Title: Aerodynamic and acoustic investigation of automotive fan-driven cooling systems

Abstract

The mitigation of urban noise pollution, due to automobiles among other things, is a growing international concern, as exposure to noise at high levels or for long periods of time can lead to physical and mental health problems. This research work focuses on broadband noise emitted by fan cooling modules, used for engine temperature control. Several mechanisms responsible for noise generation are present in such applications due to the aerodynamic interaction between the airflow and the fan blades. Three broadband noise mechanisms dominating the acoustic spectra are identified in the literature review, namely: trailing edge noise, turbulence-interaction noise and tip-clearance noise. First, this work proposes to estimate the relative importance between these mechanisms, especially in the presence of the radiator upstream of the propeller. Indeed, its influence on the modification of the flow through the radiator and on the resulting aerodynamic sound sources are not yet clearly defined. Direct sound measurement and rotating acoustic beamforming techniques are being implemented at the von Karman Institute for Fluid Dynamics in Belgium and at the University of Sherbrooke in Canada. The obtained sound-localization maps indicate that the radiator has a negligible effect on the source position, which is always located at the leading edge of the blade tip when the operating conditions of the fan used vary. This experimentally validates the high-fidelity simulations available in the literature and extends the importance of the tip-clearance noise to high frequencies. Since the effect of the radiator is not restricted to its influence on the acoustics, an experimental campaign was conducted to characterize the turbulent flow downstream of the fan, exploiting a stereoscopic PIV technique. For the analyzed cases, a maximum turbulence intensity production of about 15% is measured, decreasing to 6% at the position corresponding to the fan location. Significant levels of anisotropy and non-homogeneity are found here, requiring an analysis of the applicability of the von Kármán turbulence model, usually used in noise prediction methods and being based on the isotropy of the flow. The results indicate that this model approaches reasonably well the two-dimensional turbulence spectra in most cases. In the second part of the thesis, a review of previous work shows that high-fidelity simulations, although accurate, are still too expensive when aeroacoustics is taken into account in industrial pre-design optimization processes. A low-order technique capable of predicting the broadband noise of fans is developed here. In order to understand the influence of the blade curvature on the acoustic prediction, the case of the isolated fan is chosen to be studied numerically. Stationary 3D RANS simulations are computed as input data for a semi-analytical approach, based on Amiet's theory, adapted to the rotational case and extended to include blade sweep effects. The results obtained are in agreement with the experimental data at high frequencies. However, the stationary approach used does not allow the simulation of the large turbulent structures that develop at the tip of the blade, thus underestimating the low and medium frequencies. The sweep angle is a parameter that should be considered in the early stages of design, as it attenuates the noise emissions and changes the dominant sources along the blade.

**Keywords:** aeroacoustics, turbulence, broadband fan noise, automotive cooling system, rotating source localization, stereoscopic PIV, Amiet's theory, sweep angle.

Titre : Étude aérodynamique et acoustique de systèmes de refroidissement automobile entraînés par ventilateur

Résumé

L'atténuation de la pollution sonore urbaine, due entre autres aux automobiles, est une préoccupation internationale croissante, car l’exposition au bruit à des niveaux élevés ou durant de longues périodes peuvent conduire à des problèmes de santé physique et mentale. Ce travail de recherche se concentre sur le bruit à large bande émis par les modules de refroidissement par ventilateur, utilisés pour la régulation de la température du moteur. Plusieurs mécanismes responsables de la génération de bruit sont présents dans de telles applications en raison de l'interaction aérodynamique entre le flux d'air et les pales du ventilateur. Trois mécanismes sonores à large bande dominant les spectres acoustiques sont identifiés dans la revue de la littérature, à savoir : le bruit de bord de fuite, le bruit d'interaction de turbulence et le bruit de jeu en bout de pale. Dans un premier temps, ce travail se propose d'estimer l'importance relative entre ces mécanismes, notamment en présence du radiateur en amont de l’hélice. En effet, son influence sur la modification de l'écoulement qui traverse le radiateur et sur les sources sonores aérodynamiques résultantes ne sont pas encore clairement définies. Des techniques de mesure directe du son et d’antennerie acoustique en rotation sont mises en œuvre à l'Institut von Karman de dynamique des fluides, en Belgique, et à l'Université de Sherbrooke, au Canada. Les cartographies de localisation sonore obtenues indiquent que le radiateur a un effet négligeable sur la position des sources, demeurant au bord d’attaque de l'extrémité de la pale lorsque les conditions de fonctionnement du ventilateur utilisé varient. Ceci valide expérimentalement les simulations haute-fidélité disponibles dans la littérature et étend l'importance du bruit de jeu en bout de pale aux hautes fréquences. L’effet du radiateur n’étant pas restreint à son influence sur l’acoustique, une campagne expérimentale a été menée pour caractériser l'écoulement turbulent en aval du ventilateur, en exploitant une technique de PIV stéréoscopique. Pour les cas analysés, une production maximale d'intensité de turbulence d'environ 15% est mesurée, diminuant à 6% à la position correspondant au ventilateur. Des niveaux significatifs d'anisotropie et de non-homogénéité sont retrouvés ici, nécessitant une analyse de l'applicabilité du modèle de turbulence de von Kármán, habituellement utilisé dans les méthodes de prédiction de bruit et étant basé sur l'isotropie de l’écoulement. Les résultats indiquent que ce modèle approche raisonnablement bien les spectres de turbulence bidimensionnelle dans la plupart des cas. Dans la deuxième partie de la thèse, une revue des travaux précédents montre que les simulations haute-fidélité bien que précises, restent encore trop onéreuses lorsque l'aéroacoustique est prise en compte dans les processus d'optimisation industrielle de préconception. Une technique d'ordre inférieur capable de prédire le bruit large bande des ventilateurs est ici développée. Afin de comprendre l'influence de la courbure des pales sur la prédiction acoustique, le cas du ventilateur isolé est choisi pour être étudié numériquement. Des simulations RANS 3D stationnaires sont utilisées comme données d'entrée d'une approche semi-analytique, basée sur la théorie d'Amiet, adaptée au cas de la rotation et étendue pour inclure les effets de flèche de la pale. Les résultats obtenus sont en accord avec les données expérimentales aux hautes fréquences. Cependant, l'approche stationnaire utilisée ne permet pas de simuler les grandes structures turbulentes qui se développent à l'extrémité de la pale, sous-estimant dès lors les basses et moyennes fréquences. L'angle de flèche est un paramètre qui mérite d'être pris en compte dès les premières étapes de la conception, car il atténue les émissions sonores et modifie les sources dominantes le long de la pale.

**Mots-clés** **:** aéroacoustique, turbulence, bruit de ventilateur à large bande, système de refroidissement automobile, localisation des sources rotatives, PIV stéréoscopique, théorie d'Amiet, angle de flèche.