



HAL
open science

Effet du débit sur le bruit propre d'un étage soufflante/redresseur en présence d'une bulle de recirculation

Jean Al Am, Vincent Clair, Alexis Giaouque, Jérôme Boudet, Fernando Gea-Aguilera

► To cite this version:

Jean Al Am, Vincent Clair, Alexis Giaouque, Jérôme Boudet, Fernando Gea-Aguilera. Effet du débit sur le bruit propre d'un étage soufflante/redresseur en présence d'une bulle de recirculation. 16ème Congrès Français d'Acoustique, CFA2022, Société Française d'Acoustique; Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Apr 2022, Marseille, France. hal-03848139

HAL Id: hal-03848139

<https://hal.science/hal-03848139>

Submitted on 10 Nov 2022

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.



16^{ème} Congrès Français d'Acoustique
11-15 Avril 2022, Marseille

Effet du débit sur le bruit propre d'un étage soufflante-redresseur en présence d'une bulle de recirculation

J. Al-Am ^a, V. Clair ^a, A. Giaque ^a J. Boudet ^a F. Gea-Aguilera ^b

^a Univ Lyon, École Centrale de Lyon, INSA Lyon, Université Claude Bernard Lyon I, CNRS, Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique, UMR 5509, 36 Avenue Guy de Collongue, F-69134, Ecully, France.

jean.al-am@ec-lyon.fr

^b Safran Aircraft Engines, 77550 Moissy-Cramayel, France.



Dans cette étude, le bruit propre d'un étage soufflante-redresseur (ou rotor-stator) d'un turboréacteur est étudié en phase d'approche. Des simulations aux grandes échelles (SGE) résolues en paroi sont effectuées sur une tranche radiale d'un étage soufflante-redresseur à fort taux de dilution, l'ECL5, conçu à l'École Centrale de Lyon (ECL). En régime de fonctionnement partiel, l'angle d'incidence des aubes du rotor est important et une bulle de recirculation apparaît à proximité du bord d'attaque sur l'extrados, contrôlant la transition de la couche limite vers la turbulence. Cette zone de décollement est caractérisée par un fort niveau de fluctuations de pression, interagissant avec la paroi du rotor et générant une source de bruit propre s'additionnant au bruit de bord de fuite des pales classiquement étudié dans la littérature. Alors que ce dernier est majoritairement un bruit à large bande, la bulle de recirculation est source de composantes tonales à haute fréquence. L'objectif de cette étude est d'analyser les effets du débit massique sur les caractéristiques de la bulle de recirculation et du bruit associé, dans un étage soufflante-redresseur. Le maillage utilisé pour les SGEs est adapté pour assurer une propagation directe des ondes acoustiques sur une distance d'une corde en amont et en aval de l'étage. Des comparaisons aérodynamiques et acoustiques entre les différents débits sont effectuées. On observe que la taille de la bulle diminue avec l'augmentation du débit, réduisant de façon très significative l'amplitude des pics observés à haute fréquence sur les spectres acoustiques. Une technique de suivi dynamique des modes est utilisée pour suivre l'évolution spatio-temporelle des modes liés à ces pics.

1 Introduction

L'étage soufflante-redresseur d'un turboréacteur est l'un des contributeurs majeurs du bruit généré par les moteurs. Avec la nouvelle génération des moteurs à très haut taux de dilution qui doivent assurer un meilleur rendement de propulsion, le diamètre de la soufflante augmente, alors que la vitesse du jet en sortie diminue. En conséquence, il est attendu que la contribution du bruit de la soufflante au bruit total du moteur augmente [1, 2].

Les mécanismes principaux du bruit d'un étage soufflante-redresseur sont (i) le bruit de jeu de la soufflante, (ii) le bruit d'interaction rotor-stator et (iii) le bruit propre des profils [3, 4]. Le bruit d'interaction est dû à l'interaction entre les sillages turbulents de la soufflante et les aubes du redresseur situées dans le conduit secondaire. Le bruit de jeu est associé à l'écoulement tourbillonnaire et instationnaire issu du jeu entre les aubes de la soufflante et le carter. Cet écoulement peut ensuite se diffracter au niveau du bord de fuite (BF) en tête de pale ou bien interagir avec l'écoulement moyen ou bien avec la pale adjacente pour générer du bruit. Le bruit propre est associé à l'écoulement turbulent dans les couches limites des aubes. Il a été identifié comme source de bruit importante dans des applications diverses telles que les éoliennes [5], les ventilateurs à basse vitesse [6] ou les moteurs d'avion [7], et a fait l'objet de multiples études [8, 9, 10]. Lorsque l'écoulement reste attaché sur la surface des profils, les structures turbulentes dans les couches limites se diffractent en passant au niveau du bord de fuite (BF) et génèrent du bruit. C'est notamment le cas pour une soufflante en régime de fonctionnement nominal. Si le point de fonctionnement est à régime partiel, en phase d'approche par exemple, une zone de décollement peut apparaître proche du bord d'attaque (BA) de la soufflante, entraînant la formation d'une bulle de recirculation dans cette région. Ce décollement est notamment dû à un fort angle d'incidence de la soufflante. Dans ces cas, la bulle de recirculation joue un rôle important dans la transition vers la turbulence de la couche limite. En outre, une source de bruit additionnelle apparaît due aux fluctuations importantes des

grandeurs aérodynamiques dans la zone de la bulle [11, 12]. Ce mécanisme de décollement ainsi que le bruit associé ont été étudiés dans la littérature expérimentalement [13, 14] et numériquement [15, 16, 17, 18, 19] sur des profils isolés.

