



**HAL**  
open science

# Etude Expérimentale d'une Grille d'Aubes Linéaire Aéroacoustique

Arthur Finez, Marc Jacob, Michel Roger

► **To cite this version:**

Arthur Finez, Marc Jacob, Michel Roger. Etude Expérimentale d'une Grille d'Aubes Linéaire Aéroacoustique. 10ème Congrès Français d'Acoustique, Apr 2010, Lyon, France. hal-00542862

**HAL Id: hal-00542862**

**<https://hal.science/hal-00542862v1>**

Submitted on 3 Dec 2010

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# 10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

## Etude expérimentale d'une grille d'aubes linéaire aéroacoustique

Arthur Finez<sup>1</sup>, Marc Jacob<sup>2</sup>, Michel Roger<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ecole Centrale de Lyon, LMFA, UMR CNRS 5509, 69134 Ecully Cedex, France, [arthur.finez@ec-lyon.fr](mailto:arthur.finez@ec-lyon.fr)

<sup>2</sup> Centre Acoustique du LMFA, UMR CNRS 5509, Ecole Centrale de Lyon, Université Claude-Bernard Lyon I, F-69134 Ecully Cedex, France

Une approche originale est proposée ici pour étudier une grille d'aube en champ libre. La nouveauté consiste à mettre en œuvre des parois acoustiquement « transparentes » afin de guider l'écoulement pour améliorer la régularité de la charge sur les aubes, tout en laissant s'échapper les ondes sonores générées par la grille. Contrairement aux grilles d'aubes classiques, dont les parois imperméables constituent un obstacle à la propagation des ondes acoustiques, l'outil développé ici permet d'étudier l'aéroacoustique de la grille en champs proche et lointain. Dans la présente étude, réalisée à bas nombre de Mach ( $M < 0.25$ ) et à nombre de Reynolds modéré ( $Re_c \sim 5.10^5$ ) dans la grande soufflerie anéchoïque du LMFA, on améliore une grille existante de 7 aubes au moyen de parois poreuses constituées d'une toile tendue de Kevlar. La distribution de pression statique moyenne suivant la corde est comparée aux valeurs de la littérature et permet également de contrôler la périodicité de la grille. Des mesures au fil chaud simple montrent d'une part que l'écoulement incident est peu turbulent, faisant du bruit de bord de fuite la source acoustique principale en hautes fréquences et d'autre part que seuls les sillages des 2 aubes extrêmes sont sujettes à des effets de bord. L'analyse des signaux de pression instationnaires montre que le rayonnement des sources élémentaires est modifié par des réflexions des pâles adjacentes de la grille et semble indiquer la présence de résonances de Parker.

## 1 Introduction

Une part importante du bruit large bande des compresseurs de turbomachines provient des aubes elles-mêmes lorsque leurs couches limites interagissent avec le bord de fuite. Dans la pratique, les sources acoustiques sont situées à moins d'une corde des pales adjacentes, c'est pourquoi il est raisonnable de penser que la génération et la propagation du bruit peuvent être conditionnées par cet agencement particulier : des effets de réflexions et de diffraction par les aubes proches peuvent jouer un rôle important.

L'étude expérimentale de Sabah et Roger [1] en 2001 a été la première à mesurer le bruit de bord de fuite d'une grille d'aube linéaire. Cependant, l'écoulement n'était pas véritablement accompagné à travers la grille et il n'avait pas été possible de mettre en évidence un effet de grille prononcé : les sept profils se comportaient d'un point de vue acoustique comme sept profils isolés. D'autres études se sont affranchies du problème posé par les parois d'accompagnement à travers lesquelles il faut pouvoir mesurer le bruit [2]: les cascades annulaires présentent elles aussi des effets de grille, mais la bidimensionnalité de l'écoulement souhaitable pour l'analyse et la décomposition des phénomènes est alors perdue.

Du point de vue de l'acoustique théorique, les effets de grille ont été étudiés par Glegg [3] qui, en utilisant la technique de Wiener-Hopf prédit un effet de diffraction par les bords de fuite adjacents rehaussant le bruit d'une aube de 6 dB pour le premier mode, à Mach 0.5. Par ailleurs, Peake [4] a étudié le bruit d'impact de la turbulence sur une grille d'aubes. D'après ces études une solidité supérieure à l'unité devrait faire apparaître des effets de grille.

Des innovations récentes dans le domaine de caractérisation de sources acoustiques ouvrent une nouvelle piste pour l'étude de bruit de grille linéaire : en 2000, Jacob

*et al.* [5], ont confectionné une veine acoustiquement « transparente » à l'aide d'un tissu de polyéthylène ne supportant qu'une tension modérée, pour développer et valider des techniques de mesures embarquées, appliquées ensuite sur des TGV (Fremion *et al.*[6]). En parallèle, Jaeger [8] a proposé de placer entre une antenne de microphones placée en retrait de la paroi d'une conduite et l'écoulement, un tissu de fibres d'aramide fortement tendu sur un cadre. Ce dispositif agit comme une paroi aérodynamique qui peut soutenir une pression statique et guider l'écoulement, tout en laissant passer les ondes acoustiques avec un minimum d'atténuation. La tension permet de limiter la vibration du tissu excité par ses propres couches limites. Depuis, le Kevlar a été utilisé successivement par plusieurs équipes [8, 9] sur des cadres plats. Le premier objectif de cette étude est d'adapter cette nouvelle technologie à la géométrie incurvée de la grille d'aubes de manière à canaliser correctement l'écoulement au passage de la grille et faire apparaître des éventuels effets de grille ; ensuite, il faudra les mettre expérimentalement en évidence.

