

La turbulence n'est pas toujours indésirable ; nombre d'ingénieurs cherchent à l'amplifier. Dans les cylindres d'un moteur à combustion interne, par exemple, la turbulence améliore le mélange du carburant et de l'air, de sorte que la combustion est plus efficace et plus propre. Grâce à la turbulence créée par le relief bosselé des balles de golf, les bons golfeurs envoient les balles à 250 mètres, au lieu des 100 mètres qu'ils atteindraient avec des balles lisses.

La turbulence doit probablement sa mauvaise réputation à la difficulté de son analyse : bien qu'omniprésente dans la nature, elle reste mal comprise quantitativement. Pour Richard Feynman, la turbulence était le plus important des problèmes ouverts en physique classique. Lors d'une allocution qu'il prononça en 1932 devant l'Association britannique pour l'avancement de la science, le physicien britannique Horace Lamb exprima la même idée avec plus d'humour : «Je suis maintenant un vieil homme, et je mourrai bientôt, mais quand j'irai au ciel, il y a deux sujets sur lesquels j'espère avoir des éclaircissements : l'un est l'électrodynamique quantique, l'autre est le mouvement turbulent des fluides. Pour le premier, je suis sûr d'avoir une réponse, mais pour le second...»

Lamb ne prévoyait pas l'avènement des superordinateurs, qui donnent enfin des éléments de compréhension de la turbulence. Les informations ainsi recueillies ont déjà débouché sur des techniques, en phase de mise

au point, que l'on utilisera pour réduire de plusieurs pour cent la traînée aérodynamique des ailes d'avion, ce qui économisera le carburant. De surcroît, ces techniques permettront aux ingénieurs de perfectionner les moteurs d'avion à réaction.

Malgré son caractère abscons, l'étude de la turbulence est l'une des composantes principales de la dynamique des fluides, discipline qui traite du mouvement des liquides et des gaz. L'utilisation d'ordinateurs rapides pour l'étude des écoulements fluides turbulents est une partie importante de la mécanique des fluides numérique, une discipline qui se développe rapidement. Ces dernières années, les physiciens des fluides ont utilisé des superordinateurs pour simuler des écoulements aussi divers que celui de l'eau sur la coque des bateaux de la Coupe de l'America ou que celui du sang dans un cœur artificiel.

Une longue gestation

En quoi consiste la simulation numérique d'un écoulement fluide ? L'ordinateur résout une série d'équations et détermine, en tout point de l'espace proche d'un objet, la vitesse et la pression du fluide qui s'écoule autour de lui. Les équations utilisées furent découvertes indépendamment, il y a plus d'un siècle et demi, par l'ingénieur français Claude Navier et par le mathématicien irlandais George Stokes. Les équations de Navier-Stokes dérivent

directement des lois newtoniennes du mouvement. L'emploi d'ordinateurs pour résoudre ces équations a engendré la mécanique des fluides numérique, après un mariage qui fut l'un des plus grands succès de la dynamique des fluides, depuis la formulation même de ces équations.

Pourtant le flirt dura longtemps : ce fut seulement à la fin des années 1960 que les ordinateurs atteignirent des vitesses de calcul suffisantes pour résoudre les équations de Navier-Stokes dans des cas simples, tels les écoulements lents autour d'un obstacle, dans un espace à deux dimensions seulement. Auparavant, les essais en soufflerie étaient le seul moyen de tester l'aérodynamique des prototypes d'avion. Aujourd'hui, les ordinateurs ne sont pas encore assez puissants pour éviter le recours à la soufflerie, lors de la conception des nouveaux avions, mais l'étude numérique est de plus en plus présente dans les phases initiales de la conception, notamment lors du choix des dimensions et d'autres paramètres fondamentaux. Cette phase, qui procède par essais-erreurs, était très coûteuse, parce qu'elle nécessitait la construction et le test en soufflerie de chacun des modèles successifs. Grâce au rôle croissant pris par la mécanique des fluides numérique, le cycle de conception d'une aile comprend aujourd'hui entre deux et quatre tests en soufflerie, au lieu de 10 à 15 autrefois.

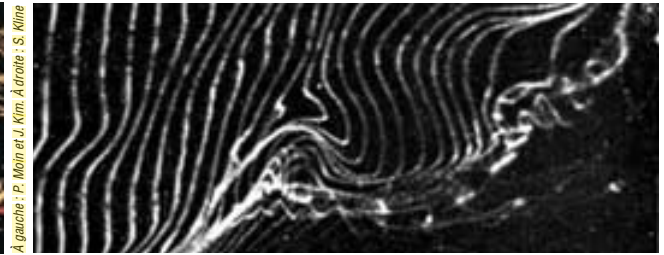
Parfois, les simulations sur ordinateur donnent même une vision plus réa-



Une grande étape de la simulation

Jusqu'en 1980, peu de chercheurs tentaient de simuler entièrement ne serait-ce qu'un écoulement turbulent extrêmement simple. Cette année-là, avec nos collègues du Centre de recherche Ames de la NASA, nous avons utilisé un prototype d'ordinateur parallèle, l'ILLIAC-IV, pour effectuer les plus grandes simulations de turbulence jamais réalisées. À partir de nos données, nous

avons réalisé un film de cinq minutes, qui montrait les trajectoires de particules traceuses dans un écoulement turbulent entre deux plaques parallèles (*à gauche*) ; il rappelait de manière remarquable les images obtenues 20 ans auparavant, à l'Université Stanford, lorsque des hydrodynamiciens avaient filmé un écoulement d'eau réel (*à droite*).



