

LA TURBULENCE

Marie Farge
LMD-CNRS
Ecole Normale Supérieure, Paris

1. Approche empirique

La turbulence dans la vie de tous les jours, c'est:

la cuillère dans la tasse de thé pour mélanger le sucre,
les volutes de fumée d'une cigarette,
le feu,
les torrents,
l'écoulement des fleuves autour des piles de pont,
les nuages,
le souffle du vent,

mais aussi:

la combustion dans les moteurs,
la traînée des avions,
le bruit des tuyères,
les anti-cyclones et les dépressions,
la tache rouge de Jupiter,
la photosphère solaire,
les nébuleuses gazeuses...

Nous pouvons empiriquement dégager quelques caractéristiques qui sont communes à tous les écoulements turbulents:

- Mouvements d'agitation très complexes avec fort mélange transversal, en particulier mouvements tourbillonnaires, irrégulièrement distribués dans l'espace et le temps. L'écoulement présente un aspect chaotique car il n'atteint jamais un état permanent stable (visualisez le cours d'un torrent toujours changeant, ou les formes infiniment variées des nuages).
- Mouvements dûs à une brusque variation dans le temps (accélération) ou dans l'espace (gradient), soit de vitesse, soit de température, soit d'autre chose (concentration ...). Il semble ainsi que, face à une perturbation trop forte, l'écoulement ne puisse plus amortir celle-ci mais au contraire l'amplifie (mettez votre doigt dans un courant d'eau rapide et observez comment la perturbation, gradient de vitesse dans la couche limite autour de votre doigt, est amplifiée ce qui donne lieu à l'apparition de remous).
- Comportement non linéaire de l'écoulement qui est devenu très sensible aux conditions initiales et aux conditions aux limites (méditez sur les caprices du feu ou sur l'apparition subite d'un sifflement quand le vent souffle plus fort).

2. Approche sémantique

Champ sémantique latin du mot 'turbulence' :

<i>Turbo, as, avi, atum, are</i>	troubler, agiter, mettre en désordre.
<i>Turbo, binis</i>	tourbillon, tumulte, tempête, élan, mouvement circulaire, toupie.
<i>Turba, ae</i>	trouble, désordre, confusion, bruit, foule en désordre, multitude, flux.
<i>Turbellae, arum</i>	vacarme, bruit, révoltes.
<i>Turbido, dinis</i>	bourrasque.
<i>Turbidus, a, um</i>	agité, confus, désordonné, violent, remuant, turbulent.
<i>Turbinatio, onis</i>	forme conique, toupie.
<i>Turbulentia, ae</i>	trouble, perturbation.
<i>Turbulentus, a, um</i>	agité, troublé, désordonné, turbulent, emporté, irréfléchi.

Le champ sémantique grec du mot 'turbulence' (*turbei*) est aussi riche et de significations équivalentes à celui latin.

Il est intéressant de noter que les différents sens attachés au mot `turbulence' (et ce dans son utilisation archaïque) corroborent les aspects de la turbulence que nous avons essayé de dégager empiriquement:

agitation désordre confusion tourbillons	<i>tourbillons, chaos,</i>
perturbations troubler violent	<i> Brusque variation,</i>
révolte vacarme bruit	<i>non linéarité, bruit.</i>

Mais à travers cette approche, on voit également se préciser d'autres aspects que l'on n'avait pas aperçus et qui s'avèreront par la suite pertinents :

multitude foule en désordre	<i>grand nombre de tourbillons en interaction,</i>
forme conique toupie	<i>tridimensionnalité,</i>
élan emporté	<i>prédominance des forces de transport,</i>
irréfléchi	<i>perte de mémoire des états antérieurs , comportement stochastique.</i>

3. Approche historique

A l'origine la turbulence a probablement été, comme nombre d'autres domaines de la physique, un problème d'ingénieur :

*comment endiguer le cours d'un fleuve,
construire des piles de pont dont la forme résiste à l'écoulement, ou
une étrave qui ne crée pas trop de remous ?*