## 2 Montage expérimental

### 2.1 Géométrie

La grille d'aubes étudiée est constituée de sept profils NACA 6512-10 de corde  $c=100$  mm et d'envergure  $L=200$ mm, espacés de  $g=70$ mm. La solidité de la grille est donc  $\sigma = c/g \approx 1.43$ . Chaque configuration est en outre définie par deux angles géométriques indépendants et variables dans l'installation: l'angle d'attaque  $\alpha$  entre l'axe de l'écoulement amont et la corde des profils et l'angle de front de grille  $\beta$  entre l'écoulement amont et la perpendiculaire à la droite reliant tous les bords d'attaque. Ces deux angles sont liés à l'angle de calage  $\chi=\beta-\alpha$ , comme indiqué sur la

Figure 1. L'aérodynamique d'une telle grille a été étudiée de manière systématique dans [10] pour plusieurs calages et angles d'attaque. Il y est montré que pour  $\beta=30^\circ$  et  $\sigma=1,5$ , le point de rendement maximal est atteint pour  $\alpha=16^\circ$ .

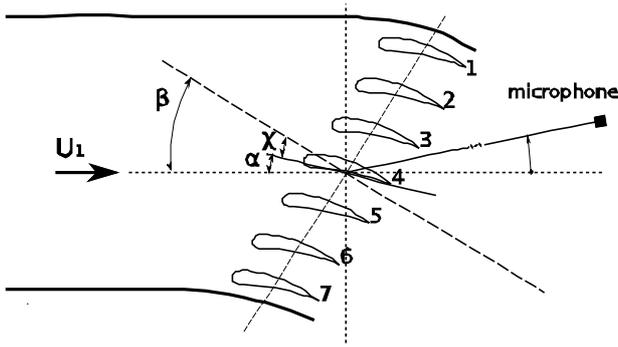


Figure 1 : géométrie de la grille, en trait gras : les parois acoustiquement transparentes

L'ensemble est placé dans la grande soufflerie anéchoïque de l'ECL, dont le taux de turbulence résiduel est ici inférieur à 0,4%. En amont de la grille, l'écoulement dans une veine fermée de 560 mm x 560 mm est dévié de 15° par un coude à ailettes puis traverse un tronçon de même section et de longueur 1 m avant d'être expulsé dans la chambre par un convergent de section de sortie 450 mm x 200 mm. L'écoulement se développe ensuite en un jet rectangulaire bafflé par 2 plaques horizontales distantes de 200 mm qui maintiennent la grille et tiennent lieu de carter et de moyeu. L'aube centrale de la grille est à ~ 480 mm de la sortie du convergent. Les 2 parois en Kevlar accompagnent ce jet entre la buse jusque près du bord de fuite de la grille (c.f. Fig. 1).

## 2.2 Prises de pression

Dix prises de pression statique moyenne sont disposées sur le profil central de manière à contrôler la charge. De plus, sur chaque aube, on a ajouté à mi-corde et mi-envergure une prise de pression sur l'intrados et une autre sur l'extrados, afin d'avoir une information sur la régularité de la charge des aubes.

Sept prises de pression instationnaires sont également insérées sur l'extrados du profil central, à proximité du bord de fuite. Sur la Figure 2, les prises de pression statique moyenne sont symbolisées par des points, et les prises de pression instationnaire par des croix situées à trois positions différentes. A la position la plus en aval, 4 autres prises (non visibles sur la Figure 2) sont déployées suivant l'envergure afin de permettre de déterminer la cohérence suivant cette direction. L'acquisition des signaux de pression instationnaire se fait en utilisant des sondes à microphones déportés suivant la procédure décrite dans [11].

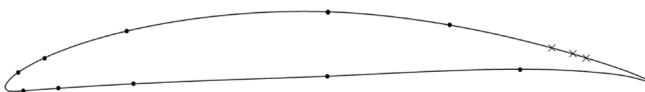


Figure 2 : position des prises de pression sur l'aube centrale

## 2.3 Parois acoustiquement transparentes

Le tissu utilisé dans cette étude est similaire à celui qui a donné les meilleurs résultats dans [7] : de masse nominale

60g/m<sup>2</sup> et d'épaisseur 0,07mm, sa très bonne tenue en tension permet de le tendre sur un cadre en acier de section 10mm\*10mm, de hauteur 200mm et de longueur 700mm. La procédure de fabrication des parois est la suivante : le tissu est tendu à 20N/cm de manière uniforme avant d'être collé sur un cadre initialement plat à l'aide d'une colle structurale. Enfin, le cadre et le tissu sont cintrés simultanément. Cette méthode est efficace pour des angles de déflexion inférieurs à 20°. Le cadre qui supporte la tension peut cependant défléchir en son centre de manière importante. Pour y remédier, on a donc placé des extenseurs intermédiaires visibles sur la Figure 3.

