

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Compensation d'effets aéro-optiques induits par des écoulements hypersoniques de paroi

Référence : **PHY-DOTA-2026-22**

(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : octobre 2026

Date limite de candidature : 30 avril 2026

Mots clés :

Aéro-optique, écoulements hypersoniques, optique adaptative

Profil et compétences recherchées :

Posséder une affinité pour le travail numérique et un intérêt pour l'optique et l'aérodynamique. Démontrer un esprit d'initiative et de créativité, essentiel pour mener à bien des travaux de recherche. Maîtriser l'anglais (niveau B2 minimum). Familiarité requise avec Python (Numpy et Scipy).

Contexte :

Les véhicules hypersoniques nécessitent pour leur mission des stratégies de guidage ou de télécommunications autonomes, résilientes et dont la précision doit être compatible avec des points de vol très exigeants. Or les écoulements d'air à très haute vitesse engendrent des variations de masse volumique dont l'intensité augmente rapidement avec le nombre de Mach. Lorsque l'écoulement est fortement compressible et de surcroît turbulent, comme c'est le cas à haut nombre de Mach et à haut nombre de Reynolds, alors la zone de l'écoulement très proche de la paroi (la couche limite) est peuplée de structures tourbillonnaires de petite taille au sein desquelles les variations de masse volumique, et donc d'indice de réfraction, sont élevées. Elles vont générer une distorsion de phase du front d'onde d'un faisceau optique traversant cet écoulement (voir Figure 1), à laquelle se greffent des fluctuations locales de l'intensité (scintillation). Il existe dans la littérature peu de modèles analytiques permettant d'évaluer le comportement statistique des effets aéro-optiques et leur emploi reste très limité [1-3]. La phase optique calculée en champ proche doit être évaluée à partir de simulations de type DNS ou LES rendant compte des fluctuations temporelles de la masse volumique, mais qui sont très onéreuses en terme de volume de calcul.

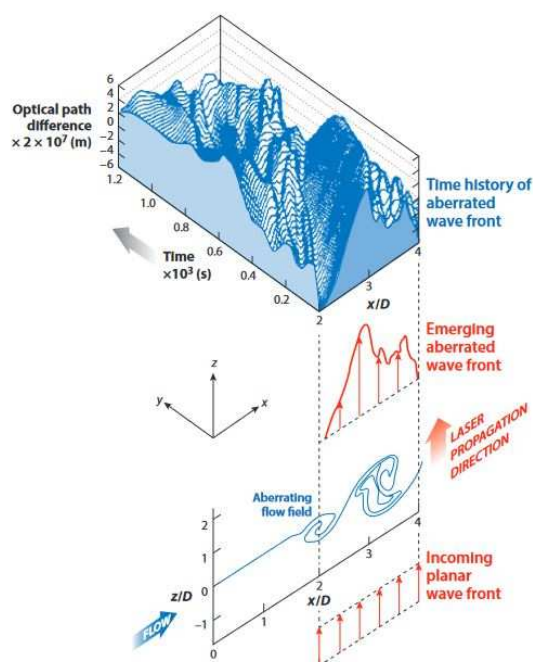


Figure 1 – Évolution temporelle de la distorsion de phase induite par un écoulement cisaillé compressible sur un front d'onde. Figure reprise de [4].

Objectifs :

L'objectif de cette thèse est de produire à partir des paramètres de vol un outil rapide de génération de champs synthétiques de masse volumique représentatifs (d'un point de vue des effets aéro-optiques) des vraies couches limites hypersoniques. Ces travaux permettront d'améliorer la compréhension des

phénomènes aéro-optiques instationnaires et d'établir des modèles permettant de relier les grandeurs stationnaires et le comportement de la phase d'un faisceau optique traversant une couche limite hypersonique. L'outil rapide développé sera exploité pour construire une stratégie de compensation des effets aéro-optiques par un système d'optique adaptative de nouvelle génération et à très grande bande passante – on s'attend à devoir corriger quelques ordres radiaux (cf. figure ci-dessous), évoluant à des cadences de 100 kHz à 1 MHz.

