# Mise en évidence d'instabilités hydrodynamiques au-dessus d'un matériau absorbant acoustique en conduite avec écoulement

# David Marx. Hélène Bailliet.

# Jean-Christophe Valière

Laboratoire d'études aérodynamiques Université de Poitiers Bat K 40. avenue du recteur Pineau 86022 Poitiers E-mail: david.marx@lea.univ-poitiers.fr

#### Yves Auregan

Laboratoire d'acoustique de l'Université du Maine Avenue Olivier Messiaen 72085 Le Mans

E-mail: yves.auregan@univ-lemans.fr

#### Résumé

Des matériaux absorbants acoustiques sont couramment utilisés pour diminuer la transmission sonore en conduite guidée, en particulier dans les réacteurs d'avion pour l'atténuation du bruit de soufflante. Si les caractéristiques acoustiques de ces matériaux sont bien connues en l'absence d'écoulement, ce n'est pas le cas en présence d'un écoulement rasant de vitesse élevée. Dans ce cas, la transmission acoustique tend à augmenter avec la vitesse de l'écoulement, et ce comportement est dû à une interaction écoulement/acoustique à proximité du matériau. L'objectif de la présente étude est de mettre en évidence la possibilité d'une instabilité hydrodynamique au-dessus d'un matériau présentant une transmission acoustique anormalement élevée. La mesure de l'écoulement par vélocimétrie laser (Vélocimétrie par Images de Particules) permet d'associer la présence de structures tourbillonnaires convectées par l'écoulement à l'augmentation de la transmission acoustique.

Acoustic liners are used in ducted flows as a way to decrease sound transmission. They are of much use in turbofan engines noise reduction. Liners behaviour is usually well predicted in the absence of flow but this is not true anymore in the presence of high speed grazing flows. As a general trend, sound transmission increases with flow velocity due to an acoustic/flow interaction in the vicinity of the liner. In this paper, some evidence of a flow instability accompanying large sound transmission is provided. Namely, when sound transmission is large, some vortical structures convected with the mean flow have been detected using Particle Image Velocimetry (PIV).

l'augmentation du trafic aérien et le rapprochement des aéroports des villes, la réduction des nuisances sonores causées par les avions devient une préoccupation majeure des avionneurs. Deux origines principales peuvent être distinguées : le bruit d'origine aérodynamique (fuselage, trains d'atterrissage) particulièrement présent en phase d'approche, et le bruit des moteurs présent dans les deux phases de décollage et d'approche. La réduction de ce bruit peut se faire par deux approches différentes: un traitement à la source dès la conception ou l'absorption du bruit d'une manière active ou passive. Les industriels aéronautiques utilisent des traitements acoustiques absorbants sur une surface importante de leurs systèmes propulsifs de facon à réduire les bruits de soufflante, de combustion, de turbine et de jet. L'optimisation de ces traitements passe par une meilleure connaissance de la structure du champ acoustique à réduire d'une part, et par la bonne connaissance des propriétés du matériau acoustique utilisé d'autre part. Une partie de ces propriétés est régie

par l'interaction entre le champ acoustique et l'écoulement principal au niveau du matériau, et c'est cette interaction qui fait l'objet de la présente étude. Le traitement optimal à employer est caractérisé par son impédance acoustique, la conception imposant par ailleurs des contraintes en termes d'épaisseur maximale et de poids.

La figure 1 représente un réacteur d'avion, dans lequel des matériaux acoustiques absorbants tapissent la nacelle. La figure montre aussi la soufflante, importante source de bruit. Un exemple de matériau est représenté sur la figure 2. Il s'agit d'un matériau à 2 degrés de liberté, formé de deux couches de résonateurs acoustiques [1]. Le pic d'absorption acoustique du matériau correspond à la fréquence de résonance de ces résonateurs. Dans un réacteur d'avion, le bruit de la soufflante est composé d'un spectre de raies aux fréquences de passage des pales, ce qui correspond à quelques kilohertz (auquel s'ajoute un bruit plus large bande), les résonateurs sont donc accordés pour atténuer ces raies fréquentielles.