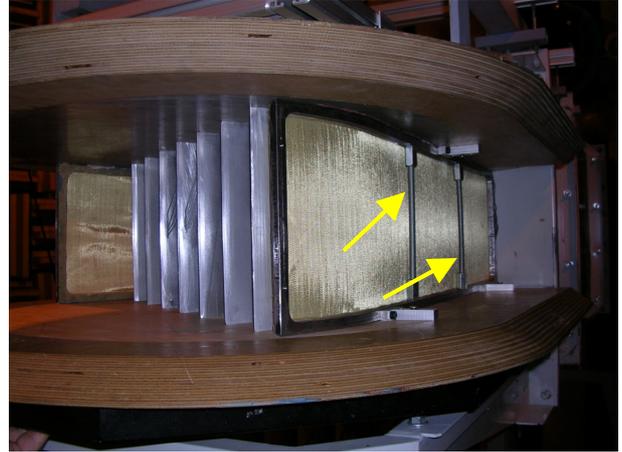


Figure 3 : Vue sur l'extrados des aubes et sur les parois en Kevlar équipées d'extenseurs (flèches jaunes)

L'indice de perte par transmission mesuré en conduit pour des ondes en incidence normale a permis de quantifier les performances acoustiques entre 500Hz et 2000Hz du matériau (Figure 4). Dans cette plage de fréquences, l'absorption par le tissu est inférieure à 0,3dB ce qui est satisfaisant pour notre application.

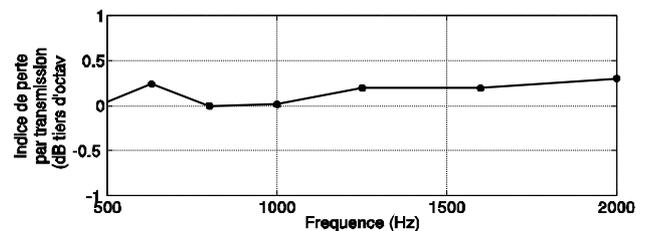


Figure 4 : Indice de perte par transmission du tissu utilisé pour les parois de guidage

De plus, la pression mesurée de part et d'autre de la paroi lorsqu'un écoulement traversant est imposé permet d'obtenir le coefficient de perte de charge du matériau  $\Lambda=193,5$ .

## 3 Résultats aérodynamiques

Le bruit généré par la grille est fortement dépendant de l'état des couches limites sur les extrados, qui est lui-même tributaire de l'équilibre aérodynamique global, en particulier du gradient de pression dans le sens de la corde. Avant toute chose, il faut donc contrôler la charge des aubes et la régularité pale-à-pale. La configuration étudiée est définie par  $\alpha=15^\circ$ ,  $\beta=35^\circ$ ,  $U_1=80\text{m/s}$ , le nombre de Reynolds basé sur la corde est donc  $Re_c = 5,3 \cdot 10^5$ .

### 3.1 Aube centrale

Le coefficient de portance  $C_p$  est défini par :

$$C_p = \frac{P - P_1}{1/2 \cdot \rho \cdot V_1^2}$$

A cause du débit traversant le kevlar, la répartition de pression statique à l'amont  $p_1$  n'est pas parfaitement homogène. On a donc utilisé la relation suivante :

$$p - p_1 = (p - p_2) + (p_2 - p_1)$$

où  $p_2$  est la pression statique à l'aval (égale à la pression atmosphérique), et  $(p_2 - p_1)$  a été évalué par simulation numérique stationnaire avec le logiciel commercial Fluent pour une grille possédant une infinité d'aubes. Après cette correction, la figure 5 permet de a charge de l'aube centrale à celles des études précédentes [10] et [14].

