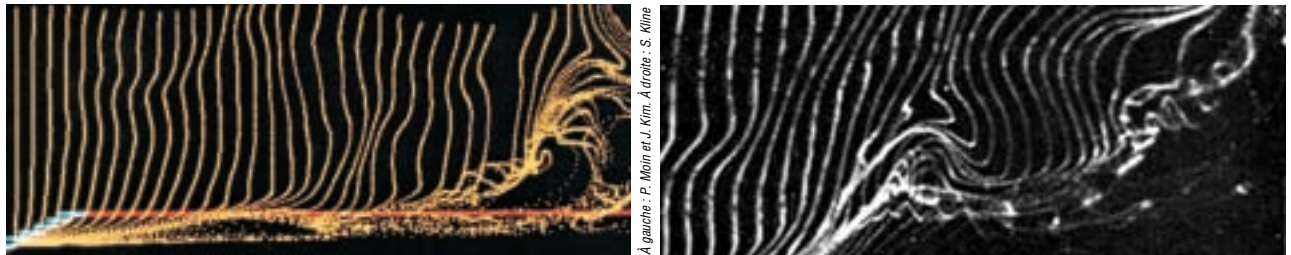


Une grande étape de la simulation

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*).



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-

ronnement par une série de points régulièrement espacés, le maillage. Puis ils fournissent les coordonnées du maillage et les paramètres qui leur sont associés au programme de résolution des équations de Navier-Stokes. L'ordinateur calcule ensuite la valeur des paramètres importants – la vitesse de l'air et la pression – en chaque point du maillage.

Le maillage permet de diviser le problème global (techniquement, on dit qu'il le « discrétise ») en autant de petits problèmes élémentaires que l'on a retenu de points. Les calculs étant effectués à intervalles réguliers pour simuler l'écoulement du temps, la simulation est également discrète dans le temps. Les résultats de la simulation sont d'autant plus précis que les points du maillage sont proches – et donc nombreux – et que les calculs opérés en ces points sont fréquents (quand l'intervalle de temps est bref). Pour la simulation d'écoulements autour de corps de formes complexes, la définition de la surface et du maillage sont des problèmes importants.

Un casse-tête de calcul numérique

En outre, la donnée des conditions aux limites et des conditions initiales ne garantit pas l'obtention d'une solution, du moins avec les ordinateurs actuels ou disponibles dans un futur proche. En effet, les équations de Navier-Stokes sont non linéaires : les variables figurant dans ces équations varient les unes en fonction des autres selon des lois de puissance supérieure à un. Les interactions de ces variables non linéaires engendrent alors des phénomènes à des échelles spatiales très différentes, ce qui complique beaucoup la résolution des équations. Ainsi les écoulements turbulents contiennent des tourbillons dont les plus gros peuvent être 1 000 fois plus gros que les plus petits. La dépendance globale est une autre complication : la pression du fluide en un point dépend de l'écoulement en de nombreux autres points. Cette corrélation entre les diverses parties du problème nécessite le calcul simultané des solutions en de multiples points.