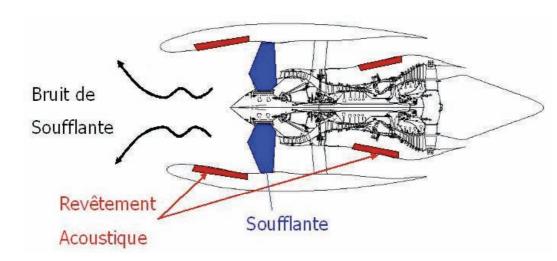


Fig. 1: Réacteur d'avion avec la soufflante (en bleu), qui émet du bruit principalement vers l'amont du réacteur (flèches noires). Les matériaux absorbants acoustiques (en rouge) placés dans la nacelle atténuent le bruit émis lors de sa propagation

Turbofan Engine with the fan (in blue) and the acoustic liner (in red), which reduces the emitted noise (black arrows)



Fig. 2: Exemple d'absorbant acoustique à deux degrés de liberté. On voit les deux rangées de résonateurs en nid d'abeille placées l'une au-dessus de l'autre, et la plaque perforée qui les sépare de l'écoulement moyen Example of two degrees of freedom acoustic liner, with a double layer of resonators, separated from the mean flow by a perforated plate.

L'impédance acoustique qui caractérise les traitements acoustiques absorbants peut être facilement modélisée et mesurée en l'absence d'écoulement, dans un tube de Kundt par exemple. Tout se complique en présence d'un écoulement rasant où l'interaction son/écoulement moyen demeure difficile à modéliser [2]. Et ceci est particulièrement vrai à proximité du matériau absorbant où l'écoulement possède un fort caractère tourbillonnaire. Des études analytiques ont montré que cette interaction peut résulter en des modes hydrodynamiques instables [3] («hydrodynamiques» dans le sens où ces modes sont convectés à la vitesse de l'écoulement, et non à celle du son). Brandes et Ronneberger [4] ont montré expérimentalement que dans une conduite cylindrique traitée l'écoulement peut avoir comme effet une nette augmentation de la transmission acoustique ; ils ont par ailleurs montré l'existence de modes convectés à la vitesse de l'écoulement. Récemment, un phénomène similaire d'amplification du son par un matériau absorbant a été observé par Aurégan et Leroux [5]. Ainsi au passage des matériaux, utilisés initialement pour absorber le son, et pour certaines conditions d'écoulement, l'onde acoustique est amplifiée du fait d'un couplage aéroacoustique. Dans les deux cas, le phénomène d'amplification a été observé avec des matériaux peu résistifs.

L'objectif de la présente étude est de mettre en évidence des modes hydrodynamiques instables au-dessus de matériaux absorbants acoustiques en présence d'un écoulement rasant. Une configuration et un matériau très semblables à ceux de la référence [5] sont utilisés. Des mesures acoustiques montrent dans un premier temps qu'à un nombre de Mach suffisant, le matériau ne remplit plus son rôle d'absorbant et amplifie en fait l'énergie de l'onde acoustique incidente. Dans un second temps, l'écoulement moyen est caractérisé en termes de cartographies de vitesse obtenues par vélocimétrie laser (Vélocimétrie par Images de Particules ou PIV). Ces cartographies montrent que des structures tourbillonnaires sont convectées le long du matériau. La génération de telles structures semble confirmer l'existence d'un mode hydrodynamique instable.

# Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est représenté sur la figure 3. Une conduite de section rectangulaire 8 cm x 3 cm est alimentée par un ventilateur. Un haut-parleur affleurant permet la génération d'une onde acoustique (plane). Une contraction de 20 cm de longueur ramène la section à 8 cm x 2 cm. Elle est suivie de la section-test de 60 cm de longueur. Une portion de celle-ci est recouverte du matériau acoustique étudié, et des fenêtres en verre permettent un accès optique pour les lasers et caméra. La section test avec le matériau est représentée à la figure 4. Le matériau est constitué de petits canaux de section carrée avec un côté E=1 mm, séparés par des cloisons d'épaisseur e=0,1 mm. Ce type de matériau est typiquement utilisé dans les pots d'échappement catalytiques. La longueur

des résonateurs, H=8 cm, correspond à une fréquence de résonance de 1 kHz. La transmission acoustique doit donc chuter à cette fréquence. La longueur totale de la section traitée avec le matériau est L=7,5 cm. En aval de la section test est positionnée une terminaison anéchoïque.

