

Caractérisation expérimentale de l'aéro-thermo-acoustique des jets chauds diphasiques.

G. Lalizel, F. Moreau, P. Berterretche, Y. Gervais et E. Dorignac

Institut P' (UPR 3346 CNRS / Université de Poitiers / ISAE-ENSMA)
11 Boulevard Marie et Pierre Curie, Site du Futuroscope
TSA 41123
86073 POITIERS CEDEX 9

Mots clés: jet supersonique chaud; aéro-acoustique; écoulement diphasique air / eau. Réduction du bruit de jet par déluge d'eau; métrologie Laser ; Loi d'échelle

Challenge scientifique et technologique

Le bruit émis par les propulseurs d'Ariane lors du décollage génère d'intenses vibrations sur la coiffe du lanceur qui peuvent endommager sa charge utile. Pour atténuer l'émission acoustique due à l'éjection de ces gaz supersoniques chauds, d'énormes quantités d'eau sont injectées sur le pas de tir. A ce jour, aucune technique alternative suffisamment efficace n'a été trouvée pour envisager un décollage en toute sécurité sans injection d'eau. Ces « déluges » sont donc indispensables et imposent de fortes contraintes de dimensionnement aux bureaux d'études et d'ingénierie du CNES pour les intégrer à l'étape de lancement (château d'eau, réseaux de distribution, crue d'eau lancement/synchronisation du décollage, injection des systèmes de lancement).

Bien que cette technique soit couramment employée, les phénomènes physiques associés à cette atténuation ne sont pas encore parfaitement compris, connus ou maîtrisés pour optimiser la quantité d'eau à utiliser, la taille des gouttes, la vitesse initiale du liquide, les positions et angles de pénétration des injections. Les modèles numériques actuels ne sont pas suffisamment matures pour reproduire fidèlement les mécanismes couplés mis en jeu : évaporation, modification des champs thermiques et aérodynamiques (cellules de choc et couches de mélange), convection et réfraction des ondes acoustiques dans le milieu diphasique en mouvement. La simulation ne permettant pas de représenter les cas réels avec le degré de confiance nécessaire, la conception des systèmes d'injection d'eau du pas de tir repose sur des lois empiriques qui doivent être validées par des essais sur le banc MARTEL à Poitiers. Pour chaque nouvelle configuration du lanceur, plusieurs itérations expérimentales sont alors nécessaires pour optimiser ces déluges, induisant des contraintes de coût et de planning sur le programme de développement du lanceur. Par exemple, les études d'acoustique expérimentale sur le banc MARTEL pour ARIANE 6 ont débuté en 2015 et ont duré 5 ans avec des questions qui restent encore ouvertes sur la transposition des résultats à l'échelle réelle. Les normes Strouhal (aéro-acoustique) et Weber (écoulement diphasique), nombre sans dimension utilisés pour respecter les lois d'échelles ne sont plus suffisantes pour retranscrire correctement ces mécanismes de réduction du bruit, tant en température qu'en échelle spatiale. Malgré une importante base de données acoustiques, il est encore nécessaire de développer des modèles prédictifs de la réduction du niveau de bruit.

L'amélioration des modèles numériques est bien sûr en cours, mais il manque manifestement des données physiques pour améliorer leurs développements et valider les simulations. Dans ce contexte, des mesures expérimentales sont nécessaires pour comprendre l'influence de la présence de la phase liquide sur le rayonnement acoustique du jet supersonique chaud. La difficulté de telles mesures réside précisément dans la nature de l'écoulement diphasique eau/gaz pour lequel les techniques de mesure classiques telles que la vélocimétrie par images de particules (P.I.V.) ne sont pas applicables en l'état. Chacune des phases doit être caractérisée indépendamment les unes des autres pour construire des bases de données suffisamment précises pour comprendre la physique.

Programme de thèse

L'objectif de ce sujet de thèse est de développer des expériences de référence d'écoulements diphasiques dans le but de comprendre les phénomènes aérodynamiques et aérothermiques conduisant à la réduction du bruit par injection d'eau. Par conséquent, une approche en plusieurs étapes est proposée sur deux installations expérimentales :

WP1. Mise en place d'expériences multi-échelles d'aéro-acoustique de référence sur le banc MARTEL

L'aéro-acoustique des écoulements diphasiques sera étudiée en tenant compte des effets d'échelle en température et en géométrie. Plusieurs configurations de jets seront testées : des jets sur-, sous- et complètement détendus, à trois échelles géométriques différentes (voir les résultats préliminaires sur la figure 1).