Dans un étage soufflante-redresseur, la présence d'une bulle de recirculation et sa contribution acoustique ont été identifiés [20], mais l'analyse des caractéristiques de cette bulle et de son effet acoustique est restée très limitée. En conséquence, l'objectif de cette étude est l'analyse des propriétés aérodynamiques et du mécanisme de génération du bruit d'une bulle de recirculation dans un étage soufflante-redresseur, en utilisant des simulations grandes échelles (SGE). En particulier, ce papier s'intéresse aux effets du débit massique sur l'évolution de la bulle et sur le bruit associé.

2 Configuration numérique

2.1 Domaine de calcul

La géométrie considérée pour les SGEs est une version de l'ECL5, un étage soufflante-redresseur représentatif d'une architecture moteur à très haut taux de dilution et conçu à l'École Centrale de Lyon [21], comprenant 16 pales de rotor et 32 aubes de stator. Pour limiter le temps de calcul, une tranche radiale d'un secteur périodique (une aube du rotor et deux aubes du stator) a été simulée. La tranche est centrée à 80% de hauteur de veine et elle représente 12% de l'envergure complète. Le domaine s'étend de 3.75 cordes (c) de soufflante en amont à 4.25 cordes de redresseur en aval.

2.2 Paramètres numériques

Le code AVBP, développé par le CERFACS [22], est utilisé pour résoudre les équations de Navier-Stokes compressibles filtrées en utilisant le schéma volumes finis TTGC (Two Steps Taylor Galerkin scheme [23]) et le modèle de sous-maille Sigma [24]. Sur les sections d'entrée et de sortie, des conditions aux limites caractéristiques non réfléchissantes [25] sont utilisées. En entrée, l'écoulement

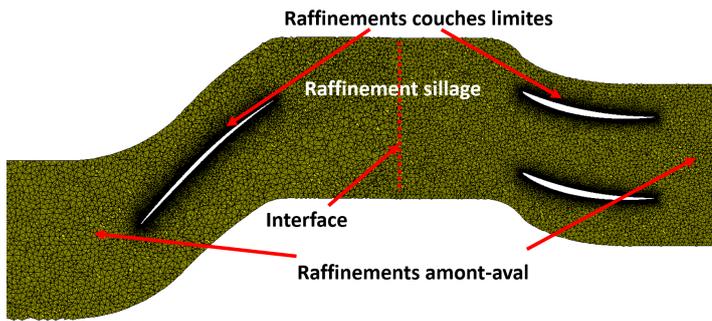


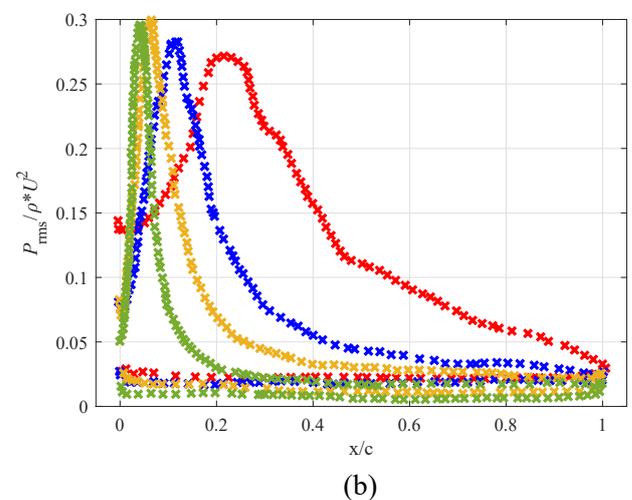
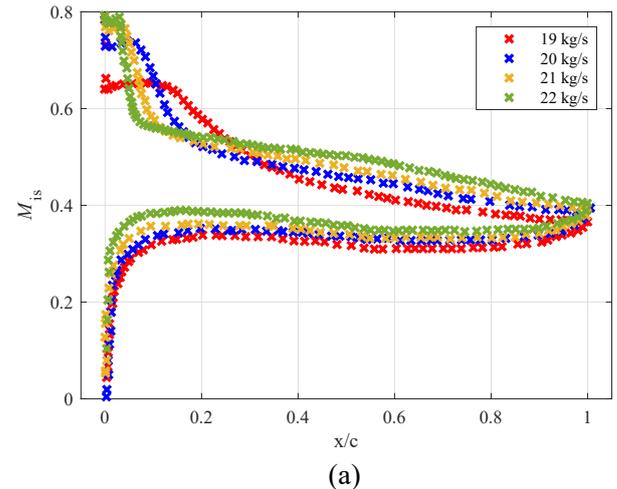
FIGURE 1 – Vue aube à aube du maillage.

est homogène et purement axial, et des conditions de pression totale ($p_{\text{tot}} = 101325 \text{ Pa}$) et de température totale ($T_{\text{tot}} = 300 \text{ K}$) sont imposées. En sortie, la pression statique est ajustée afin d'obtenir le débit massique réduit ρu désiré en amont de la soufflante, obtenu à partir de calculs RANS sur l'envergure complète avec le débit massique choisi. Une condition de périodicité angulaire est utilisée sur les faces latérales et une condition de paroi glissante sur les faces radiales. Sur les surfaces des aubes du rotor et du stator, des conditions aux limites d'adhérence sont adoptées.

