

# Modélisation et Contrôle de la Turbulence Proche des Parois : de la Compréhension Physique aux Approches d'Apprentissage Automatique

Superviseurs : Lionel Agostini & Laurent Cordier

## Abstract

De nos jours, les simulations expérimentales et numériques fournissent progressivement un volume sans précédent de données extrêmement détaillées, qui doivent être examinées et interprétées. Il y a donc une urgence croissante de disposer d'outils d'investigation raffinés pour des analyses statistiques appropriées et le data mining. Les algorithmes d'apprentissage automatique (AA) offrent une nouvelle voie pour l'examen des problèmes non linéaires et de haute dimensionnalité, tels que la turbulence proche des parois. Le développement des méthodes d'AA, associé à l'abondance de données et combiné avec une solide compréhension de la turbulence, offre une opportunité unique de réaliser des avancées majeures en termes de progrès dans les écoulements confinés par les parois et leur contrôle.

## 1 Introduction

Les algorithmes d'apprentissage automatique (AA) offrent une nouvelle voie pour examiner les problèmes non linéaires et de haute dimensionnalité, tels que la turbulence proche des parois. Le développement des méthodes d'AA, associé à l'abondance de données et combiné avec une solide compréhension de la turbulence, présente une opportunité unique pour des avancées majeures dans les écoulements confinés par les parois et leur contrôle. Les objectifs clés de ce programme de recherche, en utilisant un large spectre d'analyses statistiques combinées avec diverses approches d'AA, sont de raffiner la théorie de la couche limite et de dériver des modèles capables de prédire des caractéristiques physiques pertinentes et la réponse aux perturbations de la turbulence proche des parois pour les écoulements incompressibles et compressibles, où les variations de densité sont causées par des fluctuations de pression ou de température, ou les deux. Un autre objectif est de fournir des solutions pour réduire la traînée et, dans le cas d'une couche limite thermique, maximiser le transfert de chaleur tout en maintenant les pertes au minimum.

## 2 Contexte Sociétal

Les écoulements turbulents déterminent les caractéristiques de performance de nombreux équipements industriels et applications environnementales. Une conséquence importante de la turbulence est la forte traînée par frottement sur les surfaces, l'augmentation relative par rapport aux conditions laminaires pouvant facilement atteindre des facteurs de 10 à 100, selon le nombre de Reynolds de l'écoulement. Dans de nombreuses applications, la traînée par frottement influence extrêmement l'efficacité opérationnelle de l'appareil ou du processus. Cela s'applique particulièrement au transport, impliquant soit des corps auto-propulsés se déplaçant dans un fluide, soit des fluides transportés

dans des conduits et des tuyaux. L'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) des Nations Unies prévoit que les émissions de l'aviation devraient approximativement tripler d'ici 2050, de sorte que les avions pourraient représenter 25% du budget carbone mondial (ICCT). Il y a donc une pression significative pour réduire les émissions liées au transport, dont la traînée par frottement est une composante majeure. D'autre part, améliorer les flux turbulents dans la région confinée par les parois est généralement bénéfique pour le transfert de chaleur aux parois. Ainsi, dans le cas des échangeurs de chaleur, un équilibre doit être trouvé entre les pertes induites par la traînée et le transfert de chaleur. Avec le développement des énergies renouvelables, l'augmentation de l'efficacité des échangeurs de chaleur est un domaine de recherche en pleine expansion, particulièrement pour les récepteurs solaires.

### 3 Défis Scientifiques

Contrairement à de nombreux domaines scientifiques (comme le fonctionnement du cerveau, par exemple), la mécanique des fluides est dans une position enviable grâce à une équation de premier principe, les équations de Navier-Stokes (NS), pour décrire les écoulements. En principe, les mouvements d'écoulement peuvent être parfaitement prédits en résolvant ces équations (déterminisme de Laplace). Cependant, les équations de NS se révèlent extrêmement complexes et même impossibles à résoudre dans certains cas, principalement en raison de leur non-linéarité. Pour tout fluide visqueux en mouvement relatif à un solide, la vitesse diminue à zéro à la paroi induisant une couche de cisaillement. L'écoulement produit par cette couche de cisaillement crée des structures turbulentes chaotiques sur un large spectre d'échelles de longueur et de temps. Plus la couche de cisaillement est forte, plus la dynamique est riche et complexe, ce qui rend l'étude de la turbulence proche des parois extrêmement fascinante et difficile. Depuis Prandtl au début du siècle dernier, les écoulements proches des parois ont été intensivement étudiés, cependant, plus de deux siècles après l'introduction des équations régissant les écoulements turbulents, notre compréhension de la turbulence proche des parois reste pitoyablement modeste. Cela est d'autant plus vrai que, à mesure que le nombre de Reynolds augmente, l'écoulement turbulent devient de plus en plus complexe avec la production de nouvelles familles de structures cohérentes enrichissant la dynamique de l'écoulement (voir Figure 1).

