La turbulence dans l'environnement et en aéronautique (*)

Marcel Lesieur

Professeur à l'INPG ENSHMG

1. A la rencontre de la turbulence

L'avion Lyon-Madrid survole les Pyrénées enneigées, un jour de Printemps 1992 où soufflent mistral et tramontane. Le ciel est clair, et le spectacle est magnifique. Nous sommes peut-être à 10 km d'altitude. Tout est calme. Soudain, de violentes secousses causées par la turbulence m'arrachent à cette contemplation. Même à cette altitude, le vent du Nord est devenu instable en franchissant les montagnes, et les ondes de relief ainsi engendrées ont brusquement dégénéré en turbulence, telles les vagues déferlant à la surface de l'océan. « Mesdames et Messieurs, nous traversons une zone de turbulence, veuillez attacher vos ceintures » dit l'hôtesse, phrase traditionnelle que l'on entend sans doute des centaines de fois par jour dans tous les avions du monde. Il s'agit là de « turbulence en ciel clair »... Rien à voir avec la turbulence très violente et réellement inquiétante rencontrée une nuit de décembre 1986 lorsque, en route vers l'Australie, le Boeing 747 passait, toujours à cette altitude, à travers de puissantes montées d'air chaud au-dessus de l'océan. C'était à l'approche de la saison des pluies, du côté des Tropiques, et l'atmosphère était mise en mouvement par convection thermique, telle l'eau d'une casserole sur le feu...

Toujours en avion, on rencontre souvent la turbulence à l'approche du sol, dans les 1 000 derniers mètres (ce que l'on appelle la couche limite atmosphérique) : c'est là que le vent en altitude est arrêté par le sol, situation instable qui provoque aussi une turbulence intense, et qui favorise la condensation de l'eau dans des nuages...

Les volutes de fumée d'une cigarette, c'est encore de la turbulence. Ayant quelques difficultés à supporter ladite fumée, c'est un exemple que je n'aime pas trop donner. Et pourtant, ces volutes sont de superbes exemples d'instabilités de nappes tourbillonnaires, dont nous verrons d'autres manifestations par la suite.

Quand un corps aérodynamique se déplace suffisamment vite dans un fluide, air ou eau par exemple, il peut aussi déclencher de la turbulence dans son sillage ou dans les couches limites près de ses parois... La turbulence ainsi générée sera en général néfaste, car elle augmentera (parfois considérablement) la résistance du fluide (traînée), et par

contre réduira la portance. Les constructeurs d'avions, trains à grande vitesse, automobiles et bateaux cherchent donc à limiter cette turbulence, afin d'améliorer les performances ou réduire la consommation du véhicule en carburant. Notons qu'une voile qui fassaye, c'est encore de la turbulence. Un autre exemple aéro-thermodynamique de nocivité de la turbulence : la turbulence générée par la navette spatiale européenne Hermès lors de sa rentrée dans l'atmosphère, pourrait bien amener des bouffées de fluide extérieur très chaud (de l'oxygène dissocié à plus de 3 000°), au contact des parois (qui ne doivent pas dépasser 1 500°). S'il semble que toutes les protections thermiques ont été prises en ce qui concerne le fuselage, il y a par contre des craintes pour la tenue de la gouverne arrière, dont la destruction pourrait avoir des conséquences dramatiques pour la sécurité de l'avion. Les chercheurs et ingénieurs qui travaillent sur ce problème ont donc été amenés à développer de nouvelles techniques de calcul très sophistiquées prenant en compte ces effets non permanents de la turbulence. Nous reviendrons sur ces méthodes de modélisation plus loin.

Il faut déplorer à propos d'Hermès que ce programme ait été victime des restrictions budgétaires européennes, et craindre que la compétence acquise en aérodynamique hypersonique par des dizaines d'équipes internationales au cours de ces dernières années ne soit réduite à néant, comme ce fut le cas autrefois après l'abandon du programme Concorde.

La turbulence peut avoir aussi un rôle positif : le mélange turbulent doit être favorisé dans la chambre de combustion d'un moteur d'automobile, d'avion ou de fusée, afin d'obtenir un meilleur rendement de la combustion. Ici, accroître la turbulence aura pour conséquences à la fois un gain énergétique et une réduction des gaz polluants émis. Notons d'ailleurs à ce propos que les grands progrès réalisés dans le domaine de l'aérodynamique compressible, à propos du programme Hermès justement, permettent d'envisager maintenant la simulation numérique complète du cycle d'un moteur à explosion. C'est ainsi que l'on pourra mettre au point le « moteur propre », seul capable de réduire de manière significative la pollution automobile dramatique de l'environnement...

Revenons à l'air de l'atmosphère : les prévisions météorologiques nous montrent tous les jours des perturbations anticycloniques ou cycloniques qui couvrent la surface du globe. Les satellites nous ont révélé que ces zones de haute ou basse pression correspondaient à de gros tourbillons,

(*) Extraits du livre « La Turbulence », du même auteur, Presses Universitaires de Grenoble.

ayant un diamètre de l'ordre de 1 000 km, et dans lesquels les nuages s'enroulent en spirale. L'évolution de ces tourbillons est en général imprévisible au-delà de quelques jours : nous avons là encore affaire à la turbulence. On voit en particulier que, dans l'air de l'atmosphère, la turbulence peut affecter des échelles de l'ordre du centimètre (la fumée de cigarette), de la dizaine de mètres (le panache d'une cheminée d'usine), du kilomètre (les nuages, ou les tornades), ou des centaines de kilomètres (le cyclone tropical, ou les dépressions sur la mer de la Manche). Dans ces deux derniers cas, la turbulence résulte de l'action conjuguée de la rotation terrestre et de fortes différences de température...

Une conséquence immédiate de la turbulence dans l'atmosphère est aussi la diffusion de la pollution dans l'environnement, depuis les échelles locales d'un site industriel jusqu'aux échelles planétaires. Quelques jours après la catastrophe de Tchernobyl, les légumes de nos potagers étaient saupoudrés d'éléments radioactifs rejetés par l'accident. Tous les produits polluants qui parviennent à atteindre la stratosphère (c'est-à-dire au-dessus de 12 km d'altitude environ), diffusent ensuite horizontalement tout autour du globe terrestre sous l'effet d'une turbulence quasi bidimensionnelle (sur une sphère). Cette diffusion horizontale est due au fait que les mouvements verticaux du vent ont été presque totalement inhibés par la très forte inversion de température. Une inversion thermique est la situation opposée de la convection évoquée plus haut : le fluide qui tendrait à s'élever se retrouve dans un environnement plus chaud, et son poids, supérieur à la poussée d'Archimède, le rappellera vers le bas ; s'il tend à s'abaisser, celle-ci le rappellera vers le haut. Il en résulte des oscillations de gravité de faible amplitude suivant la verticale. Dans la stratosphère, l'inversion joue donc le rôle d'un couvercle empêchant la pollution d'échapper à notre terre. Ces produits (gaz ou particules) transportés par le vent finiront par retomber un jour (parfois après des années). C'est ainsi que l'on peut analyser la composition atmosphérique des climats passés par des carottages dans les glaces du pôle Sud, où les différentes couches de glace accumulées au cours des siècles gardent la mémoire de l'atmosphère d'antan ⁽¹⁾. En fait, des carottages dans les sédiments amassés au fond des lacs, par exemple, peuvent donner des informations analogues.

