

## Académie des sciences

### Séance solennelle de réception des Membres élus en 2002

17 juin 2003

---

#### La mécanique des fluides entre deux rives

Patrick Huerre

C'est un très grand honneur et un très grand plaisir d'être parmi vous aujourd'hui pour présenter quelques étapes de mon parcours scientifique et personnel, parcours qui s'est successivement déroulé sur deux rives comme l'annonce le titre de mon intervention.

La mécanique des fluides est une discipline classique, dont les fondements ont été posés au 18<sup>e</sup> siècle par quelques maîtres, Leonhard Euler, Daniel Bernoulli et Joseph Louis de Lagrange. Les lois de la dynamique des fluides ont été fermement établies au 19<sup>e</sup> siècle par Henri Navier et Sir George Gabriel Stokes. Cet essor s'est trouvé conforté au 20<sup>e</sup> siècle par le développement de l'aéronautique. Des avancées majeures sont ainsi dues à Ludwig Prandtl, G.I. Taylor, James Lighthill et George Batchelor entre autres personnalités marquantes.

Mais pourquoi, me direz-vous, pousser plus avant l'étude de cette discipline dès lors que les lois fondamentales régissant le mouvement des fluides sont connues depuis un siècle et demi ? C'est en effet l'une des singularités de cette science qui fait également son charme et qui la distingue d'autres champs d'investigation. Les équations de Navier-Stokes sont des équations aux dérivées partielles non linéaires ; elles ne peuvent livrer leur part de mystère que si l'on est en mesure d'en extraire par une démarche mathématique appropriée des solutions explicites, des lois d'échelle, des critères de sélection, etc. C'est tout l'art du mécanicien des fluides usuels tels que l'air et l'eau. Pourquoi ai-je donc choisi de devenir chercheur dans ce domaine somme toute traditionnel ? Il y a bien sûr une part de hasard et j'y reviendrai. Je crois avoir été attiré par l'étude des mouvements des fluides parce qu'elle m'offrait la possibilité de « faire de la théorie » en vue d'obtenir une image, ou mieux une suite d'images, un film qui pourrait ensuite être confronté à des observations expérimentales à notre échelle. La mécanique des fluides est pour l'essentiel une science du macroscopique. Elle ne nécessite pas de facultés d'abstraction inhabituelles comme par exemple la physique théorique. C'est donc avec une exaltation renouvelée, à ma portée, que je m'émerveille devant le pouvoir de prédiction, pour faire un anglicisme, d'une démarche mathématique, lorsqu'elle conduit, par exemple à reproduire la danse des tourbillons dans le sillage d'un cylindre ou d'une sphère en mouvement. La nature évolutive, dynamique, spatio-temporelle du mouvement des fluides m'a toujours paru très attrayante.

C'est donc assez naturellement qu'à la sortie de l'Ecole centrale en 1970, je choisis de me déplacer sur la rive ouest des Etats-Unis pour y préparer ma thèse à l'université de Stanford. En toute honnêteté, j'ai été fortement attiré par l'ambiance exceptionnelle qui régnait alors dans la région de San Francisco, en pleine époque des *flower children* et du *Peace and Love*. Le mode de fonctionnement de la recherche américaine m'est tout de suite apparu vivifiant, fondé sur le travail en équipe, dénué de formalisme, chacun ayant à cœur de baisser les défenses et d'aborder un problème nouveau avec simplicité et fraîcheur.

Mon premier retour sur la rive européenne s'est fait à la fin des années 70, non pas en France, mais en Angleterre, à Leeds, en tant que postdoc de David Crighton, théoricien et mathématicien appliqué extraordinaire, dans la grande tradition britannique. David Crighton était un homme simple, modeste, attentif aux autres, malheureusement disparu prématurément

en 2000. Nul doute qu'il m'a donné le goût des mathématiques appliquées à la mécanique des fluides et c'est sous son impulsion que je me suis intéressé aux instabilités hydrodynamiques.

Un des principaux enjeux de la mécanique des fluides porte en effet sur la compréhension de la transition laminaire-turbulent, en d'autres termes, la transition « ordre-désordre ». C'est à ce titre que ma discipline a servi dans les années 60-80, et sert encore, de terrain de jeu privilégié pour les physiciens du non-linéaire et du chaos déterministe, de la théorie des bifurcations et de la dynamique des textures. C'est une discipline où l'École française occupe une place de tout premier plan par l'ampleur et l'étendue de ses contributions. Pour ma part, j'ai choisi de privilégier une démarche fondée sur les instabilités et de m'intéresser aux différentes étapes impliquées dans la transition laminaire-turbulent pour des écoulements prototypes intervenant dans les applications au génie mécanique et à l'aéronautique. C'est un domaine que je n'ai plus quitté depuis et où je pense avoir fait mes travaux les plus significatifs. Mais qu'entend-on par instabilité? Les équations fondamentales de la mécanique des fluides admettent toute une panoplie de solutions stationnaires, c'est-à-dire indépendantes du temps, l'une des plus simples étant, par exemple, celle donnant lieu à un profil de vitesse parabolique laminaire dans un canal entre deux parois, dit écoulement de Poiseuille. Les expériences révèlent qu'au-delà d'une valeur critique du débit, la solution de Poiseuille perd sa stabilité au profit d'autres de plus en plus complexes, tridimensionnelles, instationnaires, pour aboutir, par bifurcations successives, à la turbulence. Ce cadre conceptuel est également pertinent pour bien d'autres configurations, par exemple le sillage derrière un objet, la couche de mélange entre deux courants parallèles, mais de vitesse différente, la couche limite au voisinage d'une paroi, le jet, etc.