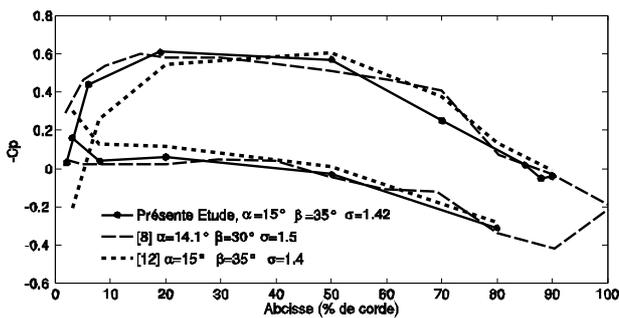


Figure 5 : Charge moyenne de l'aube centrale, comparaison avec la bibliographie

Dans son étude d'aérodynamique stationnaire, Emery [10] a suivi les recommandations données par Song [12] et Lepicovsky [13] pour améliorer les performances des grilles linéaires dans des conduites rectangulaires fermées: l'aspiration des quatre couches limites de la conduite à travers des parois poreuses en amont de la grille lui a ainsi permis de contrôler efficacement le débit, la périodicité et la bidimensionnalité. Le résultat de [10] sert donc ici de référence, bien que l'angle  $\beta$  et la solidité  $\sigma$  soient légèrement différents dans la présente étude. L'encombrement spatial et sonore d'un tel équipement d'aspiration de couche limite rendrait impossible toute mesure acoustique en champ lointain. On a donc préféré une installation plus discrète, qui permet tout de même un léger contrôle *via* l'extrémité des parois en Kevlar, en plus d'un système d'échappement de couche limite déjà développé dans [14] : celui-ci aspire de façon passive en sortie de convergent les couches limites des plaques de maintien de la grille. L'absence d'aspiration active de la couche limite dans notre installation se traduit par un angle d'attaque effectif moins important : l'écoulement est défléchi avant d'arriver sur la grille comme c'est le cas pour des expériences de profils isolés [15]. Par ailleurs, on constate que la pression de l'extrados à 70% de corde dépend du nombre de Reynolds ; des vitesses plus faibles provoquent une dépression plus marquée. Cet effet est lié à la position du point de transition de la couche limite. Les mesures de Emery [10] ayant été faites à  $Re_c = 2,45 \cdot 10^5$ , la différence observée pour ce point est justifiée. Dans l'étude de Sabah [14], les parois s'arrêtent en amont de la grille, ce qui explique un angle d'attaque effectif encore plus faible que dans notre étude.

Afin de contrôler la qualité du sillage, des traversées au pitot et au fil chaud simple ont été effectuées à mi-envergure en suivant la ligne de front de grille à différentes

distances du bord de fuite. La coupe n'est donc pas perpendiculaire au sillage. Le fil chaud est orienté parallèlement au bord de fuite. Sur la Figure 6.a, les vitesses moyennes sont présentées, décalées pour la clarté de 2 graduations pour la coupe  $x=20\text{mm}$  et de 3 graduations pour  $x=50\text{mm}$  ; sur la figure 6.b, les taux de turbulence sont décalés respectivement de 4 et 7 graduations.

Le sillage proche est fortement dissymétrique : l'écoulement accéléré du côté de l'extrados entraîne un sillage plus fin que du côté de l'intrados. Cette dissymétrie s'estompe avec l'éloignement et l'évolution axiale est compatible avec le comportement autosimilaire des sillages lointains dont l'élargissement est en  $x^{1/2}$  et le déficit de vitesse en  $x^{-1/2}$ . Concernant les taux de turbulence, on notera que la couche limite de l'extrados est notablement plus turbulente ( $u'/U=6\%$ ) que du côté de l'intrados. Ce seront donc les données de l'extrados qu'il faudra utiliser pour l'application des modèles de bruit de bord de fuite.

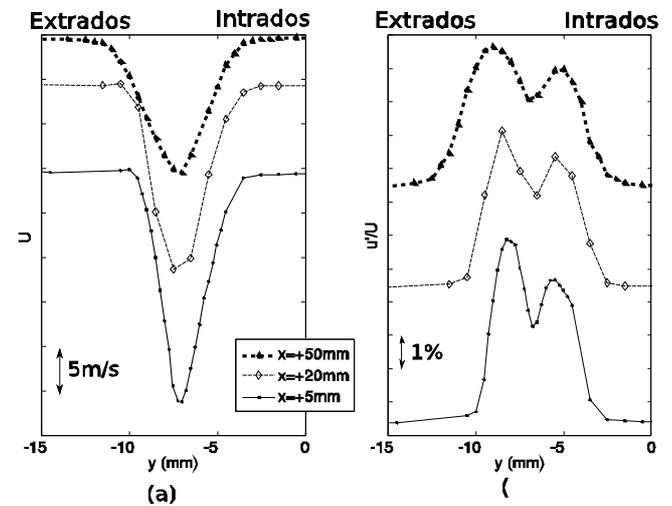


Figure 6: Mesures dans le sillage des aubes, (a) vitesse moyenne mesurée au pitot, (b) taux de turbulence mesuré au fil chaud

En conclusion, les parois acoustiquement transparentes accompagnent efficacement l'écoulement du point de vue de la charge médiane sans pour autant encombrer « le champ de vision acoustique ».

### 3.2 Périodicité

La reproductibilité de l'écoulement d'une aube à l'autre est un critère de qualité de la grille : pour faire apparaître des effets de champ proche et faciliter l'analyse acoustique, il faut que le bruit de chaque aube soit statistiquement identique, et donc que les écoulements à proximité de chacune soient similaires en tous points. On s'appuiera ici sur les coefficients de portance à mi-corde, ainsi que sur la forme des sillages.

La Figure 7 présente le coefficient de portance à 50% de corde pour chacune des aubes, en suivant les notations de la Figure 1. La position des parois en Kevlar a été optimisée pour obtenir la plus grande régularité possible. Le résultat est jugé satisfaisant hormis deux points : l'extrados de l'aube 1 et l'intrados de l'aube 7, qui sont les deux faces externes de la grille. L'aube 7 est donc significativement plus chargée que l'aube 1. Le bruit généré en est *a priori* influencé, mais on est en droit d'espérer que les effets se

compensent tant que les couches limites se développant sur le Kevlar n'interagissent pas avec les aubes.

