



6. UN CHARNIER DE 70 CORPS sans tête a été découvert le long de l'enceinte sacrée du sanctuaire de Ribemont-sur-Ancre, dans la Somme. Il s'agit probablement d'ennemis, ramassés sur le champ de bataille. Les corps accrochés en position verticale et équipés de leur panoplie guerrière pourrissaient sur place, sans aucune intervention humaine.



de l'aire sacrée. Là encore, cette pratique du trophée est proche de celle en vigueur en Grèce ou à Rome : une loi attribuée à Numa, deuxième roi légendaire de Rome, interdisait de remonter les trophées, alors constitués d'armes réelles, que le temps faisait tomber de leur support, comme si la nature seule devait mettre un terme à la vengeance contre les ennemis et à l'orgueil de la victoire.

Des trophées humains

À Ribemont-sur-Ancre, nous avons mis en évidence des rites plus macabres : les trophées guerriers contiennent les armes, mais aussi les corps des ennemis, privés de leur tête. Posidonius et d'autres auteurs nous apprennent que les Gaulois ont pour coutume, chaque fois qu'ils tuent un ennemi, de lui prendre le crâne, qu'ils rapportent ensuite chez eux, comme un butin personnel. Ces corps sans tête seraient donc le produit d'un ramassage sur un champ de bataille, la part revenant à la divinité ou à la communauté qu'elle est censée incarner.

Ce butin funèbre, après avoir été rapporté en triomphe par les vainqueurs, était traité en plusieurs phases. Une partie des corps demeurait à la périphérie du sanctuaire, où elle y pourrissait sans intervention humaine ni animale (l'absence de traces de charognage indique que ces dépouilles étaient protégées des prédateurs). Une sorte de « charnier » d'au moins 70 corps a été mis au jour. À l'intérieur du sanctuaire et le long de sa clôture, d'autres corps étaient présentés, probablement en position verticale, là aussi jusqu'à ce qu'ils se délabrent et tombent sur le sol. Les membres

devaient alors être prélevés pour constituer d'étranges constructions, des sortes de boîtes cubiques aux parois constituées d'os longs alignés et entrecroisés. Bon nombre de ces os longs étaient ensuite percutés contre une pierre, afin vraisemblablement d'en extirper la moelle. Les esquilles d'os étaient alors brûlées et déversées dans un trou cylindrique creusé dans le sol sacré, encore une sorte d'autel « chthonien ».

Ce traitement funéraire distingue les guerriers des autres hommes : dans le Nord de la Gaule, les sépultures de cette époque ne livrent pas de restes de guerriers. L'hommage rendu dans le sanctuaire est collectif, comme cela était l'usage en Grèce dans le courant du V^e siècle.

Ces actes ne prennent un sens que s'ils sont confrontés aux modestes témoignages de la littérature grecque et latine. La dégradation naturelle des trophées a certainement le même sens qu'en Grèce et à Rome. Plutarque a tenté de l'expliquer dans ses *Questions romaines* : le trophée a pour mission de fixer, pendant un temps, une violence d'ordre divin que les hommes seuls ne peuvent maîtriser. La précaution de ne pas utiliser le couteau, de laisser la nature suivre son cours, le soin pris à libérer la moelle, probablement considérée comme le siège de l'âme, le retour des morts vers une divinité infernale dont les Gaulois considéraient qu'ils étaient issus autant d'échos rituels aux croyances druidiques sur les cycles de la vie et des êtres, une théorie certainement très élaborée sur la vie, la mort et l'éternité de l'âme, proche de la métempsycose des philosophes grecs.

De telles découvertes archéologiques et les premiers résultats des études qu'elles suscitent font progresser la connaissance de la vie quotidienne des druides. Elles nous rappellent surtout que, hormis quelques lignes de Posidonius, nous ne possédons sur eux aucune information. Les rites que l'archéologie des sanctuaires gaulois restitue partiellement étaient soigneusement tenus secrets, à l'abri des monumentales enceintes sacrées et au plus profond de la mémoire orale. Ils ne sont qu'une part infime d'un ensemble de connaissances et de croyances que le monde dit « barbare » avait acquises.