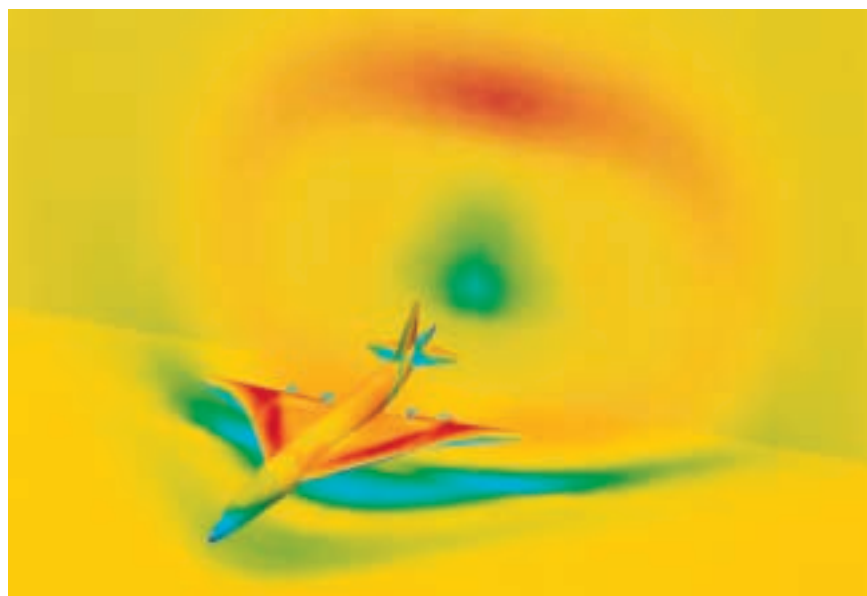
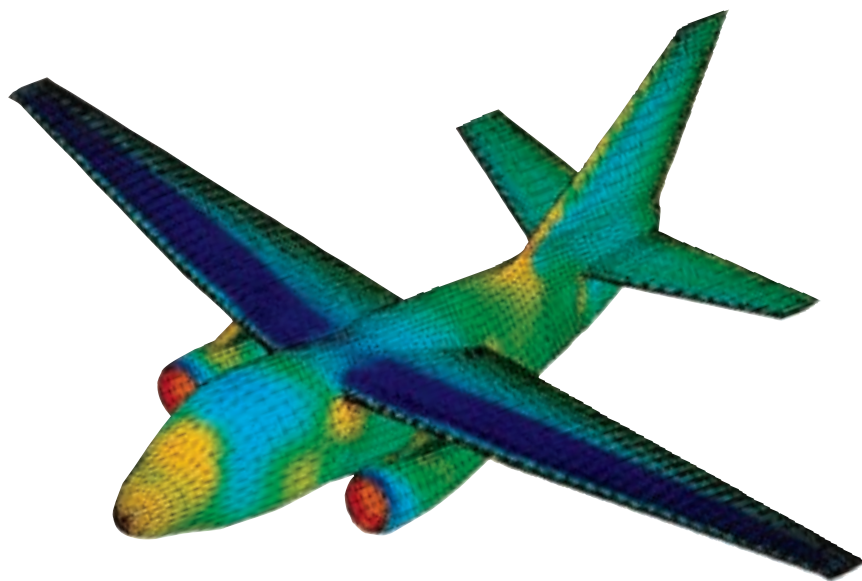
Si la description précédente donne une idée des aspects fondamentaux de la simulation en dynamique des fluides, elle ne tient pas compte de la

turbulence, sans laquelle toute évaluation des possibilités et des limitations réelles des simulations est infondée. Nous le verrons : les difficultés engendrées par la turbulence restreignent le réalisme de nos simulations des écoulements fluides.

La manière la plus simple de prendre en compte la turbulence est l'utilisation du nombre de Reynolds, un paramètre qui résume les caractéristiques d'un écoulement. Ainsi nommé en l'honneur de l'ingénieur britannique Osborne Reynolds, ce

nombre mesure le rapport – l'importance relative – des forces inertielles de l'écoulement et des forces de viscosité (on calcule une force inertielle d'écoulement en multipliant la densité du fluide par le carré de sa vitesse et en divisant ce produit par une longueur caractéristique de l'écoulement, telle l'épaisseur de la couche limite d'air, si l'écoulement s'effectue au-dessus d'une aile).

Les forces inertielles favorisent la turbulence, alors que les forces de viscosité s'opposent à son apparition.



Anthony Jameson

2. LA PRESSION DE L'AIR sur un Lockheed S-3A (en haut) en vol est maximale au voisinage du nez de l'avion et à l'intérieur des nacelles des moteurs, suspendues sous les ailes. Le filet qui enveloppe l'avion est le maillage utilisé lors de la simulation numérique ; l'ordinateur a calculé la valeur de la pression de l'air à chaque point d'intersection du maillage. Ce type de simulation est un élément décisif pour vérifier la conception des avions supersoniques (en bas) et hypersoniques, pour lesquels les essais en soufflerie sont impossibles. La simulation de ce prototype supersonique montre également le bang supersonique, correspondant ici au cercle à l'arrière de l'avion. Les ingénieurs aéronautiques se préoccupent aujourd'hui beaucoup de ces bangs supersoniques dont le public ne veut plus.