

Bang sonique et infrasons

Jean Varnier, Géraldine Ménexiadis,
Ingrid Le Griffon

ONERA
Office National d'Études et de
Recherches Aérospatiales
Département DSNA
29, avenue de la Division Leclerc
92320 Châtillon

Résumé

Tout phénomène de nature impulsionnelle, comme une explosion, un coup de canon ou un coup de foudre, engendre des infrasons qui se propagent sur de très longues distances, étant peu affectés par l'absorption atmosphérique. Le bang sonique des aéronefs, lanceurs ou météorites appartient évidemment à cette catégorie. En cours de propagation, le signal se déforme et devient un grondement dont la durée peut atteindre plusieurs minutes à des distances de l'ordre de mille kilomètres. Il est néanmoins souvent possible de distinguer l'émission du bruit de fond naturel et de la relier, par des techniques de goniométrie et d'analyse spectrale, à la source sonore d'origine. Les enregistrements du bang sonique et les données de vol de l'avion "Concorde" constituent à ce titre une base de données expérimentales intéressante et complète.

Abstract

Any phenomenon of an impulsive nature, such as an explosion, a gun shot or a clap of thunder, generates an infrasonic emission which is propagated at very long distance, as the atmospheric absorption has only a limited influence on it. The sonic boom of aircraft, launchers or meteorites obviously belongs to this category. During its propagation, the signal is distorted and becomes a rumble, the duration of which can reach several minutes at a distance of about one thousand kilometers. However, it is often possible to make the distinction between the emission and the natural background noise and to relate it to the sound source of origin by using goniometry and spectrum analysis. In this respect, the recordings of the sonic boom and the flight data of the "Concorde" airliner provide an interesting and complete experimental data base.

Tout phénomène de nature violente et impulsionnelle, tel qu'un coup de foudre ou une explosion, crée à son voisinage de fortes discontinuités de la pression atmosphérique qui sont génératrices d'infrasons. Ces infrasons présentent la caractéristique d'être peu atténués par l'atmosphère et sont donc susceptibles de se propager sur de très grandes distances (quelques dizaines voire centaines de kilomètres). Les études sur l'onde de souffle des pièces d'artillerie menées pendant la Première Guerre Mondiale ont ainsi débouché sur des techniques efficaces d'identification et de localisation des pièces lourdes à partir d'écoutes réalisées par plusieurs stations. Le bang sonique des aéronefs n'a évidemment été constaté et étudié qu'après la Deuxième Guerre Mondiale au cours de laquelle certains avions semblent avoir approché le "mur du son" en piqué, les ondes de choc créées étant assez fortes pour endommager la cellule de l'avion et en particulier les ailes, d'où l'évolution radicale de leur forme pour aboutir à l'aile delta de l'avion "Concorde". Les avions expérimentaux et de combat passent régulièrement le mur du son depuis 1947, le "Concorde" le franchit pour la première fois en 1969. C'est en rapport avec la mise en service de cet avion que le bang sonique (ou supersonique) fait l'objet de nombreuses expérimentations en France, avec les campagnes "Jéricho" menées par le Centre d'Essais en Vol et l'Armée de l'Air.

Par la suite, les vols commerciaux effectués par le "Concorde" à une vitesse largement supersonique (Mach 2 en croisière à 17 000 m d'altitude) ont permis de réaliser de nombreuses mesures à des distances de l'avion comprises entre 100 et 3 000 km. À ces distances, le bang sonique perd ses caractéristiques impulsionnelles pour se transformer progressivement en grondement que les enregistreurs peuvent percevoir pendant plusieurs secondes, voire plusieurs minutes. Il est alors intéressant de corréler la trajectoire et les données de vol de l'avion avec les signaux reçus.

Généralités sur le bang sonique

L'impact d'un mobile supersonique dans l'air crée un sillage de choc que l'on peut comparer à un sillage de navire, avec une onde avant en surpression (cône de Mach) et une onde arrière en dépression. Cette alternance de fronts de choc donne un profil de pression caractéristique appelé «onde en N» qui se traduit à l'oreille par la perception d'un claquement comparable à un coup de fouet (onde balistique des projectiles) ou d'une détonation de forte intensité susceptible d'occasionner des dégâts matériels voire des atteintes physiologiques (bang supersonique des aéronefs).

On se situe encore, jusqu'à une centaine de kilomètres pour les avions, dans le domaine de l'audible, puis par le biais de l'absorption atmosphérique, il ne subsiste que les fréquences les plus basses - on entend par infrasons les perturbations acoustiques dont la fréquence est inférieure à 16 ou 20 Hz. A noter qu'un front de choc comme celui du bang sonique peut être comparé localement à une onde plane, en aucun cas à une onde sphérique malgré l'usage fréquent et "pédagogique" de cette image : en effet, l'onde de pression locale se propage exclusivement dans la direction perpendiculaire au cône de Mach.