C'est aussi par ces mécanismes de diffusion turbulente horizontale dans la stratosphère que les CFC (Chlorofluorocarbures), produits par les bombes aérosol dans les latitudes tempérées des pays développés, diffusent vers l'Antarctique où ils semblent être responsables de la destruction de l'ozone dans le vortex circumpolaire antarctique ⁽²⁾. Cette destruction se fait par brassage turbulent au moment du Printemps Austral (septembre-octobre), lorsque la réapparition du soleil suspend l'inhibition des réactions chimiques propre à la nuit polaire. Il en résulte le phénomène saisonnier appelé « trou d'ozone », particulièrement marqué depuis 1980 (l'ozone est mesuré depuis les années cinquante). Cette diminution brusque de l'ozone stratosphérique (qui nous protège du rayonnement solaire ultraviolet) serait très inquiétante si elle venait à se généraliser à d'autres régions du globe plus peuplées que le continent antarctique...

N'ayons cependant pas un point de vue totalement pessimiste quant au rôle de la turbulence atmosphérique terrestre :

propager la pollution au loin permet d'en diminuer les effets là où elle s'est produite. Et on a calculé que la température moyenne d'une atmosphère sans turbulence rendrait toute vie impossible sur terre. La turbulence a en fait, comme nous le verrons, un double rôle d'accroissement de certaines fluctuations, et de redistribution de ces fluctuations dans l'espace.

Il ne faudrait pas croire que la turbulence se rencontre seulement dans l'air : dès l'an 1500, Léonard de Vinci dessinait les remous et tourbillons créés par une chute d'eau, et décrivait les tourbillons dans l'écoulement moyen, comme des boucles dans une longue chevelure. Ceci préfigure la fameuse décomposition, dite de Reynolds ⁽³⁾, entre champ moyen et fluctuations, introduite à la fin du XIX^e siècle. En fait, il semble que cette décomposition ait été introduite, antérieurement à Reynolds, par Barré de Saint-Venant et Boussinesq ⁽⁴⁾. Ce dernier observait la turbulence dans l'eau des torrents de montagne. De même, les conduites forcées sont toujours en régime turbulent. Cette turbulence peut avoir des effets très néfastes sur les turbines : en effet, les hautes vitesses de l'eau à l'extrémité des pales induisent de très basses pressions, comme permet de le comprendre le théorème de Bernoulli. Si la pression du liquide tombe en dessous de la pression de vapeur saturante, il y a cavitation, c'est-à-dire ébullition locale, et les poches de vapeur ainsi créées vont imploser de façon intermittente sur les pales, conduisant à une détérioration rapide de la turbine. Dans les circuits de refroidissement des centrales nucléaires, des tourbillons soumettent les enceintes à des sollicitations thermiques intenses et répétées, pouvant conduire à une fatigue prématurée du matériau et à la formation de microfissures.

Quittons les installations industrielles, les torrents et les rivières, pour aller vers l'océan : les satellites qui photographient la température ou le plancton végétal de surface montrent aussi de superbes tourbillons, dans le Gulf Stream par exemple. Ces tourbillons ont un diamètre de quelques dizaines de kilomètres, et se rencontrent aussi dans la Méditerranée : là, ils sont par exemple dus à l'eau de l'Atlantique qui, traversant le détroit de Gibraltar, devient instable sur les côtes algériennes. En effet, l'Atlantique, bien que plus froid, est moins salé et plus léger que la Méditerranée : dans le détroit de Gibraltar, l'eau superficielle est donc Atlantique (elle circule vers la Méditerranée), et l'eau profonde Méditerranéenne (elle circule vers l'Atlantique)...

Eloignons-nous maintenant de la terre : les images de l'atmosphère externe de Jupiter envoyées par les sondes Voyager I et II nous montrent une turbulence intense superposée à des vents réguliers zonaux (un vent zonal est un vent suivant les parallèles, par opposition à un vent méridional, qui suit un méridien). Un des mystères de Jupiter réside dans ces jets zonaux réguliers, faisant tout le tour de la planète, et orientés alternativement d'Ouest et d'Est. Le jet équatorial, quant à lui, est cyclonique, c'est-à-dire qu'il tourne dans le sens de rotation de la planète. Un des fleurons de la turbulence Jovienne ⁽⁵⁾ est la tache rouge (fig. 1), énorme tourbillon d'environ 20 000 km de diamètre, situé dans

⁽¹⁾ Mais où sont les glaces d'antan ? pourrait chanter Brasseur...

⁽²⁾ Voir G. Mégie, *Ozone, l'équilibre rompu*, Presses du CNRS (1989).

⁽³⁾ O. Reynolds, *An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct and sinuous, and the law of resistance in parallel channels*, Phil. Trans. Roy. Soc., pp. 51-105 (1883).

⁽⁴⁾ J. Boussinesq, *Essai sur la théorie des eaux courantes*, Mémoire présenté à l'Académie des Sciences, Paris (1872).

⁽⁵⁾ « Jovien » veut dire : qui se rapporte à Jupiter.

1. Tache rouge de Jupiter (cliché NASA).

l'hémisphère Sud, à la frontière entre deux jets zonaux opposés. Elle est anticyclonique (c'est-à-dire qu'elle tourne dans le sens opposé de la planète, donc dans le sens opposé des aiguilles d'une montre puisque nous sommes dans l'hémisphère Sud). Notons qu'un mouvement anticyclonique dans l'hémisphère Nord d'une planète suit les aiguilles d'une montre. En outre, la tache rouge voyage vers l'Ouest. Observée depuis plusieurs siècles, elle reste encore largement un mystère de Jupiter, où on observe d'autres tourbillons plus petits, telle l'ovale blanche...

En 1989, la sonde Voyager II, partie de la terre en 1977, et après avoir survolé successivement Jupiter (1979), Saturne (1981), Uranus (1986), arriva sur Neptune : elle y trouva une atmosphère de jets zonaux et de tourbillons, comme sur Jupiter. Neptune possède aussi un énorme tourbillon (la tache noire) mais, contrairement à la tache rouge de Jupiter, il est situé aux environs de l'équateur. Notons enfin que l'atmosphère de Saturne semble posséder des caractéristiques voisines.

2. Turbulence, imprévisibilité et chaos

Voilà déjà plusieurs pages que nous parlons de turbulence sans l'avoir encore définie. A l'homme de la rue qui demande ce qu'est la turbulence, nous répondrons que c'est un phénomène désordonné, aléatoire, chaotique. Tous ces mots sont vagues, et il nous demandera de préciser. La première image qui viendra alors à l'esprit est celle de l'imprévisibilité. On dira qu'un système physique est « imprévisible » (en Anglais « unpredictable ») s'il est sensible aux conditions initiales de la manière suivante : nous supposons que le système est régi par des équations « déterministes » telles que les équations de la dynamique Newtonienne par exemple, c'est-à-dire que son histoire ultérieure sera entièrement déterminée par la connaissance des positions et vitesses initiales. Si deux états du système ne diffèrent à cet instant que par des différences infinitésimales, ces différences vont, sous l'effet d'interactions complexes des diverses parties du système (il s'agit d'interactions dites « non linéaires »)... s'amplifier de façon importante au cours du temps, pour atteindre des valeurs finies. L'exemple le plus immédiat de l'imprévisibilité est donné par la météorologie : le Centre européen de prévision numérique, situé à Reading, en Grande-Bretagne, a développé d'énormes logiciels de simulation qui résolvent, à l'aide des ordinateurs les