Bientôt elle devint un problème de métaphysicien. Très tôt, l'observation des écoulements turbulents servit à fonder des métaphysiques aussi différentes que celle des Taoistes en Orient, pour lesquels le chaos toujours changeant est l'essence de toute chose, celle d'Héraclite, pour qui la réalité ne se reproduit jamais pareille à elle-même, ou encore celle de Lucrèce, dont la physique et la philosophie reposent sur la rencontre désordonnée des atomes (*turbulentus*

cursio atomorum'). Pour ce dernier, à l'origine est le chaos des atomes tombant dans le vide, puis apparaît un écart infime (*clinamen*) et les atomes s'arrangent alors en structures macroscopiques variées et changeantes qui constituent le monde matériel que nous observons : *'Sans cet écart, tous, comme des gouttes de pluie, ne cesseraient de tomber à travers le vide immense ; il n'y aurait point lieu à rencontres, à chocs, et jamais la nature n'eût pu rien créer'* (De Natura Rerum, livre deuxième, 195-232). Il poursuit en justifiant la liberté au moyen des mêmes arguments : *'Si, par leur déclinaison, les atomes ne provoquent pas un mouvement qui rompe les lois de la fatalité et qui empêche que les causes ne se succèdent à l'infini, d'où vient donc cette liberté accordée sur terre aux être vivants ?'* (233-273).

A la Renaissance la turbulence est plutôt un problème d'artiste :

comment représenter les flots, les flammes, les nuages, et les fumées ?

La représentation des écoulements turbulents est un problème tellement complexe que certains artistes préfèrent contourner la difficulté, tel Brunelleschi qui, ne sachant peindre parfaitement les formes changeantes des nuages, choisit de remplacer le ciel par un miroir reflétant leur image. Mais d'autres apportèrent des réponses plus théoriques. Et là on peut citer l'artiste ingénieur par excellence qu'est Léonard de Vinci, dont les croquis et écrits révèlent les propres recherches. En observant l'écoulement des torrents, de l'Arno ou du sang dans le cœur, il remarque que:

'Les petits tourbillons sont presque innombrables et les grands tourbillons sont mis en rotation que par les grands, non par les petits, tandis que les petits tourbillons le sont à la fois par les grands et les petits.'

Cette observation montre la compréhension profonde que Léonard de Vinci avait des mécanismes propres aux écoulements turbulents et, d'ailleurs, les modèles de turbulence développés aujourd'hui reposent sur des idées très semblables.

Au 17^{ème} siècle, il faut mentionner Descartes qui dans son ouvrage *'Le monde ou un traité sur la lumière'* décrit sa cosmologie d'un univers plein (*plenum*) composé d'une infinité de particules en interaction (résurgence des idées de Lucrèce). L'ensemble de leurs mouvements et de leurs collisions donne naissance à des tourbillons qui entraînent les planètes dans leur course et dont le mouvement rapide au centre produit la lumière des étoiles. Il est amusant de penser que, si la physique de Descartes avait été préférée à celle de Newton, nous ne saurions probablement pas expliquer de façon satisfaisante les phénomènes ne mettant en jeu que quelques corps, tel le mouvement des planètes, mais en contrepartie nous aurions, à n'en pas douter, une compréhension plus approfondie de la turbulence, où un grand nombre de tourbillons sont en interaction.

Avec le 18^{ème} siècle, l'étude des écoulements fluides devint un problème de mécanicien. Les mathématiciens d'alors fondèrent la mécanique des fluides classique, au premier rang desquels figure Euler. Ses travaux furent développés ensuite par Bernouilli, d'Alembert, Laplace et Lagrange. Ils essayèrent par exemple de répondre à des questions aussi ardues que :

pourquoi les oiseaux volent-ils ?

Cette question fit l'objet d'un concours organisé par l'académie de Dijon auquel se présentèrent les plus éminents mécaniciens, entre autres d'Alembert et Bernouilli. Seule la démonstration de d'Alembert fut jugée parfaite du point de vue mathématique,

malheureusement il démontrait que les oiseaux ne peuvent en aucun cas voler! La raison de ce désaccord entre théorie et expérience provenait du fait que les mécaniciens d'alors avaient négligé la viscosité du milieu, ce qui justement permet aux oiseaux de voler.