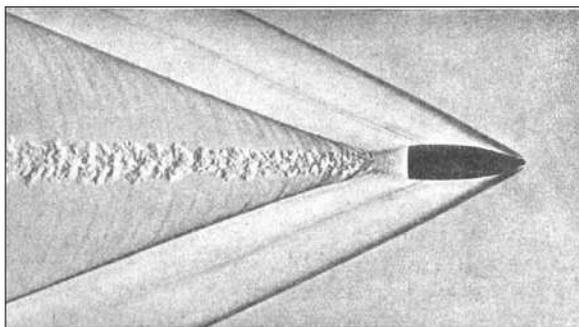


Fig. 1 : Projectile animé d'une vitesse voisine de 1 000 m/s.
Extrait de la Réf. [1]
Rifle bullet with a speed close to 1 000 m/s. From Ref. [1]

Sur la photographie de la figure 1 qui représente le sillage d'un projectile supersonique [1], on distingue bien d'une part les deux fronts de choc et une zone « lisse » intermédiaire où règnent les effets non-linéaires (forts gradients de pression et de température), et d'autre part la zone arrière qui est le siège de phénomènes aéroacoustiques plus classiques (turbulence et ondes sphériques). À noter que l'ouverture du cône de Mach est d'autant plus grande que la vitesse est faible : elle tend vers 90° quand le nombre de Mach tend vers un, d'où la notion de « mur du son ». Par ailleurs, le front avant a en réalité une forme ogivale due au fait que le choc a en tout point une vitesse normale de propagation supersonique, sa vitesse à la pointe du mobile étant nécessairement égale à celle du mobile lui-même.

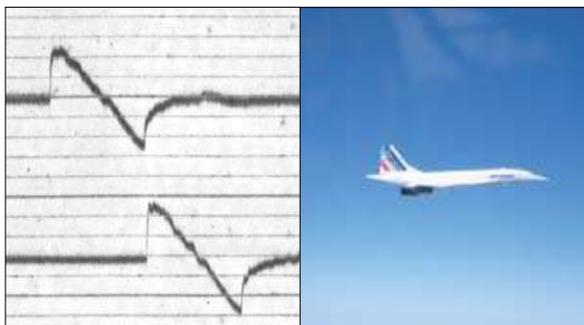


Fig. 2 : Avion "Concorde" en vol, bangs soniques enregistrés au sol à 19 km
"Concorde" in flight. Sonic booms recorded on the ground at a distance of 19 km

La figure 2 représente le supersonique "Concorde" (photo : Armée de l'Air) et le bang sonique enregistré au sol par deux des capteurs situés hors de la trace de la trajectoire, l'avion volant à Mach 1,3 à 12 000 m d'altitude [2]. La distance de ces capteurs au couloir de vol est d'environ 19 km. La forme de l'onde en N est bien visible, à noter que, sur l'échelle des temps, l'avant du bang sonique correspond au front gauche de la courbe. La durée totale de l'alternance, liée à la forme de l'appareil, à sa vitesse et à la distance de propagation, est ici de 0,2 s. La valeur de la surpression maximale est de l'ordre de 0,5 mbar, ce qui correspond à un niveau sonore d'environ 128 dB. Notons qu'à vitesse égale mais en accélération ou en virage, cette amplitude pourrait être fortement augmentée par le phénomène de focalisation.

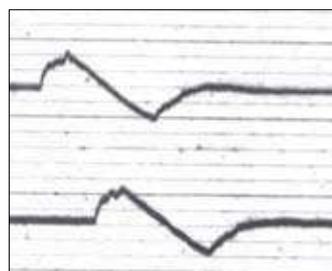


Fig. 3 : Bangs soniques du "Concorde" enregistrés à 30 km et 105 km de l'avion
Sonic booms of "Concorde" recorded at 30 km and 105 km away from the aircraft

En cours de propagation, l'énergie des chocs se dissipe et les fréquences les plus hautes associées aux discontinuités de pression tendent à disparaître, ce qui a pour effet d'arrondir le profil de l'onde en N à 30 km de l'avion comme on le voit sur la figure 3 en haut. A une centaine de kilomètres, un autre phénomène apparaît, à savoir une duplication du signal due à ce que l'on pourrait nommer la réponse impulsionnelle de l'atmosphère, notamment liée à des effets de diffraction et de réfraction sonore, qui va progressivement donner au signal une structure d'échos multiples : le même phénomène - dit de rumble [3] - est en cause quand la détonation de la foudre est transformée à distance en grondement de tonnerre. Sur le signal de la figure 3 en bas, enregistré à Lannion alors que le "Concorde" New York-Paris est en décélération à l'approche de Guernesey, on peut voir que la durée apparente de l'oscillation principale apparentée à l'onde en N initiale est d'environ 0,7 s. Bien que l'énergie du spectre soit majoritairement située dans la bande de fréquence infrasonore, le bang sonique est encore audible à plus de cent kilomètres, tout comme à Saint-Malo situé cent kilomètres plus à l'Est.