plus puissants du monde, les équations de la mécanique des fluides appliquées à l'atmosphère (par exemple sur un hémisphère terrestre). Ces logiciels (nous dirons « codes » par la suite) ne sont bien entendu pas exacts, pour plusieurs raisons : l'imprécision des algorithmes numériques utilisés pour approximer les différents opérateurs mathématiques de dérivation intervenant dans les équations, le manque de réalisme dans la représentation (on dit aussi « paramétrisation ») de certains phénomènes tels que les nuages et le rayonnement solaire, les échanges thermiques avec l'océan, ou l'impossibilité de prendre en compte les mouvements de longueur d'onde inférieure à 100 ou 200 km environ. Oublions un instant les imperfections de ces codes, qui prédisent cependant de mieux en mieux le temps global (sur un hémisphère) jusqu'à des périodes de l'ordre de cinq jours, et considérons qu'ils sont capables de donner une réponse correcte si un état initial exact leur était fourni. Dans la pratique, l'état initial est donné par des stations météorologiques ou des satellites, qui ne procurent que des informations en des points irréguliers de l'espace (différents des points où le calcul est effectué), et à des instants qui ne sont pas forcément simultanés. Il faudra donc faire une interpolation de ces champs (source d'erreur), qui fournira à l'ordinateur un état initial de calcul différent de l'état initial réel. Cette erreur initiale, même faible, va très vite s'amplifier, en sorte que l'état de l'atmosphère calculé au bout d'une période d'environ dix jours⁽⁶⁾ peut être complètement différent de l'état réel. Certains météorologues appellent ce phénomène « l'effet papillon », où un battement d'aile de papillon à l'autre bout de la planète pourrait finir par changer le climat ! Un modèle mathématique fameux de comportement imprévisible (on peut dire aussi « chaotique ») est celui de Lorenz⁽⁷⁾, du nom d'un fameux météorologue contemporain qui a beaucoup contribué à cette vision moderne du chaos : ici, le système physique considéré est un système dynamique simple résultant des équations de la convection thermique dans un fluide, très simplifiées. Le système peut alors être représenté par un point se déplaçant au cours du temps dans l'espace, et on montre que les trajectoires dans cet « espace des phases » sont à la fois imprévisibles (dans le sens défini ci-dessus) et qu'elles s'enroulent autour d'un objet géométrique proche d'une surface (c'est plutôt un « objet fractal ») appelé « l'attracteur de Lorenz ».

En fait, le premier exemple historique d'imprévisibilité fut donné par le mathématicien Henri Poincaré en 1889 : celui-ci découvrit ce comportement de « chaos déterministe » dans le cadre d'un problème de mécanique céleste, le problème à trois corps (qui interagissent par attraction Newtonienne mutuelle⁽⁸⁾)...

L'imprévisibilité ne suffit pas à définir la turbulence : par comparaison avec de nombreux systèmes dynamiques chaotiques à faible nombre de degrés de liberté (on appelle ainsi le nombre de paramètres caractérisant le système, par exemple

⁽⁶⁾ Cette limite de prévisibilité peut être estimée à partir de ces codes de calcul, ou grâce à des modèles théoriques de turbulence bidimensionnelle sur une sphère (E. Lorenz, *The predictability of a flow which possesses many scales of motion*, Tellus, **21**, pp. 289-307, 1969).

⁽⁷⁾ E. Lorenz, *Deterministic nonperiodic flow*, J. Atmos. Sci., **20**, pp. 130-141 (1963).

⁽⁸⁾ H. Poincaré, *Sur le problème des trois corps et les équations de la dynamique*, Mémoire présenté à l'Académie Royale de Suède (1889) ; voir aussi I. Ekeland, *Le calcul, l'imprévu*, Editions du Seuil (1984).

trois pour le système de Lorenz), la turbulence dans les fluides possède ce que l'on appelle la propriété de « mélange » : la turbulence se manifeste par une très forte diffusion des quantités transportées telles que colorants, fumée (dans un panache de cheminée), chaleur (dans un échangeur thermique), quantité de mouvement (la diffusion turbulente de quantité de mouvement est à l'origine d'importantes forces de traînée aérodynamique en régime turbulent) ou pollution par exemple. Ce mélange est considérablement plus important que si c'était simplement les mécanismes de diffusion moléculaire qui rentraient en jeu : si on considère une tache de colorant transportée dans un fluide, et que des différences de vitesse importantes existent de part et d'autre de la tache, celle-ci va être étirée par l'écoulement. C'est ce mécanisme très simple qui est responsable du mélange intense opéré par la turbulence...

Associé à cette propriété de mélange est le fait que la turbulence fluide fait intervenir, comme nous l'avons déjà vu à propos de l'atmosphère, une très large gamme de longueurs d'onde spatiales : dans une couche limite turbulente sur un avion, les échelles peuvent aller de quelques microns à quelques dizaines de cm. Dans l'atmosphère, du dixième de mm à plusieurs milliers de km.

3. Spirales de Kelvin-Helmholtz

Parmi les mécanismes les plus efficaces pour déclencher la turbulence, figurent sans aucun doute les instabilités des nappes tourbillonnaires, appelées « instabilités de Kelvin-Helmholtz ». Une nappe tourbillonnaire est une couche de mélange, interface à travers laquelle existe une brusque différence de vitesse tangentielle dans le fluide. Dans la couche de mélange, la vorticité (vitesse angulaire de rotation latente) est approximativement uniforme. À l'extérieur de la couche, elle est nulle puisque les courants y sont uniformes. Une couche de mélange apparaît donc comme une nappe de vorticité (ou nappe tourbillonnaire) plongée au sein d'un écoulement sans vorticité (irrotationnel). Supposons maintenant qu'une perturbation extérieure conduise à l'oscillation de la nappe tourbillonnaire. On peut montrer que celle-ci est instable et s'enroule en spirale, pour donner des « tourbillons de Kelvin-Helmholtz ». Ceux-ci s'apparient ensuite, chacun entraînant l'autre dans son mouvement induit... La figure 2 montre une simulation numérique de ces tourbillons en train de s'apparier dans une couche de mélange.

Dans les couches de mélange bidimensionnelles, la vorticité ne peut pas augmenter ; en effet, dans le cas incompressible, on peut montrer facilement que, en fluide parfait, chaque parcelle fluide conserve sa vorticité dans son mouvement. En fluide visqueux réel, il y a en outre des effets de diffusion moléculaire, qui ne peuvent que l'amortir. Les tourbillons qui se condensent ont donc une vorticité de l'ordre de celle de la nappe tourbillonnaire initiale. La taille des tourbillons croît au cours du temps, mais la vitesse de circulation du fluide, qui est maximum en bordure de ces tourbillons, reste de l'ordre de la vitesse de chacun des deux

2. Appariement de tourbillons de Kelvin-Helmholtz.

courants initiaux. En météorologie, par exemple, un mécanisme de ce genre est incapable d'intensifier la vitesse et la vorticit du vent, et ne peut donc expliquer les tornades, cyclones ou dpressions cycloniques intenses. Pour comprendre ces phnomnes, il faut faire intervenir la rotation de la terre, les gradients de temprature horizontaux (fronts) ou verticaux (convection thermique), et aussi les effets « diabatiques » ⁽⁹⁾ correspondant aux changements de phase de l'eau. Dans un cyclone par exemple, qui prend naissance au-dessus de l'ocan quand la temprature de surface de l'eau dpasse 26 C, il semble qu'une intensification violente de la vorticit puisse tre obtenue par les mcanismes suivants : la vapeur d'eau, abondamment produite sur l'ocan la base du cyclone, est pompe, grce la convection thermique, vers le haut (beaucoup plus froid) o elle se condense ⁽¹⁰⁾. L'nergie de chaleur latente de vaporisation ainsi libre est convertie en nergie cintique qui contribue l'acclration de la rotation du cyclone.