Le formalisme de la religion romaine a permis aux plus anciennes institutions de se maintenir encore au Haut-Empire, voire d'être restaurées. Le régime des castes en Inde a pérennisé la place des brahmanes. Les druides, en revanche, n'ont pas survécu à l'occupation romaine, au moins dans leur état authentique.

Jean-Louis BRUNAUX est chargé de recherches au Laboratoire d'archéologie d'Orient et d'Occident du CNRS et de l'École normale supérieure.

Christian GOUDINEAU, *César et la Gaule*, éditions Errance, Paris, 1990.

Les sanctuaires celtiques et le monde méditerranéen, Actes du colloque de Saint-Riquier, édité par J.-L. Brunaux, éditions Errance, Paris, 1991.

Camille JULIAN, *Histoire de la Gaule*, éditions Hachette, Paris, 1993.

S. PIGGOTT, *The Druids*, éditions Thames and Hudson, Londres, 1994.

Jean-Louis BRUNAUX, *Les religions gauloises*, éditions Errance, Paris, 1996.

Les superordinateurs analysent la turbulence

PARVIZ MOIN • JOHN KIM

Seuls les ordinateurs les plus puissants parviennent à décrire les écoulements turbulents simples. Dans certains cas, les calculs révèlent des possibilités de commander la turbulence.

Les fluides en mouvement nous entourent et nous font vivre : du sang circule dans notre corps et de l'air est en mouvement dans nos poumons ; certains de nos véhicules se déplacent dans la couche d'air qui enveloppe notre planète, tandis que d'autres sillonnent l'eau des lacs et des océans, alimentés par des fluides, tels le carburant et le comburant, qui se mélangent dans les chambres de combustion des moteurs. Nombre de problèmes environnementaux ou énergétiques auxquels nous sommes aujourd'hui confrontés ne peuvent être abordés sans une connaissance détaillée de la mécanique des fluides.

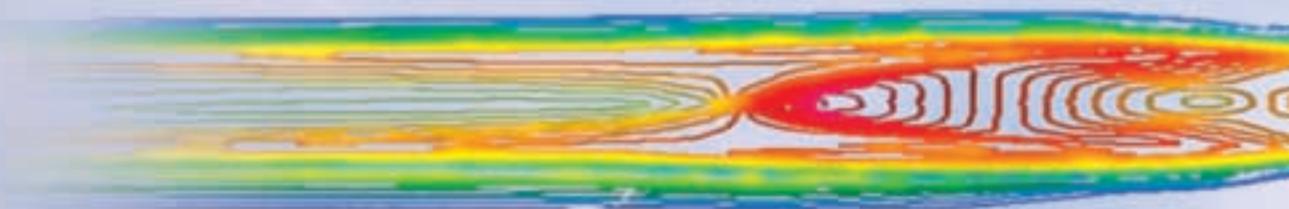
La plupart des écoulements de fluides qui intéressent les scientifiques et les ingénieurs sont turbulents. Aussi les ingénieurs doivent comprendre la turbulence pour réduire les frottements aérodynamiques des automobiles ou des avions de ligne, accroître la manœuvrabilité des avions de combat et améliorer le rendement des moteurs. Les médecins aussi doivent faire face à la turbulence quand ils analysent l'écoulement du sang dans le cœur et, notamment, dans le ventricule gauche, où le mouvement est particulièrement rapide.

Qu'est-ce que la turbulence ? Examinons deux exemples. Si nous ouvrons légèrement un robinet de cuisine, le filet d'eau qui coule est lisse et homogène :

c'est ce qu'on nomme un écoulement laminaire. Puis, si nous ouvrons davantage le robinet, l'écoulement devient irrégulier et sinueux : il est « turbulent ». Ce même phénomène s'observe avec la fumée de cigarette : juste au-dessus de la cigarette, son écoulement est laminaire, mais, un peu plus haut, la fumée ondule de façon complexe, turbulente.

Les écoulements turbulents sont composés de fluide qui zigzague, qui s'enroule sur lui-même et semble se déplacer au hasard, autour de la direction générale du mouvement. Cet état chaotique survient lorsque la vitesse du fluide est supérieure à une limite après laquelle la viscosité ne suffit plus à régulariser les mouvements.