Il est intéressant de constater que le spectre de l'onde en N est formé d'arches dont la courbe tangente a une décroissance en $1/f^2$ lui donnant une pente de -6 dB par octave ou -20 dB par décade (figure 4 en haut), pente qui est aussi celle de la fonction porte incluant un signal de courte durée. La pseudo-période des arches est reliée à la durée totale T de l'onde, elle va donc varier avec celle-ci, par exemple quand on s'éloigne de la source. On peut ainsi faire coïncider le spectre d'une onde en N théorique avec le spectre du signal enregistré. Sur la figure 4 en bas, il est probable que le spectre du signal serait plus proche du spectre théorique sans la dégradation due au report graphique du signal de la figure 3 droite, mais le premier minimum du spectre vers 6 Hz est clairement identifié. On peut donc supposer que le spectre du bang sonique est peu dégradé par la duplication du signal par l'atmosphère.

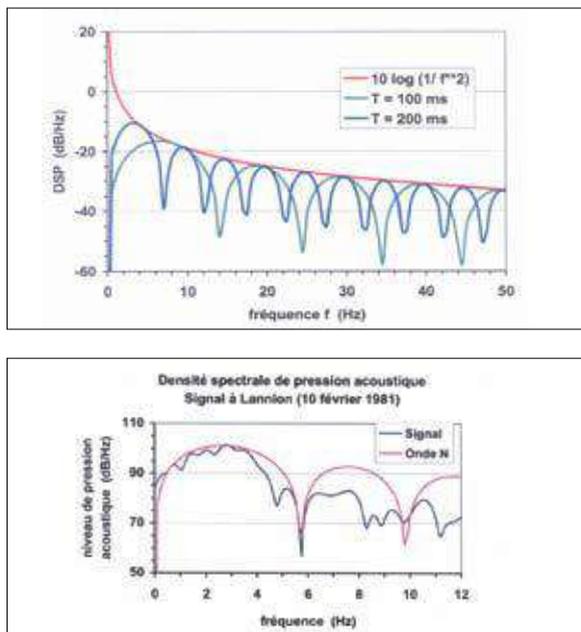


Fig. 4 : Spectres de l'onde en N théorique, spectre du signal à 105 km de l'avion
Spectra of theoretical N-wave, signal spectrum at 105 km away from the aircraft

Bang sonique et propagation atmosphérique

Pour calculer la propagation du bang sonique, on considère que l'émission sonore est perpendiculaire au cône de Mach local qui se propage ensuite parallèlement à lui-même.

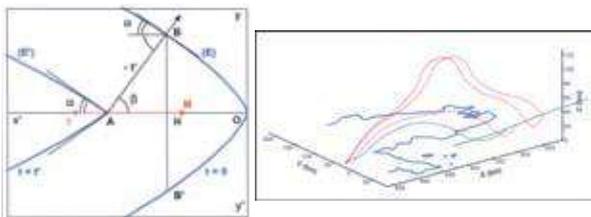


Fig. 5 : Emission par le cône de Mach, calcul de rayons sonores.
Extrait de la Réf. [4]
Sound emission by the Mach cone, calculation of sound rays. From Ref. [4]

Ainsi, sur la figure 5 gauche, la trace du cône de Mach dans le plan de la figure est toujours perpendiculaire au rayon sonore AB émis en A. La courbure du front n'est pas due ici aux effets non-linéaires, mais à la décélération du mobile (vitesse proche de Mach 2 en A, de Mach 1 en O). Dans la référence [4], on a en effet tenu compte de façon précise des données de vol du "Concorde" au-dessus de la Manche [5] pour calculer les trajectoires des rayons sonores susceptibles d'atteindre la station d'enregistrement du CEA de Flers (figure 5 droite).

Bien entendu, la propagation sujette aux effets de réfraction dus aux gradients de vent et de température ne s'effectue pas en ligne droite. Le calcul de rayons tridimensionnel est effectué à l'aide du code de l'Onera SIMOUN, compte tenu des données Mach-altitude-cap-inclinaison, de la météorologie du jour (ou saisonnière statistique en haute altitude) et de la rotondité de la Terre – abstraction faite des effets des vents latéraux, les projections des rayons sur la surface de la mer seraient des orthodromies. On trouve quatre trajectoires de rayons possibles, deux dites stratosphériques qui culminent vers 30 ou 50 km d'altitude, deux dites thermosphériques qui montent à plus de 100 km. À noter que ce sont les vents en altitude qui sont responsables de la réflexion vers le sol des ondes stratosphériques, alors que les trajets thermosphériques sont surtout liés au effet des gradients de température.