Mais permettez-moi d'interrompre provisoirement cet exposé pour en revenir à mon parcours personnel. Le hasard a voulu que, à la fin de mon postdoc en 78, Janos Laufer, président du département d'*Aerospace Engineering* de l'Université de Californie du Sud (USC) à Los Angeles m'offre la possibilité de devenir *Assistant Professor*. Je suis donc passé à nouveau sur la rive américaine et me suis résolument fixé dans la sphère universitaire. Janos Laufer, juif hongrois ayant fui la terreur nazie, avait rassemblé une équipe unique de chercheurs de toutes provenances. Il avait eu à cœur de constituer le groupe en veillant non seulement à la complémentarité scientifique de ses membres, mais aussi en s'assurant de leurs qualités humaines et de leur compatibilité. Janos Laufer, malheureusement décédé, était très représentatif de l'intellectuel de la *Mittel Europa* qui, par sa grande sagesse tirée de son expérience personnelle, donnait toute sa dimension humaine à la recherche académique. Toute une génération d'intellectuels émigrée d'Europe centrale a ainsi très fortement contribué à l'essor de la recherche nord-américaine. C'est donc dans ce vivier que, pendant onze ans, j'ai développé mes propres thèmes de recherche, encouragé en cela par le soutien amical de mes collègues.

L'approche classique permettant de rendre compte de l'instabilité d'un écoulement consiste à injecter en amont, par la pensée ou expérimentalement, une perturbation de fréquence et d'amplitude données et à suivre son développement dans la direction du courant. L'écoulement est alors qualifié d'instable vis-à-vis de cette fréquence si la perturbation croît exponentiellement vers l'aval. Cette démarche revient donc à considérer l'écoulement comme une boîte noire où l'entrée est représentée par la perturbation amont et la sortie par la perturbation aval. La sensibilité de l'écoulement aux fluctuations les plus dangereuses pour la transition est ainsi déterminée. Jean-Marc Chomaz, Peter Monkewitz, Larry Redekopp et moi-même avons montré que cette approche n'est pas toujours fondée. Elle ne s'applique en fait qu'aux écoulements dits amplificateurs de bruit comme la couche limite au voisinage d'une paroi, la couche de mélange entre deux courants, et le jet, dont la dynamique est extrinsèque, c'est-à-dire déterminée par le forçage amont. D'autres configurations donnent lieu au contraire à des oscillations périodiques intrinsèques, synchronisées dans tout l'espace

et indépendantes du forçage amont. L'archétype de cette classe d'écoulements est l'allée de tourbillons alternés de Bénard-Karman dans le sillage d'un cylindre en mouvement. Comment peut-on savoir a priori si un écoulement est amplificateur de bruit ou oscillateur intrinsèque ? La réponse à cette question nous est venue en transplantant les notions d'instabilité convective et d'instabilité absolue introduites par les physiciens des plasmas.

Une fois identifiée la nature intrinsèque de la dynamique, est-il possible de déterminer la fréquence et la distribution spatiale des oscillations synchronisées observées ? Nous avons apporté des réponses théoriques à ces questions en ayant recours à tout l'arsenal des méthodes asymptotiques fréquemment utilisées en mécanique des fluides. L'objet théorique essentiel se trouve être un mode global, c'est-à-dire un paquet d'ondes étendu vivant dans l'écoulement et battant à une fréquence bien déterminée. Nous avons obtenu un critère de sélection qui s'est trouvé confirmé par les expériences de laboratoire et par les simulations numériques, à condition de se restreindre au régime linéaire, c'est-à-dire à de faibles niveaux de fluctuations. Cette problématique a mobilisé une partie notable de mon temps pendant ces onze années passées en Californie.

En 1989, s'est présentée l'occasion de passer à nouveau sur la rive européenne. Première expérience professionnelle en France à la quarantaine bien sonnée, avec ma nomination comme professeur à l'Ecole polytechnique, bientôt suivie par mon entrée au Centre national de la recherche scientifique. Nouvelle aventure qui m'a donné cette fois la possibilité de fonder le laboratoire d'hydrodynamique dans l'environnement intellectuel stimulant de Polytechnique. Les premières années ont été fortement mobilisées par le développement d'un programme d'enseignement dans ma discipline. Tâche exigeante menée en collaboration avec Jean Salençon qui, par sa rigueur intellectuelle, son énergie et son amitié, m'a fait éviter de multiples écueils. C'est également avec enthousiasme et obstination qu'avec Jean-Marc Chomaz, ami et chercheur brillant et inventif, nous avons rassemblé et nous animons une équipe de recherche initialement centrée autour des instabilités, mais désormais bien diversifiée dans différents domaines connexes à cette thématique. Sans doute ai-je été poussé dans cette voie par la tentation de reproduire ce que j'avais connu à l'USC, mais cette fois en tant qu'animateur. Dès le début, nous avons privilégié l'interaction forte avec des expériences relativement simples. J'ai personnellement trouvé cette phase exaltante, tant dans ses aspects humains que scientifiques. Quid de la recherche proprement dite ? La problématique des modes globaux, précédemment traitée dans l'approximation linéaire, a été cette fois abordée dans un cadre pleinement non linéaire, sans faire aucune hypothèse restrictive sur l'ordre de grandeur des perturbations. Paradoxalement, l'analyse s'est révélée moins ardue que son homologue linéaire. Nous sommes maintenant en mesure de déterminer avec précision la fréquence et la distribution spatiale des tourbillons dans un sillage, auquel j'avais fait allusion au début de cet exposé. D'autres applications ont également été possibles, par exemple pour rendre compte de la dynamique de l'éclatement tourbillonnaire sur une aile delta aux angles d'incidence élevés.

J'ai donc été pleinement comblé par la pratique de la mécanique des fluides : elle a conforté mon intuition initiale que les développements mathématiques peuvent effectivement conduire à de belles images d'allées tourbillonnaires.