1. CETTE SIMULATION DE LA NAVETTE SPATIALE en vol a été superposée à une photographie de l'appareil. Sur la moitié inférieure de l'image, les couleurs indiquent les valeurs de la pression de l'air à la surface de la navette (le bleu correspond à une pression faible, le rouge à une pression élevée).



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.

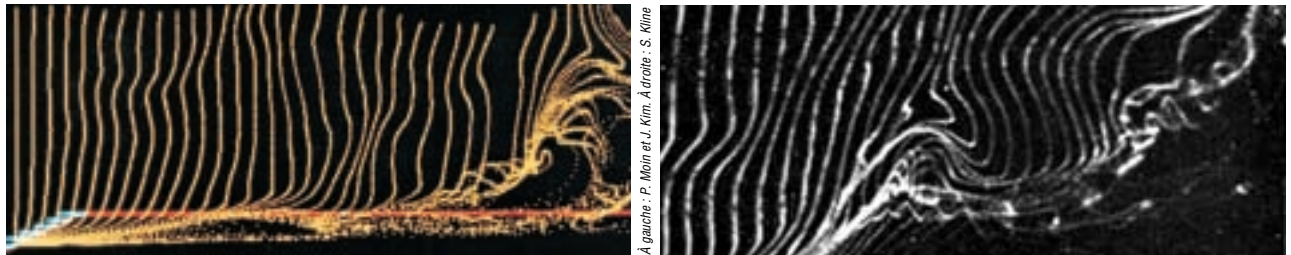
Parfois, les simulations sur ordinateur donnent même une vision plus réa-



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*).



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.

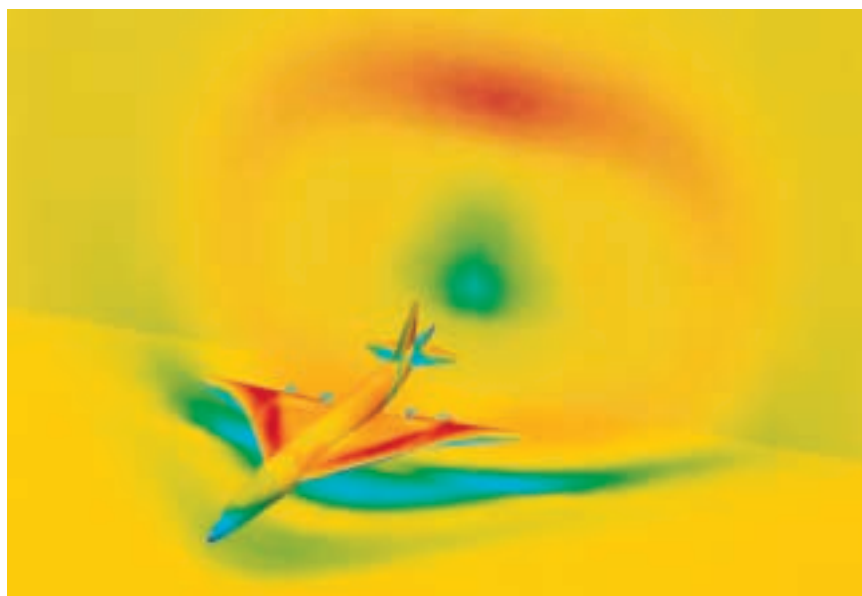
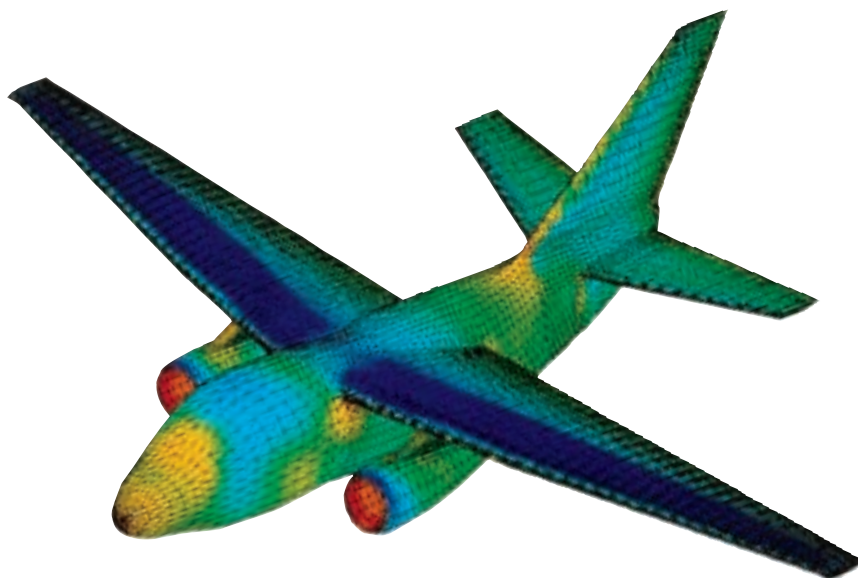
Si la description précédente donne une idée des aspects fondamentaux de la simulation en dynamique des fluides, elle ne tient pas compte de la