On remarque que trois des trajets sont sujets à une réflexion sur la surface de la mer, réflexion qui donne lieu, par effet de diffraction, à des «ondes rampantes» susceptibles de se propager au loin en restant près de la mer et du sol [6]. Ce phénomène est une des causes pour lesquelles le bang sonique est souvent enregistré dans des zones de silence théoriques, au-delà des trajets limite (caustiques) donnés par le calcul de rayons sonores. La démarche consistant à viser un point comme la station de Flers à partir de la trajectoire de l'avion est un exercice difficile compte tenu des contraintes aérodynamiques et météorologiques, mais il permet d'avoir une idée des temps de propagation et des décalages prévisibles des arrivées réelles des trains d'ondes. On peut retenir que très peu de points de la trajectoire répondent au problème posé et qu'il faut s'attendre à des arrivées à intervalles discrets.

La figure 6 en haut montre qu'en effet les arrivées des trains d'ondes à Flers s'étalent sur près de cinq minutes. Le groupe de signaux S1-S2-S3 (arrivée principale) correspond à un trajet stratosphérique bas, le groupe S4-S5 à un trajet stratosphérique haut, le groupe S6 à un trajet thermosphérique. Notons la présence de signaux parasites qui n'apparaissent pas sur tous les capteurs, ce qui permet de les identifier comme tels. L'ensemble des trajets (ou phases) détectés est correctement représenté sur la figure 5 en bas, mais le timing des arrivées est sensiblement différent de celui qui a été calculé compte tenu du plan de vol de l'avion et de la météorologie du jour. Ceci suggère que les paramètres en jeu sont nombreux et complexes : il est par exemple probable que les hypothèses de l'acoustique géométrique sur laquelle est basé le calcul de rayons ne s'appliquent que de façon imparfaite au domaine infrasonore.

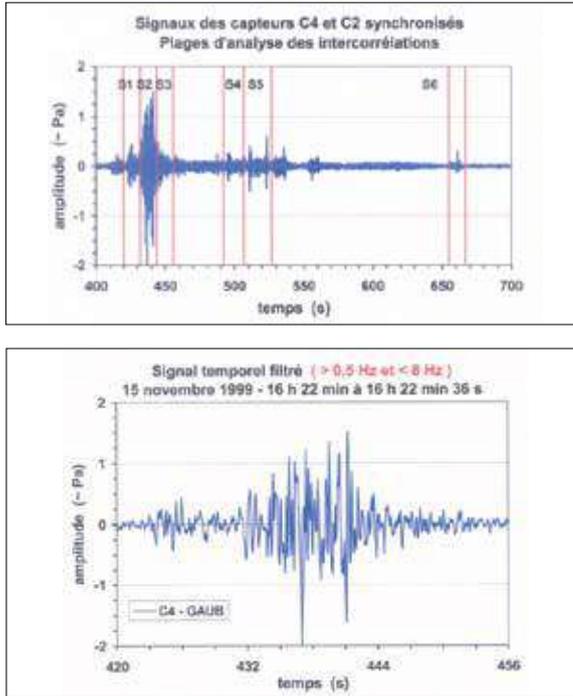


Fig. 6 : Signaux reçus à la station du CEA de Flers et détails. Extrait de la Réf. [4]
Signal recorded at the CEA station at Flers, and details. From Ref. [4]

On voit par ailleurs sur le détail de l'arrivée principale que le signal utile, à une distance de l'avion estimée à 300 km, dure au moins douze secondes, ce qui l'apparente plus à un grondement d'orage qu'à un bang sonique classique (figure 6 en bas). Notons que le rapport signal sur bruit est très favorable, sauf aux très basses fréquences ($f < 1$ Hz) où le bruit naturel reste prédominant, d'où la nécessité d'un filtrage.

La figure 7 gauche montre l'évolution du signal enregistré à un peu plus de 700 km du «point tournant» BISKI situé dans l'Atlantique Nord. Le «Concorde» manœuvre à Mach 2 à 17 km d'altitude, le rayon de virage étant voisin de 100 km. Différentes phases ou paquets d'ondes sont visibles, l'arrivée principale qui dure environ une minute étant la plus tardive sur cette figure, à l'inverse du cas précédent. Chaque arrivée a une forme proche d'une double gaussienne qui semble caractéristique de la réponse impulsionnelle de l'atmosphère.

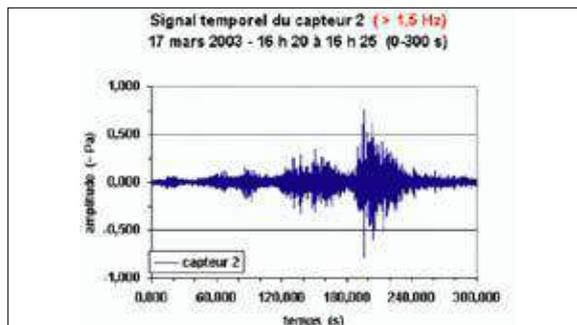


Fig. 8 : Vol BA002, trajets plausibles de rayons arrivant en Suède. Extrait de la Réf. [4]
Flight BA002, plausible paths of sound rays reaching Sweden. From Ref. [4]

