

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.

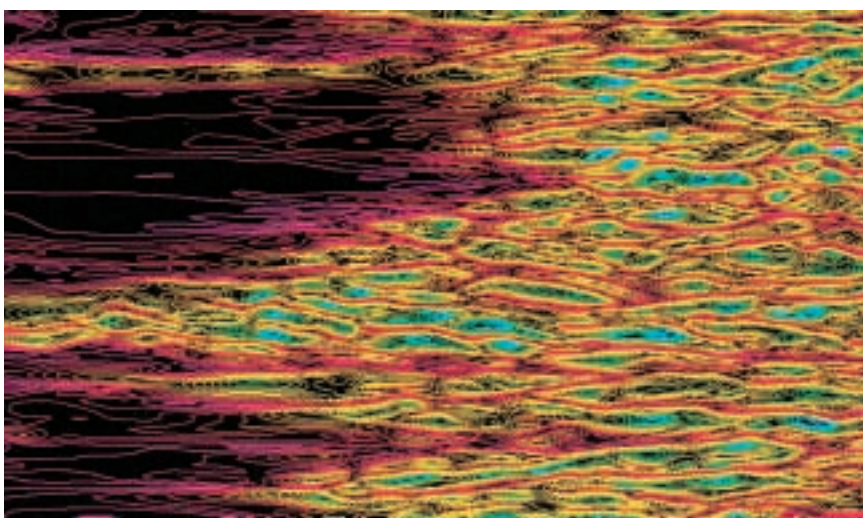
De même, les augmentations des puissances de calcul permettent le calcul complet d'écoulements relativement simples, tel l'écoulement dans un tuyau. Ces simulations – notamment aux faibles nombres de Reynolds – livrent de précieuses indications sur la nature de la turbulence. C'est ainsi qu'elles ont 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

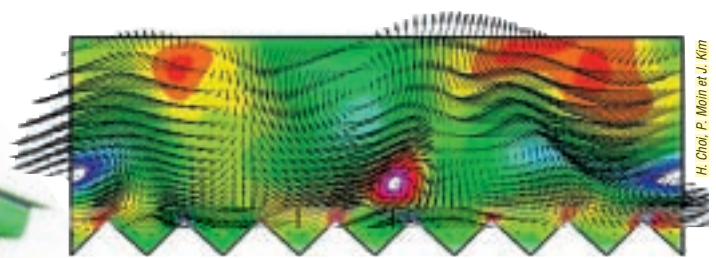
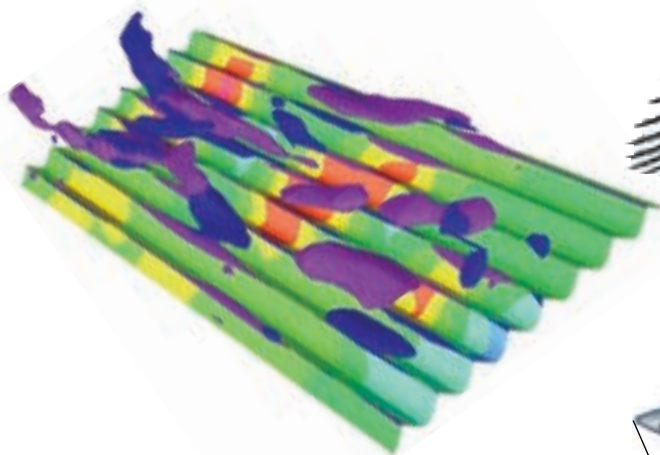
Grâce aux superordinateurs, les physiciens passent progressivement du stade de la prédiction des effets de la turbulence à celui de leur commande. Cette commande peut avoir des conséquences économiques considérables : si l'on réduisait de un pour cent la traînée des avions de ligne, on accroi-

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

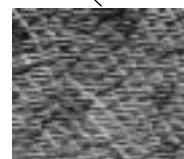
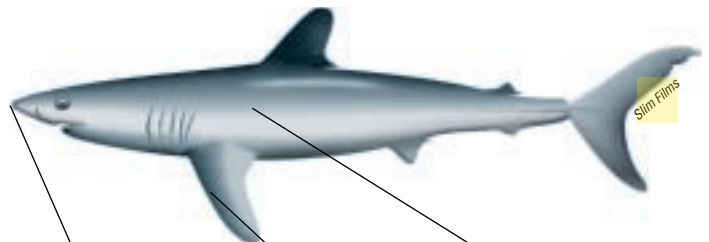


En haut : D. Scharf. En bas : M.M. Rai et P. Moin

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.