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).

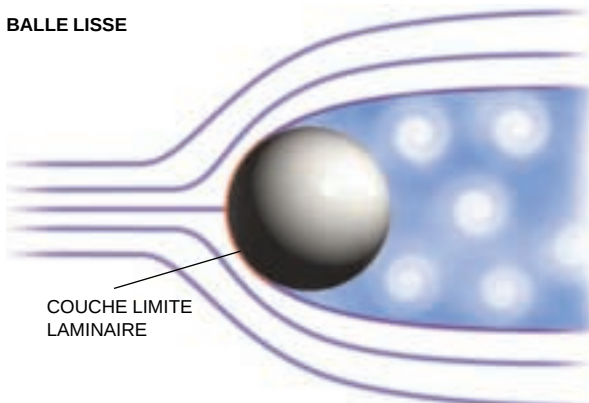
Les forces inertielles favorisent la turbulence, alors que les forces de viscosité s'opposent à son apparition.



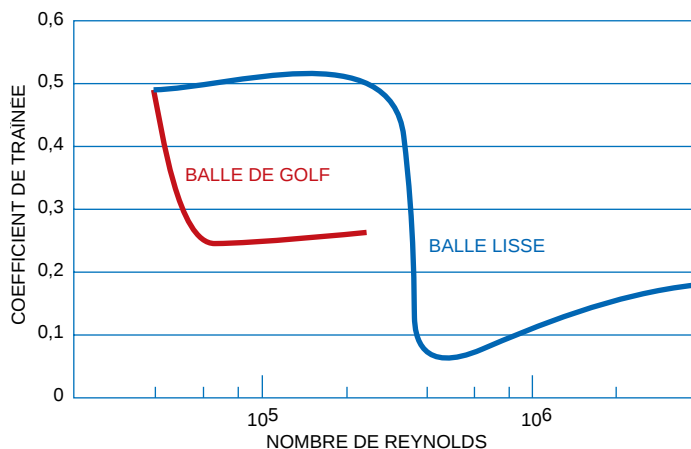
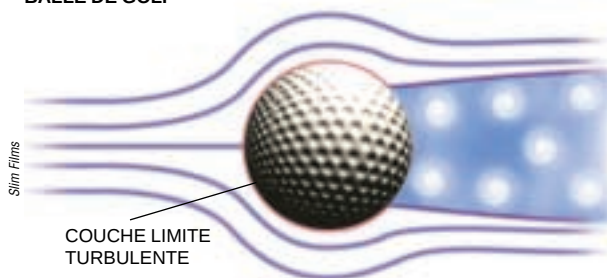
2. LA PRESSION DE L'AIR sur un Lockheed S-3A (en haut) en vol est maximale au voisinage du nez de l'avion et à l'intérieur des nacelles des moteurs, suspendues sous les ailes. Le filet qui enveloppe l'avion est le maillage utilisé lors de la simulation numérique ; l'ordinateur a calculé la valeur de 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.

Anthony Jameson

BALLE LISSE



BALLE DE GOLF



3. LA TRAÎNÉE D'UNE BALLE DE GOLF est principalement due à la pression de l'air. Cette traînée apparaît lorsque la pression devant la balle est bien supérieure à la pression derrière elle. On réduit la traînée en bosselant la surface de la balle ; les bosses et les creux accroissent la turbulence très près de la surface, ce qui entraîne un resserrement de la zone centrale du flux d'air, et donc une augmentation de la pression à l'arrière de la balle. Le diagramme ci-dessus montre que, pour des nombres de Reynolds accessibles lorsqu'on frappe la balle avec un club, la traînée est bien inférieure si la balle est bosselée.

