

“Performances de la soufflerie anéchoïque à grandes vitesses de l'école centrale de Lyon”

par M. SUNYACH, B. BRUNEL, G. COMTE-BELLOT*

Résumé

Cette soufflerie anéchoïque, continuellement réglable, fournit les vitesses maximales suivantes :

- 160 m/s dans une section de 0.40 m × 0.20 m
- 80 m/s dans une section de 0.60 m × 0.40 m
- 35 m/s dans une section de 1.40 m × 0.60 m

Sur le plan technique elle possède plusieurs caractères spécifiques :

1° La partie motrice est à l'amont, ce qui permet l'évacuation directe de l'écoulement hors de la chambre, grâce à une paroi composée d'une ouverture réglable et de baffles mobiles.

2° Le système d'alimentation des jets est du type double flux, ce qui réduit le bruit propre de la veine primaire à haute vitesse.

3° Un système annexe de galerie latérales et de passages avec baffles contrôle l'entraînement des jets, ce qui permet de réduire fortement les écoulements secondaires qui existent dans la chambre anéchoïque.

L'exposé précise les différentes caractéristiques aérodynamiques et acoustiques de l'ensemble, notamment l'isolement acoustique de l'installation, la carte des écoulements secondaires, la fréquence de coupure de la chambre, le bruit propre.

Quelques exemples illustrant les recherches actuellement conduites sur ce moyen d'essais sont ensuite présentés.

I. INTRODUCTION

L'analyse de la génération des bruits d'écoulement et du rayonnement des structures excitées par des écoulements est grandement facilitée si l'on dispose d'un moyen d'essais qui allie à la fois une arrivée d'air silencieuse et une chambre anéchoïque.

Quelques montages de ce type existent notamment au David Taylor Naval Ship Research and Development Center, (Bethesda, U.S.A.), dans plusieurs Laboratoires de la NASA (Ames, Langley et Lewis, USA) au National Gas Turbine Establishment (Farnborough, G.B.) chez Dassault-Bréguet (Velizy) et à l'Ecole Centrale de Lyon. Plus récemment, deux installations plus modernes ont été réalisées : la

* Centre Acoustique ; Equipe du LA CNRS N° 04.263, "Mécanique des Fluides de l'Ecole Centrale de Lyon 69131 LYON CEDEX" et du GRECO-CNRS N° 130.045, "Acoustique du Sud-Est".

CAPABILITIES OF THE HIGH-SPEED ANECHOIC WIND-TUNNEL OF THE "ECOLE CENTRALE DE LYON"

Abstract

This high speed anechoic wind tunnel gives the following top speeds :

- 160 m/s in a section of 0.40 m × 0.20 m
- 80 m/s in a section of 0.60 m × 0.40 m
- 35 m/s in a section of 1.40 m × 0.60 m

Concerning its technical realization the main features are as follows :

(i) The fan are placed upstream, so that is a direct exhaust of the flows through the wall opposite to the nozzles, by means of an adjustable opening and mobile acoustic baffles.

(ii) Adjacent flows can be added on both sides of the primary flow; the noise of the primary jet can then be reduced as in by-pass engines.

(iii) Auxiliary galleries and passages with acoustic baffles control the air entrained by the jets, which reduces the secondary flows in the anechoic room.

In this report the acoustic transmission loss of the silencers and the map of the secondary flows are indicated as well as the cut-off frequency of the room and the back room and the background noise.

Several investigations actually conducted in this set-up are also described.

soufflerie CEPRA-19 à Saclay et la soufflerie Hollando-Allemande (DNW) dans le Polder Nord près d'Amsterdam. Les principes de fonctionnement utilisés sont différents d'une installation à l'autre : montage en circuit fermé ([1], [2], [3]), emploi d'un collecteur de sortie avec circuit d'extraction [4], emplacement de la partie haute pression à l'amont [5].

C'est ce dernier principe qui a été retenu pour l'élaboration du nouveau moyen d'essais réalisé à l'E.C.L. Il offre en effet plusieurs avantages :

- . possibilité d'avoir une chambre anéchoïque de grande dimension et libre de tout obstacle de type collecteur de reprise ;
- . bon contrôle acoustique et aérodynamique de la veine fluide débouchant dans la chambre ;
- . élimination directe de l'écoulement après la traversée de la chambre ;
- . possibilité de montage de plusieurs jets coaxiaux ou adjacents, afin de réduire le niveau de bruit du jet principal comme dans les systèmes double flux de l'aéronautique ;
- . possibilité d'adjoindre des arrivées d'air latérales pour alimenter les jets en air entraîné et réduire ainsi les écoulements de recirculation qui existeraient en espace confiné.

Dans ce rapport sont présentés les caractéristiques de la chambre, celles de la soufflerie et quelques exemples d'emploi du moyen d'essais.

II. DESCRIPTION DE L'INSTALLATION

La soufflerie est représentée dans son ensemble sur la Figure 1 et elle comprend essentiellement, de l'amont à l'aval :

- des baffles acoustiques* sur une section de 4 m x 3 m, et une profondeur de 3 m ;
- les ventilateurs de type centrifuge à diffuseur rotorique fabriqués par les Etablissements NEU, de puissance 350 Kw pour le circuit primaire et 110 Kw pour le circuit secondaire ;

* Tous les baffles utilisés, fournis par FRANCISOL, sont en laine de roche de deux densités, revêtus d'un voile de verre ou d'une feuille métallique. L'élément de base a pour dimensions 1 m x 1 m x 0,20 m. L'espace ménagé entre baffle est généralement de 0,20 m.