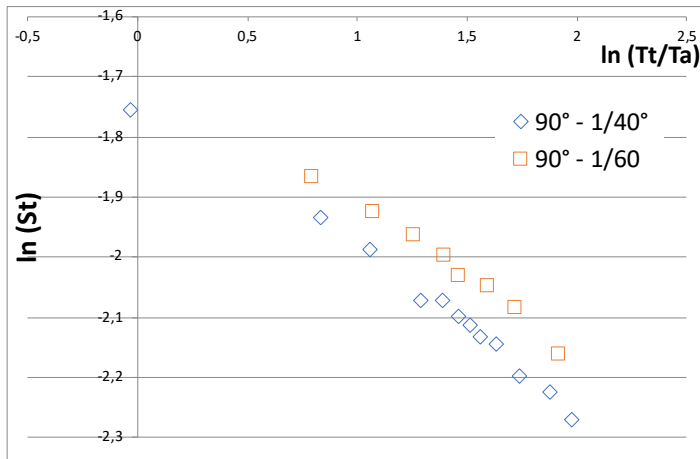


Figure 1: BBSAN central frequency at 90° of an over-expanded Mach 3 jet in function of the jet temperature ratio at two different scalew (1/40e and 1/60e to launcher's thruster scale)

Un objectif important de ce WP est d'essayer de formaliser les lois d'échelle globales aéro-acoustiques depuis les essais sur des modèles à échelle réduite jusqu'à l'échelle réelle. Ceci doit être réalisé dans un premier temps sur de simples jets libres supersoniques chauds à différentes températures afin d'évaluer plus précisément l'effet de ce paramètre. Les effets de l'injection d'eau seront ensuite considérés dans un second temps.

WP2. Développement d'une métrologie optique des écoulements diphasiques sur le banc d'essai BATH

Le banc d'essai BATH est dédié aux études aérothermiques sur les écoulements à haute température. Sa configuration en section d'essai fermée est adaptée au développement des techniques de métrologie LASER. Ces travaux s'inscrivent dans la continuité d'un projet R&T CNES initié en 2021. Pour rappel, le développement de la métrologie repose sur :

- l'étude aérodynamique turbulente de la phase gazeuse par P.I.V. appliquée à la phase gazeuse en utilisant la phosphorescence des particules de ZnO. Ces particules sont donc des traceurs pour mesurer la vitesse dans la phase gazeuse jusqu'à de très hautes températures. Le laser utilisé pour exciter le ZnO est un laser Yag pulsé à une fréquence de 10 Hz, rayonnant à 266 nm, dans le spectre de longueur d'onde UV. L'émission de phosphorescence est un spectre continu et étroit entre 380 et 450 nm ;

- l'étude dynamique de la phase liquide par utilisation de la fluorescence d'un colorant mélangé à de l'eau. La rhodamine B est un colorant organique fluorescent qui peut être mélangé avec de l'éthanol ou de l'eau pure. La rhodamine B est habituellement utilisée pour caractériser le phénomène de mélange dans les écoulements liquides turbulents à partir de la mesure de la concentration. Il est excité par un laser Yag pulsé à 266 nm. Son spectre d'émission de fluorescence est continu, étroit et compris entre 540 et 700 nm. Grâce à ces bibliothèques d'images, il est prévu d'estimer la quantité de liquide vaporisée et d'en déduire la perte de puissance thermique, de suivre la trajectoire des gouttes d'eau, de mesurer leur vitesse et de quantifier l'interaction entre le flux chaud et la phase liquide.

Des mesures conjointes de ces deux phases sont possibles car les longueurs d'onde d'émission des phases liquide et gazeuse ne se chevauchent pas (voir figure 1).