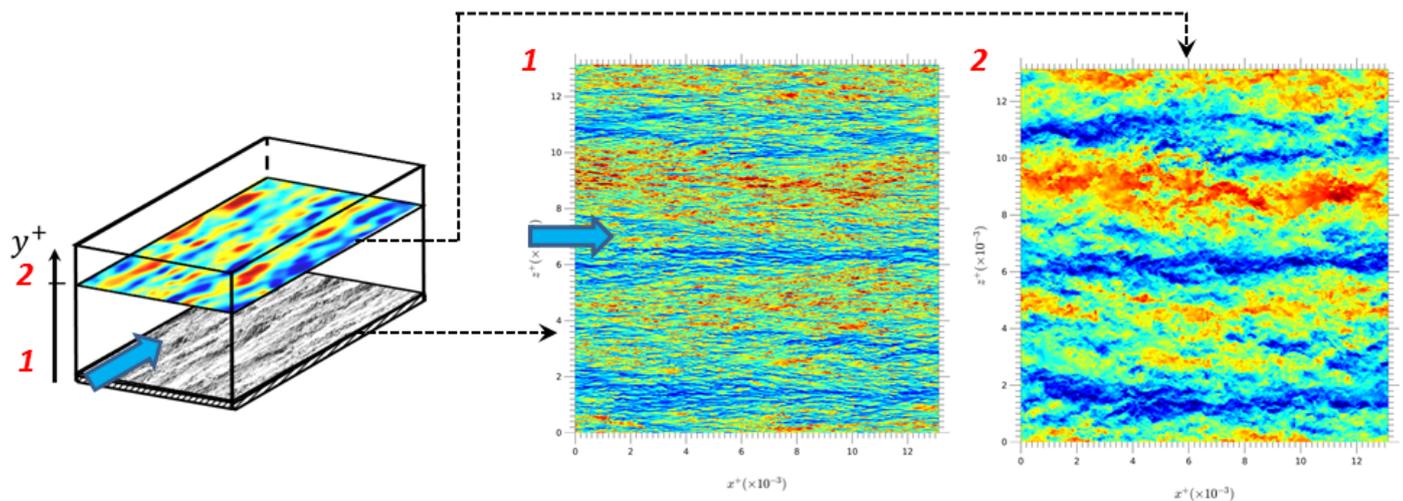


Figure 1: Champ de vitesse longitudinale pour  $Re\tau \approx 4200$ . 1 : dans la sous-couche visqueuse et 2 : dans l'écoulement extérieur (mi-hauteur de la loi logarithmique).

Sans une compréhension suffisamment détaillée des écoulements turbulents, la plupart des stratégies

de contrôle restent sous-optimales. Grâce aux récentes avancées en métrologie et à la réduction drastique des coûts de calcul, la quantité et la taille des bases de données ont considérablement augmenté en mécanique des fluides. Cette abondance de données pose de nouveaux défis pour le post-traitement qui nécessite des outils appropriés. Heureusement, de nombreuses techniques ont été développées par la communauté de l'apprentissage automatique qui sont facilement applicables aux données fluides spatio-temporelles, et sont soutenues par les récentes avancées en matériel (développement des plateformes GPU/TPU), en algorithmes et en bibliothèques open-source.

## 4 Objectifs de la Recherche

Par définition, l'apprentissage automatique est le domaine d'étude qui permet aux ordinateurs d'apprendre sans être explicitement programmés. Dans ce projet, les algorithmes d'apprentissage automatique ne visent pas à remplacer les connaissances issues de la physique (lois d'évolution, par exemple) par des données, mais plutôt à utiliser les modèles et les données en synergie. En effet, il serait complètement absurde de se débarrasser de siècles de connaissances scientifiques ou de modèles éprouvés. Le postulant utilisera donc les méthodes d'apprentissage automatique comme compléments aux approches traditionnelles en imposant, par exemple, des propriétés de symétrie ou des modèles évolutifs connus.

L'identification des phénomènes qui gouvernent la dynamique des écoulements reste l'un des principaux défis de la physique et de l'ingénierie aujourd'hui. Cette complexité a traditionnellement été abordée par des modèles de turbulence statistiques, mais ceux-ci se sont révélés d'une généralité limitée, même dans le cas où les modèles sont basés sur les équations de transport les plus élaborées pour les second moments des fluctuations turbulentes. Les développements récents des méthodes d'apprentissage automatique pour la modélisation de problèmes à grande échelle et leur contrôle s'avèrent être une voie prometteuse. Basé sur nos connaissances actuelles des écoulements turbulents et des progrès qui restent à réaliser en utilisant les techniques d'apprentissage automatique, on peut s'attendre à introduire de nouvelles méthodes de contrôle plus efficaces. De plus, tout effort visant à démêler la nature des structures peuplant les couches limites, et à comprendre leur dynamique, est crucial pour progresser vers une modélisation universelle de la turbulence et contribue à dériver des systèmes de contrôle efficaces compatibles avec les exigences des applications industrielles.

Après des années d'analyse approfondie de la dynamique des couches limites dans les régimes compressibles et incompressibles, et ses études récentes utilisant des algorithmes d'apprentissage automatique, le postulant croit que des progrès significatifs dans la compréhension des écoulements proches des parois et leur contrôle ne peuvent être réalisés qu'en tirant le meilleur parti d'une solide base en turbulence et des nouvelles approches offertes par l'apprentissage automatique.

## 5 Conclusion

Ce programme de recherche vise à combiner les avancées en apprentissage automatique avec une compréhension approfondie de la turbulence proche des parois pour développer des modèles prédictifs et des stratégies de contrôle efficaces. Les résultats attendus pourraient avoir un impact significatif sur l'optimisation des performances des équipements industriels et des applications environnementales, contribuant ainsi à des solutions plus durables et efficaces.

## 6 Références

1. Lionel Agostini et Michael Leschziner. “Analyse assistée par auto-encodeur de la modulation d’amplitude et de longueur d’onde de la turbulence proche des parois par des structures à grande échelle externes dans un écoulement en canal au nombre de Reynolds de friction de 5200”. *Physics of Fluids*, 34.11 (2022).
2. Davide Gatti et Maurizio Quadrio. “Pertes de performance de la réduction de traînée par forçage en spanwise à des valeurs modérées du nombre de Reynolds”. *Physics of Fluids*, 25.12 (2013), p. 125109.
3. UK Seth et al. “Étude paramétrique d’une action plasma DBD basée sur le modèle de Suzen-Huang”. *Journal of Electrostatics*, 93 (2018), p. 1-9.