

CONTROLE ACTIF DES TRANSFERTS D'ENERGIE INTER-ECHELLES DANS UNE TURBULENCE DE GRILLE PAR ACTIONNEURS PLASMA

ENCADRANTS : NICOLAS BENARD (nicolas.benard@univ-poitiers.fr), JOHN-CHRISTOS VASSILICOS (JOHN-CHRISTOS.VASSILICOS@CENTRALELILLE.FR)

LIEU : INSTITUT PPRIME (UPR CNRS 3346), FUTUROSCOPE

EQUIPES : ELECTROFLUIDODYNAMIQUE

Contexte scientifique

Ce projet de recherche vise à développer une approche inédite de contrôle actif de la turbulence fondée sur l'utilisation d'actionneurs plasma à décharge à barrière diélectrique (DBD). Ces actionneurs sont aujourd'hui largement utilisés pour le contrôle des écoulements, notamment pour le retard du décollement ou la réduction de traînée et plus généralement de frottement pariétal. Ils reposent sur une conversion électromécanique extrêmement rapide de l'énergie électrique en quantité de mouvement, générant un écoulement localisé de faible vitesse. Si les vitesses induites restent modestes, l'absence totale de pièces mobiles permet d'atteindre des fréquences d'actionnement de plusieurs kilohertz, très largement supérieures à celles accessibles par des dispositifs mécaniques conventionnels.

Le projet propose de détourner cette technologie de ses applications classiques afin d'étudier une problématique encore largement inexplorée : le contrôle direct des mécanismes de transfert d'énergie au sein de la cascade turbulente. En s'appuyant sur une turbulence homogène générée par une grille, configuration de référence dont les propriétés statistiques sont parfaitement documentées, il s'agira d'évaluer dans quelle mesure un forçage plasma peut modifier les caractéristiques spectrales de la turbulence, redistribuer l'énergie entre les différentes échelles et influencer les mécanismes de production et de dissipation. L'originalité de cette approche réside dans la possibilité d'injecter de l'énergie directement aux petites échelles, dans une gamme fréquentielle habituellement associée aux phénomènes dissipatifs, ouvrant ainsi la voie à un nouveau régime de turbulence forcée hors équilibre.

Méthodologie

Le travail doctoral comportera deux volets complémentaires. Le premier consistera à étudier l'effet d'un forçage homogène, obtenu par l'actionnement simultané des électrodes plasma, afin de caractériser l'influence de la fréquence, du rapport cyclique et du mode d'alimentation (AC continu ou pulsé) sur les transferts d'énergie inter-échelles. Le second explorera un forçage spatialement inhomogène par activation sélective de groupes d'actionneurs, permettant de créer des distributions spatiales contrôlées de l'injection d'énergie. Cette approche, totalement inédite, permettra d'étudier le couplage entre

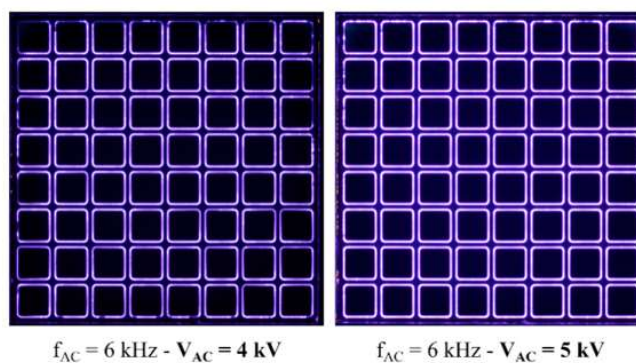


Figure 1 : Système plasma installé sur une grille homogène

hétérogénéités spatiales et cascade turbulente, ainsi que l'éventuelle apparition de mécanismes de transfert non locaux ou de cascades inverses.

Les décharges DBD produisant simultanément une force volumique électrohydrodynamique et des espèces réactives, le projet ouvrira également des perspectives vers des forçages combinant effets hydrodynamiques et thermodynamiques. Si cette dimension physico-chimique ne constitue pas l'objectif principal de la thèse, elle représente une extension naturelle des travaux vers le contrôle des écoulements réactifs et des procédés de combustion.