Dans cette étude, les SGEs sont effectuées en condition d'approche à une vitesse de rotation de $\Omega = 6050 \text{ tr/min}$, correspondant à 55% de la vitesse de rotation nominale. A cette vitesse de rotation, le débit massique nominal est $\dot{m} = 20 \text{ kg/s}$, et le taux de pression totale est 1.1. Outre le débit massique nominal, trois autres débits, 19 kg/s, 21 kg/s et 22 kg/s ont été considérés. Toutes les valeurs du débit massique correspondent à la configuration à envergure complète.

2.3 Caractéristiques du maillage

Les différentes zones de raffinement du maillage sont présentées sur une vue aube à aube dans la Figure 1. Un maillage hybride non-structuré constitué de 80 millions d'éléments est utilisé. Il est composé de prismes sur les parois, de tétraèdres dans le domaine fluide et de pyramides dans les liaisons entre les prismes et les tétraèdres. Au niveau des parois, les valeurs moyennes de x^+ , y^+ et z^+ sont choisies dans la gamme convenable pour une SGE résolue en paroi ($x^+ = z^+ = 35$ et $y^+ = 1$). Loin des parois, les tailles caractéristiques des éléments respectent les critères turbulents et acoustiques établis dans des travaux précédents [26]. A partir de ces critères, le maillage a été conçu pour transporter avec de faibles niveaux de dissipation et de dispersion les sillages ainsi que les ondes acoustiques sur une distance d'une corde en amont du rotor et en aval du stator. Le temps de calcul par rotation de la soufflante (soit 32 passages d'aubes de stator) est 280 000 CPUh. Trois tours de soufflante sont effectués pour assurer les convergences statistique et numérique, et quatre tours additionnels pour les enregistrements instationnaires.

FIGURE 2 – Nombre de Mach isentropique moyen M_{is} (a) et fluctuations RMS de pression P_{rms} (b) autour de l'aube du rotor pour les différents débits.

3 Effets du débit massique

Dans cette section, les effets de la variation du débit massique sur les caractéristiques de la bulle de recirculation et sur le bruit associé sont étudiés.

3.1 Résultats aérodynamiques

Les distributions du nombre de Mach isentropique M_{is} , relié à la distribution de la pression statique sur l'aube, et des fluctuations RMS de pression P_{rms} autour de l'aube du rotor sont présentées dans la Figure 2. Pour les différents cas, un gradient de pression favorable est observé sur l'intrados de l'aube. Sur l'extrados, un plateau de M_{is} est observé proche du BA, indiquant la présence d'une bulle de recirculation. En aval de la bulle, la couche limite est soumise à un gradient de pression adverse jusqu'au BF. La région de la bulle est caractérisée par de forts niveaux de P_{rms} , tel qu'illustré dans la Figure 2 (b). En comparant les différents débits, on remarque qu'avec la diminution du débit, la bulle est

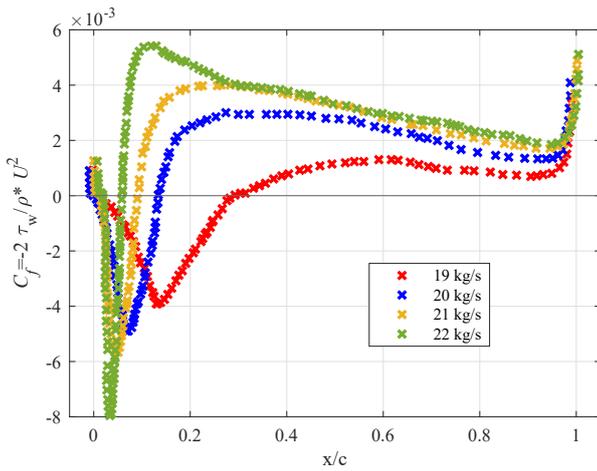


FIGURE 3 – Coefficient de frottement moyen C_f le long de l’extrados de l’aube du rotor pour les différents débits.