Autrement dit, la turbulence apparaît lorsque le nombre de Reynolds dépasse un certain seuil. Ce nombre est proportionnel à la taille de l'objet et à la vitesse de l'écoulement. Par exemple, le nombre de Reynolds pour de l'air glissant sur le fuselage d'un avion de ligne volant à sa vitesse de croisière est de l'ordre de 100 millions. Pour de l'air s'écoulant autour d'une balle de golf, il est égal à 200 000 environ. Pour le sang circulant dans une artère de dimension moyenne, il est égal à près de 1 000.

Nous l'avons vu, l'une des caractéristiques de l'écoulement turbulent est qu'il se compose de tourbillons de tailles très diverses. Ces tourbillons se forment et se défont en permanence. Les grands tourbillons se dissocient en tourbillons plus petits, qui, à leur tour, se dissocient en tourbillons encore plus petits, et ainsi de suite. Lorsqu'ils deviennent suffisamment petits, ils disparaissent en dissipant leur énergie par chauffage du fluide.

La résolution des équations de Navier-Stokes dans le cas de l'écoulement de l'air à la surface d'un avion, par exemple, nécessite un maillage suffisamment serré pour révéler les plus petits tourbillons, mais assez grand pour englober l'avion entier et une partie de l'espace qui l'entoure. Dans un écoulement turbulent, l'amplitude des échelles de longueur – le rapport des dimensions des plus

grands tourbillons à celles des plus petits – est égale au nombre de Reynolds de l'écoulement élevé à la puissance 3/4. Cette valeur permet d'évaluer le nombre de points du maillage nécessaires pour obtenir une simulation relativement précise : comme l'espace a trois dimensions, ce nombre est proportionnel au cube du rapport des échelles de longueur. Ainsi, le nombre de points nécessaires pour avoir une simulation numérique fiable est proportionnel au nombre de Reynolds élevé à la puissance 9/4. En d'autres termes, un doublement du nombre de Reynolds multiplie presque par cinq le nombre de points du maillage.

Considérons un avion de transport de 50 mètres de long et dont le profil d'aile mesure environ cinq mètres. Si l'avion vole à 250 mètres par seconde, à une altitude de 10 000 mètres, le nombre de points du maillage nécessaires pour simuler la turbulence au voisinage de sa surface avec suffisamment de détails est égale à dix milliards de milliards (10^{16}).

Quel type d'ordinateur peut-il effectuer de tels calculs ? Avec les algorithmes et les logiciels actuels, même un ordinateur capable d'effectuer 1 000 milliards (10^{12}) d'opérations en virgule flottante par seconde mettrait plusieurs dizaines de milliers d'années pour calculer l'écoulement de l'air durant une seconde de vol !

Heureusement, les aérodynamiciens n'ont pas besoin de simuler l'écoulement autour d'un avion entier pour recueillir des informations utilisables. De surcroît, une telle simulation fournirait tant de données qu'on ne saurait probablement pas les exploiter. En pratique, les physiciens des fluides s'intéressent uniquement aux effets de la turbulence sur les paramètres techniquement utiles, tels que l'écoulement moyen d'un fluide ou, dans le cas d'un avion, les forces de frottement, la portance et le transfert de chaleur. Pour un moteur, on s'intéresse, par exemple, aux effets de la turbulence sur les vitesses auxquelles s'effectue le mélange du carburant et du comburant.

De la simulation à la modélisation

Pour cette raison, on effectue souvent des moyennes sur les échelles de longueur associées aux fluctuations de la turbulence : au lieu de calculer le comportement de chacun des petits tourbillons, on détermine l'écoulement des gros tourbillons, puis on utilise des modèles pour évaluer les effets des petits tourbillons sur les plus gros. On simule ainsi un champ de vitesses moyen, qui correspond à un écoulement plus régulier que l'écoulement réel et qui impose l'emploi d'un maillage beaucoup plus grossier.

Les modèles employés pour la simplification sont de types variés, du simple accroissement des coefficients de viscosité à l'introduction de systèmes d'équations supplémentaires. Tous sont fondés sur des hypothèses et emploient des coefficients que l'on peut ajuster par comparaison avec des résultats expérimentaux. Aussi les modélisations d'écoulements turbulents ont la même fiabilité que les hypothèses et les modèles dont elles sont issues.