Revenons au laboratoire. Lorsqu'une parcelle fluide circule autour d'un tourbillon, elle est (dans un repre tournant avec elle) en quilibre sous l'effet de la force centrifuge, qui tend la chasser vers l'extrieur du tourbillon, et de la rsultante des forces de pression. Il faut donc que la pression extrieure soit suprieure la pression intrieure. En d'autres termes, l'intrieur du tourbillon est un minimum de pression. Ceci est bien vrifi maintenant par tous les calculs qui ont t voqus plus haut, ainsi que dans les expriences de cavitation dans les liquides. Si la pression de l'exprience est suffisamment basse, la dpression cre par l'apparition d'un tourbillon va suffire passer en dessous de la tension de vapeur saturante : il y aura bullition locale, et donc production de bulles de vapeur, au sein du tourbillon. On peut ainsi en particulier visualiser des tourbillons cohrents dans des sillages trs grand nombre de Reynolds ⁽¹¹⁾.

4. Les alles tourbillonnaires de von Karman

Le promeneur observant l'eau qui coule derrire les piles d'un pont aura souvent la chance de voir des tourbillons de signe oppos lâchs alternativement de part et d'autre de l'obstacle. Ces tourbillons sont trs joliment appels l'alle de von Karman (ou la rue de Karman chez les Anglo-Saxons). C'est un phnomne sur lequel tout est loin d'avoir t dit, mais que l'on peut nanmoins expliquer simplement en termes d'instabilits de nappes tourbillonnaires. En fait, ce lâcher de tourbillons avait dj t dessin par Lonard de Vinci. En 1870, Strouhal mesura la frquence du phnomne, qui fit aussi l'objet cette poque d'observations prcises de la part de Bnard. Strouhal introduisit cette occasion un nombre sans dimension, le nombre de Strouhal, qui mesure le rapport entre la frquence du lâcher de tourbillons, f , et une frquence caractristique des mouvements. Pour le sillage d'un courant de vitesse U derrire un cylindre de diamtre D , le nombre de Strouhal est donc gal fD/U . On trouve exprimentalement qu'il est de l'ordre de 0,2, mais varie lgrement avec le nombre de Reynolds UD/ν . La figure 3 montre une simulation numrique d'une alle de Karman.

⁽⁹⁾ C'est--dire non adiabatiques.

⁽¹⁰⁾ Ce qui explique les pluies diluviennes qui accompagnent ces pisodes.

⁽¹¹⁾ J. Franc, J. Michel et M. Lesieur, C.R. Acad. Sci., Ser. II, 295, pp. 773-776 (1982).

3. Allée de Karman « numérique ».

Theodor von Karman donna en 1911 une solution analytique ⁽¹²⁾ d'allée de tourbillons alternés, stable à des perturbations. D'où le nom de cette « allée ». Von Karman, d'origine Hongroise, est un des plus illustres mécaniciens des fluides de notre siècle. Issu de la célèbre école de Göttingen en Allemagne, fondée par Ludwig Prandtl, il fut choisi en 1930 par le mécène américain Guggenheim pour créer un laboratoire d'aéronautique au prestigieux Californian Institute for Technology (CALTECH) à Pasadena, près de Los Angeles. Ceci fut à l'origine d'une véritable dynastie intellectuelle aux Etats-Unis, où la majorité des ténors de la mécanique des fluides et de la turbulence est constituée de « petits-enfants spirituels » (c'est-à-dire les élèves des élèves), ou même arrière-petits-enfants, de von Karman. L. Prandtl est un autre très grand nom de la mécanique des fluides ; on lui doit en particulier la théorie de la couche limite laminaire ⁽¹³⁾, où les forces visqueuses sont simplifiées pour ne tenir compte que des variations perpendiculaires à la paroi. Il est aussi à l'origine des théories de la viscosité turbulente et de la longueur de mélange.

Lorsque l'on augmente le nombre de Reynolds au-dessus de quelques milliers afin que le sillage devienne turbulent à petite échelle, les tourbillons cohérents subsistent, tout en étant plus chaotiques et imprévisibles. Ce fait est une découverte récente, due aux moyens modernes d'investigation expérimentale, et aux grands progrès du calcul scientifique appliqué à la mécanique des fluides. Nous en parlerons plus en détail au chapitre suivant.

Ces allées tourbillonnaires de Karman sont en général nuisibles pour la portance d'une voile ou d'un corps aérodynamique. Elles peuvent être particulièrement néfastes pour la sécurité des plates-formes pétrolières offshore, quand les oscillations induites par le sillage des piliers entrent en résonance avec les oscillations propres de la structure. En conséquence, les piliers sont spécialement renforcés pour éviter la destruction. Des accidents analogues se sont produits par le passé pour des ponts (le pont de Tacoma, aux Etats-Unis, en est un exemple fameux), toujours à cause du sillage des piles. Notons pour la petite histoire que Navier devint célèbre auprès du public, non pour l'équation qui porte son nom, mais pour avoir conçu un pont suspendu sur la Seine. Ce dernier s'effondra peu de temps après sa construction, suite à la construction d'une jetée. Il est tentant d'imaginer que les tourbillons lâchés en aval de cette jetée aient excité les fréquences propres du pont ⁽¹⁴⁾.

⁽¹²⁾ En fluide parfait.

⁽¹³⁾ L. Prandtl, *Ueber Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung*, Verhandlungen des III. Internationalen Mathematiker Kongresses (Heidelberg, 1904), Leipzig (1905).

⁽¹⁴⁾ Ainsi, le Navier des fluides aurait-il vaincu son double solide.

5. Tourbillons longitudinaux

Les tourbillons de Kelvin-Helmholtz ou de von Karman sont le résultat d'instabilités bidimensionnelles, où l'écoulement ne dépend pas de la troisième composante d'espace (la direction dite « de l'envergure »). Ces tourbillons sont dirigés suivant l'envergure, et leur axe est perpendiculaire à la direction de l'écoulement de base. En fait, il arrive que se forment aussi des tourbillons longitudinaux, quasi parallèles à l'écoulement, par le mécanisme appelé *étirement de tourbillons en épingle à cheveux*... Dans un écoulement parallèle de type couche de mélange ou couche limite (ou Poiseuille et Couette plans) laminaires, le vecteur vorticité est dirigé suivant l'envergure, et donc les filaments tourbillonnaires sont des droites parallèles à l'envergure. Dans l'instabilité de Kelvin-Helmholtz, comme dans un sillage ou un jet plans, les filaments tourbillonnaires, qui étaient initialement répartis uniformément au sein des nappes tourbillonnaires, se concentrent dans l'espace pour former les tourbillons. C'est un peu comme des spaghettis non cuits (donc droits) et parallèles que l'on grouperait par paquets. Une des conséquences de la conservation du moment cinétique pour un écoulement incompressible où la viscosité a été négligée, est que les filaments tourbillonnaires sont transportés avec le fluide qui les constitue ; si l'on pouvait marquer exactement à un instant donné un de ces filaments avec du colorant, on pourrait suivre l'évolution du filament tourbillonnaire au cours du temps en considérant le transport et l'étirement du colorant au sein du fluide ⁽¹⁵⁾...