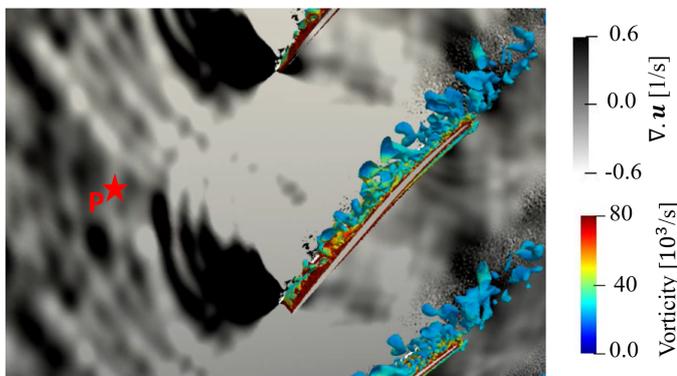


FIGURE 4 – Contours instantanés de dilatation et iso-surface du critère Q ($Qc^2/U^2 = 80$) colorée par la norme de la vorticité pour le cas $\dot{m} = 20$ kg/s. L’étoile indique la position de la sonde où les enregistrements stationnaires sont effectués pour le calcul de la densité spectrale de puissance.

poussée vers l’aval sur l’extrados de l’aube et la valeur maximale de P_{rms} diminue. Toutefois, l’extension du pic de P_{rms} augmente lorsque le débit diminue. L’intensité du bruit propre additionnel lié à la bulle de recirculation est partiellement lié aux niveaux de P_{rms} .

Une autre façon de caractériser la bulle de recirculation est d’observer le coefficient de frottement C_f . La Figure 3 montre une comparaison de C_f le long de l’extrados de l’aube du rotor pour les différents débits. Pour tous les cas, une zone de C_f négatif est observée proche du BA de l’aube, associée à la bulle de recirculation. En aval de cette région, C_f reste positif jusqu’au BF. Les positions où C_f est nul peuvent être considérées comme le début et la fin de la bulle, respectivement, ce qui permet de définir la taille de la bulle. Comme décrit sur le M_{is} , le point de ré-attachement se déplace vers l’aval quand le débit est réduit, conduisant à une bulle de recirculation plus longue.

Les contours instantanés de la dilatation ($\nabla \cdot \mathbf{u}$)

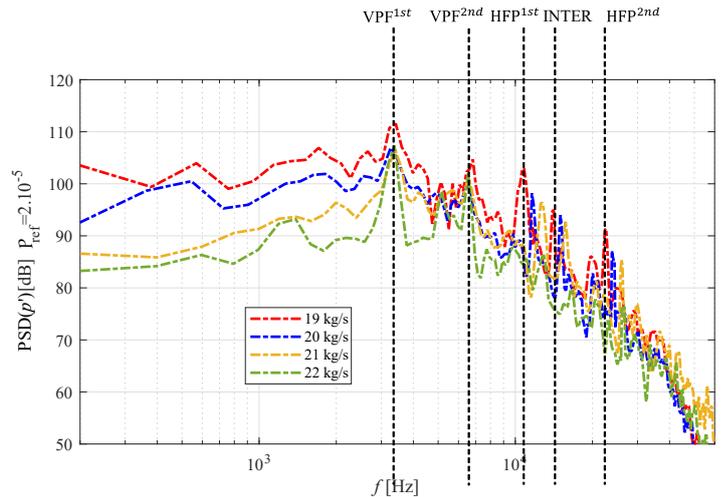


FIGURE 5 – DSP des fluctuations de pression pour une sonde positionnée à une longueur de corde et dans la direction perpendiculaire au BA de l’aube du rotor, pour les différents débits.

correspondant au cas $\dot{m} = 20$ kg/s sont présentés dans la Figure 4, ainsi qu’une iso-surface du critère Q ($Qc^2/U^2 = 80$) colorée par la norme de la vorticité. Le développement des structures turbulentes autour de l’aube du rotor et dans le sillage apparaît clairement. Sur le champ de dilatation, des fronts d’onde partant du BF et de la zone de la bulle proche du BA sont observés. On note aussi que le bruit lié au sillage du rotor ne représente pas une contribution importante dans ce cas.

Le champ acoustique est directement calculé par les SGEs sur une distance d’une corde en amont des aubes du rotor, dans la zone de raffinement amont du maillage (présentée dans la Figure 1). Une comparaison des densités spectrales de puissance (DSP) du signal de pression (p') pour les différents débits est présentée dans la Figure 5. La position de la sonde; fixe par rapport au rotor; est présentée dans la Figure 4. Pour les différents cas, des pics à 3200 Hz et 6400 Hz sont observés. Les fréquences de ces pics ne varient pas en fonction du débit et correspondent respectivement à la fréquence fondamentale de passage des aubes du stator $VPF = V \cdot \Omega/60$ ainsi qu’à sa première harmonique, où Ω est la vitesse de rotation donnée en tr/min et $V = 32$ le nombre d’aubes du stator de l’étage complet. La présence de ces pics pour une sonde tournante avec le rotor est associée au bruit émit par l’interaction périodique des sillages du rotor avec les aubes du stator.