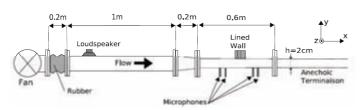


Fig. 3: Schéma du dispositif expérimental. Echelles en x et en y arbitraires Experimental setup. Scales are different in x and y-directions

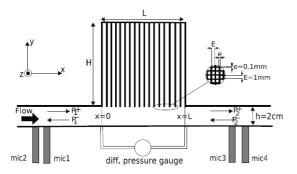


Fig. 4: Vue de la section test. Celle-ci a une section rectangulaire, de hauteur h=2cm dans la direction y et de profondeur 8cm dans la direction z. Sur le haut de la section est placé un absorbant acoustique View of the test section. It is of rectangular cross-section 8cm x 2cm and its top is covered with an acoustic liner

Dans la partie centrale de la veine, la vitesse de l'écoulement, paramètre régissant les phénomènes étudiés, peut atteindre 108 m/s, soit un nombre de Mach M=0,3.

Deux types de mesures sont réalisés. D'abord, la transmission du mode plan est mesurée à l'aide des 4 microphones (mic 1 à mic 4 sur la figure 4), en excitant la conduite au niveau du haut-parleur avec un sinus glissant. Ensuite, des mesures de l'écoulement moyen sont effectuées. Une mesure de la chute de pression moyenne peut être réalisée à l'aide du capteur différentiel de pression (figure 4). Et surtout, la vitesse de l'écoulement est mesurée par vélocimétrie laser. La présentation de ces mesures fait l'objet de la section suivante.

# Dispositif de mesure PIV

L'écoulement est mesuré avec une technique de vélocimétrie par images de particules, dites PIV (pour Particle Image Velocimetry en anglais). Cette technique consiste à prendre à l'aide d'une caméra rapide deux images successives d'un ensemble de particules illuminées par une nappe laser [6]. La corrélation des deux images numériques permet de remonter au déplacement des particules puis à leur vitesse moyennant une hypothèse de mouvement rectiligne uniforme. Typiquement, les deux

images sont ici séparées d'un intervalle de temps de  $1\,\mu$ s. A partir d'un doublet d'images, un champ de vecteur vitesse sur toute une zone de l'espace est donc obtenu, ce qui est particulièrement utile pour l'observation de structures dans l'écoulement. Cette technique est par ailleurs non intrusive, bien qu'il faille réaliser un ensemencement de l'écoulement avec des particules de taille micrométrique,

ici à base de fumée d'encens. Notons que la technique PIV, issue de la mécanique des fluides, est essentiellement utilisée pour des mesures d'écoulement, mais peut se révéler très utile en acoustique pure (fluide oscillant sans écoulement moyen) [7].

Une mesure 2D de la vitesse est réalisée dans un plan perpendiculaire au matériau acoustique, dans la section centrale de la veine. La position de la nappe laser est

représentée à la figure 5. La zone de mesure est d'environ 2,5 cm en x et 1,8 cm en y. Elle ne couvre pas l'intégralité de la longueur (7,5 cm) du traitement mais peut être déplacée. La résolution spatiale du champ de vitesse obtenu est d'environ 0,15 mm. La zone de mesure peut être située aussi bien du côté du matériau acoustique que du côté de la paroi rigide opposée, principalement pour permettre des comparaisons des champs de vitesse entre la paroi rigide et la paroi traitée. Notons que la y=0 correspond au maximum de vitesse moyenne (au centre du canal), le matériau étant situé en y=0,01 m, et la paroi lisse en y=-0,01 m. Pour permettre des comparaisons, on utilisera au lieu de la coordonnée y, la coordonnée w représentant la distance à la paroi (qu'elle soit rigide ou traitée). L'abscisse x a son origine au début de la portion traitée du matériau (voir figure 4).

