

■ Turbulence : déterministe, cependant aléatoire et pire que le chaos,

à Centrale Lille, les 12 et 13 juin 2019

L'école Centrale de Lille nous a reçus pour un stage de deux jours sur le thème de la turbulence les 12 et 13 juin 2019.

L'accueil chaleureux autour d'un café de bienvenue fut fait en présence du directeur de l'école.

Nous avons ensuite initié notre approche du sujet avec un cours d'introduction aux problématiques de la Turbulence effectué par le professeur J. Vassilicos.

Après une évocation des fondamentaux de la mécanique des fluides, et un petit détour historique nous permettant de revoir les contributions de Saint Venant, Stokes, Navier et Reynolds, nous nous sommes concentrés sur le cœur du sujet : la turbulence.

Les écoulements turbulents à hauts nombres de Reynolds sont fondamentalement non linéaires.

Pour apprécier la physique de ces écoulements, le professeur Vassilicos a réduit l'équation de Navier-Stokes à celle de Burgers, et a ensuite multiplié les exemples « physiques » pour éclairer l'auditoire.

Les transferts d'énergie au sein de ces écoulements se font en cascade. Les tourbillons initiaux évoluent des échelles les plus grandes vers les plus petites. Ce phénomène appelé cascade turbulente a été analysé par Kolmogorov [1].

Selon le célèbre mathématicien, le transport d'énergie se fait sans pertes, par étapes, des grands tourbillons vers les plus petits. Le comportement du fluide vérifie alors des lois d'échelle régulières, qui ont été confirmées par de nombreuses études expérimentales. En-deçà d'une dimension dénommée dimension de Kolmogorov, les effets de viscosité se manifestent et assurent la dissipation d'énergie.

La turbulence étant "chaotique", l'exploitation des mesures se fait dans un cadre statistique en raison de la non-stationnarité des écoulements. Nous avons terminé la matinée en évoquant, sous l'hypothèse d'ergodicité, les plaisirs de la recherche des différents ordres statistiques de la distribution de vitesse.

Après la pause déjeuner, le professeur J. Foucaut nous a présenté les différentes méthodes expérimentales exploitées pour suivre et mesurer la turbulence.

Son expertise s'appuie sur un usage conséquent de la soufflerie dont dispose l'école, et elle fut indéniablement appréciée. Nous avons analysé en détail le fonctionnement des anémomètres à fils chauds.

L'estimation de la vitesse du fluide s'effectue en estimant le processus de transfert thermique engendré par l'écoulement. La loi de King en est l'un des éléments clés.

Nos lycées disposent usuellement de ces dispositifs mais ils sont exploités dans le laboratoire à des résolutions et des précisions peu communes.

Nous avons ensuite évoqué la technique de vélocimétrie par image de particules (PIV).

Cette technique d'imagerie est basée sur l'exploitation des caractéristiques gaussiennes d'un faisceau laser. Le fluide est éclairé dans un plan par un laser de puissance. Les particules injectées dans le fluide diffusent le faisceau. La lumière diffractée est capturée par un système optique à haute résolution. Chaque particule non résolue directement va, du fait de la diffraction, pouvoir être résolue sur la matrice CMOS.

Les images sont enregistrées séquentiellement et correspondent à l'émission successive de deux impulsions laser. Entre deux images, une technique d'intercorrélation permet d'estimer le déplacement des particules entraînées par le fluide.

L'intercorrélation, pour des raisons de complexité et de rapidité, est calculée par transformée de Fourier 2D.

Le tout permet de visualiser le mouvement du fluide dans l'ensemble du plan éclairé.

En fin d'après-midi, nous nous sommes déplacés sur le site de l'ONERA (Office national d'études et de recherches aérospatiales) pour visiter les souffleries massives dont dispose le centre de Lille. Les tunnels à vent ont des diamètres de plusieurs mètres, et permettent de réaliser des écoulements dont la vitesse peut atteindre 60 mètres par seconde. Le centre dispose de plusieurs tunnels de qualités distinctes.

Un tunnel horizontal assurant un écoulement à très faibles perturbations, et hautes vitesses, permet d'étudier le comportement du fluide au voisinage de différents profils de vol. Un tunnel vertical d'une quarantaine de mètres permet de simuler le comportement en vrille d'un avion, difficile à déterminer par la simulation numérique. Dans ce cas, des réductions d'échelles sont nécessaires.