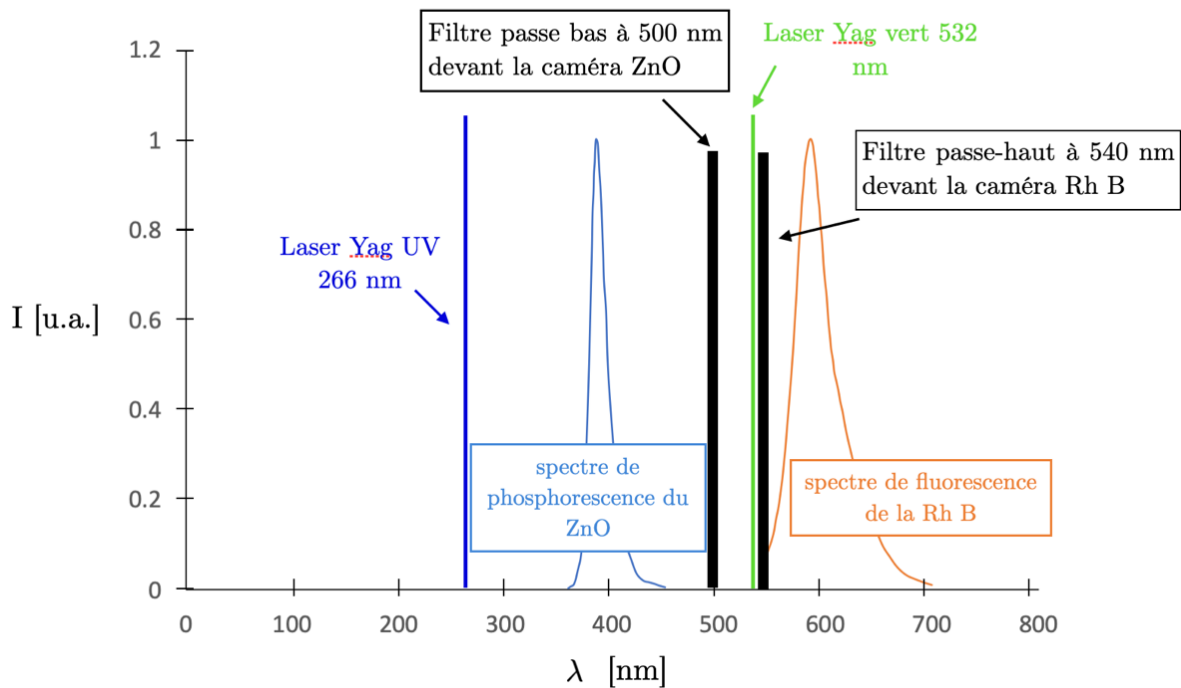


Figure 1: Spectres d'émission de fluorescence de la rhodamine B et de phosphorescence du ZnO. L'utilisation de 2 filtres passe-haut et passe-bas permet de mesurer instantanément uniquement l'émission de la phase gazeuse (ZnO) et de la phase liquide (Rh B)..

Cette technique de mesure sera développée sur un écoulement à faible vitesse, de température modérée (150°C max), à la pression atmosphérique et pour lequel le débit d'eau sera injecté perpendiculairement à l'écoulement d'air. La métrologie sera ensuite sur des cas de vitesse (jusqu'à Mach 1), de pression (jusqu'à 10 bar), de température (jusqu'à 1000 K) et de débit air/eau plus élevés.

WP3. Caractérisation des jets supersoniques chauds diphasique et couplage aéro-acoustique sur le banc d'essai MARTEL

L'objectif final est de coupler les travaux WP1 et WP2 sur les jets supersoniques chauds du banc MARTEL. La réalisation à la fois de mesures acoustiques et de visualisations des champs d'écoulement de vitesse et de la phase liquide permettra de caractériser l'influence de l'écoulement de la phase liquide sur le développement du jet supersonique et les modifications qui en résultent en termes de structure aérodynamique et d'émission acoustique.

Comme pour WP2, une approche progressive sera mise en place en augmentant la température et la vitesse du jet, et le rapport de débit eau/air.

D'autres mesures plus classiques sont également envisagées en complément :

- des profils de température moyenne issus d'une sonde de température utilisant un micro-thermocouple de type S développé spécifiquement pour ce contexte ;
- des profils de pression totale en utilisant une sonde de Pitot refroidie par eau (à développer pour les mesures à haute température) ;
- des profils des flux thermiques convectifs au niveau d'une paroi d'impact à partir d'images infrarouges de la face arrière de la paroi d'impact ;
- des profils de la répartition granulométrique des gouttes de l'eau d'injection (voir figure 3) ;

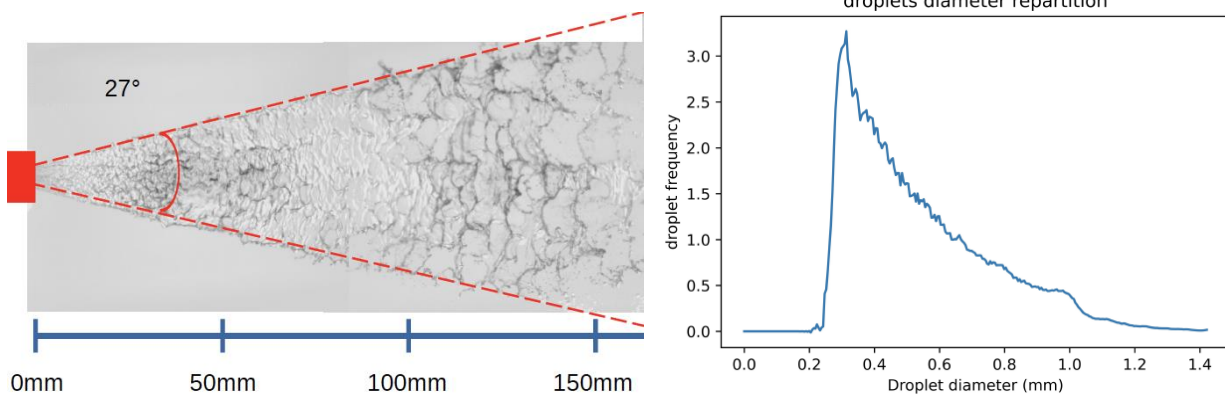


Figure 3: Exemple d'images d'une injection d'eau plate utilisée sur le banc d'essai MARTEL pour des essais de réduction de bruit : (à gauche) visualisation par ombroscopie ; (à droite) distribution des diamètres des gouttelettes d'eau à 500 mm de la sortie de la buse.