Considérons maintenant un profil de vitesse de base parallèle et présentant un gradient de vitesse. Les filaments tourbillonnaires correspondants sont parallèles à l'envergure. Supposons que, sous l'effet d'une faible perturbation initiale, les filaments oscillent légèrement de part et d'autre de l'envergure. Utilisons maintenant l'analogie avec un filament de colorant : ce dernier verra le fluide de sa partie supérieure (appelée *Pic*) transporté plus vite que le fluide de la *Vallée* ⁽¹⁶⁾. Le filament sera donc étiré longitudinalement et prendra une forme d'*épingle à cheveux*. Une telle expérience est très facile à réaliser, avec du colorant ou de fines bulles injectées dans l'écoulement. Il en résulte la formation de tourbillons en épingle à cheveux, étirés dans le sens du courant. Ces tourbillons ont une vorticité longitudinale alternativement positive et négative. Dans certains cas, ces tourbillons tendent à se redresser vers le haut, par un mécanisme d'auto-induction. La *figure 4* montre une simulation numérique de ces tourbillons dans une couche limite.

Une des traces des tourbillons en épingle à cheveux est la présence de courants longitudinaux de fluide, plus lents dans les plans *pic* (plans de symétrie des pics) que dans les plans *vallée*. Les tourbillons de signe opposé constituant les jambes du *pic* vont pomper du fluide inférieur plus lent. Au contraire, du fluide supérieur plus rapide va être aspiré dans la *vallée*. La circulation secondaire ainsi induite est faite de courants longitudinaux alternativement lents et rapides, qui

⁽¹⁵⁾ Ceci est possible tant que la diffusion moléculaire du colorant peut être négligée ; celle-ci va en fait contribuer à élargir le diamètre du mince filet de colorant.

⁽¹⁶⁾ Cette terminologie de *Pic* et de *Vallée* est due à Klebanoff, qui découvrit expérimentalement ce type de structure dans une couche limite (P. Klebanoff, K. Tidstrom et L. Sargent, *The three-dimensional nature of boundary layer instability*, J. Fluid Mech., 12, pp. 1-34, 1962).

4. Tourbillons longitudinaux dans une couche limite au voisinage d'une paroi.

5. Tourbillons longitudinaux étirés dans une couche de mélange.

sont la signature des tourbillons en épingle à cheveux. C'est en fait l'observation de ces courants qui a conduit Klebanoff à proposer le modèle des tourbillons en épingle à cheveux dans la transition d'une couche limite à la turbulence. Des simulations numériques récentes ont confirmé la validité de ce modèle. Les expériences de laboratoire ou les calculs numériques montrent aussi que, lorsque les tourbillons en épingle à cheveux ont été étirés à un niveau critique, un déferlement local se produit dans le plan *pic*, conduisant au lâcher de petits tourbillons de Kelvin-Helmholtz secondaires, qui amorcent la transition à la turbulence développée.

On a également montré l'existence de tourbillons en épingle à cheveux analogues, dans les écoulements de Couette et Poiseuille plans, ainsi que dans une conduite cylindrique (Poiseuille circulaire). S'il n'est pas toujours facile de relier l'existence de ces tourbillons aux théories de stabilité hydrodynamique, il n'en demeure pas moins que nous comprenons maintenant les mécanismes physiques de leur génération, et le rôle qu'ils jouent dans la transition à la turbulence. Pour revenir à l'image des spaghettis, on pourrait dire que ceux-ci, créés par des gradients de vitesse, sont, une fois cuits, étirés longitudinalement par les différences de vitesse qui leur ont donné naissance.

Ces mécanismes ne sont pas immédiatement applicables aux écoulements violemment instables tels que les couches de mélange. En effet, l'instabilité de Kelvin-Helmholtz, conduisant à la condensation des filaments tourbillonnaires, va contrecarrer la tendance pour ces filaments à être étirés longitudinalement. En d'autres termes, les spaghettis ne savent plus s'ils doivent se regrouper ou être étirés. En fait, les calculs et les expériences montrent que, dans certains cas, les deux types d'instabilité se découpent : entre les gros tourbillons de Kelvin-Helmholtz s'étirent des tourbillons plus fins en épingle à cheveux. Ces tourbillons sont visibles dans la simulation numérique d'une couche de mélange tridimensionnelle présentée sur la figure 5.

Dans les simulations numériques tridimensionnelles des écoulements décollés en aval d'une marche, on observe la formation de gros tourbillons quasi parallèles à la marche. On y voit aussi des tourbillons en épingle à cheveux. Ces tourbillons ont également été trouvés dans les expériences... Notons enfin que ces tourbillons longitudinaux s'observent souvent (sous forme de nuages très allongés qui se redressent légèrement) dans l'atmosphère dans deux cas : soit en aval

de chaînes montagneuses, comme le Vercors aux environs de Grenoble, ou les Montagnes Rocheuses ⁽¹⁷⁾ ; soit dans la couche limite atmosphérique. A plus petite échelle, on les observe aussi dans certains feux attisés par le vent ⁽¹⁸⁾.

D'autres types d'organisation des filaments tourbillonnaires existent dans les couches de mélange. On a pu montrer dans certains cas où l'écoulement est forcé par une perturbation tridimensionnelle, l'apparition de treillis de tourbillons (voir fig. 6), un peu analogue à la structure de l'écorce de certains conifères.

6. Les objets fractals

On évoque souvent un caractère fractal à propos des objets observés en turbulence. Donnons donc quelques notions très simples sur ce que sont les objets fractals. Considérons d'abord des objets de dimension entière. Si l'on prend un segment sur un axe, et qu'on le divise en n parties égales, on obtient bien entendu $n^1 = n$ segments semblables au premier ; on dira que la dimension de l'objet considéré (le segment) est 1. Si maintenant on prend dans un plan un carré, et qu'on divise chacun de ses côtés en n parties, on obtiendra n^2 carrés semblables au premier ; le carré est évidemment de dimension 2. Le lecteur montrera ainsi que le cube est de dimension 3. Mais on peut faire d'autres constructions. Supposons par exemple que nous divisons le segment (supposé matériel) de tout à l'heure en trois parties égales, et ôtons la partie centrale, puis répétons le processus sur chacun des deux segments qui restent, et ainsi de suite jusqu'à l'infini : on obtient une construction mathématique bien connue appelée *ensemble de Cantor*. A chaque étape de l'itération, on a obtenu deux segments semblables au précé-

⁽¹⁷⁾ Il s'agit là d'écoulements en aval d'une marche descendante.

⁽¹⁸⁾ En combustion turbulente, les flammes suivent en général les tourbillons. Les équations de transport des constituants montrent en effet que c'est dans les zones de fort gradient de vitesse que la diffusion moléculaire de ces constituants est la plus intense. Cette diffusion moléculaire permet un mélange intime entre les espèces intervenant dans les réactions chimiques dont résulte la flamme.