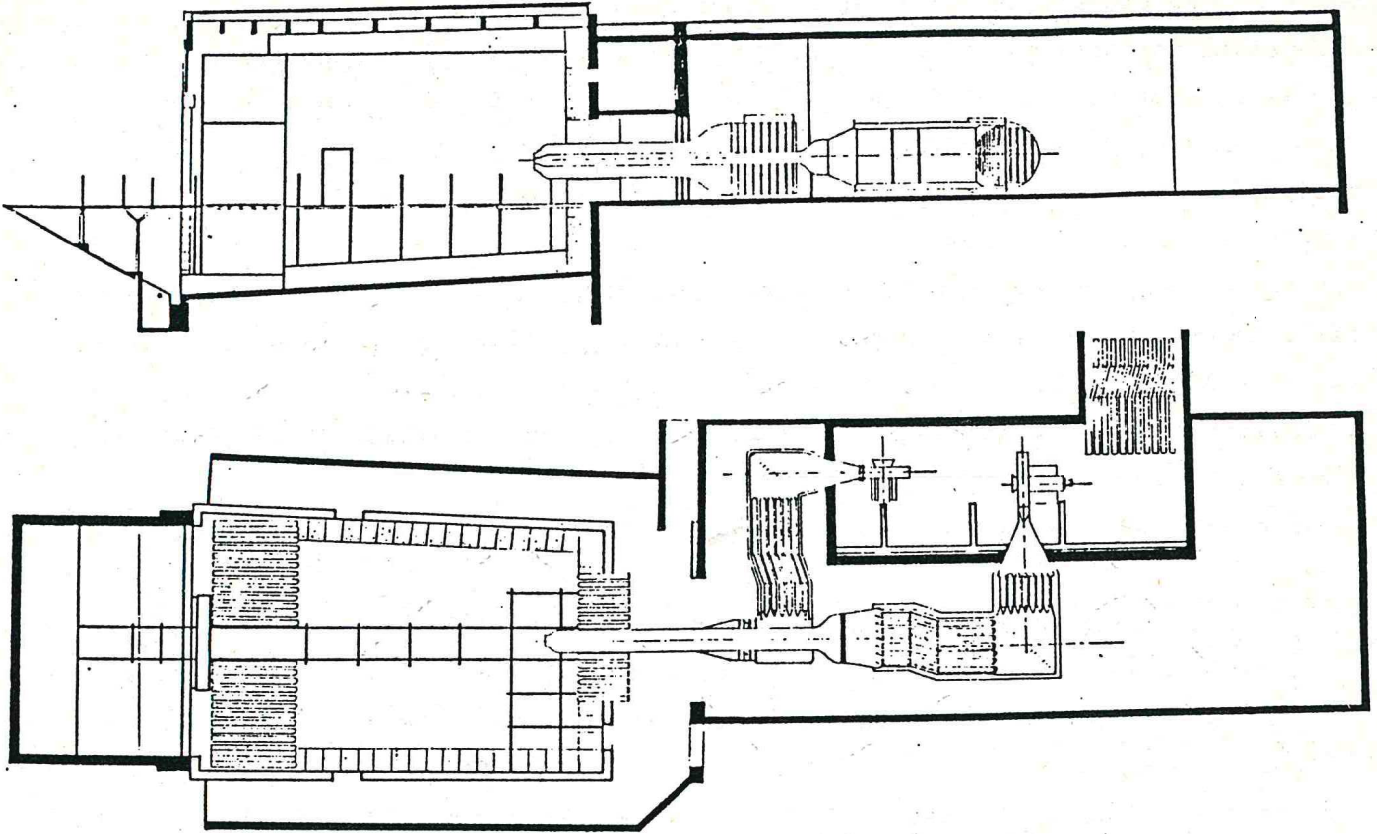


Figure 1
 Schéma de la nouvelle soufflerie anéchoïque à grandes vitesses de l'Ecole Centrale de Lyon
 Sketch of new anechoic wind tunnel available at the Ecole Centrale de Lyon

- des baffles acoustiques placés dans les conduits sur une longueur de 5 m pour le primaire et une longueur de 4 m pour le secondaire ;
- le circuit de sub-division de la veine secondaire de part et d'autre du circuit primaire ;
- des grillages et des nids d'abeilles ;
- une première contraction de rapport 4 pour la veine primaire de même que pour les veines secondaires ;
- une deuxième contraction à l'arrivée des veines dans la chambre, de rapport 1,6 pour le circuit primaire et 1,4 pour le circuit secondaire ;
- les buses des jets, de contraction 3,9 pour le jet primaire (avec une section droite de sortie de 0,40 m x 0,20 m) et une contraction de 2,8 pour l'ensemble des deux jets du secondaires (avec une section droite de sortie de 2 x 0,40 m x 0,20 m).

La chambre anéchoïque aux parois légèrement divergentes a comme dimensions moyennes utiles : 10,3 m, 8 m et 7,6 m. Elle est semi-enterrée sauf sur la face opposée à l'arrivée des jets qui est constituée, sur une section de 8,15 m x 8,40 m, de trois rangées de 26 baffles verticaux (épaisseur 0,20 m ; profondeur totale 3 m). L'air peut passer entre les baffles et, de plus, la rangée centrale de baffles est montée sur glissière pour dégager une ouverture centrale de 3,20 m x 2,20 m qui sert à l'évacuation direct du jet vers l'extérieur. Pour les cinq autres faces le revêtement intérieur est en laine de verre, avec des panneaux d'épaisseur 40 mm et de longueur 450 mm, 675 mm et 850 mm, de masse volumique 37 Kg/m³ et 70 Kg/m³, associés sur une maille de base de 0,60 m x 0,60 m.

Deux galeries latérales ouvertes sur l'extérieur (section 2 m x 1,5 m) sont disposées de part et d'autre de la chambre et communiquent avec des baffles acoustiques qui entourent les veines juste à leur entrée dans la chambre anéchoïque, sur une section de 3 m x 3,50 m et une profondeur de 2 m. Ces galeries alimentent les jets en air entraîné (Cf. § VI).

Un caillebotis amovible sur sa plus grande partie assure la desserte de la chambre. Il peut s'étendre jusqu'à l'extérieur pour l'entrée de machines qui seraient à tester dans la chambre. Des barres d'appui et des points d'attache servent à supporter les divers équipements de mesure à introduire dans la chambre.

III. PROPRIETES ANECHOIQUES DE LA CHAMBRE

Le caractère anéchoïque de la chambre a été analysé en mesurant la décroissance de la pression sonore à partir d'une source quasi-monopolaire (haut parleur, FOCAL 5N 81 DB, diamètre 13 cm, associé à un petit caisson fermé), émettant dans la gamme de fréquences 40 hz - 4 Khz. Deux microphones à électret NEUTRIK type 3281 sont utilisés, l'un fixe à 1 m en aval de la source et l'autre mobile. Deux directions de décroissance ont été explorées dans le plan horizontal médian de la chambre : le sens longitudinal vers les baffles et le sens transversal vers les parois latérales.

Dans une première étape une impulsion émise par le haut parleur est enregistrée de manière digitale (transiscope DIFA TR 1030 échantillonnage 1 MHz) de façon à déterminer la distance émetteur microphone. Ensuite une mesure à large bande est effectuée par un analyseur FFT bicanal HP 3582 A. Les résultats sont ensuite traités par un mini ordinateur PDP11-03 de façon à extraire les résultats par tiers d'octave et le tracé automatique des courbes de décroissance.