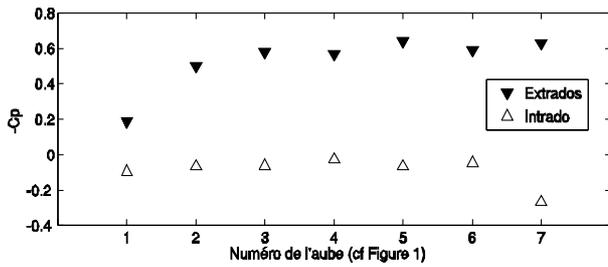


Figure 7 : Périodicité de la charge à 50% de corde

Le taux de turbulence dans le sillage est un critère de régularité exigeant. On le présente dans la Figure 8 pour les aubes 1 à 5 (avec les notations de la figure 1) à 5% de corde en aval des bords de fuite. Les aubes internes (de 2 à 5) présentent des sillages très réguliers pour leur forme générale, le taux de turbulence maximal ainsi que l'épaisseur de sillage. L'intrados de l'aube 1 est semblable aux autres (partie droite de la figure) tandis que l'extrados (partie gauche) est significativement plus turbulent ( $Tu = u'/U = 9\%$ ). En s'éloignant de l'aube,  $Tu$  augmente progressivement car on rejoint les couches de cisaillement du jet. Pour cette coupe, le taux de turbulence résiduel des canaux interaubes n'est pas rejoint entre l'aube 1 et la paroi de Kevlar. Pourtant, les vitesses moyennes non présentées ici montrent que la couche de cisaillement du jet est clairement distincte du sillage. Le niveau de turbulence relativement élevé dans cette région est un témoignage d'une turbulence plus intense dans cette zone, ce qui se traduit également par une élévation du niveau dans la couche limite extrados de l'aube 1. Ces niveaux sont cependant nettement inférieurs (d'environ 35%) à ceux relevés dans la référence [14].

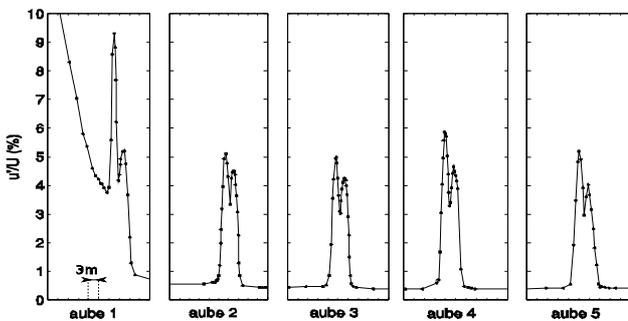


Figure 8 : Taux de turbulence dans les sillages des aubes 1 à 5 à 5% de corde en aval des bords de fuite

En conclusion, l'écoulement dans la grille est globalement bien périodique. Au moins une des deux parois des profil orientées vers l'extérieur a un comportement singulier : la couche limite de l'extrados de l'aube 1 est plus turbulente que les autres, on s'attend donc à ce qu'elle génère un bruit de bord de fuite plus important que les autres.

### 3.3 Ecoulement amont

Le taux de turbulence résiduelle au centre de la veine est mesuré inférieur à 0,4%, la loi en  $-5/3$  de la zone inertielle de la turbulence de Kolmogorov est présente pour des fréquences supérieures à 800Hz. L'écoulement amont est

donc quasi-laminaire, condition nécessaire à la prédominance du bruit de bord de fuite.

L'épaisseur des couches limites se développant sur les plaques de maintien en bois inférieure et supérieure en contact avec les aubes (cf Figure 3) est évaluée au fil chaud respectivement à 15mm et 21mm. Ces valeurs élevées sont probablement dues au système d'échappement de couche limite identique à celui présenté dans [14] : en effet une légère inclinaison de la plaque inférieure, ajoutée à un léger effet de blocage de l'échappement de la couche limite a occasionné un décollement local et un épaissement prématuré de la couche limite. Comme ce défaut peut augmenter le bruit d'installation, il faut vérifier que le bruit mesuré a bien toutes les caractéristiques du bruit de bord de fuite.

## 4 Acoustique

La figure 9 présente la densité spectrale de puissance acoustique de la grille mesurée pour  $\alpha=15^\circ$ ,  $\beta=35^\circ$ ,  $U_1=80\text{m/s}$  avec un microphone Bruel & Kjaer  $\frac{1}{2}$ " de type 2671 placé à 2m du centre de la grille et dans le plan mi-envergure, pour un angle d'observation  $\theta=110^\circ$  (voir Figure 1). Cette mesure est comparée au résultat correspondant tiré de [1]. La différence majeure entre les deux installations est liée aux parois de guidage en tissu qui sont plus tendues et plus lisses que dans [1] où le matériau utilisé était le même que celui de la référence [5]. Par ailleurs dans le dispositif initial de Sabah et Roger [1], l'extrémité aval des parois se situe légèrement en amont de la grille. La présence d'une conduite à proximité de la grille a donc un effet notable sur l'acoustique. Les spectres acoustiques présentent certaines particularités que l'on va analyser ci-après.