Toutefois, grâce aux perfectionnements des superordinateurs, les physiciens des fluides peuvent simuler des tourbillons de tailles plus variées et réduire ainsi le domaine où les échelles de longueur doivent être modélisées. Ils approchent la simulation numérique complète de la turbulence.

Depuis des années, les météorologues fondent leurs prévisions sur une stratégie de ce type, nommée simulation des grandes échelles. Les mouvements turbulents à grande échelle présentant un intérêt particulier pour la météorologie, les tourbillons relativement grands y sont simulés dans leur totalité, et seule la modification apportée par les tourbillons plus petits sur la turbulence à grande échelle est modélisée. Récemment, des ingénieurs ont commencé à utiliser ces techniques pour simuler des écoulements fluides complexes, tel celui de gaz à l'intérieur d'un moteur à combustion interne.

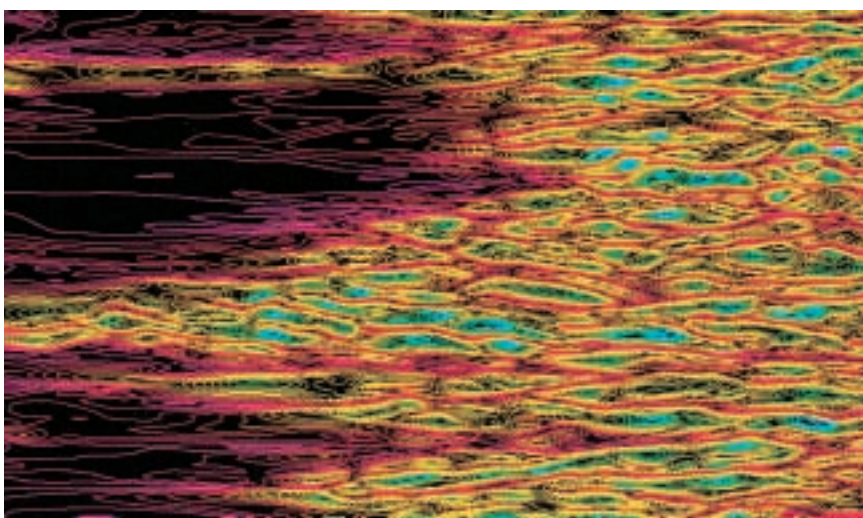
De même, les augmentations des puissances de calcul permettent le calcul complet d'écoulements relativement simples, tel l'écoulement dans un tuyau. Ces simulations – notamment aux faibles nombres de Reynolds – livrent de précieuses indications sur la nature de la turbulence. C'est ainsi qu'elles ont révélé la structure de base des tourbillons au voisinage d'une paroi et le rôle exact de ces tourbillons sur la traînée. Elles ont également affiné les modèles utilisés pour les simulations empiriques des écoulements complexes.

Ces derniers temps, tant d'ingénieurs et de scientifiques ont voulu utiliser ces données, que le Centre de recherche de la NASA a dû ouvrir à la consultation informatique son immense base de données. Si la majorité des chercheurs n'ont pas les moyens de calculs nécessaires pour effectuer des simulations directes de la turbulence, ils disposent de moyens suffisants pour explorer ces données archivées.