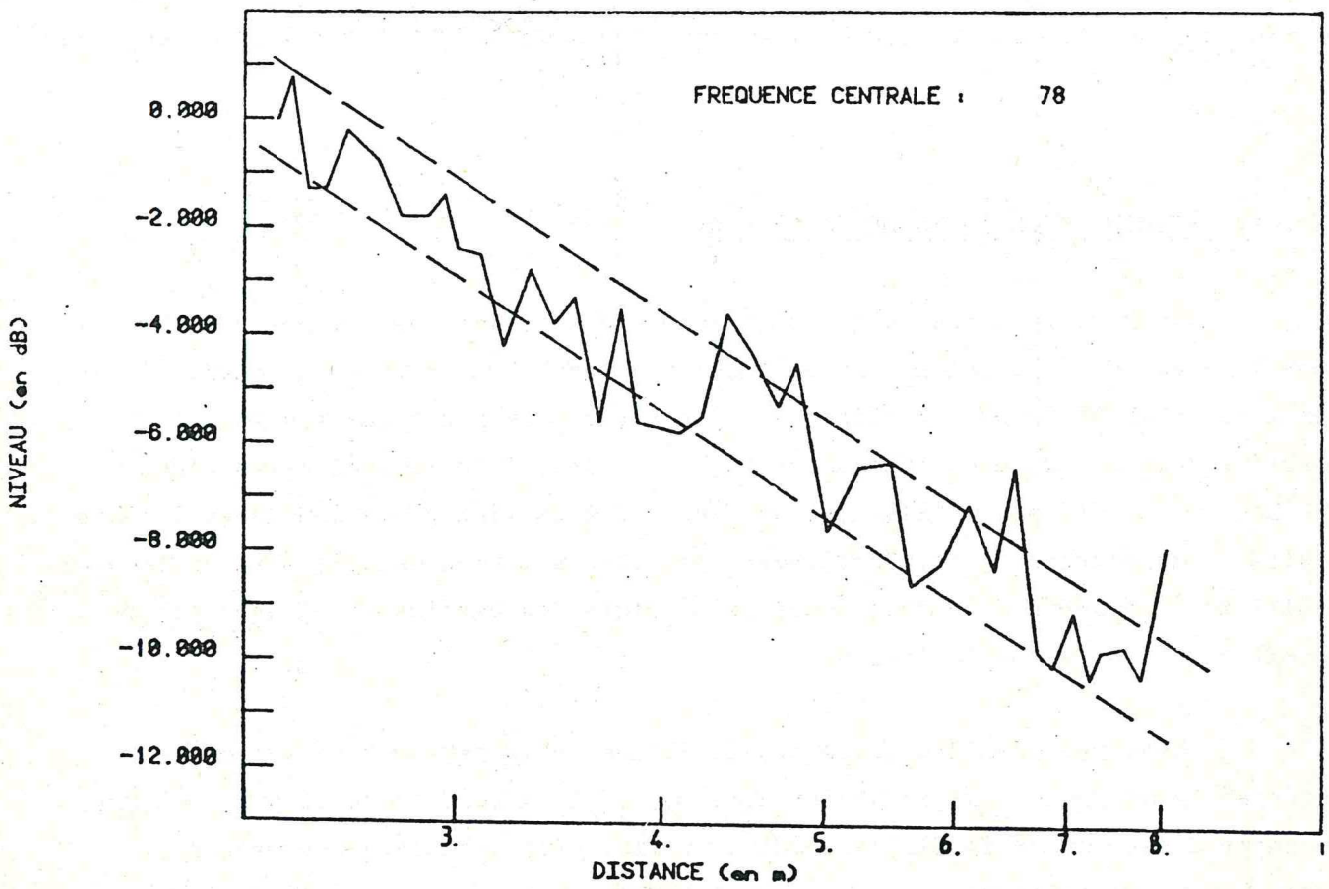
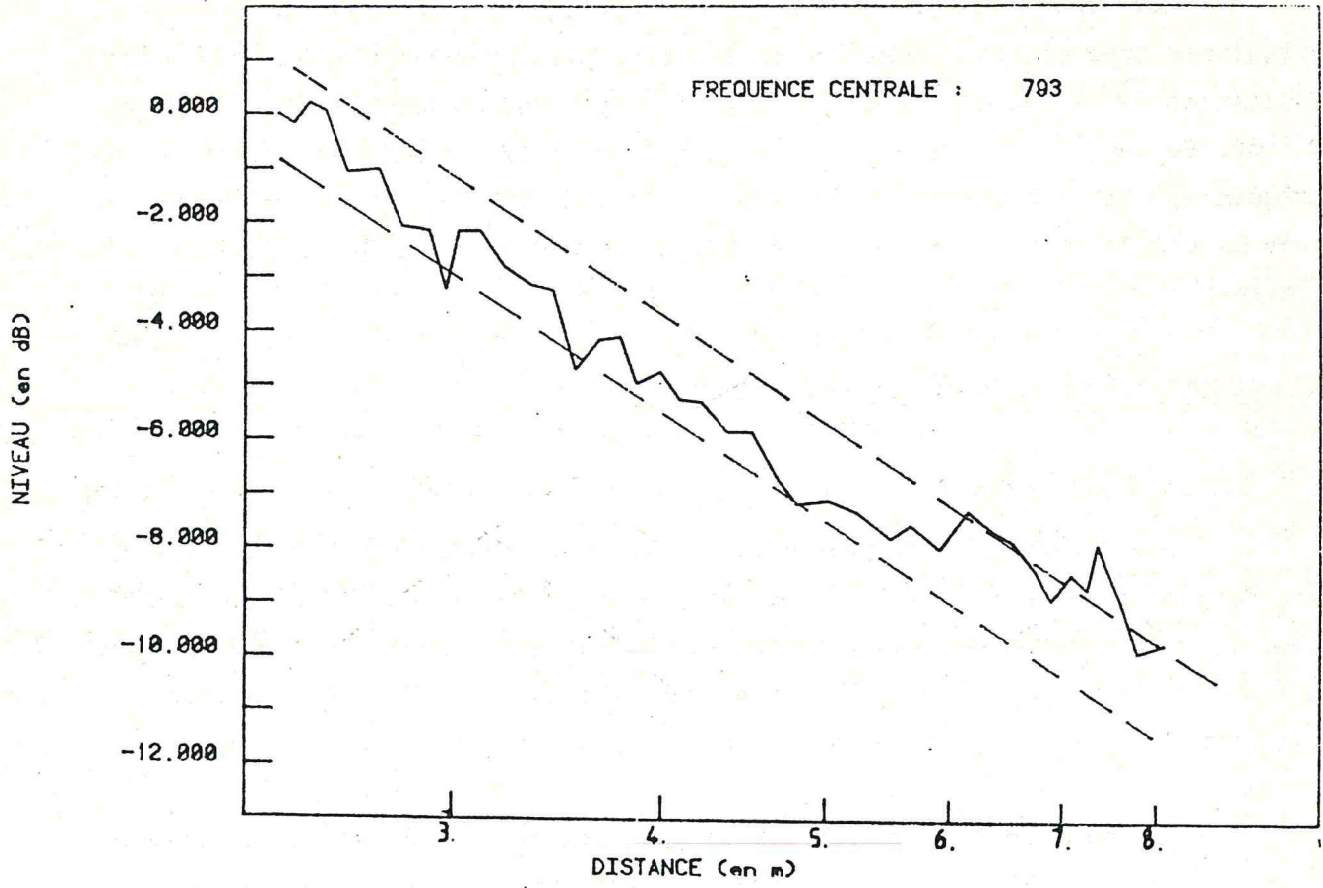


Figure 2
 Test de la décroissance en 1/R (sens longitudinal)
 Example of free field decay (in the longitudinal direction)

Les résultats obtenus pour la direction longitudinale, et pour deux fréquences typiques $N = 78 \text{ Hz}$ et 783 Hz , sont présentées sur la Figure 2, avec indication de la décroissance théorique en $1/r$ et d'une bande de précision de $\pm 1 \text{ dB}$. En dépit d'une légère réflexion qui se manifeste sur les baffles à basses fréquences, le caractère anéchoïque de la chambre est bon, pour $N \gtrsim 75 \text{ Hz}$, même dans la direction où a priori la réponse acoustique des baffles n'était pas connue d'avance.