Sur la figure 7 droite, l'observatoire est situé en Suède, à plus de 3 000 km de l'avion de la British Airways (Vol New York-London Heathrow BA002) situé au large de l'Irlande au moment de l'émission du ou des bangs soniques (les trains d'ondes proviennent d'azimuts différents). Le signal est relativement faible par rapport au niveau de bruit ambiant, les différentes phases semblent s'être rejointes. On a fait figurer les gaussiennes enveloppes, déterminées de façon empirique. Le logiciel PMCC du CEA [7] décèle pour chacune des trois stations d'enregistrement dix minutes d'arrivées cohérentes pour lesquelles on peut déterminer un azimut d'arrivée, une vitesse de propagation apparente et une fréquence dominante, cette dernière appartenant nettement au domaine infrasonore ($1 \text{ Hz} < f < 6 \text{ Hz}$). Les trains d'ondes proviennent d'azimuts distincts, notamment pour la station d'enregistrement la plus au Nord où deux directions principales d'arrivée sont clairement identifiées (tracés bleus de la figure 8).

On a fait dans la référence [4] le même exercice de tir de rayons directs visant les stations à partir de la trajectoire de vol, avec une météorologie statistique de saison (données COSPAR International Reference Atmosphere aux latitudes considérées). Pour le calcul de la trajectoire de l'avion entre les «points tournants» du couloir aérien et celui des rayons sonores, il est très important de tenir compte de la courbure de la Terre : à défaut de trajets orthodromiques, l'erreur sur les points d'arrivée à ces latitudes serait en effet de plusieurs centaines de kilomètres. On voit sur la figure 8 que les rayons sonores stratosphériques émis perpendiculairement au cône de Mach rebondissent une dizaine de fois sur la mer ou la terre avant d'atteindre les points visés.

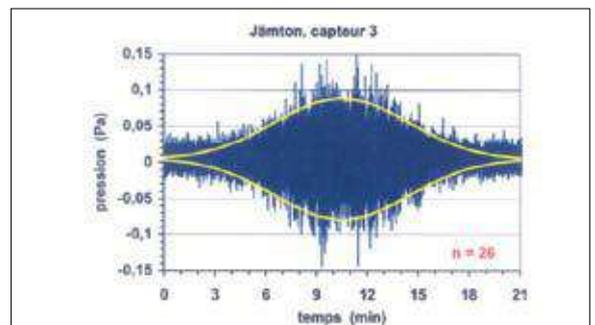


Fig. 7 : Signaux «Concorde» enregistrés à 700 km et 3 000 km. Extrait de la Réf. [4]
Signal from «Concorde» recorded at distances of 700 and 3 000 km. From Ref. [4]

Stations	Azimut de réception	Horaire d'émission	Longueur orthodromique	Horaire de réception	c sol expérimentale
Lycksele	258,5°	20h11min52s	3042 km	2h59min 25s	302,6 m/s
Jämton	250°	20h30min05s	2835 km	23h09min00s	297,3 m/s
Kiruna	243°	20h30min57s	2812 km	23h07min40s	299,1 m/s
Kiruna	251,5°	20h17min10s	3085 km	23h07min25s	302,0 m/s

Stations	Azimut de réception	Horaire d'émission	Temps de propagation	Horaire de réception	c sol calculée
Lycksele	256,16°	20h13min15s	2h46min10s	22h59min25s	302,6m/s
Jämton	248,3°	20h29min54s	2h39min06s	23h09min00s	300,5m/s
Kiruna	240,6°	20h30min17s	2h37min23s	23h07min40s	300,6m/s
Kiruna	249,8°	20h16min40s	2h50min45s	23h07min25s	300,4m/s

Tabl. 1: Vol BA002, données réelles (en haut) et calculées (en bas). Extrait de la Réf. [4]
Flight BA002, real data (above) and calculated data (below). From Ref. [4]

Il est évidemment difficile de valider ces calculs de façon formelle. Toutefois, un certain nombre de données expérimentales et de données calculées à l'aide du code SIMOUN peuvent être comparées. Dans le tableau 1 (en haut), on a supposé que le "Concorde" était passé à l'heure prévue par le plan de vol pour calculer une vitesse de propagation projetée au niveau de la mer à partir de l'horaire d'arrivée du train d'ondes sous l'azimut enregistré. La position de l'avion et la distance ont été calculées par intersection de la trajectoire théorique et de l'orthodromie (arc de grand cercle) tirée de la station d'écoute selon l'azimut opposé. En bas, on a fait figurer les résultats issus du calcul de rayons 3D, avec un recalage artificiel des instants d'arrivée. La bonne concordance des azimuts de réception et des vitesses de propagation projetées milite en faveur des hypothèses faites et prouve notamment que le vol de la British Airways est bien à l'origine des signaux enregistrés par les trois stations.