6. Basse pression (a) et haute vorticité (b) dans la simulation numérique d'une couche de mélange forcée tridimensionnellement.

dent, à partir d'une division en *trois* de celui-ci. On peut écrire

$$2 = 3^{\log 2 / \log 3}$$

puisque les logarithmes des deux membres de l'équation sont égaux. Par analogie avec les objets de dimension entière ci-dessus (segment, carré, cube), on dira que l'ensemble de Cantor est de dimension fractale $\log 2 / \log 3$. Un autre exemple d'objet fractal est la *courbe de Koch* : on part d'un triangle équilatéral, dont on divise chacun des côtés en trois parties égales ; on construit ensuite sur le segment médian de chaque côté un nouveau triangle équilatéral, dont on ôte la base ⁽¹⁹⁾, et l'on itère le processus à l'infini. On montre sur la *figure 7* une des étapes du processus.

Cette courbe a la dimension $\log 4 / \log 3$, puisque l'on construit à chaque itération $4 = 3^{\log 4 / \log 3}$ segments à partir d'une division en 3 du segment précédent. En général, la dimension fractale (au sens de Hausdorff) d'un ensemble, obtenu par itération d'une transformation d'un objet donné, est donnée par $\log N / \log n$, où N représente le nombre d'objets semblables obtenus à partir d'une partition en n . Une caractéristique intéressante de ces ensembles est qu'il peut être impossible d'y définir des longueurs ou des surfaces. En Mathématiques, la longueur d'une courbe est obtenue en approximant cette courbe par une suite de segments de droite de longueur δl , et dont les sommets s'appuient sur la courbe (un mètre pliant de charpentier) : si la longueur totale de tous ces segments mis bout-à-bout tend vers une limite quand δl tend vers 0, celle-ci sera appelée la longueur de la courbe. On voit bien que ceci n'a aucun sens pour la courbe de Koch par exemple : chaque fois que le segment du mètre pliant sera divisé par 3, la longueur trouvée sera multipliée par $4/3$. Ce processus ne converge évidemment pas. On peut ainsi, comme Mandelbrot, se demander quelle est la longueur de la côte de la Bretagne, sachant que celle-ci est composée de rochers très finement découpés, un peu comme la courbe de Koch.

7. Courbe de Koch.

7. Les grands enjeux du calcul scientifique

Ces dernières années ont vu une explosion sans précédent dans la puissance offerte par les ordinateurs de calcul scientifique, qui, alliés à des outils logiciels performants (bi ou tridimensionnels) de visualisation et d'animation des champs calculés, ont provoqué une révolution dans la simulation numérique en mécanique des fluides. Celle-ci est devenue un outil expérimental au même titre que l'expéri-

⁽¹⁹⁾ On obtient ainsi une étoile de David.

mentation en laboratoire⁽²⁰⁾, et elle est en passe de supplanter la modélisation statistique classique pour les applications industrielles⁽²¹⁾. Dans ce paragraphe, nous parlerons successivement des méthodes numériques utilisées pour résoudre les équations de la mécanique des fluides par *Simulation numérique directe*. Nous évoquerons ensuite les outils de calcul scientifique d'aujourd'hui et de demain...

Le problème posé est donc la résolution par l'ordinateur des équations du mouvement du fluide (équation de Navier-Stokes). Cette équation est une équation aux dérivées partielles : en un point donné (fixe) de l'espace de coordonnées x, y, z , les variables (vitesse $\vec{u}$, pression p , densité $\rho, \dots$) dépendent à la fois de x, y, z et du temps t . Considérons par exemple $u(x, y, z, t)$, la première composante du vecteur vitesse. La dérivée partielle par rapport à t est une dérivée où x, y, z restent fixés, c'est-à-dire que l'on regarde passer le fluide au point considéré. On notera cette dérivée par $\partial u / \partial t$. Une dérivée partielle par rapport à x , notée $\partial u / \partial x$, est une dérivée où, à un instant donné, on se déplace dans le fluide dans la direction de l'axe des $\vec{x}$. On définira de même $\partial u / \partial y$ et $\partial u / \partial z$. On pourra définir ces dérivées partielles pour toute quantité scalaire $f(x, y, z, t)$ ou même vectorielle. Il est alors possible de mettre les équations du mouvement⁽²²⁾ sous forme d'une égalité vectorielle entre vecteurs dans un espace à cinq dimensions, présentée de la façon suivante, dite « conservative » :

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial z}, \quad (1)$$

où U a pour composantes successives $\rho, \rho u, \rho v, \rho w$, et l'énergie totale du fluide (somme de l'énergie mécanique et de l'énergie interne). Les trois vecteurs F, G et H dépendent de ρ, u, v, w , des gradients de vitesse et de l'énergie totale. La pression et la température peuvent être déterminées grâce à ces quantités.

Dans la simulation numérique, on définit dans l'espace à trois dimensions où s'étend le fluide une grille de points. Prenons le cas le plus simple d'un maillage orthogonal où tous les points sont équidistants⁽²³⁾. Ce maillage a une mèche de largeur Δx , que l'on s'efforcera de prendre la plus petite possible en fonction de la puissance de l'ordinateur dont on dispose (nous discuterons de ce problème de précision plus loin). Le temps sera aussi discrétisé par intervalles Δt (que nous prendrons aussi identiques pour simplifier). Nous allons donner un exemple très simple de calcul, correspondant à des schémas peu précis, mais qui permettra de comprendre la philosophie d'une simulation numérique. Supposons qu'à l'instant t on connaisse toutes

les variables (densité, vitesse et énergie totale) en tout point du maillage. Soit M un de ces points, M_1, M_2, M_3 les trois points voisins de M dans les directions respectivement des axes $\vec{x}, \vec{y}$ et $\vec{z}$, M'_1, M'_2, M'_3 leurs symétriques. Soit $f(x, y, z, t)$ une quantité quelconque dont nous voulons calculer la dérivée partielle $\partial f / \partial x$ au point M : avec les hypothèses de continuité nécessaires, on va faire un développement de Taylor à l'ordre deux suivant les puissances de Δx , permettant de déterminer $f(M_1, t) - f(M, t)$ et $f(M'_1, t) - f(M, t)$. Soit :

$$\begin{aligned} f(M_1, t) - f(M, t) &= \\ &= \Delta x \frac{\partial f}{\partial x}(M, t) + \frac{(\Delta x)^2}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(M, t) + O[(\Delta x)^3] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f(M'_1, t) - f(M, t) &= \\ &= -\Delta x \frac{\partial f}{\partial x}(M, t) + \frac{(\Delta x)^2}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(M, t) + O[(\Delta x)^3] \end{aligned}$$

où le terme $O[(\Delta x)^3]$ signifie que l'erreur faite est de l'ordre de $(\Delta x)^3$. Par différence, on va trouver

$$f(M_1, t) - f(M'_1, t) = 2 \Delta x \frac{\partial f}{\partial x}(M, t) + O[(\Delta x)^3],$$

ce qui permet de calculer la dérivée partielle de f par rapport à x au point M en fonction des différences de f entre les deux points entourant M suivant la direction x , sous la forme :

$$\frac{\partial f}{\partial x}(M, t) = \frac{f(M_1, t) - f(M'_1, t)}{2 \Delta x} + O[(\Delta x)^2]. \quad (2)$$