L'ensemble des études reposera sur une caractérisation expérimentale avancée des écoulements par vélocimétrie par images de particules (PIV) résolue en temps. Une attention particulière sera portée à l'estimation des plus petites échelles turbulentes et des taux de dissipation, nécessitant le développement de procédures spécifiques de réduction du bruit, de traitements multi-échelles et d'estimation des gradients de vitesse. Les données acquises permettront notamment d'évaluer les différents termes de l'équation de Kármán–Howarth–Monin–Hill (KMHM), afin de quantifier les mécanismes locaux de transfert d'énergie au sein de la cascade turbulente.

Verrou scientifique et originalité

Le projet ambitionne de développer une nouvelle approche du contrôle actif de la turbulence fondée sur un forçage localisé aux petites échelles et à haute fréquence. Contrairement aux approches classiques, qui agissent principalement sur les grandes structures énergétiques de l'écoulement, les actionneurs plasma DBD offrent la possibilité d'injecter directement de l'énergie dans une gamme spectrale généralement

associée aux phénomènes dissipatifs. Cette stratégie ouvre un nouveau paradigme de contrôle de la turbulence, non plus centré sur la modification des structures cohérentes de l'écoulement, mais sur le pilotage des mécanismes de transferts d'énergie inter-échelles eux-mêmes. L'objectif est ainsi de comprendre comment un forçage électrohydrodynamique de faible amplitude, appliqué à haute fréquence, modifie la dynamique intrinsèque de la cascade turbulente, les mécanismes de dissipation et les interactions entre grandes et petites échelles.

Au-delà de ses perspectives applicatives, ce projet constitue un outil expérimental unique pour explorer plusieurs questions fondamentales encore largement ouvertes en turbulence. En particulier, il permettra d'étudier le caractère local ou non des transferts d'énergie entre échelles, l'influence d'un forçage imposé dans la gamme dissipative sur la dynamique globale de l'écoulement ainsi que l'apparition éventuelle de mécanismes de transfert inverse ou de couplages non locaux entre échelles éloignées. La possibilité de contrôler indépendamment la fréquence, la localisation spatiale et l'intensité du forçage offre un niveau de maîtrise inédit des conditions expérimentales et ouvre la voie à l'étude d'une nouvelle classe de systèmes turbulents maintenus hors équilibre. L'originalité du projet ne réside donc pas uniquement dans l'utilisation d'actionneurs plasma, mais dans le développement d'une nouvelle discipline située à l'interface du contrôle des écoulements, de la physique des plasmas et de la turbulence expérimentale. En proposant de piloter directement la cascade énergétique plutôt que les seules structures de l'écoulement, ce travail ambitionne d'ouvrir un nouveau champ de recherche en mécanique des fluides, avec des retombées attendues aussi bien pour la compréhension fondamentale de la turbulence que pour le développement de stratégies innovantes de contrôle du mélange, de la combustion et des transferts dans les procédés industriels.

Environnement de travail

Ce sujet s'inscrit dans le projet ANR ENRICO (ANR-25-CE51-0954), financé dans le cadre de l'Appel à projets générique 2025. Il est porté conjointement par l'Institut PPRIME, reconnu pour son expertise dans le développement d'actionneurs plasma et le contrôle des écoulements, et le Laboratoire de Mécanique des Fluides de Lille (LMFL – Centrale Lille/CNRS), référence internationale dans le domaine de la turbulence de grille. Le doctorant évoluera dans un environnement scientifique particulièrement stimulant, en interaction étroite avec un post-doctorant, plusieurs stagiaires de Master 2 et les équipes des deux laboratoires. Le doctorat ainsi que les expériences seront réalisés très majoritairement sur le site de l'Institut PPRIME dans le bâtiment H2 sur le site du Futuroscope. Naturellement, des périodes

d'échanges seront proposées tout au long des 3 années du doctorat afin de formaliser la collaboration entre les deux laboratoires.

Profil recherché

Nous recherchons un étudiant en Master 2 ou école d'ingénieur avec des compétences en mécanique des fluides, thermique et/ou génie électrique, ainsi qu'une expérience en traitement de données. La curiosité scientifique, un bon niveau d'anglais et la capacité à travailler dans un environnement expérimental sont nécessaires.