Analyse des signaux infrasonores

L'analyse spatio-temporelle des signaux enregistrés fournit des renseignements intéressants qui, comme on l'a vu, peuvent être exploités soit via la météorologie réelle, soit via une météorologie statistique, ou même sans en tenir compte en première approximation (trajets orthodromiques).

Sachant que les stations d'enregistrement du CEA comportent plusieurs capteurs microbarographes répartis sur le terrain, on peut par ailleurs appliquer une technique classique de goniométrie basée sur les intercorrélations temporelles entre capteurs pour déterminer la direction de provenance moyenne du signal. La méthode développée à l'Onera consiste à trouver les temps de corrélation entre capteurs, puis à déterminer par itération en azimut la direction de provenance et la vitesse de propagation apparente des trains d'ondes. La figure 9 gauche montre la fonction de corrélation entre deux capteurs qui est obtenue en faisant glisser un signal sur l'autre, la durée de signal considérée étant de 12 s (tranche S2 de la figure 6). Le maximum correspond à la meilleure concordance qui donne le temps de propagation entre les deux capteurs. Un examen à l'œil nu de la figure 9 droite qui représente le réseau de la station de Flers et indique les temps de propagation entre capteurs permet de voir, en première analyse, que le train d'ondes provient de la direction Ouest-Nord-Ouest.

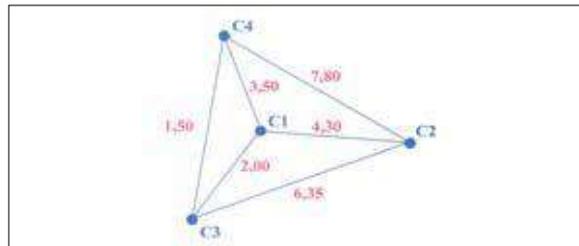
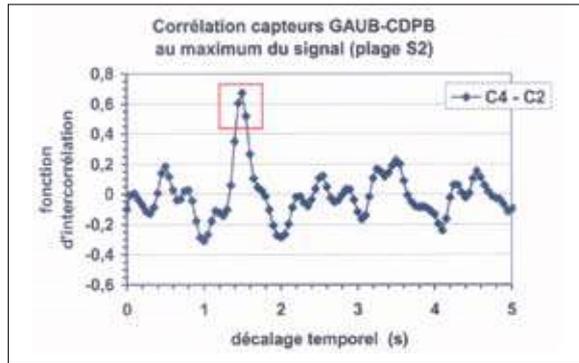


Fig. 9 : Calcul de corrélation, temps de propagation entre capteurs. Extrait de la Réf. [4]
Correlation function, duration of propagation between the sensors. From Ref. [4]

N° de la plage temporelle	Fenêtre temporelle	Célérité corrigée	Ecart-type	Angle d'azimut	Angle de site
S1	22min00s à 12s	328,7 m/s	2,7 m/s	285,0°	0°
S2	22min12s à 24s	334,3 m/s	0,9 m/s	285,8°	0°
S3	22min24s à 36s	336,3 m/s	1,4 m/s	285,7°	1,3°
S4	23min12s à 27s	343,3 m/s	2,8 m/s	284,9°	11,7°
S5	23min27s à 47s	363,8 m/s	3,5 m/s	284,5°	22,5°
S6	25min55s à 26min12s	429,9 m/s	5,5 m/s	289,3°	38,6°

S1 à S3	Azimut ± 0,5°	Site ± 2,0°
S4 et S5	Azimut ± 1,0°	Site ± 3,0°
S6	Azimut ± 3,0°	Site ± 6,0°

Tabl. 2 : Calcul goniométrique (en haut) et incertitudes (en bas). Extrait de la Réf. [4]
Goniometric calculation (above), and uncertainties (below). From Ref. [4]

La vitesse de propagation apparente (célérité du front d'onde supposé plan) doit évidemment être la même entre chaque paire de capteurs, un seul azimut d'arrivée permettant en principe de satisfaire cette condition. En réalité, on détermine l'azimut qui minimise l'écart constaté entre les célérités relatives aux six paires considérées, d'où les écarts-types indiqués dans le tableau 2. L'étape suivante consiste à corriger la célérité moyenne constatée de la composante utile de la vitesse du vent local pour pouvoir la comparer à la vitesse du son ambiante et ainsi déterminer, par calcul de cosinus, l'angle d'incidence du train d'ondes (ou angle de site mesuré à partir de l'horizontale). On voit sur le tableau 2 que l'arrivée principale de la figure 6 arrive sous incidence rasante, l'incertitude en azimut étant d'environ 0,5°. La vitesse du son ambiante près du sol a été estimée à 336 m/s d'après le bulletin météorologique local ALADIN (données interpolées de Météo-France).