De la prévision à la commande

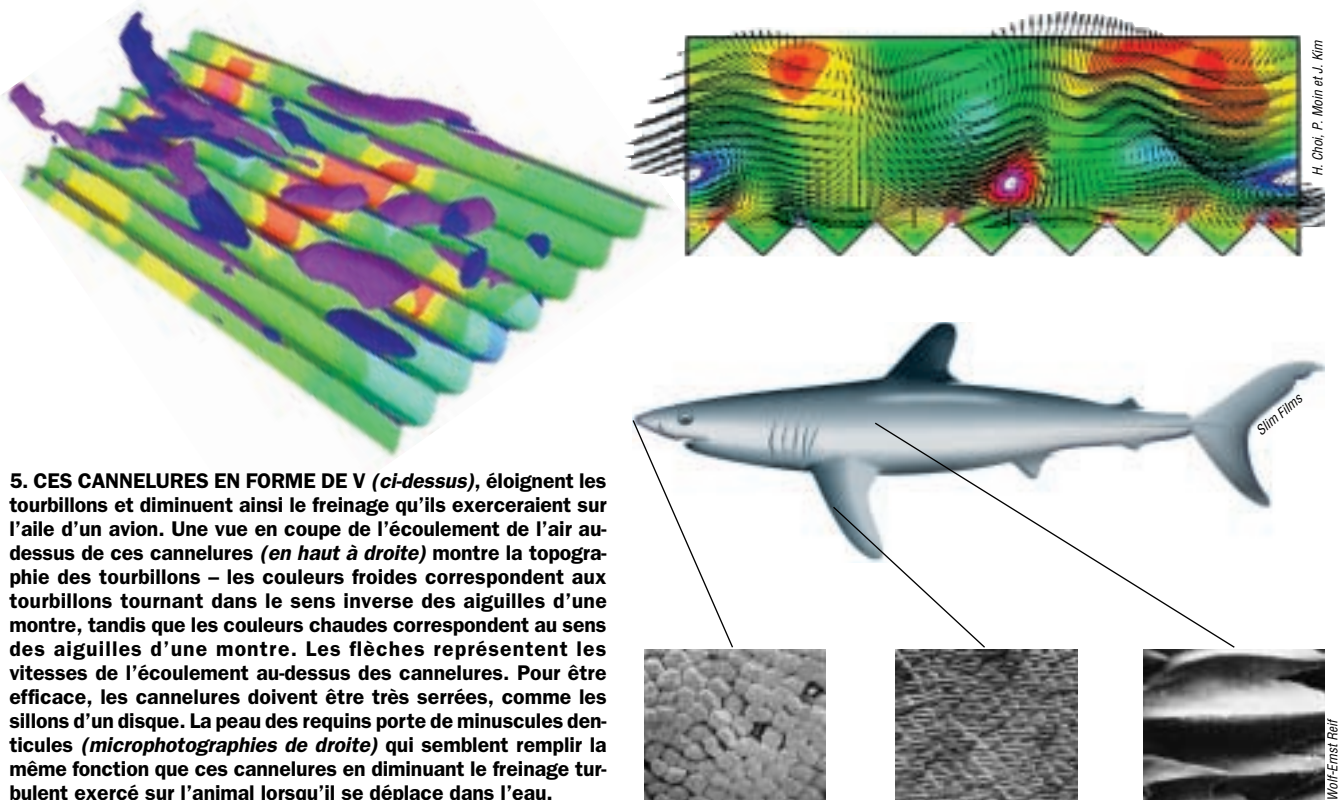
Grâce aux superordinateurs, les physiciens passent progressivement du stade de la prédiction des effets de la turbulence à celui de leur commande. Cette commande peut avoir des conséquences économiques considérables : si l'on réduisait de un pour cent la traînée des avions de ligne, on accroi-

trait de 40 pour cent le bénéfice des compagnies aériennes. Les premiers résultats sont déjà là : en plaçant des cannelures longitudinales en forme de V, à la surface des ailes ou du fuselage d'un avion, on réduit de cinq à six pour cent la traînée. Notons que la traînée diminue ainsi malgré l'accroissement de la surface exposée à l'écoulement de l'air. Aux vitesses de croisière standard des avions de transport, l'espace



En haut : D. Scharf. En bas : M.M. Rai et P. Mon

4. CE DÉTAIL DE LA SIMULATION de l'écoulement de l'air sur une aile d'avion (*en bas*) montre la transition entre un écoulement lisse, laminaire (*zones sombres à gauche*) et la turbulence (*zones ondulantes à droite*). On pourrait réduire la traînée en plaçant sur l'aile des microvolets (*microphotographie supérieure*) qui, se soulevant en fonction des variations de pression, agiraient sur les petits tourbillons qui se forment au voisinage de l'aile.