IV. CARACTERES AERODYNAMIQUES DES VEINES DE SORTIE

Les profils de vitesse moyenne ont été déterminés à la sortie des jets, soit au ras du revêtement pour la grande section de la veine, soit à 1 m de celui-ci lorsque les buses mentionnées au § II sont en place. Les résultats obtenus sont reportés sur la Figure 3 et ils montrent qu'en agissant sur les vitesses respectives du jet primaire et du jet secondaire on peut obtenir :

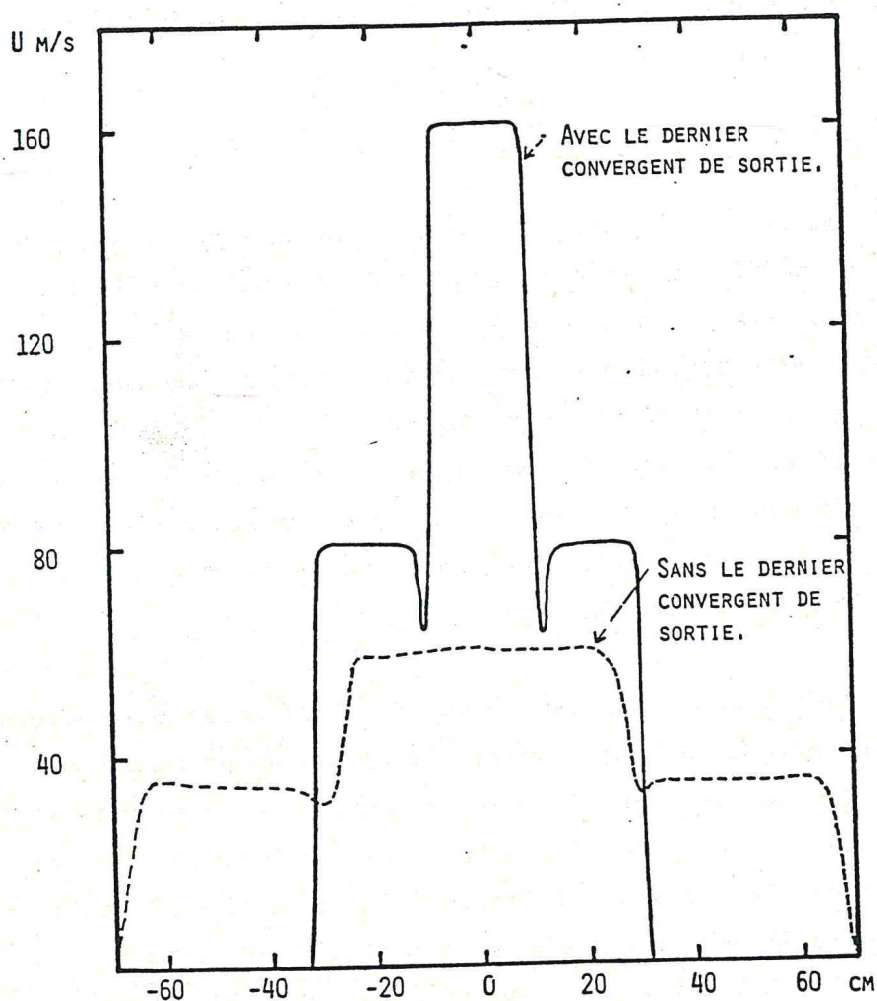


Figure 3
 Profils des vitesses moyennes pour un fonctionnement nominal de l'installation, relevés à la sortie des jets, avec ou sans le dernier convergent de sortie décrit au paragraphe II
 Mean velocity profiles at the jet exit, with or without the final nozzles

160 m/s dans une section de 0,40 m x 0,20 m, avec deux écoulements adjacents de vitesse moitié.

80 m/s dans une section de 0,60 m x 0,40 m.

35 m/s dans une section de 1,40 m x 0,60 m.

Le rapport $\lambda = U_S/U_P$ de la vitesse secondaire à la vitesse primaire ($\lambda = 0,5$ au régime nominal) de même que le rapport β' de la section secondaire à la section primaire (fixé ici à $\beta' = 2$) sont définis par une recherche d'optimum acoustique d'un système double flux, cf. [6], [7] et § VII.

Le niveau de pré-turbulence des écoulements est de 0,2 % à la sortie de jets et de 0,4 % à l'arrivée des veines dans la chambre. Les mesures ont été effectuées de façon classique avec un anémomètre à fil chaud : fil en tungstène de 10 μ , surchauffe 0,8, anémomètre à température constante DISA 55 D01.

L'allongement du cône potentiel du jet primaire sous l'influence des jets secondaires adjacents est en cours d'étude. Les premiers essais indiquent qu'il est déjà de l'ordre de 30 % sans parois latérales de garde des jets.

V. ATTENUATION ACOUSTIQUE DES SILENCIEUX DES CONDUITS

L'atténuation acoustique qui peut être fournie par les silencieux des conduits a été étudiée en plaçant une source de bruit dans le local des ventilateurs et en mesurant les niveaux sonores subsistant à l'aval dans la chambre anéchoïque, au centre de la buse du jet primaire. Les mesures sont faites par 1/3 d'octave à l'aide d'un microphone 1" B.K. 4145 et d'un analyseur B.K. 4417. A titre additionnel l'atténuation du mur de béton du local des ventilateurs (épaisseur 0,20 m) et de la porte acoustique qui lui est incorporée a été déterminée avec la même source de bruit auxiliaire. Les résultats sont présentés sur la Figure 4.