A de plus hautes fréquences, entre 10 kHz et 13 kHz, un pic (HFP^{1st} dans la Figure 5) est visible pour chacun des débits à l’exception du débit le plus important (22 kg/s). Sa première harmonique HFP^{2nd} est aussi visible. Avec l’augmentation du débit, la fréquence de ces pics à haute fréquence (HFP) augmente (de 10,5 kHz à 12,8 kHz pour HFP^{1st}) alors que leur amplitude diminue. Pour les différents cas dans lesquels les HFPs sont présents, un pic additionnel INTER est observé à des fréquences $INTER = VPF^{1st} + HFP^{1st}$. Les HFPs sont liés à un mécanisme de bruit associé à la bulle

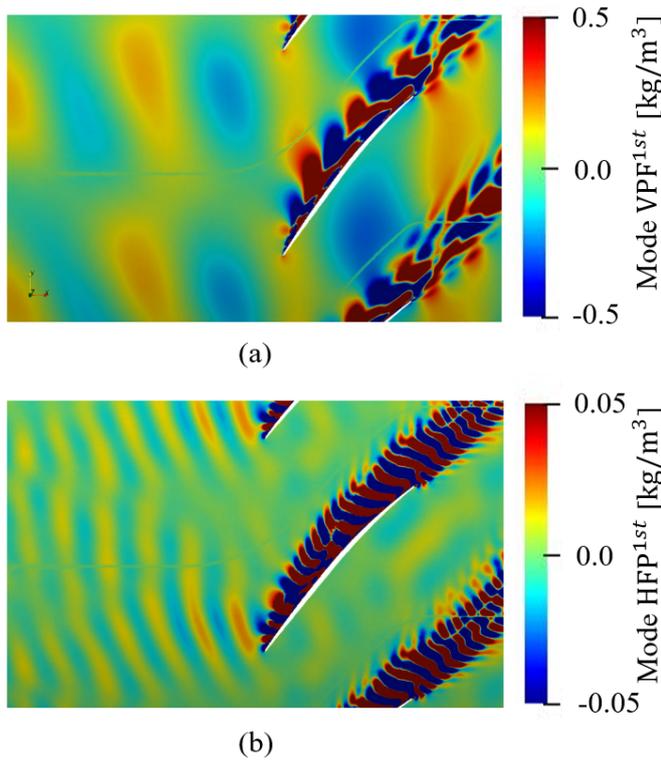


FIGURE 6 – Distribution spatiale des modes de masse volumique obtenus par la DMT pour le cas à 20 kg/s. (a) VPF^{1st}. (b) HFP^{1st}.

de recirculation, et ils sont examinés dans la suite, alors que le pic INTER provient d'une interaction entre HFP^{1st} et VPF^{1st}.

Afin de suivre l'évolution spatio-temporelle à une fréquence donnée des pics observés dans la Figure 5, une méthode de suivi dynamique des modes (DMT) [27] est utilisée. La Figure 6 montre les résultats de la DMT aux fréquences VPF^{1st} et HFP^{1st} obtenus à partir de la masse volumique dans la SGE pour le cas à 20 kg/s. Outre la trace des structures turbulentes dans les couches limites, le mode relié à la fréquence VPF^{1st} montre des ondes acoustiques générées en aval du rotor et se propageant vers l'amont, à travers le passage inter-aube. Le comportement de ce mode confirme donc que les pics observés à cette fréquence sont associés à l'interaction entre les sillages périodiques du rotor et les aubes du stator.

Les résultats de la DMT à la fréquence HFP^{1st} montrent des fluctuations de la densité dans la couche limite, convectées par l'écoulement, et des fronts d'onde générés dans la région de la bulle de recirculation qui se propagent en amont des aubes du rotor. Ces ondes acoustiques confirment que le pic à la fréquence HFP^{1st} observé dans la Figure 5 est généré par une source de bruit localisée dans la région de la bulle.

Pour une meilleure compréhension des sources de bruit, la cohérence entre les fluctuations de pression pariétale dans la zone de décollement de l'aube du rotor et celles à la position de la sonde P de la Figure 4 est calculée pour les deux débits

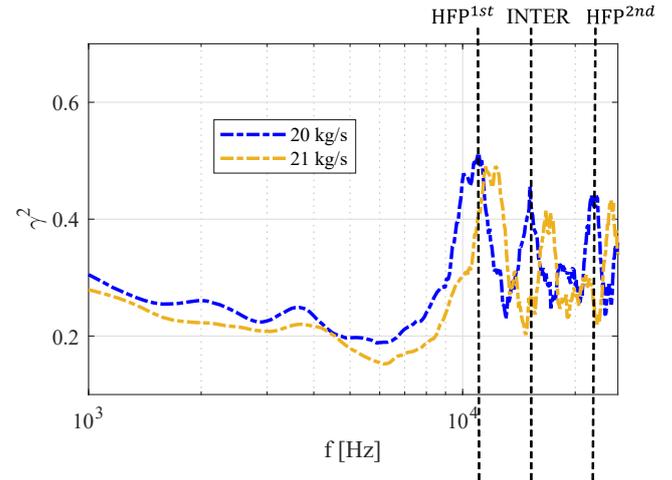


FIGURE 7 – Cohérence entre les fluctuations de pression pariétale dans la région de la bulle et les fluctuations de pression en amont du rotor à une longueur de corde et à 90° du BA, pour les débits $\dot{m} = 20$ kg/s et $\dot{m} = 21$ kg/s.