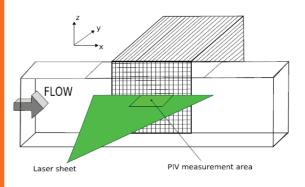


Fig. 5: Mesure PIV de l'écoulement : représentation de la nappe laser, et de la zone de mesure PIV measurement of the flow: view of the laser sheet and of the measurement area

Pour chaque configuration étudiée 1 000 champs de vecteurs vitesse instantanés  $\mathbf{u}(x,y,t_i)$  sont mesurés à 1 000 instants  $t_i$ , avec  $\mathbf{u}=(u,v)$  dans les directions x et y. La moyenne de ces champs fournit un champ moyen  $\mathbf{U}(x,y)$  avec  $\mathbf{U}=(U,V)$ ; 1 000 champs de vitesse fluctuante peuvent ensuite être calculés selon  $\mathbf{u}'(x,y,t_i)=\mathbf{u}(x,y,t_i)$ .  $\mathbf{U}(x,y)$ , avec  $\mathbf{u}'=(u',v')$ . Une valeur typique de la fluctuation de vitesse est donnée par sa valeur rms (root mean square, ou valeur quadratique moyenne),  $\mathbf{u}_{rms}=(\mathbf{u}_{rms},v_{rms})$ .

Signalons enfin que les 1 000 champs de vitesse sont mesurés à des instants  $t_i$  complètement aléatoires, c'est-à-dire qu'aucun verrouillage de phase n'a été effectué lors de la mesure des champs de vitesse. Il est toutefois possible de reclasser les 1 000 champs de vitesse suivant un certain angle de phase  $\Phi$ . En définissant dix phases  $\Phi_j$ =2 $j\varpi$ /10, j=1...10, des moyennes de phase sont effectuées pour le champ de vitesse. Plus de détails sont disponibles dans la référence [8].

# Résultat des mesures acoustiques

Une onde acoustique plane est introduite dans la veine à l'aide du haut-parleur (figure 3). De chaque côté du matériau, l'onde acoustique peut être décomposée en une onde incidente et une onde réfléchie, toutes deux complexes. Celles-ci sont respectivement notées  $P_1^+$  et  $P_1^-$  en amont du matériau, et  $P_2^+$  et  $P_2^-$  en aval (voir figure 4). Une mesure à deux microphones de chaque côté du matériau donne accès à ces quatre grandeurs [9]. On en déduit le taux de transmission au passage du matériau,  $T = P_2^+/P_1^+$ , ainsi que les coefficients de réflexion amont,  $R_1 = P_1^-/P_1^+$ , et aval,  $R_2 = P_2^-/P_2^+$ . La variation du taux de transmission avec la fréquence est donnée en figure 6 pour différents nombres de Mach. En l'absence d'écoulement (M=0), le taux de transmission vers f=1 kHz (fréquence de résonance du matériau) tend vers 0.

Ce comportement est attendu et correspond au fonctionnement visé du matériau, accordé ici pour supprimer la composante à 1 kHz. Lorsque le nombre de Mach augmente, une bosse inattendue apparaît vers 1 kHz, dont l'amplitude croît avec le nombre de Mach. Au plus haut nombre de Mach, M=0,3, le taux de transmission atteint 0,9 à f=1,1 kHz. Cette nouvelle valeur de la fréquence correspond toujours à la résonance du matériau, sachant que la température du fluide a augmenté d'une vingtaine de degrés à cette vitesse de l'écoulement. L'apparition d'une bosse a été observée précédemment dans les références [4] et [5], avec des taux de transmission pouvant atteindre 3 [5].

Les mesures des différentes ondes incidentes et réfléchies donnent aussi accès aux flux d'énergie acoustique entrant et sortant du matériau [9]. Ceux-ci sont respectivement donnés par :

$$E_{in} = (1+M)^{2} |P_{1}^{+}|^{2} + (1-M)^{2} |P_{2}^{-}|^{2}$$
et
$$E_{out} = (1+M)^{2} |P_{2}^{+}|^{2} + (1-M)^{2} |P_{1}^{-}|^{2}$$

La dissipation d'énergie acoustique par le matériau normalisée est alors donnée par :

$$\frac{E_{in} - E_{out}}{E_{in}}$$

L'évolution de cette dernière en fonction de la fréquence est donnée sur la figure 7. On constate un fait surprenant

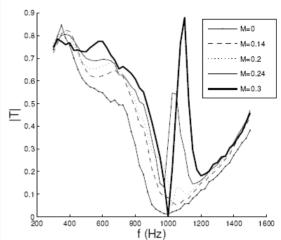


Fig. 6 : Module du taux de transmission en fonction de la fréquence. Variation of the acoustic transmission with frequency.