De ces atténuations, appliquées au niveau de bruit maximum créé par les ventilateurs en marche, on peut estimer le niveau de bruit parasite dans la chambre, en fonctionnement réel de l'installation. Les résultats sont reportés sur la Figure 5 (courbes n° 1 et n° 3 respectivement). A titre de complément et de contrôle, on a aussi évalué de la même façon l'atténuation du mur de béton du local des ventilateurs (courbe n° 2) et comparé avec une mesure (courbe n° 2'). L'écart entre 2 et 2', au maximum de 10 dB, est explicable car lorsque les ventilateurs fonctionnent on peut s'attendre à un rayonnement acoustique du début de l'enveloppe située hors du local des ventilateurs. L'écart entre les courbes n° 2 et n° 2' donne une idée de l'erreur

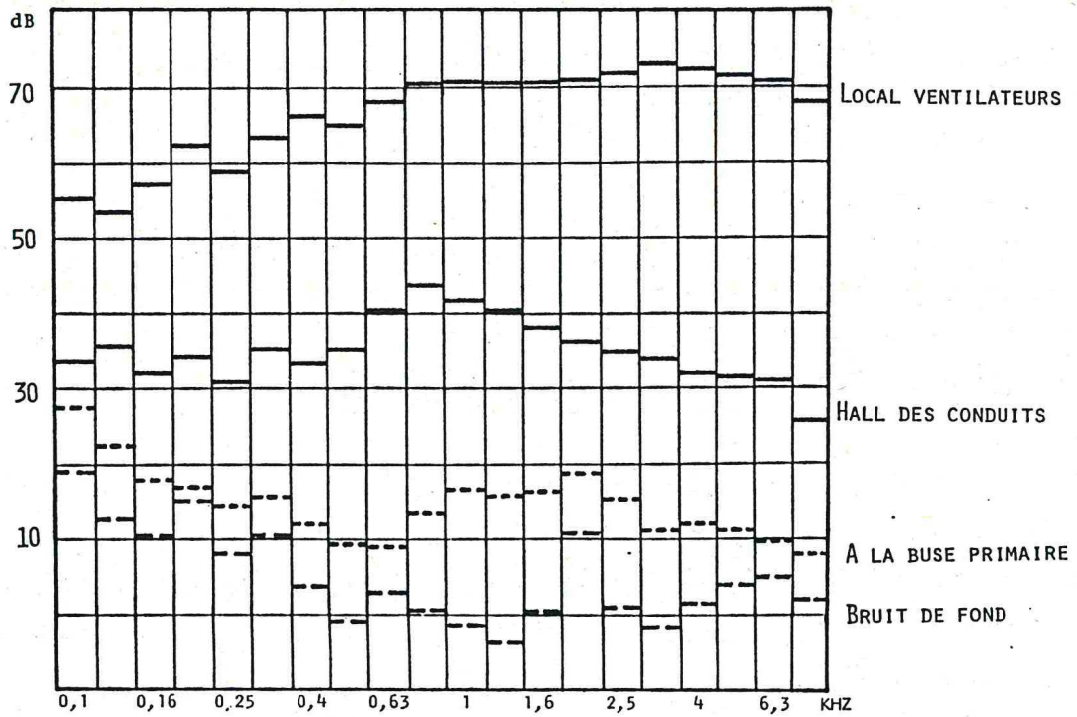


Figure 4
 Isolation acoustique des silencieux internes - Test au moyen
 d'une source placée dans le local des ventilateurs
*Acoustic transmission loss of in-duct silencers : Measurement with
 an acoustic source located in the machinery room*

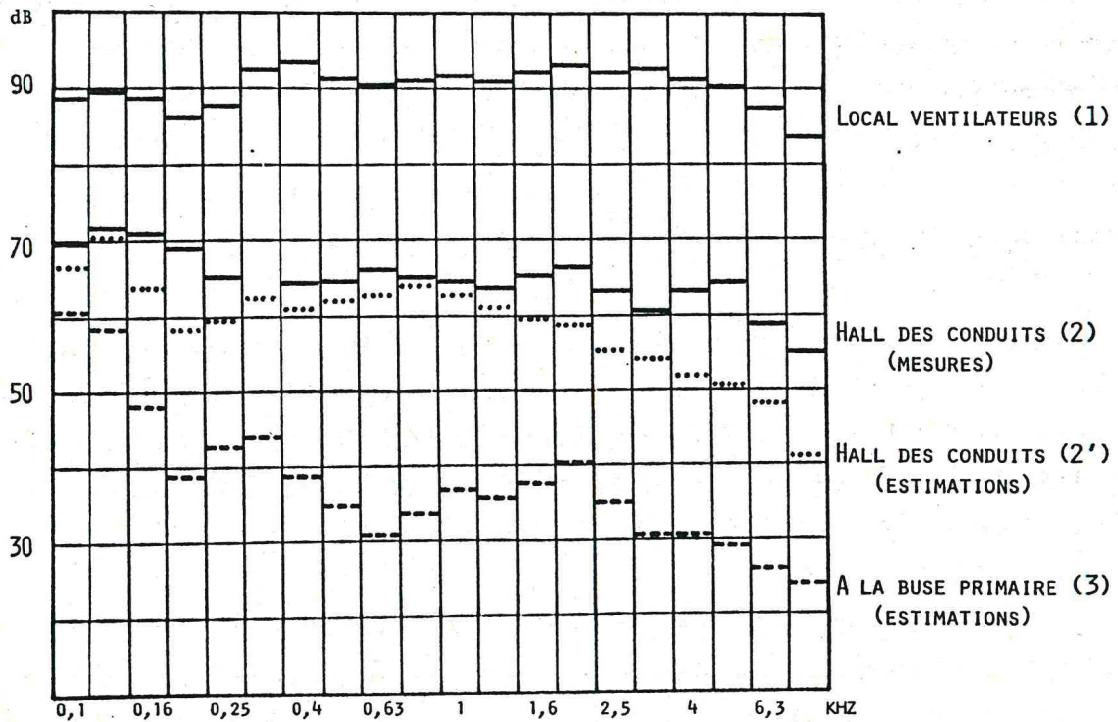


Figure 5
 Isolation acoustique dans les conditions nominales de fonctionnement
 des ventilateurs - Estimation à l'aide de la figure 4
*Acoustic transmission loss of in-duct silencers : Estimates deduced
 from Figure 4 for nominal conditions of the fans*

maximale sur l'évaluation de la courbe n° 3. L'efficacité des silencieux est donc supérieure à 30 dB dès 160 Hz et supérieure à 50 dB au delà de 500 Hz, ce qui permet un niveau résiduel voisin de 40 dB seulement (dans chaque 1/3 d'octave).

Enfin, le bruit de fond de la chambre a été mesuré, toutes les sources de bruit étant arrêtées. Les niveaux absolus, obtenus, en 1/3 d'octave, sont également reportés sur la Figure 4.