$\dot{m} = 20$ kg/s et $\dot{m} = 21$ kg/s. Cette cohérence est donnée par :

$$\gamma_{p_w p_{ac}}^2(f) = \frac{|S_{p_w p_{ac}}(f)|^2}{S_{p_w p_w}(f) S_{p_{ac} p_{ac}}(f)} \quad (1)$$

où $S_{p_w p_w}$ est la densité spectrale des fluctuations de pression pariétale dans la zone de décollement p_w , $S_{p_{ac} p_{ac}}$ celle des fluctuations de pression au niveau de la sonde P en amont des aubes du rotor p_{ac} , et $S_{p_w p_{ac}}$ la densité spectrale croisée entre p_w et p_{ac} . Cette cohérence est présentée dans la Figure 7. Les deux cas montrent des niveaux de cohérence importants aux fréquences HFP^{1st}, HFP^{2nd} et INTER. Ces résultats confirment les observations faites à partir des résultats de la DMT (Figure 6). La région de la bulle peut donc être considérée comme une source de bruit propre de la soufflante qui génère du bruit à hautes fréquences. La Figure 7 montre aussi que la cohérence est relativement faible aux fréquences VPF^{1st} et VPF^{2nd}, ce qui confirme que la bulle de recirculation ne contribue pas aux pics observés dans les spectres à ces fréquences. Les fréquences des HFP^{1st} et HFP^{2nd} augmentent avec le débit massique, ce qui peut être relié à la diminution de la taille de la bulle, et ce qui est cohérent avec les spectres de la Figure 5. La cohérence des pics est plus importante pour le débit massique le plus faible. Ceci est cohérent avec les observations en Figure 5 que le bruit produit par la région de la bulle aux fréquences des HFPs est plus important pour le faible débit massique.

Le mécanisme physique à l'origine des HFPs observés dans les spectres acoustiques est aussi examiné. Dans ce but, les structures turbulentes autour de la région de la bulle sont présentées dans la Figure 8 (a) pour le débit massique $\dot{m} = 20$ kg/s. On note que des structures turbulentes similaires sont observées pour les autres débits. La couche limite laminaire proche du BA du rotor décolle face à un gradient de pression important, et des rouleaux tourbillonnaires quasi-2D se forment. Ensuite, ces rouleaux tourbillonnaires sont soumis à une forte déformation dans

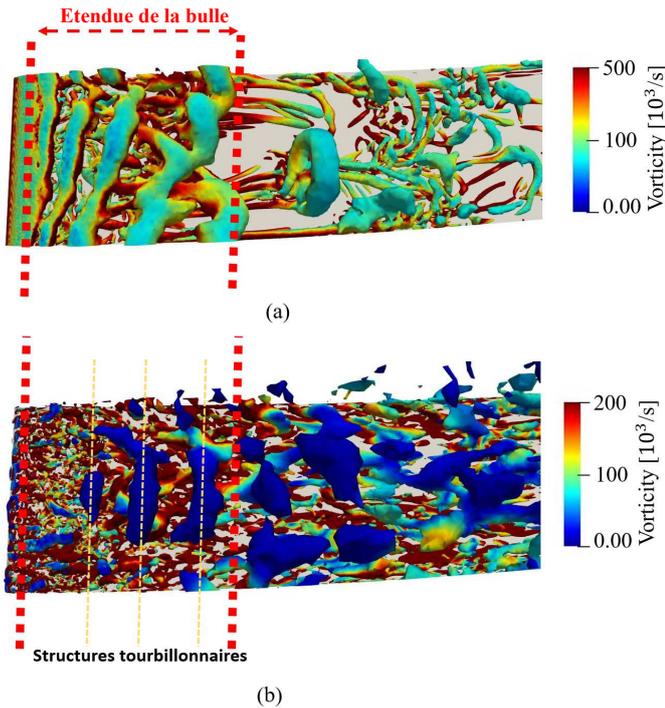


FIGURE 8 – Iso-surfaces du critère Q ($Qc^2/U^2 = 5000$), colorées par la norme de la vorticité pour le débit massique $\dot{m} = 20$ kg/s. (a) Champ instantané complet de l'écoulement. (b) Mode issu de la DMT à HFP^{1st} .