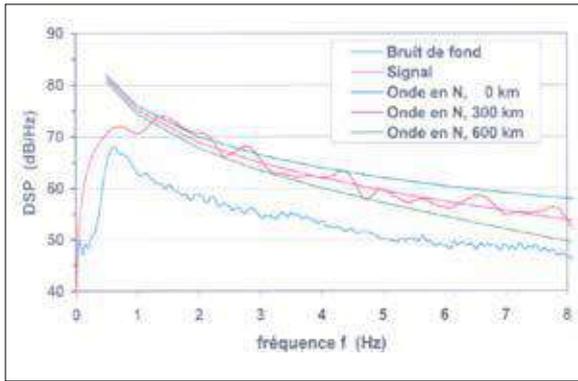


Fig. 10 : Spectres du bruit de fond et du signal, analyse en distance. Extrait de la Réf. [4]
Background noise and signal spectra, estimation of the distance. From Ref. [4]

Pour résoudre complètement le problème inverse, il faut pouvoir estimer la distance curviligne parcourue dans l'atmosphère par le train d'ondes. La figure 10 montre le spectre du bruit de fond moyenné entre les différents capteurs sur une durée de plusieurs minutes et le spectre du signal moyenné sur la durée de l'arrivée principale. Comme on le voit, le rapport signal sur bruit est très favorable et on peut considérer la courbe rouge comme un signal pur, du moins au-dessus de 1 Hz.

La méthode élaborée, présentée dans la référence [8], se base sur l'hypothèse que le spectre du bang sonique initial doit se retrouver dans un signal formé d'échos multiples, du moins en ce qui concerne sa pente (il est clair qu'aucune arche n'est plus visible au-delà d'une certaine distance de propagation). La pente initiale de l'enveloppe de l'onde en N est au départ de -6 dB par octave comme le montre la figure 4 gauche, mais elle augmente en cours de propagation sous l'action de l'absorption atmosphérique d'une part, de la dissipation des effets non-linéaires d'autre part. On peut ainsi déterminer la pente de l'enveloppe et par

extension celle du spectre du signal à différentes distances, en faisant l'hypothèse d'un trajet stratosphérique. On a ainsi estimé que la distance de propagation la plus probable pour le signal reçu à Flers était de l'ordre de 300 km, comme le suggère la figure 10 où sont représentées les enveloppes théoriques du spectre de l'onde en N à 0, 300 et 600 km.

En définitive, il apparaît possible de tirer à partir de la station de Flers des rayons inverses en vue d'intercepter la trajectoire du vol "Concorde" Air France New York-Paris AFOO2 dont les données ont été recalculées par l'APCOS [5] en fonction de la météorologie du jour issue des radiosondages de la station de Brest.

Notons que l'inversion des trajectoires de rayons sonores pose un problème particulier, ces trajectoires n'étant pas réversibles en présence d'un gradient de vent car leur concavité change selon que l'on se trouve au vent ou sous le vent (figure 11 droite), ce qui n'est pas le cas en présence d'un gradient de température (figure 11 gauche). Cette contradiction apparente du principe de Fermat et du théorème de réciprocité est examinée dans la référence [9] mais pose un problème numérique insurmontable, à moins d'inverser de façon artificielle le sens du vent à toutes les altitudes.

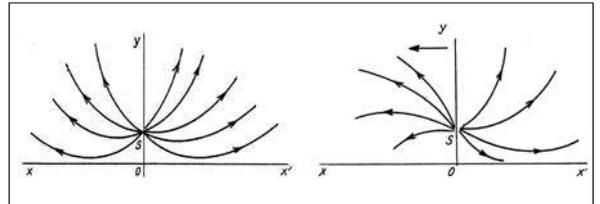


Fig. 11 : Effets acoustiques de gradients de température et de vent. Extrait de la Réf. [9]
Acoustic effects of a temperature gradient and a wind gradient. From Ref. [9]

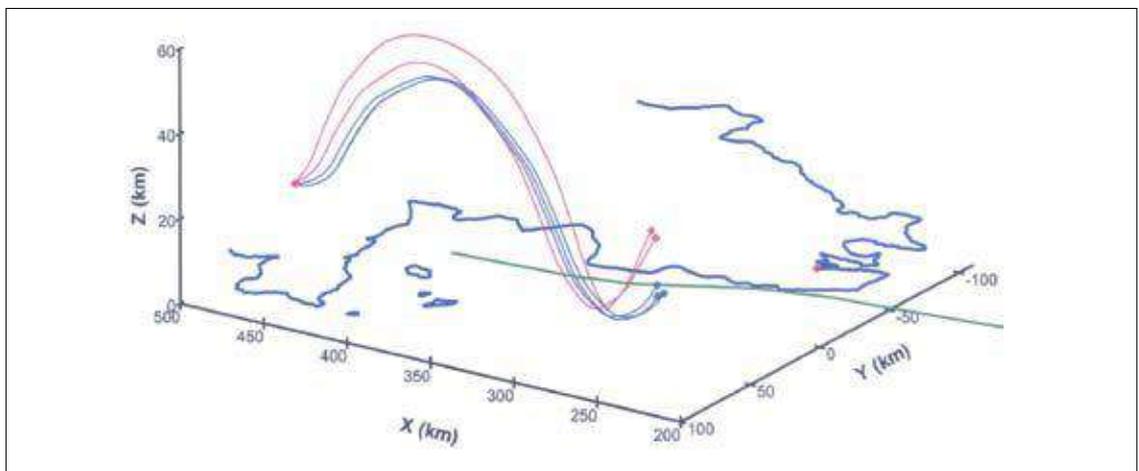


Fig. 12 : Calcul de rayons inverses issus de la station de Flers. Extrait de la Réf. [4]
Calculation of reverse rays coming from the station at Flers. From Ref. [4]

Pour initialiser les rayons, on utilise les données en site et azimut du tableau II pour les séries de signaux stratosphériques (S1 à S5).