VI. CARTES DES ECOULEMENTS SECONDAIRES DANS LA CHAMBRE

Les écoulements secondaires ont été mesurés dans le plan horizontal médian de la chambre au moyen d'une sonde Anémotherm munie d'un clinomètre, la soufflerie tournant à son régime nominal (veine primaire à 160 m/s, veine secondaire à 80 m/s). Deux configurations ont été comparées, le cas des galeries latérales fermées (Figure 6) et le cas des galeries latérales ouvertes (Figure 7) où s'établit alors une vitesse de 2,80 m/s. On voit nettement que lorsque l'alimentation des jets est permise à travers les baffles acoustiques qui entourent les buses, une réduction par un facteur de l'ordre de 2 se manifeste à presque tous les points explorés. Les écoulements n'excèdent pas 1 m/s dans toute la zone utile pour les mesures acoustiques (quelques contrôles dans le plan vertical médian de la chambre sont en cours). On remarque aussi que dans une zone assez vaste les vitesses sont encore plus faibles ($\lesssim 0,20$ m/s) ce qui permet l'emploi assez aisé d'antennes acoustiques de type interférométrique et d'intensimètres acoustiques vectoriels.

VII. EFFICACITE ACOUSTIQUE DU SYSTEME DOUBLE FLUX

Le gain acoustique du système double flux a été contrôlé par des mesures de niveau global et des mesures de spectres. Dans ces essais le microphone (1/2" B.K. 4133) est placé dans le plan vertical de symétrie des jets à 1,5 m au dessus du plan médian horizontal et à 1 m en aval du plan de sortie des jets. Les spectres sont obtenus avec un analyseur Hewlett-Packard 3582 A.

Dans une première série d'essais on a mesuré le niveau de bruit du jet primaire seul, J_1 , et le niveau de bruit de l'ensemble jet primaire et jets secondaires, $J_1 + J_2$, pour différentes vitesses du jet secondaire. Les résultats sont indiqués Figure 8 pour deux valeurs de la vitesse primaire (160 et 80 m/s). La plus petite des vitesses permet évidemment de bien mettre en évidence le minimum de bruit obtenu pour $\lambda = 0,5$ et l'augmentation de 6 dB qui apparaît

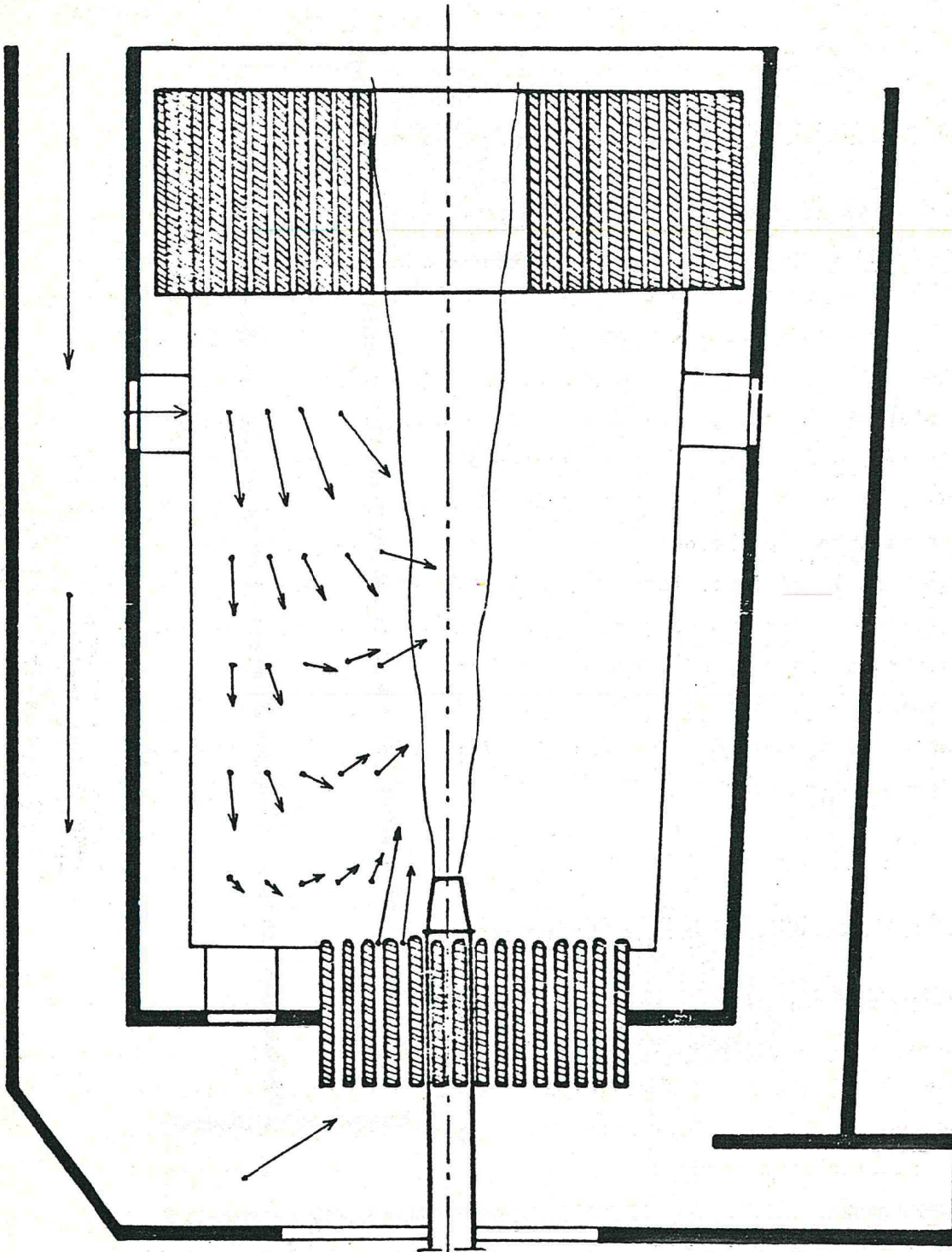


Figure 7
 Carte des écoulements secondaires (galeries latérales ouvertes)
 Echelle : 2 cm pour 1 m/s
 Map of the secondary flows when the lateral galleries are
 opened (scale : 2 cm for 1 m/s)