On peut de même calculer les dérivées partielles par rapport à y (avec les points M_2 et M'_2) et par rapport à z (avec les points M_3 et M'_3). On appelle cette procédure un *schéma aux différences finies centrées*, et on dira que ce schéma est d'ordre deux en espace, puisque l'erreur faite en évaluant la dérivée est proportionnelle à $(\Delta x)^2$. Donc, la donnée des vitesses à l'instant t permet de calculer les dérivées partielles de ces vitesses par rapport à x, y et z . Dans le second membre de l'équation (1), on connaît donc (toujours à l'instant t) tous les vecteurs F, G et H en tout point du maillage : l'équation (2) permet alors de calculer les dérivées partielles $\partial F / \partial x, \partial G / \partial y$ et $\partial H / \partial z$, et donc $\partial U / \partial t(M, t)$ à l'instant t en tout point M du maillage. On peut ensuite calculer U à l'instant $t + \Delta t$: différents schémas sont possibles. Le plus simple, qui est aussi le moins précis, est un schéma *en avant*⁽²⁴⁾, où un développement de Taylor à l'ordre un donne

$$U(M, t + \Delta t) = U(M, t) + \Delta t \frac{\partial U}{\partial t}(M, t) + O[(\Delta t)^2],$$

ce qui permet de déterminer la densité ρ , la quantité de mouvement $\rho \vec{u}$ (et donc la vitesse en divisant par ρ), et l'énergie totale du fluide en tout point du maillage à l'instant $t + \Delta t$. On est ramené au problème précédent, et on peut ensuite itérer dans le temps et prévoir l'évolution du fluide pendant un aussi grand nombre de pas de temps que l'on voudra⁽²⁵⁾. Le schéma d'Euler est d'ordre un en temps,

⁽²⁰⁾ On parle maintenant d'expérimentation numérique, et la *Mécanique des Fluides Numérique* a conquis ses lettres de noblesse, au même titre que la *Mécanique des Fluides Expérimentale*.

⁽²¹⁾ Ceci est fait depuis longtemps en météorologie, où toutes les prévisions numériques sont effectuées par des codes de simulation numérique, comme nous l'avons déjà expliqué.

⁽²²⁾ Bilans de masse, de quantité de mouvement et d'entropie.

⁽²³⁾ Quand l'écoulement est dans des domaines complexes, entre les pales d'une turbine par exemple, il faut avoir recours à des maillages non orthogonaux, ce qui rend le problème plus difficile. Une branche importante dans les applications industrielles de la mécanique des fluides numérique est justement ce que l'on appelle la « génération de maillages ».

⁽²⁴⁾ *Forward* en anglais ; on dira aussi schéma d'Euler.

⁽²⁵⁾ Compte tenu quand même de la vitesse de l'ordinateur : si le calcul sur un pas de temps dure un quart d'heure, et qu'il faut itérer sur dix mille pas de temps, il faudra attendre quatre mois le résultat !

puisque l'erreur pour calculer la dérivée temporelle est d'ordre Δt .

Depuis l'apparition des premiers ordinateurs à la fin de la deuxième guerre mondiale, des progrès considérables ont été accomplis dans la vitesse et les capacités de stockage des calculateurs scientifiques. On peut distinguer ⁽²⁶⁾ en gros trois types d'architectures, le calcul séquentiel, le calcul vectoriel, et le calcul parallèle. Dans ce dernier cas, plusieurs processeurs (qui peuvent être vectoriels) se partagent les tâches et travaillent en parallèle... Ceci permettrait de multiplier la puissance d'un ordinateur par le nombre de processeurs, à condition que ceux-ci puissent échanger leurs informations suffisamment vite, et qu'ils travaillent vraiment simultanément. Aujourd'hui, le CRAY YMP, qui possède quatre à huit processeurs de calcul, a une vitesse théorique de 2,5 Gigaflops (un Gigaflop est 1 000 Mégaflops, donc 10^9 flops). Les machines massivement parallèles peuvent maintenant avoir plusieurs centaines (la machine INTEL Delta), ou milliers de processeurs, telle la Connexion, Machine 2 de la Thinking Machine Corporation dans le Massachusetts, qui en possède $2^{16} = 65\,536$. Cette dernière a une vitesse théorique de presque 1 Téraflopp (un million de Mégaflops).

La façon la plus simple de paralléliser un code de calcul en mécanique des fluides est de décomposer le domaine de calcul où s'étend l'écoulement en un certain nombre de sous-domaines, à chacun desquels on affecte un processeur de calcul particulier. Chaque processeur de calcul résout les équations du mouvement sur le sous-domaine qui lui est attribué, et interagit avec les autres processeurs (c'est-à-dire sous-domaines) quand c'est nécessaire. On impose en outre des conditions de continuité des différents champs aux frontières entre les sous-domaines.

Un des enjeux du parallélisme massif est de savoir trouver des méthodes de calcul et des langages tirant parti de l'extraordinaire puissance virtuelle de la machine, ce qui nécessite des efforts de programmation, et donc des moyens en hommes, très importants. Il faut en particulier trouver l'assignement optimal des processeurs aux sous-domaines minimisant le temps de communication de l'information entre les processeurs. Ceci pose des problèmes mathématiques difficiles. Dans la pratique, les machines massivement parallèles peuvent actuellement dans certains cas gagner jusqu'à un facteur 50 de vitesse par rapport aux machines plus classiques. Il est incontestable qu'elles ouvrent de grandes perspectives à la mécanique des fluides numérique.

Les liaisons entre ordinateurs (réseaux) ont pris une place de plus en plus grande dans le calcul scientifique appliqué à la turbulence, en particulier pour les problèmes de visualisation graphique des champs calculés. Pour la visualisation des champs résultant des calculs, il est souvent bien préférable de dissocier la partie « calcul » de la partie « analyse graphique ». Cette dernière peut se faire sur des machines locales dédiées à cet effet. Il faut alors pouvoir rapatrier sur la machine graphique les champs calculés sur la machine déportée, et la vitesse de transmission de la ligne devient un facteur essentiel. La vitesse V d'une liaison informatique se définit en « bauds » (un baud est un bit par seconde). Si l'on prend l'exemple d'un champ scalaire de 128^3 points, qui représente (sur une machine à 64 bits) 134 Mégabits, il

faudra un temps de $(134/V) \cdot 10^6$ s pour transférer le champ. Pour une vitesse de 1 Mégabaud (qui est la vitesse typique des lignes rapides actuelles), il faut donc 134 s, ce qui est relativement rapide. Pour une vitesse de 1 200 bauds ⁽²⁷⁾, il faudrait environ 31 h. Ceci est considérable, et montre l'importance des liaisons à haut débit. Les liaisons futures à 1 Gigabaud permettront ce type de transfert en $1/10^6$ de seconde.

Plus généralement, ces liaisons sont très importantes pour l'interrogation à distance de bases de données numériques : un calcul, une fois qu'il est fait, génère une quantité considérable de données qu'il est difficile aux chercheurs ayant développé le calcul d'analyser toutes immédiatement. Ces données sont alors transmises à d'autres groupes, qui peuvent les étudier sans avoir à refaire l'expérience numérique, nécessairement lourde et coûteuse. Les réseaux contribuent ainsi à une économie globale de temps et d'argent.