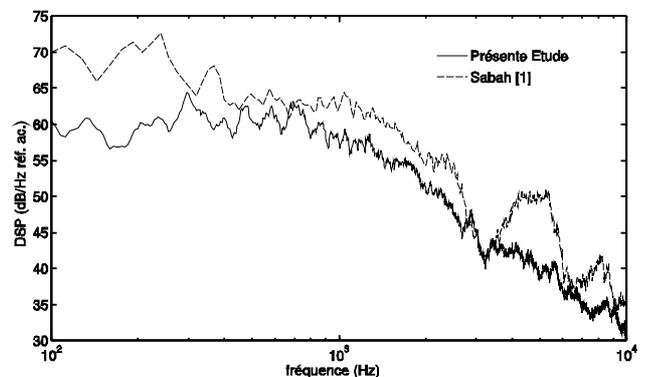


Figure 9 : Acoustique mesurée en champ lointain  $\alpha=15^\circ$ ,  $\beta=35^\circ$ ,  $U_1=80\text{m/s}$ ,  $\theta=110^\circ$ ,  $r=2\text{m}$

### 4.1 Réflexions sur les aubes adjacentes

Lorsqu'on présente le microphone du côté intrado ( $-100^\circ < \theta < 0^\circ$ ), des oscillations typiques de phénomènes d'interférences sont visibles sur les spectres acoustiques (voir Figure 10 mesure  $\theta=-97^\circ$ ). La réflexion d'un rayon acoustique sur l'intrados de l'aube adjacente peut avoir un tel effet. Un rapide raisonnement géométrique valable pour les objets non compacts peut nous en convaincre. Dans notre cas, on a  $kc > 1$  pour les fréquences supérieures à 540Hz.

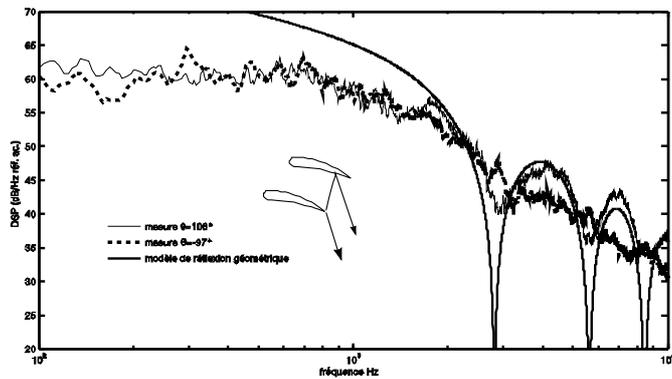


Figure 10 : Effet de réflexion sur les pales adjacentes

Supposons qu'un rayon acoustique émis à proximité d'un bord de fuite parcourt le trajet direct vers le microphone. Le bruit de bord de fuite étant un mécanisme approximativement dipolaire, un deuxième rayon est tiré dans le sens opposé avec un déphasage de  $\pi$ . Si ce rayon est réfléchi par une aube et emprunte un chemin parallèle au premier, un réseau d'interférences peut naître en champ lointain. On appelle  $\delta$  la différence de marche entre les deux rayons et  $c_0$  la vitesse du son, le rapport de l'énergie acoustique de la somme des deux rayons et de celle du rayon direct seul est :

$$\frac{|p|^2}{|p_i|^2} = |1 - \exp(2i\pi\delta f/c_0)|^2$$

La Figure 10 illustre ce résultat appliqué au cas où la distance aube-à-aube  $g$  est de 65mm. La valeur réelle étant de 70mm, on a utilisé ce paramètre comme léger recalage puisqu'on a négligé l'épaisseur des pales, leur courbure, la position exacte des sources acoustiques et la réfraction des rayons acoustiques par les couches de cisaillement [17] qui ajoute elle aussi une différence de marche, quoique minime pour les rayons en incidence quasi-normale. Dans la Figure 10, on a ajouté cette fonction de correction à une droite passant par 60dB à 1kHz et par 30dB à 10kHz comme c'est le cas pour le spectre typique à  $\theta=106^\circ$ , afin de faciliter la comparaison. Il s'agit d'un premier effet marqué d'acoustique de grille.

#### 4.2 Résonnances internes

Les sondes de pression instationnaire témoignent d'un autre effet de grille qui n'est pas directement visible sur les spectres acoustiques en champ lointain. Comme le montre la Figure 11, la cohérence des sondes est particulièrement marquée pour les deux fréquences 2080 Hz et 3540 Hz quel que soit l'espacement des sondes suivant la corde ou l'envergure. Les densités spectrales de puissance de la pression pariétale instationnaire exhibent également des émergences pour ces deux fréquences.