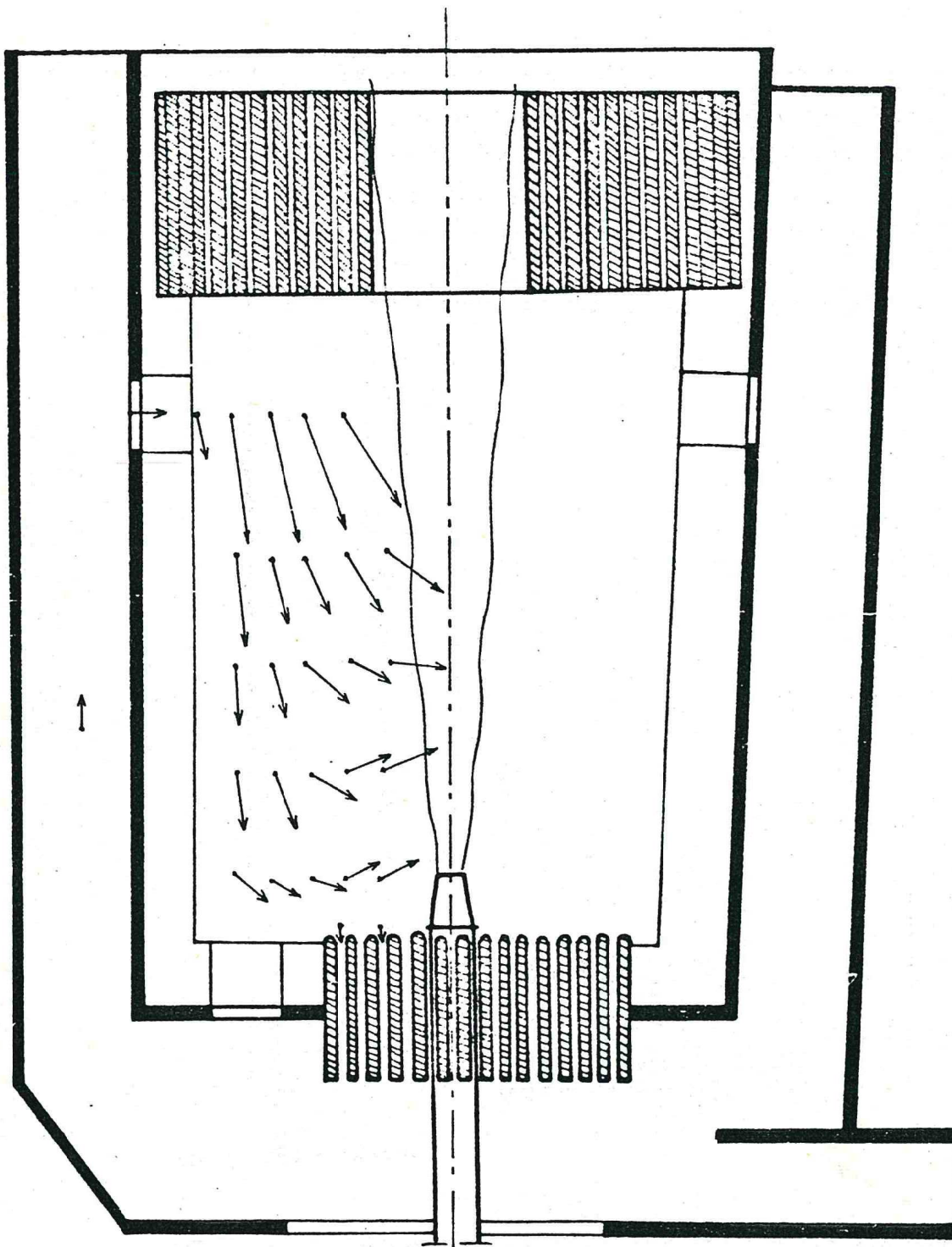


Figure 6
 Carte des écoulements secondaires (galeries latérales fermées)
 Echelle : 2 cm pour 1 m/s
 Map of secondary flows when the lateral galleries are closed
 closed (scale : 2 cm for 1 m/s)

pour $\lambda = 1$ puisque le rapport β' des sections secondaires et de la section primaire est égal à 2. La réduction optimale réalisée par le système double flux (5 dB) correspond à celle que des essais préliminaires à petite échelle avaient permis d'observer [7] et que des analyses théoriques [6], [7] avaient permis de prévoir.

Le spectre acoustique de l'ensemble jet primaire et jet secondaire, $J_1 + J_2$, a été aussi comparé au spectre acoustique du jet primaire seul, J_1 , pour la plus grande vitesse disponible, $U_p = 160$ m/s, (cf. Figure 9). On note une diminution appréciable (5,5 dB) du bruit de la configuration double flux sur une large bande de fréquences 50 Hz - 10 kHz.

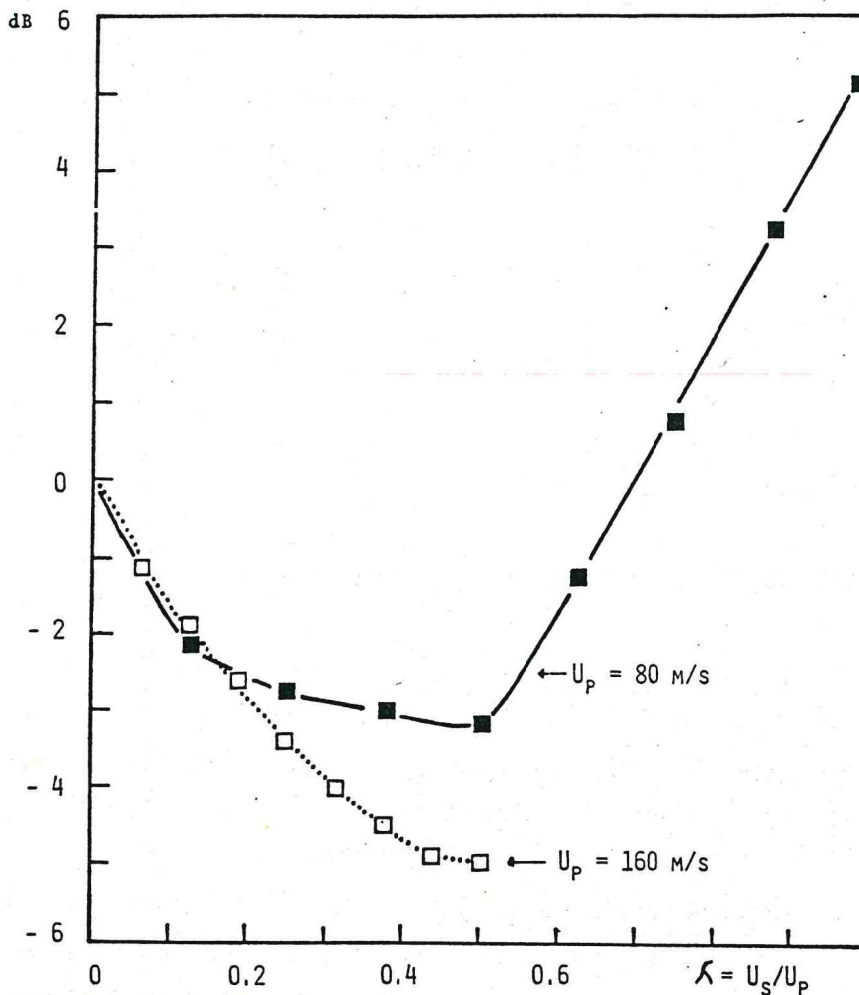


Figure 8
Gain acoustique du système double flux pour deux vitesses du jet primaire
Acoustic reduction given the by-pass set up used for the jets : global measurements for two primary velocities