8. Turbulence aérodynamique

Nous avons déjà vu que la turbulence est l'ennemi principal de l'aérodynamicien externe. A ce propos, ce sont surtout les zones de type couches de mélange et sillages (qui génèrent des gros tourbillons très actifs) qui sont à craindre. Les couches limite sur les fuselages d'avion deviennent presque toujours turbulentes, ce qui n'est qu'un demi-mal tant qu'elles ne « décollent » pas de la paroi. Les décollements de couche limite donnent encore naissance à des gros tourbillons analogues à ceux des couches de mélange. Ils surviennent suite à un brusque décrochement de la paroi, comme dans la marche descendante considérée plus haut, ou par effet dit de « gradient de pression adverse », où la pression est plus forte en aval et la couche limite est ralentie. Ceci se produit autour d'un profil d'aile en incidence. En aérodynamique supersonique, un choc peut provoquer le décollement d'une couche limite...

Dans l'aérodynamique d'une voiture, les allées tourbillonnaires de von Karman générées dans le sillage des rétroviseurs sont responsables de forces de traînée pouvant, pour des rétroviseurs mal profilés, contribuer jusqu'à 8 % de la traînée totale et 4 % de la consommation du véhicule. On comprend plus généralement que tout ce qui touche à la « réduction de traînée » et au « contrôle de turbulence » est d'une importance économique (et écologique) considérable ⁽²⁸⁾. Par contre, l'aérodynamique interne des chambres de combustion aura besoin de façon cruciale de la turbulence pour un bon rendement des réactions chimiques intervenant dans la combustion.

9. Contrôle de turbulence

Commençons par quelques chiffres très simples : si l'on réduisait de 20 % la traînée aérodynamique des avions, trains et automobiles, leur consommation énergétique serait réduite

⁽²⁶⁾ Voir par exemple J. Sansonnet, *L'architecture des nouveaux ordinateurs*, La Recherche, **204**, pp. 1298-1307 (1988).

⁽²⁷⁾ C'est la vitesse du réseau Transpac pour un utilisateur connectant son ordinateur local sur le réseau téléphonique.

⁽²⁸⁾ Notons pour la petite histoire que les béquets posées à l'arrière de voitures plus ou moins sportives ne sont pas là pour réduire la traînée, mais créent une surpression à l'arrière qui plaque la voiture au sol dans les situations où elle est susceptible de décoller.

d'environ 10 %. Au niveau de l'Europe, il s'agirait d'une économie d'environ 24 milliards d'euros par an⁽²⁹⁾, ce qui est considérable. Au vu de ces chiffres, on comprend mal que l'administration de Bruxelles n'ait pas encore débloqué les quelques dizaines de millions d'euros par an permettant la constitution d'un centre européen de recherche sur le contrôle de la turbulence. Espérons néanmoins que cet appel finira par être entendu.

Comme nous l'avons déjà vu, contrôler la turbulence constitue certainement l'application la plus importante de toutes les études fondamentales que nous avons évoquées jusqu'ici. Contrôler la turbulence revient en fait de plus en plus à contrôler les tourbillons cohérents, pour les intensifier (en combustion et génie chimique), ou les réduire (en aérodynamique, acoustique et hydro-élasticité). Un exemple de tels tourbillons est donné sur la *figure 8* qui montre les tourbillons lâchés, à l'intérieur et à l'extrados de l'entrée d'air d'un réacteur, en incidence de 40°, dans une simulation numérique bidimensionnelle.

A défaut de pouvoir supprimer les tourbillons, on peut chercher à modifier leur forme et leur organisation. Il est clair par exemple que la structure de tourbillons disloqués découverts dans les couches de mélange est très défavorable pour la traînée aérodynamique.

Le contrôle de la turbulence est une science encore embryonnaire et très largement empirique, mais que le développement foudroyant des simulations numériques va

8. Tourbillons lâchés dans l'entrée d'air d'un réacteur en incidence.

certainement faire progresser à pas de géant. Je ne donnerai pas un aperçu global des techniques de contrôle, mais me contenterai de donner quelques exemples. En aérodynamique, l'aspiration des couches limite permet de retarder leur décollement. Pour réduire la traînée, beaucoup de recherches ont aussi été faites sur les surfaces auto-adaptables, ainsi que sur les injections de polymères à la paroi, qui réduisent la turbulence. On s'est aussi beaucoup intéressé à ce qui permettait aux dauphins de nager si vite, sans grand succès me semble-t-il. En fait, le moyen le plus efficace de réduire la traînée en aérodynamique et en hydrodynamique semble bien être les « riblets » (littéralement « côtelettes »). Il s'agit de fines côtes placées longitudinalement (dans le sens du courant) sur la paroi, comme le velours côtelé. Leur nature peut varier, mais on utilise surtout des formes triangulaires. Empiriquement, on est arrivé à une largeur optimale des riblets de l'ordre de 10 à 20 épaisseurs de sous-couche visqueuse δ_v . Des essais en soufflerie et sur des avions en vol montrent que les riblets réduisent la traînée d'environ 6 à 8 %. Dans l'air (où δ_v est de l'ordre du micron), les riblets ont donc une taille de l'ordre de 10 à 20 μ . Dans l'eau, leur taille est de 1 à 2 mm. Lors de la finale de la coupe de l'America gagnée en 1986 face aux Australiens, Dennis Conner en avait équipé la quille de son bateau Stars and Stripes. Cela faisait les gros titres des journaux, à une époque où les états-majors du monde entier faisaient voler dans le plus grand secret des avions équipés de riblets.

En fait, on ignorait jusqu'à maintenant par quels mécanismes les riblets pouvaient réduire la traînée. On parlait en général de relaminarisation à la paroi. Une découverte numérique faite récemment par des chercheurs de la NASA pourrait bien avoir levé ce mystère. Ceux-ci ont simulé numériquement l'écoulement turbulent dans un canal dont la paroi inférieure était équipée de riblets, alors que la paroi supérieure était plane. Notons d'abord que dans les calculs de couche limite turbulente, les tourbillons longitudinaux ont un diamètre d'environ 25 δ_v . Deux calculs ont été faits, respectivement avec des riblets de 40 et 20 δ_v . Le premier calcul montre des tourbillons longitudinaux situés dans les vallées entre les riblets. Le frottement sur la paroi inférieure est alors supérieur à celui sur la paroi plane supérieure. Dans le deuxième cas, les tourbillons sont au-dessus des riblets, et le frottement est réduit par rapport à la paroi plane. On peut alors expliquer l'action des riblets de la façon suivante : si leur taille est supérieure au diamètre des tourbillons longitudinaux, ces derniers seront piégés dans les vallées, et frotteront de façon plus importante sur la paroi que si celle-ci était plane. Si au contraire les riblets sont plus fins, les tourbillons longitudinaux seront contraints d'évoluer au-dessus des points. Ils ne rentreront en contact avec la paroi que par celles-ci, et auront donc un frottement réduit.

Les riblets représentent un moyen attrayant de réduire la traînée. On peut cependant s'interroger sur leur viabilité économique, le coût d'installation et d'entretien risquant d'être élevé. On pourrait envisager d'autres méthodes dynamiques de contrôle, où des perturbations particulières injectées dans l'écoulement peuvent modifier sa structure et réduire la traînée. Ces méthodes seront mises au point grâce à un recours intensif au calcul scientifique, avec des validations expérimentales en laboratoire et *in situ*.

⁽²⁹⁾ Ce calcul, un peu simpliste sans doute, est basé sur l'hypothèse que le citoyen européen moyen en âge de se déplacer dépense 2 000 euros par an pour ses transports et voyages. En comptant 120 millions de personnes concernées, on obtient bien une économie de 24 milliards d'euros.