Les phénomènes de résonnances internes aux grilles d'aubes ont été étudiés notamment par Parker [19] et Koch [18]. Le modèle de Koch permet de prendre en compte les effets de l'écoulement ainsi que l'effet de l'angle de calage. L'application de ce modèle à notre cas suggère que les fréquences signalées correspondent aux modes de Parker  $\alpha$  et  $\gamma$ . Ceci constitue donc un deuxième effet de grille.

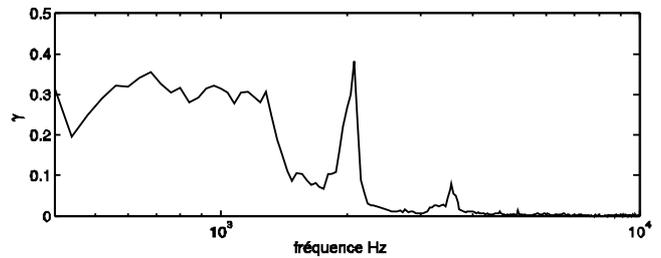


Figure 11 : Cohérence de deux sondes espacées de 5mm dans la direction transversale.

#### 4.3 Directivité

La carte de directivité de la grille est tracée sur la figure 12. Le niveau de densité spectrale de puissance est donné en couleur pour un angle  $\theta$  donné en abscisse et une fréquence donnée en ordonnées.

Premièrement, la majeure partie de l'énergie acoustique surtout en haute fréquence est rayonnée vers l'aval (typiquement entre  $\pm 40^\circ$  et  $\pm 80^\circ$ ). Bien que l'on s'attende à ce que le bruit de bord de fuite rayonne préférentiellement vers l'amont [21], la grille semble ici canaliser le son vers l'aval. Il se peut aussi que la directivité soit modifiée par des effets d'installation indésirables comme par exemple le bruit d'interaction de la turbulence des plaques de maintien avec les aubes (cf § 3.3), le bruit du jet principal quittant la section d'essais (plutôt en basse fréquence) ou l'interaction entre les parois en Kevlar et les aubes d'extrémités. En pratique, seules la dernière source peut avoir des effets non négligeables en haute fréquence.

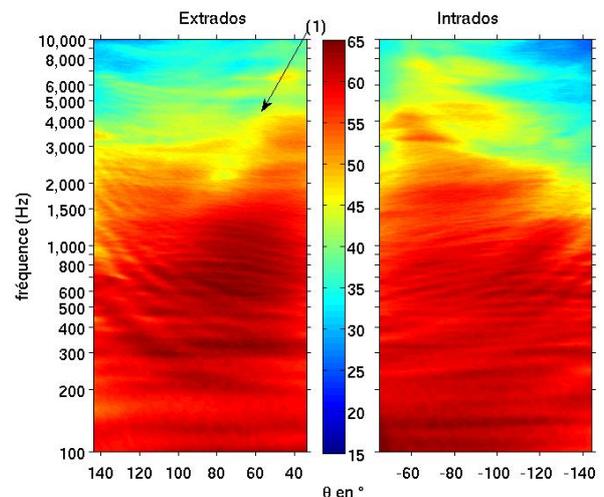


Figure 12 : Directivité en dB/Hz, réf. ac. de la grille d'aubes  $\alpha=15^\circ$ ,  $\beta=35^\circ$ ,  $U_1=80\text{m/s}$ ,

Deuxièmement, à proximité de l'axe, en particulier pour les angles négatifs ( $\theta \approx -50^\circ$ ), les basses fréquences sont fortement réhaussées, ce qui est typique d'une pollution des mesures par le pseudo-son des couches de cisaillement du jet. Cela est très net pour les fréquences inférieures à 100Hz, et il y a encore quelques traces de ce phénomène dans la gamme d'analyse.

Troisièmement, on retrouve dans cette figure le phénomène de réflexion sur les aubes voisines décrit précédemment (§4.1) pour  $-50^\circ > \theta > -90^\circ$ , entre 2kHz et 6kHz.

Quatrièmement, le réseau d'interférences formant un « V » entre 300Hz et 3kHz dans le rayonnement vers l'amont, est attribuable à des phénomènes de réflexions sur les épaulements de la buse qui conduit le jet [21].

Enfin, du côté extrados ( $30^\circ < \theta < 80^\circ$ ), une fréquence d'extinction, notée (1), est visible entre 2kHz et 10kHz sur la Figure 12; elle augmente lorsque le microphone se rapproche de l'axe. Ce phénomène pourrait être liée à la directivité des sources, mais la question reste ouverte.

## 5 Conclusion

Dans cette étude, des parois acoustiquement transparentes ont été spécialement mises au point et ont permis l'étude de la production de bruit de bord de fuite large bande pour une grille d'aube linéaire.

Le montage a été validé expérimentalement d'abord d'un point de vue aérodynamique : la charge de l'aube centrale est en accord avec la bibliographie. La périodicité de la grille est remarquable pour les 5 aubes centrales et a été nettement améliorée par rapport à la grille initiale, même pour les aubes 1 et 7. Malgré tout, les deux aubes périphériques restent chargées différemment des aubes centrales ce qui implique qu'au moins une couche limite est plus turbulente que les autres. Ceci pourrait avoir un impact sur le bruit généré.

