

## ED SMAER

### Sujet de thèses 2014

**Laboratoire :** Physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes (PMMH), UMR7636 CNRS, ESPCI (Paris), Université Pierre et Marie Curie (UPMC)

**Etablissement de rattachement :** ESPCI – Ecole Supérieure de Physique de Chimie Industrielles de la ville de Paris

**Directeur de thèse et section CNU ou CNRS :** Jean-Luc Aider (CR1 CNRS – HDR UPMC) – section 10 du CNRS. [aider@pmmh.espci.fr](mailto:aider@pmmh.espci.fr) - 01 40 79 58 52

**Codirection et section CNU ou CNRS :**

**Titre de la thèse :** Contrôle réactif d'écoulements décollés 2D ou 3D par asservissement visuel.

**Collaborations dans le cadre de la thèse :**

Des collaborations sont initiées avec l'ONERA (Meudon), le laboratoire PPrime (Poitiers) et en cours de discussion avec le Laboratoire de Mécanique des Fluides de l'Ecole Centrale de Lille.

#### Résumé du sujet :

Les écoulements décollés sont omniprésents dans la nature comme dans les écoulements industriels (aérodynamique externe des véhicules, des bâtiments, écoulements autour d'aubes de turbines, aérodynamique interne dans des tuyaux, etc) ou ils sont en général sources de nuisances (vibrations, bruit aéroacoustique, forces de traînée ou de portance). Les enjeux associés sont considérables. Notre objectif est d'explorer de nouvelles stratégies de contrôle d'écoulement en boucle fermée où le capteur est « visuel » car basé sur le calcul en temps réel de champs de vitesses. Cette approche expérimentale novatrice vient d'être validée et ouvre de nouvelles perspectives pour le contrôle d'écoulement. Nous pouvons évaluer l'état de l'écoulement à haute fréquence et utiliser des algorithmes de contrôle jusqu'alors réservés aux approches numériques. En particulier nous voulons mettre en œuvre des approches statistiques de type « Machine learning » pour rechercher des lois de commande optimale ou d'apprentissage par construction de modèle d'ordre réduit pour prédire la dynamique de l'écoulement. Nous chercherons à contrôler un écoulement décollé 2D (marche descendante) avant de s'intéresser, si possible, à un écoulement décollé 3D (présence de tourbillons longitudinaux). Le travail est expérimental et bénéficiera des travaux réalisés précédemment (expérience interfacée et pilotée, PIV en temps réel). Les expériences sont réalisées en tunnel hydrodynamique. L'étudiant devra avoir de solides connaissances en mécanique des fluides et un goût prononcé pour l'expérimentation, l'automatique et la programmation.

**Sujet développé** (à présenter en 2 ou 3 pages maximum, en précisant notamment le contexte, les objectifs, les résultats attendus)

**Problématique générale :**

Les écoulements décollés sont omniprésents, dans la nature comme dans les écoulements industriels. Si on considère les écoulements aérodynamiques ou hydrodynamiques autour de véhicules terrestres, aériens ou sous-marins, les écoulements décollés sont en général sources de nuisances : traînée aéro(hydro)dynamique, vibrations dues aux interactions fluide-structure, bruit aéroacoustique, etc. Afin de limiter ces effets, on peut essayer d'optimiser la silhouette des véhicules ou bien chercher à contrôler l'écoulement à l'aide d'artifices passifs ou actifs. Il existe de nombreuses démonstrations expérimentales ou numériques de l'efficacité du contrôle d'écoulement en boucle ouverte mettant en œuvre des actionneurs passifs ou actifs. Cependant, afin d'optimiser l'efficacité du contrôle et d'améliorer son bilan énergétique, il apparaît nécessaire de mettre en œuvre des stratégies de contrôle d'écoulements en boucle fermée. Ce type d'approche est difficile à mettre en œuvre expérimentalement ce qui explique le peu de publications sur ce sujet. L'objectif de cette thèse est de réaliser des expériences de contrôle d'écoulements décollés en boucle fermée en utilisant un capteur optique comme input pour la boucle de contrôle. Nous chercherons à utiliser des perturbations 3D pour contrôler un écoulement décollé sur une géométrie 2D (marche descendante) avant de chercher à contrôler un écoulement décollé avec des effets 3D (structures longitudinales interagissant avec la bulle de recirculation).