À gauche : P. Moin et J. Kim. À droite : S. Kline

liste que les essais en soufflerie, car les résultats de ces derniers sont faussés par les parois du tunnel et par la structure qui soutient le modèle. En outre, comme certains engins du futur voleront à des vitesses plusieurs fois supérieures à celle du son, dans des conditions trop extrêmes pour être reproduites en soufflerie, la mécanique des fluides numérique est le seul outil fiable de description des comportements : les prochains avions hypersoniques atteindront 20 fois la vitesse du son et les avions stratosphériques traverseront les couches très peu denses de l'atmosphère.

Les fabricants de moteurs d'avion se fondent également sur les techniques numériques : aux États-Unis, un programme de recherches envisage d'atteindre, vers l'an 2003, une amélioration de 100 pour cent de la poussée rapportée au poids des moteurs d'avion et de réduire ainsi de 40 pour cent leur consommation en carburant. En Europe, les lois de protection de l'environnement, de plus en plus draconiennes, ont poussé les constructeurs à mettre en place un programme pour la réduction de l'émission des polluants par les réacteurs d'avion.

L'écoulement de l'air et du carburant dans les divers compartiments et conduits d'un réacteur est complexe. Une hélice aspire d'abord l'air dans une chambre interne, nommée compresseur, où sa pression est multipliée par 20 environ. Cet air comprimé est ensuite injecté dans une chambre de combustion, où il est mélangé au carburant et où s'effectue la combustion. Enfin, les gaz d'échappement, chauds et dilatés, actionnent une turbine qui entraîne l'hélice et le com-

presseur et, surtout, engendre une poussée en éjectant les produits de combustion à l'arrière du réacteur. Aujourd'hui, les ingénieurs utilisent la mécanique des fluides numérique pour concevoir les pales de la turbine, les conduits d'admission et les chambres de combustion. Ces simulations aident également à déterminer la forme des mélangeurs dans les foyers de réchauffe qui, sur les avions militaires, fournissent une poussée supplémentaire et augmentent la manœuvrabilité. Elles interviennent aussi pour la conception des nacelles, ces coques cylindriques qui enveloppent les réacteurs et sont accrochées sous les ailes.

L'utilisation des équations

Pour comprendre comment les ingénieurs utilisent les équations de Navier-Stokes, considérons l'écoulement de l'air sur un avion en vol. Les ordinateurs ne calculeront en détail l'écoulement de l'air autour d'un avion entier que dans plusieurs décennies, mais, en théorie du moins, les équations de Navier-Stokes permettent de déterminer la vitesse et la pression de l'air en tout point proche de la surface de l'avion. Les ingénieurs envisagent d'utiliser ces données pour calculer, dans diverses conditions de vol, tous les paramètres aérodynamiques intéressants : la portance, la traînée et les couples qui s'exercent sur l'avion.

La traînée est primordiale, car elle détermine le rendement énergétique de l'avion. Le carburant étant le principal poste financier de la plupart des compagnies aériennes, celles-ci investissent beaucoup pour réduire la traî-

née, ne serait-ce que dans des proportions limitées. Toutefois, si la portance est relativement facile à calculer, les couples des forces posent davantage de problèmes, et la traînée est le facteur le plus difficile à déterminer.

En effet, la traînée dépend beaucoup de la turbulence. Cette turbulence n'est pas celle des «trous d'air» qui imposent l'usage des ceintures en cours de vol ; même lorsqu'un avion vole régulièrement, l'écoulement de l'air à quelques centimètres de sa surface, dans un volume nommé couche limite, est turbulent. En raison de cette turbulence, l'air qui s'écoule rapidement à plusieurs millimètres de la surface des ailes s'approche très près de cette surface, où il est brusquement ralenti. Une force de réaction, opposée à cette force de freinage, s'exerce sur l'avion. Aussi les aérodynamiciens s'efforcent-ils de comprendre suffisamment les mécanismes qui engendrent et détruisent la turbulence pour la commander.

Afin de résoudre les équations de Navier-Stokes, les ingénieurs fournissent à l'ordinateur certaines variables nommées conditions initiales et conditions aux limites. Pour un avion en vol, les conditions initiales incluent la vitesse du vent et les perturbations atmosphériques telles que les courants d'air ; les conditions aux limites incluent une description mathématique de la forme de l'avion.

Avant d'appliquer ces équations au calcul de l'écoulement autour d'un avion, des spécialistes de l'analyse numérique transforment la surface de l'avion et l'espace qui l'entoure sous une forme utilisable par l'ordinateur : ils représentent l'avion et son envi-