

**Titre:** Etude de l'interaction onde ultrasonore / fluide en mouvement à fort nombre de Mach :  
Application à la détermination de la vitesse et de l'angle d'incidence d'un aéronef

**Directeur de thèse :** Guy FEUILLARD, Professeur à l'INSA Centre Val de Loire.  
Laboratoire GREMAN UMR 7347. ([guy.feillard@insa-cvl.fr](mailto:guy.feillard@insa-cvl.fr))

**Co-directeur de thèse :** Doumit ZAOUK, Professeur à l'Université Libanaise.  
Laboratoire LPA. ([doumitzaouk@ul.edu.lb](mailto:doumitzaouk@ul.edu.lb))

**Encadrants de thèse :**

- François VANDER MEULEN, Maître de conférences à l'Université François Rabelais de Tours. Laboratoire GREMAN UMR 7347. ([vandermeulen@univ-tours.fr](mailto:vandermeulen@univ-tours.fr))
- Hossep ACHDJIAN, Maître de conférences à l'INSA Centre Val de Loire. Laboratoire GREMAN UMR 7347. ([hossep.achdjian@insa-cvl.fr](mailto:hossep.achdjian@insa-cvl.fr))

**Laboratoires :**

- Laboratoire GREMAN UMR 7347, pôle acoustique et piézoélectricité (INSA Centre Val de Loire)
- Laboratoire LPA, Université Libanaise

**Descriptif du sujet:**

Depuis les débuts de l'aviation au 19ème siècle, l'angle d'incidence, défini par l'angle entre le fuselage d'un avion et le flux d'air qui l'entoure, est connu pour être un paramètre critique de vol. La connaissance de cet angle est indispensable pour un pilote. De nombreux éléments critiques s'y rapportent, comme les calculateurs de masse et de centrage ou encore les avertisseurs de décrochage. En effet, lorsque l'angle d'attaque, ou angle d'incidence, d'un profil aérodynamique (aile d'avion) croît, il se forme une dépression au dos de ce profil qui tend à augmenter. Ce phénomène peut entraîner un décollement de la zone comprise entre la paroi et l'écoulement uniforme extérieur pouvant conduire à la formation d'une zone de recirculation tourbillonnaire et d'un sillage épais dont la conséquence peut être une chute brutale de la portance. C'est le phénomène de décrochage. Le phénomène de décollement correspond à une inversion du gradient de vitesse dans la couche limite et joue un rôle critique en aéronautique.

Aujourd'hui, le système le plus largement utilisé pour la mesure de l'angle d'incidence dans le monde industriel est un système mobile, appelé girouette.

La protubérance de ce système implique un entretien particulier, notamment en ce qui concerne un éventuel givrage du système en plein vol. En effet, le vol en conditions givrantes est un élément perturbateur au regard de la sécurité. Au cours de ces dernières années, des accidents majeurs ont été attribués au givrage.

Des recherches sont donc menées actuellement au sein de l'entreprise Thales en vue de s'affranchir de ces mesures coûteuses, tout en s'assurant que le pilote continue de recevoir des informations fiables et non perturbées. La conception de systèmes affleurant la peau de l'avion pourrait être une solution adéquate, la protubérance d'une sonde favorisant l'accrétion de glace en vol. Dans le langage industriel aéronautique, on parlera de système « flush » pour définir son affleurement par rapport à la peau de l'avion.

Les premiers travaux de recherche en vue de la conception d'un système flush à Thales se sont inspirés d'appareils anémométriques fonctionnant par voies ultrasonores. Ce principe de mesure est largement utilisé aujourd'hui, et ce dans de nombreux domaines, comme le médical, où l'échographie a fait ses preuves depuis les années 50, ou encore le milieu naval, avec le développement des sonars. Il s'agit d'un concept simple au premier abord, où les seules connaissances de la vitesse d'un écoulement et de la vitesse du son permettent de déterminer une distance entre deux points, par la mesure du temps de vol des ondes ultrasonores entre ces deux points. C'est le principe de l'écholocation, utilisée également par les chauves-souris. A l'inverse, des vitesses d'écoulement peuvent être déterminées grâce à ce principe. Connaissant cette fois-ci la distance entre les deux points de mesure, on retrouve, via une mesure de temps, la vitesse apparente du son (dans un cas unidirectionnel) en présence d'un écoulement.

Au travers d'un travail effectué en collaboration avec Thales Avionics, un tel système à ultrasons constitué de transducteurs ultrasonores a été développé. Les trajets des ondes d'un capteur à un autre permettent de déterminer les temps de vol, et d'en déduire l'angle d'incidence  $\alpha$  de l'avion par rapport à l'écoulement de l'air, via le calcul de la projection de la vitesse de l'air sur l'axe d'alignement des capteurs.