### **Contexte de la thèse:**

Dans le cadre de la thèse de N. Gautier (étudiant UPMC, co-financement DGA-CNRS, fin prévue : septembre 2014), nous avons développé et validé un nouveau système de vélocimétrie par images de particules. L'amélioration récente et très rapide des performances des cartes GPU (carte graphique, Graphics Processing Unit) et du langage de programmation associé (CUDA) nous a permis de tirer avantage des algorithmes de vélocimétrie par flot optique. En effet, l'architecture des GPU (chaque GPU est constituée de plusieurs centaines à plusieurs milliers de coeurs) et la nature hautement parallélisable de l'algorithme de Flot Optique nous permet de calculer *en temps réel* les deux composantes du champ de vitesses dans un plan avec des fréquences d'acquisition pouvant atteindre 120 Hz. Des fréquences de calcul supérieures sont aisément accessibles avec une meilleure carte GPU (jusqu'à plusieurs centaines de Hz) mais n'étaient pas nécessaires pour nos applications. Ces performances sont bien supérieures à celles obtenues avec des algorithmes de PIV classiques.

Ce nouveau moyen de mesure nous ouvre de nouvelles perspectives :

- pour le contrôle d'écoulement. Il est maintenant possible de calculer à haute fréquence une grandeur globale ou locale caractérisant l'état du système qui peut alors être utilisée comme « input » dans une boucle de contrôle. La caméra est alors utilisée comme un « capteur visuel » et remplace avantageusement les capteurs pariétaux (pression, frottement) et plus encore des capteurs en volume en général intrusif comme le fil chaud. C'est pour cette raison que nous parlons d'« asservissement visuel ».
- pour l'analyse rapide des propriétés d'écoulements complexes. Les études paramétriques sont accélérées grâce au calcul de champs vitesse bien plus rapide que par PIV classique. Des approches statistiques sont maintenant envisageables sur des temps relativement courts.

Nous avons ainsi pu tout récemment réaliser les premières expériences de contrôle réactif par asservissement visuel de l'écoulement massivement décollé en aval d'une marche descendante [1, 2, 3]. Les premiers résultats sont très encourageants bien que n'utilisant qu'un actionneur très simple (soufflage pulsé par une fente homogène selon la direction transverse) à une position donnée en amont du décollement. Les stratégies de contrôle possibles grâce à

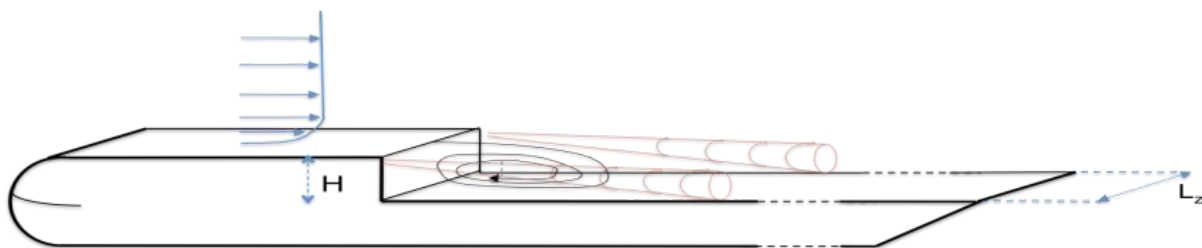
cette nouvelle approche sont très diverses et peuvent aisément s'appliquer à d'autres écoulements.

### **Objectif et programme de la thèse :**

Le contrôle par asservissement visuel est un nouvel axe de recherche pour le contrôle d'écoulement. Son potentiel d'application est réel et très large car le calcul par flot optique est robuste et peu cher. La visualisation d'un scalaire passif ou de particules transportés par l'écoulement permet le calcul de champs de vitesse en temps réel. Des applications à la réduction de traînée de pression ou de frottement, à la réduction du bruit aéro-acoustique ou encore au mélange sont aisément envisageables.

Dans un premier temps, nous allons prolonger les études initiées sur la marche descendante 2D. Nos travaux ont porté sur le soufflage continu ou pulsé par une fente transverse placée en amont du décollement. Nous voulons maintenant explorer les effets de perturbations 3D générées par des générateurs de vortex fluidiques. L'objectif sera cette fois de minimiser l'énergie utilisée pour contrôler le décollement. Pour ce faire nous ferons varier la forme et les dimensions des générateurs de vortex en essayant de réduire au minimum la section de soufflage. Nous nous proposons ici de mettre en œuvre une approche originale, à savoir la programmation génétique, pour déterminer la loi de commande optimale pour piloter l'amplitude, la fréquence et le duty-cycle de la perturbation. D'autres approches seront évaluées, comme la dérivation de modèles d'ordre réduit par des méthodes d'identification de type apprentissage statistique.