Notons toutefois que l'épaisseur de la paroi séparant les flux primaire et secondaire induit, si elle est trop faible, une fréquence discrète dans la gamme 1 - 3 kHz. Pour les résultats reportés sur la Figure 9, cette

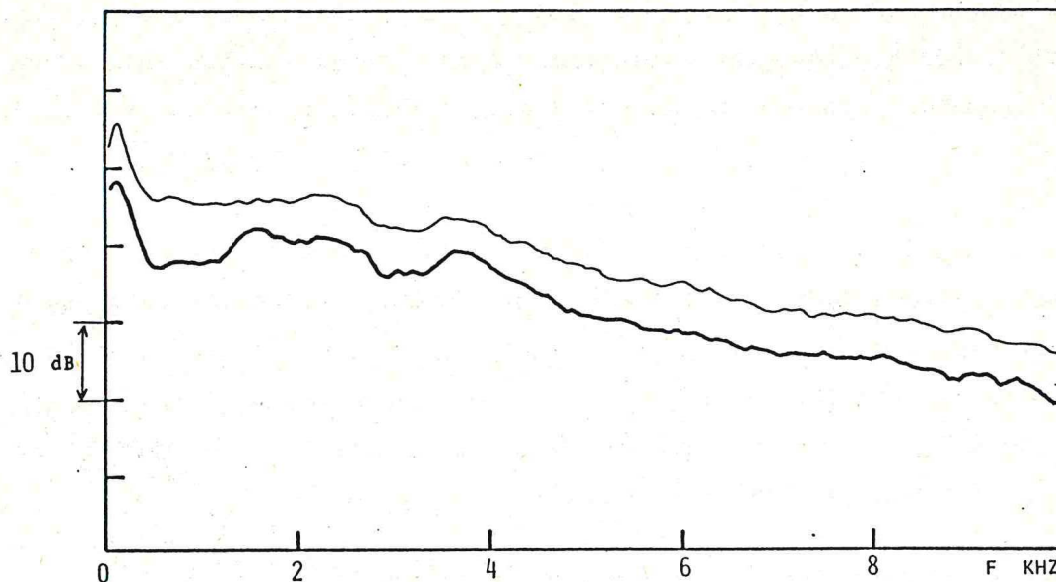


Figure 9
Gain pour les spectres acoustiques du système double flux
(Vitesse primaire 160 m/s)
*Acoustic reduction given by the by-pass set up used for the jets :
spectra measurement at 160 m/s for the primary jet.*

épaisseur a été portée à 10 mm ce qui permet de faire presque complètement disparaître ces pics parasites.

VIII. EXEMPLES D'EMPLOI DE L'INSTALLATION

Plusieurs recherches ont déjà été conduites dans la soufflerie :

- étude des champs de pression pariétaux sous des couches limites turbulentes, jusqu'à 140 m/s. Le très faible niveau des signaux parasites (bruit amont, vibrations des parois) a été en particulier, une caractéristique très intéressante de l'installation [8] (en liaison avec Métraflu) ;
- étude de la réponse vibro-acoustique de parois excitées par des couches limites turbulentes et analyse des phénomènes de coïncidence entre vitesse de convection aérodynamique du champ exciteur et vitesse des ondes de flexion dans la plaque [8] (en liaison avec Métraflu) ;
- étude de l'effet d'une couche limite laminaire ou turbulente sur la localisation des sources de bruit à l'aide d'une antenne interférométrique [9] (en liaison avec Métraflu) ;
- effet d'un écoulement à haute vitesse sur un thermomètre à ultra-sons devant être embarqué sur un avion (en liaison avec l'Université de Paris VI).

D'autres recherches sont actuellement en cours : analyse des perturbations apportées par une turbulence thermique à la propagation des ondes acoustiques ; mesure des champs de pression turbulents dans des zones tridimensionnelles et décollées.

Au seuil d'une année d'utilisation, l'installation apparaît comme souple d'emploi et susceptible d'accueillir des configurations d'essais variées.

REMERCIEMENTS

Nous sommes très reconnaissants au personnel du Bureau d'Etudes du Laboratoire de Mécanique des Fluides de l'ECL, particulièrement à Messieurs J.C. ROBERT et P. DUTHEIL pour l'aide substantielle apportée dans la réalisation des plans de l'installation et le suivi des constructions confiées à l'extérieur.

Nos remerciements vont aussi aux organismes qui ont apporté leur concours financier à l'opération : le Centre National de la Recherche Scientifique, l'Etablissement Public Régional de Rhône-Alpes, la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique, l'Aménagement du Territoire (D.A.T.A.R.) et l'Ecole Centrale de Lyon.

REFERENCES

- [1] Al. Bowers, Brian E., 1973
"The anechoic flow facility aerodynamic calibration and evaluation"
Naval Ship Research and Development Center, Report SAD-48E-1942.
- [2] F.C. DEMETZ, M.J. CASARELLA, 1973
"An experimental study of the intermittent properties of the boundary layer pressure field during transition on a flat plate"
Naval Ship Research and Development Center, Rep. 4140.
- [3] J.C.A. VAN DITSHUIZEN, G.D. COURAGE, R. ROSS and K.J. SCHULTZ, 1982
"Acoustic Capabilities of the German-Dutch Wind Tunnel, DNW"
Paper n° 9.5, 8th European Rotorcraft Forum, Aix-en-Provence, France.
- [4] J. BONGRAND, P. LIENARD, 1977
"Etude et réalisation d'une chambre sourde avec soufflerie aérodynamique, pour recherches aéro-acoustiques"
9th Int. Congress Acoustics Vol. I, p. 227.
- [5] J.P. BERHAULT, M. SUNYACH, H. ARBEY, G. COMTE-BELLOT, 1973
"Réalisation d'une chambre anéchoïque revêtue de panneaux et destinée à l'étude des bruits d'origine aérodynamique"
Acustica 29(2), pp. 69-78.

- [6] D. JUVE, J. BATAILLE, G. COMTE-BELLOT, 1978
"Bruit de jets coaxiaux"
J. Méca. Appliquée 2 (3), pp. 385-398.
- [7] H. ARBEY, M. SUNYACH, G. COMTE-BELLOT, 1979
"Use of adjacents jets to investigate the aerodynamic sound of airfoils at
moderatly high Reynolds numbers"
J. Sound and Vibration 65(2), pp. 215-228.
- [8] G. ROBERT, 1984
"Modélisation et simulation du champ excitateur induit sur une structure par une
couche limite turbulente"
Thèse Docteur-Ingénieur, ECL 84-02.
- [9] Ph. DUFOURCQ, 1984
"Influence d'un écoulement de type couche limite sur la localisation de sources
sonores placées en paroi"
Thèse Docteur-Ingénieur, ECL 84-11.

(Manuscrit reçu le 14 novembre 1984, revu le 4 février 1985)