Le code SIMOUN intègre la météorologie issue du bulletin ALADIN de Flers jusqu'à l'altitude 1500 m, des radio-sondages de Brest et Trappes jusqu'à 30 000 m et des données COSPAR pour le 50ème Parallèle Nord au-dessus de cette altitude, avec l'artifice des vents inversés. Le code calcule à la fois la longueur de la trace au sol et la distance curviligne parcourue (pour les trajets stratosphériques, la différence entre les deux reste généralement inférieure à 10 %). Le calcul est stoppé quand la distance curviligne est égale à 300 km.

La figure 12 montre que les trajets issus des séries S1 à S3 (arrivée principale) interceptent la trajectoire de vol à l'altitude voulue, sensiblement à l'endroit prévu par le calcul direct de la figure 5 droite. Par contre, les trajets stratosphériques hauts issus des séries S4 et S5 manquent la cible, touchant la mer trop tôt par rapport au trajet trouvé par le calcul direct. En dépit de toutes les précautions prises pour maîtriser au mieux l'ensemble des paramètres et réduire les incertitudes, le calcul inverse issu des données acoustiques enregistrées et le calcul direct effectué à partir des données de vol de l'avion ne concordent donc que pour les trajets stratosphériques bas.

[4] Ménexiadis G., Détection à grande distance et localisation du supersonique "Concorde" à partir de signaux infrasonores, Thèse de l'Université Aix-Marseille II, décembre 2008

[5] Duval G., Grange P., documents d'origine et calculs, Association des Professionnels du Concorde (APCOS), Air France, Paray-Vieille-Poste (91), 2006-2008

[6] Coulouvrat F., Sonic boom in the shadow zone : a geometrical theory of diffraction, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 111, n°1 (Part 2), pp. 409-508, janvier 2002

[7] Le Pichon A., Garcés M., Blanc E., Barthélémy M., Drob D.P., Acoustic propagation and atmosphere characteristics derived from infrasonic waves generated by the Concorde, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 111, n° 1 (Part 2), pp. 629-641, janvier 2002

[8] Ménexiadis G., Varnier J., Long-range propagation of sonic boom from the Concorde airliner : analyses and simulation, Journal of Aircraft, Vol. 45, n° 5, pp. 1612-1618, septembre-octobre 2008

[9] J. Vermorel, Extensions du principe de Fermat à un milieu en mouvement, Rapport Technique RT 506/87, Institut Franco-Allemand de Recherches de Saint-Louis, juillet 1987

Conclusion

Le bang sonique du "Concorde" et les signaux infrasonores qui en sont issus fournissent une base expérimentale très riche pour des distances comprises entre 100 km et 3000 km. Pour les exploiter, on se trouve confronté à des problèmes incomplètement résolus à ce jour, à savoir d'une part la duplication et la déformation du signal par l'atmosphère et les réflexions intermédiaires, d'autre part la propagation des infrasons, celle-ci se prêtant mal à une modélisation par l'acoustique géométrique, même quand on se trouve largement au-delà de la zone de propagation non-linéaire.

Il apparaît cependant que plus le nombre de paramètres physiques pris en compte est grand, plus les simulations se rapprochent de la réalité, ce qui est encourageant pour les modélisations effectuées.

Le sujet reste d'actualité avec le projet d'avion hypersonique ZEHST d'EADS dans lequel l'Onera est impliqué, notamment pour les questions environnementales liées à l'acoustique (bang sonique et bruit de jet).

Références bibliographiques

[1] Charbonnier P., Esclançon E., Etude cinématique du champ acoustique d'un projectile. L'acoustique des canons et des projectiles, Mémorial de l'Artillerie Française, Tome IV, 3^e fascicule de 1925

[2] Parmentier G., Mathieu G., Schaffar M., Johe C., Bang sonique de Concorde. Enregistrement hors trace des variations de pression au sol. Centre d'Essais des Landes ; 13 au 15 juin 1973, Rapport Technique RT 19/73, Institut Franco-Allemand de Recherches de Saint-Louis, septembre 1973

[3] Delorme P., Ménexiadis G., Gravity and rumble of distant sources, Congrès Acoustic's 08, Paris, 29 juin-4 juillet 2008