Les parois acoustiquement transparentes ont à la fois un rôle aérodynamique en limitant la déflexion de l'écoulement amont et une influence sur l'acoustique car elles conditionnent l'équilibre global de l'écoulement. Concernant l'acoustique, au moins deux effets de grille ont été identifiés, mais des questions subsistent quant à l'origine du bruit observé car une des couches limites des plaques de maintien des aubes est épaisse et est susceptible de générer du bruit de bord d'attaque parasite.

Les prochains sujets d'investigation sont l'utilisation des données instationnaires de pression de paroi pour utiliser des modèles analytiques de bruit de bord de fuite, afin d'identifier un éventuel effet de grille sur la répartition et la directivité des sources acoustiques, l'amélioration de l'installation expérimentale ainsi que l'utilisation des méthodes d'antennerie pour la localisation directe et la hiérarchisation des sources de bruit.

## Remerciements

Ce projet a été réalisé dans le cadre du Projet Européen FLOCON.

## Références

- [1] Sabah M., Roger M. "Experimental Study and Model Predictions of Cascade Broadband Noise", *AIAA 2001-2243*, 7<sup>th</sup> AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference
- [2] Posson H. "Fonctions de réponse de grille d'aubes et effet d'écran pour le bruit à large bande des soufflantes", thèse de doctorat, ECL (2008)
- [3] Glegg S. A.L., 1996, "Airfoil self noise generated in a cascade", *AIAA Paper n° 96-1739*
- [4] Peake N., 1992, "The Interaction Between a High-Frequency Gust and a blade Row", *J. Fluid Mech.*, Vol 241, pp. 261-289
- [5] Jacob, M. C., Robert, G., Fremion, N., Guerrand, S., 2000, "In-flow acoustic measurements on high speed trains", *AIAA paper n° 2000-2011*, 6<sup>th</sup> AIAA/CEAS meeting, Lahaina (HW)
- [6] Fremion, N., Vincent, N., Jacob, M., Robert G., Louisot, A., Guerrand, S., 2000, "Aerodynamic noise radiated by the intercoach spacing and the bogie of a high speed train", *J. Sound Vib.*, Vol.231 n°3, pp. 577-593
- [7] Jaeger S. M., 2000, "Effect of surface treatment on array microphone self-noise", *AIAA Paper n°2000-1937*
- [8] Remillieux M. C., Crede E. D., Camargo H. E., 2008, "Calibration and demonstration of the new virginia tech anechoic wind tunnel" *AIAA paper n.° 2008-2911*.
- [9] Piet J.-F., 2002, "Hublot acoustique : Caractérisation de la transmission et implantation des microphones", *ONERA, RT 1/06965 DSNA/DMAE*
- [10] Emery J. C, Herrig L. J., Erwin J R., Felix A. R., 1957, "Systematic two-dimensional cascade test of NACA 65-series compressor blades at low speeds" *NACA Report 1368*
- [11] Perennès S., 1999, "Caractérisation des sources de bruit aérodynamique à basse fréquences de dispositifs hypersustentateurs", thèse de doctorat ECL 99-32
- [12] Song B., Gui X., Li S.-M., Douglas J., Ng W. F., 2002, "Flow periodicity improvement in a high speed compressor cascade with a large turning-angle", *AIAA paper n° 2002-3539*
- [13] Lepicovsky J., Chima R. V., McFarland E. R., Wood J. R., 2001, "On flow field periodicity in the NASA transonic flutter cascade", *J. Turbomachinery*, Vol. 123, pp. 501-509
- [14] Sabah M., 2001, "Etude expérimentale du bruit à large bande d'une grille d'aube. Application au calcul du bruit des soufflantes", Thèse de Doctorat n°2001-15, Ecole Centrale de Lyon
- [15] Brooks T.F *et al.*, 1984, "Airfoil trailing edge flow measurements and comparison with theory incorporating open wind tunnel corrections", *AIAA paper n° 84-2266*
- [16] Bailly C., Comte-Bellot G., 2003, "Turbulence", CNRS Editions, Paris ISBN : 2-271-06008-7
- [17] Amiet R. K., 1975, "Correction of open jet wind tunnel measurements for shear layer refraction", *AIAA paper n° 75-532*
- [18] Koch W., 1983, "Resonant acoustic frequencies of flat plate cascades", *J. Sound Vib.* Vol. 88 n°2, pp. 233-242
- [19] Parker R., 1966, "Resonance effects in wake shedding from parallel plates: some experimental observations", *J. Sound Vib.* Vol. 4 n°1, pp. 62-72
- [20] Brooks T. F., Pope D. S., Marcolini M. A., 1989, "Airfoil Self-Noise and Prediction", *NASA Reference Publication 1218*
- [21] Moreau S., Roger M., 2009, "Back-scattering correction and further extensions of Amiet's trailing-edge noise model. Part II : Application", *J. Sound Vib.*, Vol. 323, n°1-2, pp. 397-425.