Lors de ce travail, nous avons montré qu'il est possible de déterminer l'angle d'incidence d'un aéronef par ultrasons dans l'air à 40 kHz avec un dispositif affleurant. Le principe est de mesurer les temps d'arrivées amont et aval d'un tir ultrasonore. La différence des temps d'arrivées renseigne sur la vitesse du fluide. Le dispositif à un transducteur émetteur et quatre récepteurs permet également de mesurer l'angle d'incidence. Les essais ont pu être menés que jusqu'à Mach 0.15 en soufflerie anéchoïque (vitesse maximale de la soufflerie).

L'étude précédente a mis en évidence des limites imposées par l'instrumentation utilisée. Les essais en souffleries, à différents nombres de Mach et différents angles d'incidence, ont été comparés aux retards calculés numériquement l'aide d'un code basé sur la théorie des rayons. Ces comparaisons ont fait apparaître l'importance prépondérante de la couche limite dans le comportement des ondes. Les limites d'application du modèle ont été étudiées et montrent un bon accord pour les forts angles d'incidence (particulièrement à 90°), mais des divergences apparaissent aux faibles angles : au-delà d'une certaine limite angulaire, les effets de couche limite deviennent négligeables et la propagation s'apparente à une transmission en écoulement uniforme.

Ce qui est constaté également lors de la première série d'essais est une dégradation des résultats avec le nombre de Mach. En effet, l'augmentation de la vitesse vient perturber le rapport signal sur bruit dans les mesures ; elle est donc une cause d'erreurs expérimentales majeure. La directivité des capteurs utilisés est également la cause de cette dégradation de signal sur bruit, les signaux reçus étant principalement issus des lobes secondaires. La mesure de temps de vol entre les signaux est elle-même source d'erreurs dans les cas des forts nombres de Mach, car le rapport signal sur bruit est fortement dégradé.

L'objet de cette thèse sera donc de mieux prendre en compte les effets d'un fort nombre de Mach dans la propagation des ondes et les caractéristiques de la couche limite. D'une part, l'instrumentation de mesure sera optimisée en vue d'avoir une meilleure émission et réception

des signaux contribuant ainsi à l'amélioration du rapport signal sur bruit. D'autre part, des algorithmes de traitement du signal adaptés aux situations avec faible rapport-signal sur bruit seront étudiés et implémentés.

La propagation des ondes dans un écoulement d'air turbulent sera étudiée afin de compléter le modèle de rayons utilisé dans la première étude. Notamment, le diagramme de rayonnement des transducteurs sera pris en compte par un modèle de décomposition en somme de gaussiennes. Compte tenu des contraintes de fréquence et environnementales, le récepteur est un transducteur avec une dimension finie et non un récepteur ponctuel. Le modèle de rayonnement supportant les mesures prendront en compte le diagramme de rayonnement du récepteur.

Une nouvelle maquette intégrant les optimisations précédemment mentionnées sera mise en place de façon à s'adapter aux souffleries (Beti et Bruit & Vent) permettant ainsi de prévoir des campagnes de mesures jusqu'à Mach 0,5 afin de valider les choix technologiques, les algorithmes de temps de vol et les modèles implémentés.

Ce sujet de recherche se fera dans le cadre d'un partenariat avec le Laboratoire Pprime à Poitiers et la Sté Thales Avionics à Vendôme et en cotutelle avec le Laboratoire LPA au Liban.

### **Profil du candidat :**

Le (la) candidat(e) doit être titulaire d'un diplôme de master recherche (BAC+5) dans l'une des spécialités suivantes :

- ✓ Electronique, microélectronique, nanotechnologies
- ✓ Physique appliquée

Au cours de son cursus, le (la) candidat(e) aura eu une expérience en électronique, acoustique, traitement de signal et instrumentation. Une bonne connaissance de ce domaine est essentielle à la réussite du travail à mener dans ce projet. Une compétence complémentaire dans un des domaines suivant serait grandement appréciée :

- Connaissances des logiciels Comsol (Modélisation des éléments finis) et Matlab (traitement du signal),
- Connaissances en instrumentation (pilotage des appareils et automatisation du dispositif, adaptation aux mesures en soufflerie),
- Maitrise des outils mathématiques pour la propagation des ondes acoustiques et la modélisation des écoulements.

Le (la) candidat(e) doit être intéressé(e) par un travail en équipe car il (elle) sera un lien essentiel au groupe de travail, faisant la liaison entre des personnes venant d'institutions différentes (LPA (Université Libanaise), Pprime (Université de Poitiers), Thalès Avionics (Vendômes), GREMAN).