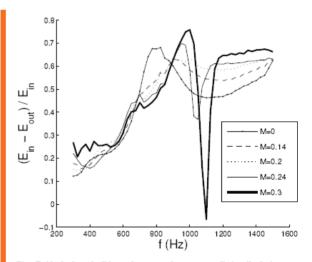


Fig. 7: Variation de l'énergie acoustique normalisée dissipée par le matériau en fonction de la fréquence. Frequency variation of the acoustic energy dissipated by the material.

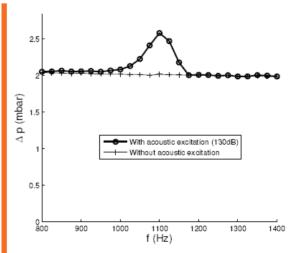


Fig. 8: Variation de la chute de pression (hydrodynamique) moyenne entre les extrémités du matériau en fonction de la fréquence. L'onde acoustique incidente (P¹) a un niveau fixé à 130 dB. Frequency variation of the mean pressure drop across the liner, with a controlled incident level (P¹) of 130 dB.

à M=0,3 pour f=1,1 kHz: la dissipation acoustique devient négative, ce qui signifie que le matériau produit de l'énergie acoustique au lieu d'en dissiper.

Les mesures acoustiques montrent donc, à la fréquence de résonance du matériau, et pour un écoulement de nombre de Mach élevé, à la fois une forte transmission et une production d'énergie acoustique, à l'encontre du résultat attendu. Ces phénomènes peuvent être expliqués par une interaction entre l'écoulement et l'onde acoustique. La suite de l'article consiste ainsi en l'étude de l'écoulement.

### Résultat des mesures d'écoulement

Dans un premier temps, la chute de pression moyenne entre les extrémités du matériau a été mesurée à l'aide du capteur de pression différentiel (voir figure 4). On excite éventuellement la conduite avec une onde acoustique plane de fréquence variable, mais de niveau incident fixé à 130 dB (c'est-à-dire  $20*\log(P_i^*/P_0)=130$  dB). La chute de pression est représentée à la figure 8 en fonction de la fréquence. En l'absence d'excitation acoustique (le résultat est alors bien sûr indépendant de la fréquence), la chute de pression vaut de l'ordre de 2 mbar. Avec excitation acoustique, la chute de pression varie avec la fréquence et connaît un pic à 1,1 kHz (fréquence de résonance du matériau), à plus de 2,5 mbar. Ceci montre que l'écoulement moyen est suffisamment modifié par l'effet de l'onde acoustique à cette fréquence pour qu'une augmentation de la chute de pression de 20% soit créée,

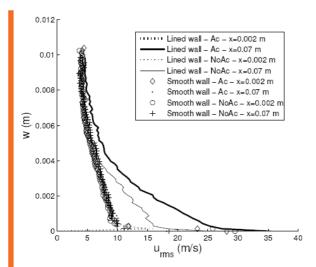


Fig. 9: Profils de l'amplitude de fluctuation rms de la composante axiale de la vitesse. Deux positions axiales de mesure sont considérées : x=0,002 m au tout début de la portion traitée de la veine, et x=0,07 m en fin de portion traitée. La coordonnée w est la distance par rapport à la paroi, qui peut être soit la paroi rigide (smooth wall), soit le matériau (lined wall). Enfin, les mesures sont faites soit avec une excitation acoustique à f=1,1 kHz via le haut-parleur (Ac), soit sans excitation acoustique (NoAc). Le nombre de Mach est M=0,3. Axial velocity fluctuation profiles (rms). Measurement station x=0.002 m is at the beginning of the lined part of the tube, while station x=0,07 m is at the end of the lined section of the tube. The w-coordinate represents the distance to the wall, either the lined one or the smooth (rigid) one. Measurements are done with (Ac) or without (NoAc) acoustic excitation at frequency f=1,1 kHz. Mach number is M=0,3.

laissant supposer que la production d'énergie acoustique observée ci-dessus résulte d'un transfert d'énergie de l'écoulement moyen vers l'acoustique.

