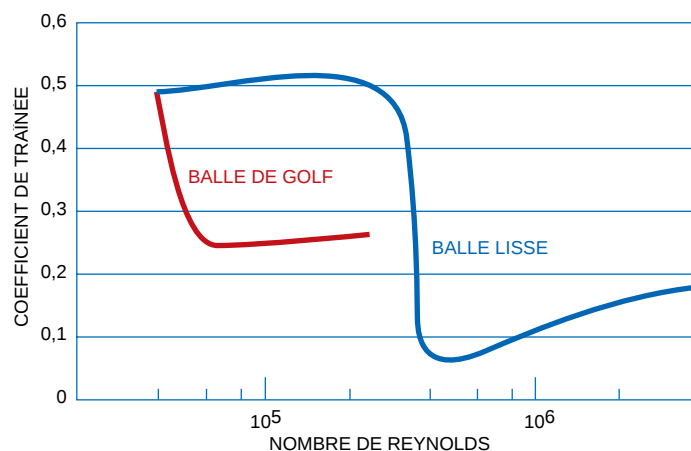




3. LA TRAÎNÉE D'UNE BALLE DE GOLF est principalement due à la pression de l'air. Cette traînée apparaît lorsque la pression devant la balle est bien supérieure à la pression derrière elle. On réduit la traînée en bosselant la surface de la balle ; les bosses et les creux accroissent la turbulence très 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 millions 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.

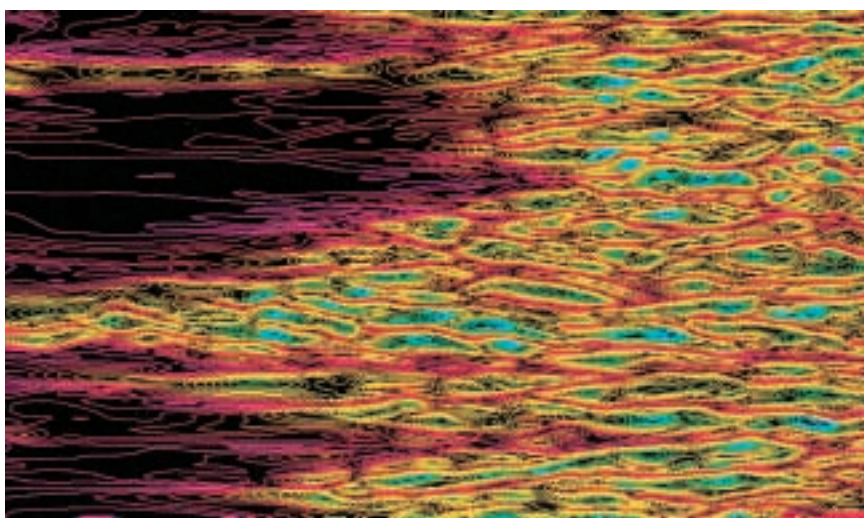
De même, les augmentations des puissances de calcul permettent le calcul complet d'écoulements relativement simples, tel l'écoulement dans un tuyau. Ces simulations – notamment aux faibles nombres de Reynolds – livrent de précieuses indications sur la nature de la turbulence. C'est ainsi qu'elles ont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

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.