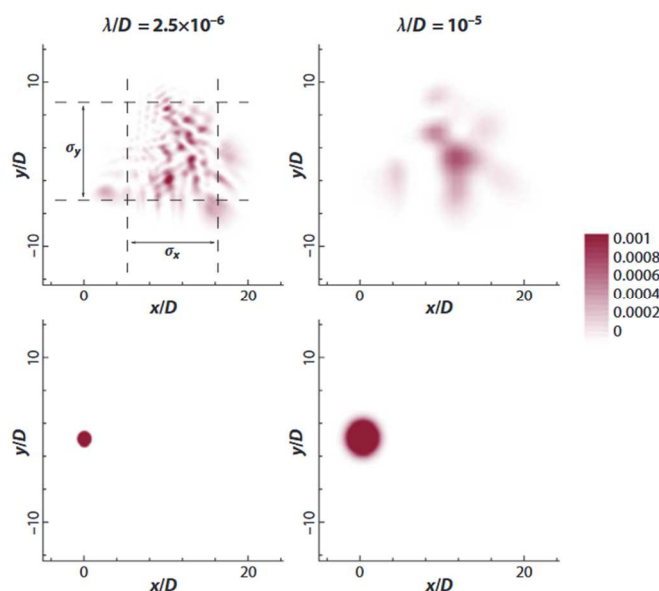


Figure 2 – Exemples de PSFs obtenues pour un écoulement de Mach number 0.4 et de nombre de Reynolds $Re_D = 3900$. Figure tirée de [5].

Description des travaux :

Après une première étape de revue bibliographique, des calculs de propagation de front d'onde et de distorsion de phase seront effectués sur des écoulements hypersoniques « haute-fidélité » à l'aide d'outils de post-traitement parallèles développés à l'ONERA. Ces outils feront l'objet d'adaptation au format de données d'entrée. Les propriétés des structures cohérentes turbulentes dans la couche limite qui ont le plus fort impact sur la distorsion de phase seront identifiées au moyen d'algorithmes d'identification, d'extraction et de caractérisation d'objets géométriques extraits depuis les bases de données de champs fluides. Une approche de type décomposition orthogonale aux valeurs propres sera aussi investiguée pour identifier ces structures. A partir de ces travaux, un outil rapide de génération de champ de masse volumique et de cartes de phase sera construit. Celui-ci permettra d'établir des modèles et d'évaluer les propriétés spatio-temporelles du front d'onde généré par la turbulence spécifique à la couche limite de véhicules hypersoniques, à partir d'hyperparamètres de la configuration de vol (altitude, vitesse, Reynolds, température de paroi) sans recourir à des calculs coûteux de type LES (Large Eddy Simulation) ou DNS (Direct Numerical Simulation). Cet outil sera validé au moyen de simulations aérodynamiques haute fidélité disponibles, mais aussi de résultats de mesures expérimentales réalisées dans une soufflerie de l'ONERA.

La génération et l'analyse modale des cartes spatio-temporelles du front d'onde créées par l'outil seront exploitées pour établir des modèles permettant de relier les grandeurs aérodynamiques et les propriétés de la couche limite à la distorsion de phase. Selon différents scénarios établis, une stratégie de correction du front d'onde capable de compenser les distorsions de phase dans différents régimes de vol hypersonique sera alors établie et ses performances évaluées.

Cette thèse se déroulera dans le cadre du projet MIDENGRAD (ANR Astrid) dont le responsable de projet, José Cardesa, assurera aussi le co-encadrement de la thèse. Le candidat évoluera au sein d'une équipe pluridisciplinaire (Département d'Aérodynamique et d'Optique) investie dans le projet. Le candidat réalisera, a minima, les six premiers mois de sa thèse à Toulouse et les mois suivants en Ile de France. Ce sujet de thèse s'adresse aux candidats ayant un goût pour la simulation numérique et la modélisation.

- [1] Sutton, G. W., Pond, J. E., Snow, R., & Hwang, Y. (1994). Hypersonic interceptor aero-optics performance predictions. *Journal of spacecraft and rockets*, 31(4), 592-599.
- [2] Tromeur, E., Garnier, E., & Sagaut, P. (2006). Large-eddy simulation of aero-optical effects in a spatially developing turbulent boundary layer. *Journal of Turbulence*, (7), N1.
- [3] Aupoix B., 2003, « Prédiction des effets aéro-optiques en couche limite » RT 1/07893 DAME, ONERA, France
- [4] Jumper, E. J., & Gordeyev, S. (2017). Physics and measurement of aero-optical effects: past and present. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 49(1), 419-441.
- [5] Wang, Meng, Ali Mani, and Stanislav Gordeyev. "Physics and computation of aero-optics." *Annual review of fluid mechanics* 44.1 (2012): 299-321.

Collaborations envisagées :

ONERA (DOTA-DMPE-DAAA) - ENSAM

Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : Optique et Techniques Associées

Lieu (centre ONERA) : Châtillon

Contact : Béatrice Sorrente

Tél. : 01 46 73 48 53 Email : beatrice.sorrente@onera.fr

Directeur de thèse

Nom : Fabien Méry

Laboratoire : ONERA Toulouse

Tél. : 05 62 25 28 04

Email : fabien.mery@onera.fr

Pour plus d'informations : <https://www.onera.fr/rejoindre-onera/la-formation-par-la-recherche>