En fin de journée, nous avons été invités par l'école, dans un restaurant du centre de Lille. Nous y avons retrouvé nos hôtes. L'instant convivial, apprécié par tous, nous a permis d'évoquer une diversité de sujets. L'évolution des enseignements scientifiques, et du public concerné, fut évidemment au cœur de nos débats.

Le deuxième jour s'est ouvert par un cours sur les pratiques modernes de simulation numérique en mécanique des fluides. J.-P. Laval, directeur de recherche au CNRS, nous a accompagnés dans ces méandres numériques.

Simuler le comportement d'un fluide en turbulence est une tâche complexe.

Du fait des lois d'échelle de Kolmogorov, il faut idéalement pouvoir résoudre des cellules jusqu'aux dimensions permettant la dissipation de l'énergie (dimension de Kolmogorov). L'exemple classique d'une simulation météorologique nous permet de saisir la difficulté du processus, la dimension des cellules sources du phénomène est de l'ordre de la dizaine de kilomètres, la cellule de Kolmogorov associée est de l'ordre du millimètre, le facteur d'échelle est supérieur à 10 millions, il doit être déployé sur une géométrie 3D (maillage de 1021 points). Ce processus est aujourd'hui et pour quelque temps encore irréalisable.

Différentes techniques sont utilisées pour contourner cette difficulté. Elles sont le fruit de compromis distincts, et sont adaptées aux objectifs de recherche.

Nos collègues utilisent finalement des installations de calcul déporté et des codes massivement parallèles. Le concept de l'IaaS (Infrastructure as a Service) est mis en œuvre. Les puissances de calcul mobilisées dépassent la centaine de téraflops et utilisent plusieurs milliers de cœurs.

En fin de matinée, nous avons travaillé avec le logiciel Star-CCM+ pour simuler des écoulements autour d'une aile. Au-delà d'une relative complexité d'approche, le coût de ce logiciel rend son usage délicat dans le cadre de nos établissements. Une solution OpenSource exploitable équivalente est disponible et s'appelle OpenFoamTM pour les éventuels curieux. Les adeptes des licences académiques peuvent aussi avoir recours à AutodeskTM ou à SolidWorksTM.

Après une pause déjeuner, nous nous sommes dirigés vers la soufflerie de Centrale Lille. Le "tunnel à vent" est d'une dimension plus réduite que ceux de l'ONERA mais est sous le seul contrôle des laboratoires de l'école. Il est équipé pour permettre différentes mesures, et

mettre en œuvre la PIV (vélocimétrie par imagerie de particules). Il est configuré pour favoriser la croissance de la couche limite et permet d'en créer une de plus de 25 cm d'épaisseur. Après une initiation à l'usage des lasers de puissance, rendue nécessaire par la présence d'un laser de classe IV, nous avons eu la démonstration d'un relèvement de vitesse.

Note hôte, Christophe Cuvier, est un maître de conférence passionné. Son engagement indénié dans son travail, ainsi que sa maîtrise du sujet, ont été appréciés par les stagiaires.

La journée s'est achevée par une réunion bilan. Les stagiaires ont unanimement remercié l'école Centrale de Lille pour le riche contenu scientifique de ces deux journées. La qualité de l'accueil et la disponibilité des personnels ont été louées.

Quelques stagiaires sont alors restés pour une dernière visite de l'école en compagnie de Christophe Cuvier. Nous avons pu découvrir quelques travaux pratiques de mécanique des fluides originaux, et nous avons été très favorablement impressionnés par l'important fablab que l'école a déployé. Il est mis à disposition des étudiants, pour l'essentiel en libre accès, et il permet de réaliser facilement nombre de projets et dispositifs. L'imagination des étudiants peut aisément se concrétiser dans un espace vaste, magnifique, lumineux et très généreusement équipé.

Si Centrale Lille renouvelle cette initiative, nous ne pouvons que conseiller à tous ceux intéressés par ces sujets de profiter de cette offre de qualité. Rappelons enfin qu'à cette occasion, l'école a pris en charge les frais de transport et de logement des stagiaires.

[1] A. N. Kolmogorov, *The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds number*, *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 30, 301-305 (1941)

Christophe Caire