Le contrôle par générateurs de vortex fluidique en amont du décollement implique une modification de l'état de la couche limite incidente. A ce titre il nous apparaît intéressant de consacrer un peu de temps au contrôle de la transition à la turbulence de la couche limite se développant sur la plaque plane. Le passage de la configuration marche descendante à une configuration plaque plane est simple et rapide. A l'aide des mesures en temps réel, l'état de la couche limite peut être évalué en temps réel et il est donc aisé d'évaluer différentes approches de contrôle en boucle fermée de la couche limite. Ce sujet est intéressant en soit mais aussi dans la perspective du contrôle des décollements car l'état de la couche limite incidente (turbulent ou laminaire, présence de structures cohérentes) va impacter directement la couche cisailée et la longueur de la bulle de recirculation.



*Figure 1. Ecoulement en aval d'une marche descendante 3D.*

Enfin, nous voulons également contrôler des écoulements décollés avec des effets 3D induits par la géométrie. Cela suppose la mise en place d'un nouveau montage, c'est pourquoi cette action se déroulera plutôt au cours de la seconde partie de la thèse. Le montage est illustré schématiquement sur la figure 1. Le confinement latéral sera à l'origine de structures tourbillonnaires 3D qui impacteront l'écoulement décollé. L'objectif sera ici de rechercher des stratégies de contrôle adaptées à la tridimensionalisation de l'écoulement. De nouvelles lois de commande devront être évaluées (programmation génétique, par exemple). Nous introduirons également de nouvelles perturbations avec du soufflage latéral pour impacter les structures longitudinales directement, tout en contrôlant l'écoulement décollé comme précédemment.

Nous chercherons également à améliorer la vélocimétrie temps-réel en intégrant la mesure de la troisième composante (Stéréo-PIV). Il s'agira ici d'un développement logiciel mais qui supposera aussi l'achat de matériel (nouvelle caméra, carte d'acquisition, carte GPU). Cette évolution sera donc conditionnée à notre budget. Ceci nous permettrait d'évaluer l'état de l'écoulement à partir de mesures des trois composantes du champ de vitesse dans un plan transverse. Ceci nous donnerait en particulier accès à la signature des structures tourbillonnaires longitudinales ce qui serait particulièrement pertinent pour le cas de la marche descendante 3D.

Les objectifs proposés ici sont ambitieux mais réalistes. Une partie des expériences ne demandera pas de modification majeure du montage expérimental. Les mesures par flot optique sont immédiates. L'étudiant pourra donc commencer très vite les premières expériences et obtiendra rapidement des premiers résultats. L'extension à des écoulements fortement 3D nous paraît une étape importante. Le passage à cette nouvelle géométrie se fera progressivement au cours de la thèse.

### **Références (disponibles sur arXiv ou la revue quand déjà publiées) :**

- 1. Real-time flow optics computation for closed-loop flow control**  
*N. Gautier, J.-L. Aider*  
Jour. of Visualization (arXiv preprint arXiv:1306.2461) (2014)
- 2. Frequency lock closed-loop control of a separated flow using visual feedback**  
*N. Gautier, J.-L. Aider*  
Soumis à Exp. in Fluids (2014)
- 3. Experimental Feed-Forward Control of the Backward-Facing Step Flow**  
*N. Gautier, J.-L. Aider*  
Soumis à J. Fluid. Mech. (2014)
- 4. Control of the separated flow downstream a backward-facing step using real-time visual feedback**  
*N. Gautier, J.-L. Aider*  
Proc. R. Soc. A, vol. 469, no. 2160 (2013)
- 5. Upstream open-loop control of the recirculation area downstream a backward-facing step**  
*N. Gautier, J.-L. Aider*  
Proceedings of the 3rd GDR Symposium « Flow séparation control », éditions Cepadué, Lille, France, 2013.
- 6. Drag reduction on the 25° slant angle Ahmed reference using pulsed jets**  
*P. Joseph, X. Amandolese, J.-L. Aider*  
Exp. in Fluids, **52 (5)**, 1169-1185 (2012)