5. CES CANNELURES EN FORME DE V (ci-dessus), éloignent les tourbillons et diminuent ainsi le freinage qu'ils exerceraient sur l'aile d'un avion. Une vue en coupe de l'écoulement de l'air au-dessus de ces cannelures (en haut à droite) montre la topographie des tourbillons – les couleurs froides correspondent aux tourbillons tournant dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, tandis que les couleurs chaudes correspondent au sens des aiguilles d'une montre. Les flèches représentent les vitesses de l'écoulement au-dessus des cannelures. Pour être efficace, les cannelures doivent être très serrées, comme les sillons d'un disque. La peau des requins porte de minuscules denticules (microphotographies de droite) qui semblent remplir la même fonction que ces cannelures en diminuant le freinage turbulent exercé sur l'animal lorsqu'il se déplace dans l'eau.

séparant ces cannelures doit être très petit, de l'ordre de 40 micromètres, comme les sillons d'un disque ; des cannelures plus espacées augmenteraient la traînée.

Des biologistes soviétiques avaient étudié des structures analogues à la surface de la peau des requins, qui réduisent la turbulence. La nature avait-elle ainsi découvert les cannelures anti-traînée ? La simulation directe de l'écoulement turbulent le long de ces rainures confirma que les structures naturelles inhibent l'action des tourbillons en les empêchant de s'approcher trop de la surface (elles les maintiennent à une distance d'environ 50 micromètres).

La simulation numérique directe a également été utilisée pour la commande active (et non passive, comme avec les cannelures) de la turbulence : on envisage notamment de déformer la surface des ailes d'avion en réaction aux fluctuations de la turbulence du fluide. En pratique, la surface de l'aile serait constituée de composants comprenant des millions de capteurs et de microvolets qui réagiraient aux fluctuations de pression et de vitesse de l'air de manière à agir sur les petits tourbillons responsables du freinage turbulent (voir la figure 4).

Il y a trois ans seulement, cette technique semblait irréaliste ; grâce à l'avènement des techniques microélectro-

mécaniques, elle est aujourd'hui sur le point d'aboutir : par ces techniques, on fabrique aujourd'hui des circuits intégrés contenant les capteurs, l'électronique de commande et les microvolets. La commande active de la turbulence au voisinage de la surface d'une aile a été observée chez les dauphins, dont la remarquable propulsion est probablement due à des mouvements de la peau.

Revenons aux balles de golf, qui montrent bien comment la texture d'une surface permet de contrôler avantageusement l'écoulement de l'air (voir la figure 3). Le freinage le plus important auquel est soumise une balle de golf est dû à la pression de l'air ; il survient lorsque la pression devant la balle est notablement supérieure à la pression derrière elle. Grâce à la turbulence engendrée par ses bosselures, une balle de golf peut être projetée environ deux fois et demie plus loin qu'une balle de taille identique, mais de surface parfaitement lisse.

La mécanique des fluides numériques s'impose aujourd'hui pour l'étude de la turbulence, parce qu'elle donne enfin les résultats escomptés. Ces prochaines années, lorsque la vitesse des superordinateurs dépassera mille milliards d'opérations en virgule flottante par seconde, les mécaniciens des fluides aborderont des écoulements turbulents plus complexes, avec des nombres de

Reynolds supérieurs. Peut-être alors parviendront-ils à simuler l'écoulement de l'air à travers les passages cruciaux d'un réacteur d'avion et à obtenir une visualisation réaliste de l'ensemble piston-cylindre d'un moteur à combustion interne, de l'admission et de la combustion du mélange combustible, ainsi que de l'échappement des gaz à travers les soupapes. Ce type de simulations permettra enfin de commencer à éclairer les équations découvertes par Navier et Stokes il y a plus d'un siècle.

Parviz MOIN dirige le Centre de recherche sur la turbulence de l'Université Stanford. John KIM enseigne l'ingénierie à l'Université de Los Angeles.

P. SAGAUT, T.H. LÊ et P. MOSCHETTI, *Large Eddy Simulation and Direct Numerical Simulation*, in *New Tools in Turbulence Modelling*, École des Houches, mai 1996.

D.J. TRITTON, *Physical Fluid Dynamics*, Oxford Science Publications, 1988.

Tom MULLIN, *Turbulent Times for Fluids*, in *Exploring Chaos : A Guide to the New Science of Disorder*, sous la direction de Nina Hall, W.W. Norton, 1993.

Parviz MOIN et Thomas BEWLEY, *Feedback Control of Turbulence*, in *Applied Mechanics Reviews*, vol. 47, n° 6, deuxième partie, pp. S3-S13, juin 1994.