Ces observations conduisent naturellement à caractériser l'écoulement. Des mesures PIV ont été effectuées au plus haut nombre de Mach accessible, M=0,3, ce dernier ayant fait apparaître les comportements acoustiques les plus marqués. Deux types de mesures ont été réalisés: des mesures sans excitation acoustique ('NoAc'); et des mesures avec excitation acoustique ('Ac') où une onde de fréquence f=1,1 kHz est introduite dans la conduite au niveau du haut-parleur. Cette fréquence correspond à la résonance du matériau pour M=0,3. Considérons d'abord les statistiques de l'écoulement, à travers la fluctuation rms de la vitesse axiale, représentée pour différentes configurations en figure 9. Les profils sont donnés soit en x=0,002 m, au tout début de la portion de la veine traitée par le matériau, soit en x=0,07 m, en fin de portion traitée. Les profils sont représentés à proximité du matériau acoustique («Lined wall») et à proximité de la paroi rigide faisant face au matériau («Smooth wall»). A x=0,002 m, les différents profils sont très similaires. Ainsi, avant la zone traitée, aucun phénomène n'est encore apparu qui puisse distinguer l'écoulement à proximité du matériau de celui à proximité de la paroi rigide. En x=0,07 m, les profils à proximité de la paroi rigide sont identiques à ceux obtenus en x=0,002 m. L'écoulement n'est donc pas modifié à proximité de la paroi lisse au passage de la portion traitée de la veine, qu'il y ait ou non excitation acoustique. Sur la figure 9, seuls deux profils ressortent en fait, mesurés en fin de portion traitée, à proximité du matériau. Ces profils présentent des fluctuations de vitesse supérieures à celles qui ont été obtenues en début de matériau. De plus, le profil avec excitation acoustique présente des valeurs supérieures au profil obtenu sans excitation acoustique. Ainsi l'excitation acoustique à la fréquence de résonance du matériau a pour effet une modification de l'écoulement. Notons que l'augmentation des fluctuations de vitesse de l'écoulement obtenue ici est de l'ordre de 5 à 10 m/s à proximité du matériau. La

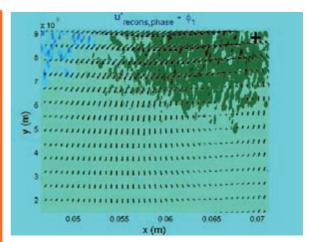


Fig. 10 : Exemple de cartographie du vecteur fluctuation de vitesse en moyenne de phase, ici pour la phase Φ1. Excitation acoustique à 1,1 kHz, avec M=0,3. La couleur représente la valeur de la vorticité Vector map of the phase-averaged fluctuation velocity, at one of the 10 available phases, here Φ1. M=0.3, f=1.1kHz. Colors represent the vorticity

vitesse associée à l'onde acoustique est quant à elle de l'ordre de 0,2 m/s. Il est donc clair que ce sont les effets induits par l'onde acoustique, et non pas l'onde acoustique elle-même, qui sont ici mesurés.

Intéressons nous pour finir aux structures de l'écoulement pouvant expliquer les changements statistiques observés sur la figure 9. La figure 10 (page 43) donne par exemple le champ de vecteur vitesse instantané en moyenne en phase, à la phase  $\Phi_1$ , avec la vorticité correspondante, dans le cas où l'on excite la conduite avec une onde acoustique à f=1,1 kHz. La figure fait apparaître un

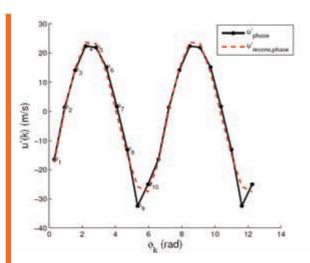


Fig. 11: Evolution avec la phase de la fluctuation de vitesse en moyenne de phase au point indiqué par une croix sur la figure 10. La courbe a été dupliquée (2 x 10 phases) pour une meilleure visibilité de la périodicité Variation with the phase of the phase-averaged velocity fluctuations at the point indicated by a cross in figure 10