la direction de l'envergure en se convectant vers l'aval. Pour examiner le lien entre ces structures turbulentes et le bruit aux fréquences des HFPs, la Figure 8 (b) montre une iso-surface du critère Q reposant sur le champ de l'écoulement filtré par la DMT à la fréquence du HFP^{1st} . Les structures turbulentes associées à cette fréquence peuvent donc être identifiées. On observe les structures quasi-2D formées dans la région de la bulle de recirculation et convectées vers l'aval. Cela semble indiquer que le pic HFP^{1st} observé dans les spectres acoustiques est lié à un mécanisme de détachement tourbillonnaire dans la région de la bulle. Un nombre de Strouhal $St = f_v L / U_0$, où f_v est la fréquence du détachement tourbillonnaire, L est une longueur caractéristique et U_0 est la vitesse débitante en amont des aubes du rotor, est calculé pour les différents débits. Pour un mécanisme de détachement tourbillonnaire, la longueur caractéristique est souvent choisie dans la direction normale à l'écoulement incident. Ici, la valeur maximale de l'épaisseur de déplacement de la couche limite dans la zone de la bulle δ_{bulle}^* est utilisée. Pour un détachement tourbillonnaire à la fréquence HFP^{1st} , le nombre de Strouhal calculé pour chacun des cas est présenté dans le Tableau 1. Les valeurs obtenues sont caractéristiques d'un mécanisme de détachement tourbillonnaire ($St \approx 0.2$). Ces résultats semblent confirmer que le bruit rayonné par la bulle de recirculation est bien associé à un mécanisme de détachement tourbillonnaire.

Tableau 1 – Nombre de Strouhal St associé au pic HFP^{1st} pour différents débits massiques.

\dot{m} [kg/s]	19	20	21
U_0 [m/s]	80	84	88
δ_{bulle}^* [mm]	1.81	1.61	1.38
HFP^{1st} [kHz]	10.5	11.6	12.8
St	0.237	0.222	0.201

4 Conclusion

Un ensemble de SGE résolues en paroi a été effectué sur une tranche radiale d'un étage soufflante-redresseur à très haut taux de dilution en régime d'approche, pour différentes valeurs du débit massique. Pour réduire le temps de calcul, un secteur périodique comprenant une aube du rotor et deux aubes du stator a été considéré. Le maillage a été conçu afin d'assurer une propagation acoustique directe jusqu'aux points d'enregistrements dans la limite des fréquences d'intérêt.

Pour les différents débits, une bulle de décollement laminaire est observée sur l'extrados, proche du BA de l'aube du rotor, qui entraîne la transition de la couche limite vers la turbulence. La taille, la position et le niveau des fluctuations de pression dans la région de décollement varient significativement avec le débit massique. Avec la diminution du débit, la bulle devient plus longue, se déplace vers l'aval et les niveaux des fluctuations de pression pariétale augmentent sur l'extrados de l'aube du rotor.

Deux sources de bruit principales sont identifiées sur l'aube du rotor : le bruit de bord de fuite généré par la diffraction des couches limites turbulentes au niveau du BF de l'aube, et une source de bruit additionnelle due à la bulle de recirculation proche du BA. Des pics à hautes fréquences observés dans les spectres acoustiques sont associés à la bulle de recirculation. Ce mécanisme de génération de bruit est étudié en détail grâce à une technique DMT. Les ondes acoustiques reliées à la fréquence fondamentale du pic haute fréquence partent de la région de la bulle. Cette observation est consistante avec l'analyse de la cohérence entre les fluctuations de pression pariétale dans la région de la bulle et celles de la pression acoustique loin de l'aube.

La fréquence des pics liés à la bulle décroît avec le débit massique, et leur amplitude augmente. De plus, le niveau du bruit large bande augmente lorsque le débit massique diminue et ce sur toute la gamme de fréquences étudiées.

Enfin, des iso-surfaces du critère Q ont été calculées à partir des champs obtenus par la DMT à la fréquence fondamentale du pic associé à la bulle pour examiner le mécanisme physique de bruit sous-jacent. Cette analyse suggère qu'un mécanisme de détachement tourbillonnaire au niveau de la bulle de recirculation explique le bruit rayonné à cette fréquence.

Cette étude montre que le bruit rayonné par la formation d'une bulle de recirculation peut être significatif. Cette source de bruit peut être rencontrée en phase d'approche,

lorsque le débit massique du moteur est réduit. En conséquence, il s'avère utile d'identifier la présence d'une bulle de recirculation sur les aubes de la soufflante (en utilisant des modèles haute-fidélité) pour réduire cette potentielle source de bruit lors de la conception de moteurs d'avion.

Remerciements

Ce travail a été effectué dans le cadre de la chaire industrielle ARENA (ANR-18-CHIN-0004-01) co-financée par Safran Aircraft Engines et l'Agence Nationale de Recherche (ANR) française, et il est également soutenu par le Labex CeLyA de l'Université de Lyon, soutenu par l'Agence Nationale de Recherche (ANR-11-LABX-0060/ANR-16-IDEX-0005). Les ressources de calculs ont été fournies par le GENCI (CINES, numéros des projets A0082A05039 et A0102A05039) et par le méso-centre FLMSN-PMCS2I à l'École Centrale de Lyon.