tourbillon au niveau de la paroi supérieure (le matériau). Les autres phases,  $\Phi_2$ ...  $\Phi_{10}$ , montrent un tourbillon identique mais qui est décalé dans l'espace à cause de son entrainement par l'écoulement moyen. Ainsi le tourbillon est-il convecté le long du matériau. D'autres types de mesure ont par ailleurs confirmé cette convection, à une vitesse de l'ordre de 50 m/s (cette vitesse apparaît classiquement comme une moyenne entre la vitesse nulle à la paroi et la vitesse de 108 m/s au centre de la veine). L'évolution de la vitesse axiale fluctuante en movenne de phase en un point particulier du domaine est représentée à la figure 11. On constate que la vitesse oscille sinusoïdalement avec une amplitude de plus de 20 m/s, du fait du passage périodique des tourbillons. L'amplitude d'oscillation est remarquablement élevée, si l'on se rappelle que la vitesse de l'excitation acoustique est au plus de 0,2 m/s. Le couplage aéroacoustique audessus du matériau peut donc être important.

Il faut attirer l'attention sur le fait que la cartographie de la figure 10 est obtenue en fin de portion traitée, pour x>0,05 m. Des mesures plus globales (non représentées) font apparaître une croissance axiale de ces tourbillons, typiquement entre x=0,02 m et x=0,05 m. Ainsi, même si une étude plus complète reste à faire, il paraît probable qu'une instabilité hydrodynamique existe, avec une zone

de croissance axiale linéaire entre x=0 et x=0,02 m, et que les tourbillons observés en représente la saturation non-linéaire.

# Conclusion

Plusieurs types de mesure ont été conduits sur un traitement acoustique de paroi dans un canal. A un nombre de Mach suffisamment élevé, le matériau acoustique n'atténue pas l'onde acoustique incidente à sa fréquence de résonance comme il le devrait, mais au contraire fournit de l'énergie acoustique. Dans le même temps, l'écoulement hydrodynamique subit une perte de charge importante, montrant une forte interaction entre l'onde acoustique et l'écoulement moyen. Enfin, en extrémité de portion traitée, des tourbillons sont convectés à la surface du matériau. Ces tourbillons trouvent selon toute probabilité leur origine dans une instabilité hydrodynamique qui se développe depuis le bord amont du matériau. Des études restent à faire pour étudier l'instabilité dès sa naissance au début du matériau absorbant.

### Remerciements

Ces recherches bénéficient du soutien financié de la FRAE (Fédération de Recherche pour l'Aéronautique et l'Espace) dans le cadre du projet COMATEC (COmportement des MATériaux acoustiques sous ECoulement).

# Références bibliographiques

- [1] Drevon (2004). Measurement Methods and Devices Applied to A380 Nacelle Double Degree-Of-Freedom Acoustic Liner Development. 10th AIAA-CEAS Aeroacoustic Conference. AIAA Paper 2004-2907.
- [2] Malmary C., Carbonne S., Aurégan Y., Pagneux V. (2001). Acoustic impedance measurement with grazing flow, Proceedings of the 7th AIAA-CEAS Aeroacoustics conference, AIAA Paper 2001-2193.
- [3] Rienstra S. W. (2003). A classification of duct modes based on surface waves. Wave motion  $37,\,119-135.$
- [4] Brandes M., Ronneberger D. (1995). Sound Amplication in flow ducts lined with a periodic sequence of resonators, 10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, AIAA paper 95-126.
- [5] Aurégan Y., Leroux M. (2008). Experimental evidence of an instability along an impedance wall with flow, J. sound Vib. 317, 432-439.
- [6] Adrian R. J. (1991). Particle Imaging technique for experimental fluid mechanics. Ann. Rev. Fluid Mech. 23, 261-304.
- [7] Marx D., Bailliet H., Valière J.-C. (2008). Analysis of the acoustic flow at the abrupt change of section in an acoustic waveguide using PIV and POD. Acta Acustica united with Acustica 94, 54-65.
- [8] Marx D., Aurégan Y., Bailliet H., Valière J.-C. (2008). Sound amplification in a lined duct with flow: PIV measurements. 2nd ASA-EEA Joint Meeting (Acoustics'08) / Euronoise 2008 Conference, 30juin-4juillet 2008, Paris, France.
- [9] Holland K. R., Davies P. O. A. L. (2000). The measurement of sound power flux in flow ducts. J. Sound Vib. 230(4), 915-932.