Références

- [1] E. Envia, "Fan noise reduction : an overview," *International Journal of Aeroacoustics*, vol. 1, no. 1, pp. 43–64, 2002.
- [2] S. Moreau, "Turbomachinery noise predictions : Present and future," *Acoustics*, vol. 1, no. 1, pp. 92–116, 2019.
- [3] G.J.J. Ruijgrok, *Elements of Aviation Acoustics*. Delft University Press, 2004.
- [4] N. Peake and A. B. Parry, "Modern challenges facing turbomachinery aeroacoustics," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 44, pp. 227–248, 2012.
- [5] S. Oerlemans, P. Sijtsma, and B. Méndez López, "Location and quantification of noise sources on a wind turbine," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 299, no. 4-5, pp. 869–883, 2007.
- [6] S. Bianchi, A. Corsini, and A. Sheard, "A Critical Review of Passive Noise Control Techniques in Industrial Fans," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 136, no. 4, 2013.
- [7] L. Leylekian, M. Lebrun, and P. Lempereur, "An overview of aircraft noise reduction technologies," *Aerospace Lab*, no. 6, pp. 1–15, 2014.
- [8] R. K. Amiet, "Acoustic radiation from an airfoil in a turbulent stream," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 41, no. 4, pp. 407–420, 1975.
- [9] M. Roger and S. Moreau, "Back-scattering correction and further extensions of Amiet's trailing-edge noise model. Part 1 : theory," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 286, no. 3, pp. 477–506, 2005.
- [10] C. Pérez Arroyo, T. Leonard, M. Sanjosé, S. Moreau, and F. Duchaine, "Large eddy simulation of a scale-model turbofan for fan noise source diagnostic," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 445, pp. 64–76, 2019.
- [11] J. Al-Am, V. Clair, A. Giaque, J. Boudet, and F. Gea-Aguilera, "On the effects of a separation bubble on fan noise." 2022. (hal-03583335).
- [12] J. Al-Am, V. Clair, A. Giaque, J. Boudet, and F. Gea-Aguilera, "Effet du débit sur le bruit propre d'un étage soufflante/redresseur en régime d'approche," in *Congrès des Jeunes Chercheurs en Mécanique - Méca-J*, (En ligne, France), 2021.
- [13] T. Michelis, S. Yarusevych, and M. Kotsonis, "On the origin of spanwise vortex deformations in laminar separation bubbles," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 841, pp. 81–108, 2018.
- [14] J. W. Kurelek, M. Kotsonis, and S. Yarusevych, "Transition in a separation bubble under tonal and broadband acoustic excitation," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 853, pp. 1–36, 2018.
- [15] R.D. Sandberg and N. D. Sandham, "Direct numerical simulation of turbulent flow past a trailing edge and the associated noise generation," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 596, pp. 353–385, 2008.
- [16] R.D. Sandberg, L. Jones, N. Sandham, and P. Joseph, "Direct numerical simulations of tonal noise generated by laminar flow past airfoils," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 320, no. 4, pp. 838–858, 2009.
- [17] L. E. Jones, N. D. Sandham, and R. D. Sandberg, "Acoustic source identification for transitional airfoil flows using cross correlations," *AIAA Journal*, vol. 48, no. 10, pp. 2299–2312, 2010.
- [18] H. Wu, M. Sanjosé, S. Moreau, and R. D. Sandberg, "Direct numerical simulation of the self-noise radiated by the installed controlled-diffusion airfoil at transitional Reynolds number," in *2018 AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, 2018.
- [19] M. Deuse and R. D. Sandberg, "Different noise generation mechanisms of a controlled diffusion aerofoil and their dependence on Mach number," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 476, 2020.
- [20] D. Lewis, S. Moreau, M. C. Jacob, and M. Sanjosé, "ACAT1 fan stage broadband noise prediction using large-eddy simulation and analytical models," *AIAA Journal*, vol. 60, no. 1, pp. 360–380, 2022.
- [21] C. Brandstetter, V. Pages, P. Duquesne, B. Paoletti, S. Aubert, and X. Ottavy, "Project PHARE-2—A high-speed UHBR fan test facility for a new open-test case," *Journal of Turbomachinery*, vol. 141, no. 10, 2019.
- [22] T. Schonfeld and M. Rudgyard, "Steady and unsteady flow simulations using the hybrid flow solver AVBP," *AIAA Journal*, vol. 37, no. 11, pp. 1378–1385, 1999.
- [23] O. Colin and M. Rudgyard, "Development of high-order Taylor-Galerkin schemes for LES," *Journal of Computational Physics*, vol. 162, no. 2, pp. 338–371, 2000.
- [24] F. Nicoud, H. B. Toda, O. Cabrit, S. Bose, and J. Lee, "Using singular values to build a subgrid-scale model for large eddy simulations," *Physics of Fluids*, vol. 23, no. 8, 2011.
- [25] T. Poinot and S. Lele, "Boundary conditions for direct simulations of compressible viscous flows," *Journal of Computational Physics*, vol. 101, no. 1, pp. 104–129, 1992.
- [26] J. Al-Am, V. Clair, A. Giaque, J. Boudet, and F. Gea-Aguilera, "A parametric study on the LES numerical setup to investigate fan/OGV broadband noise," *International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power*, vol. 6, no. 2, 2021.
- [27] M. Queguineur, L. Gicquel, F. Dupuy, A. Misdariis, and G. Staffelbach, "Dynamic mode tracking and control with a relaxation method," *Physics of Fluids*, vol. 31, no. 3, 2019.