La mécanique des fluides visqueux ne fut élaboré qu'à la fin du 19ème siècle par des physiciens tels von Helmholtz en Allemagne, Stokes et Kelvin en Angleterre, Navier et Saint-Venant en France. Leurs travaux conduisirent à l'équation de Navier-Stokes qui est aujourd'hui considérée comme l'équation fondamentale de la mécanique des fluides. Le régime turbulent apparaît quand le terme non linéaire de cette équation, qui engendre les comportements instables, devient dominant par rapport au terme linéaire, qui amortit les perturbations par dissipation. Cette génération de physiciens fut suivie par celle des premiers théoriciens de la turbulence, parmi lesquels Reynolds, Prandtl, Taylor, von Karman et Lord Rayleigh, puis plus près de nous Landau, Kolmogorov, Arnold et l'école des mécaniciens russes qui développèrent en particulier la magnéto-hydrodynamique, la théorie ergodique et la théorie statistique de la turbulence homogène et isotrope.

Aujourd'hui la turbulence est également un problème de mathématiciens, ces derniers cherchant à comprendre la genèse du chaos et à savoir si, en régime turbulent, il y a toujours unicité et régularité des solutions des équations de Navier-Stokes, ou si celles-ci ne développeraient-elles pas des singularités au bout d'un temps fini. Ceci était l'un des problèmes posés par Hilbert au début du siècle et il figure toujours sur la liste dressée par Smale des problèmes mathématiques qui restent à résoudre pour le 21ème siècle.

4. Approche critique

La turbulence est restée jusqu'à présent un problème mal formalisé (sinon mal posé). On ne dispose à ce jour d'aucune théorie complète du phénomène. Celui-ci est trop complexe pour être résolu de façon satisfaisante avec les moyens actuels, aussi bien d'un point de vue expérimental, que numérique ou théorique.

Plus exactement, la turbulence nous apparaît d'autant plus complexe que les moyens dont nous disposons nous semblent inadaptés :

- la mécanique Hamiltonienne ne traite que des états stables (ou au voisinage de l'équilibre) et ne décrit que des phénomènes conservatifs et réversibles en temps,
- de plus, la dynamique classique a toujours raisonné à partir de systèmes composés de peu d'éléments en interaction (en général les problèmes à deux corps),
- et si on regarde du côté des mathématiques, elles n'ont pas encore les moyens de résoudre, dans la majorité des cas, les équations aux dérivées partielles non linéaires qui décrivent l'évolution des écoulements turbulents.

Or, comme nous l'avons vu, la turbulence est bien différente :

instable,

dissipative et irréversible,
provenant d'un très grand nombre de tourbillons en interaction,
et décrite par des équations aux dérivées partielles non linéaires.

Il nous semble donc qu'il y a inadéquation entre les moyens conceptuels et techniques actuels et les caractéristiques intrinsèques aux phénomènes turbulents, ce qui explique le peu d'emprise que nous ayons sur eux.

5. Approche spéculative

On dispose actuellement d'une 'théorie statistique' de la turbulence développée, mais non d'une 'mécanique statistique', et c'est l'écueil auquel se heurte toute évolution possible de cette théorie. La théorie cinétique des gaz, qui est l'archétype de toute mécanique statistique, est basée sur deux hypothèses: l'existence de molécules, modélisées sous la forme de sphères dures, et d'interactions locales, représentées par des chocs élastiques entre molécules. La théorie cinétique des gaz est donc fondée sur un modèle mécanique élémentaire. A celui-ci s'ajoute une troisième hypothèse, aujourd'hui démontrée dans certains cas et infirmée dans d'autres (théorème KAM), dite hypothèse ergodique, qui suppose que le système, avant d'atteindre l'état d'équilibre que va décrire la mécanique statistique, a parcouru tous les états possibles du système, c'est-à-dire toutes les configurations accessibles de l'espace des phases. Or, dans la formulation actuelle de la théorie statistique de la turbulence ces trois hypothèses restent dans un flou quelque peu artistique faute de modèle mécanique sous-jacent.

Un préalable à la formulation d'une mécanique statistique de la turbulence est l'identification des 'objets' élémentaires et de leur interactions: par objets élémentaires nous entendons les constituants de l'écoulement qui confinent l'essentiel de l'énergie cinétique et qui constituent la part dynamiquement active de l'écoulement, c'est-à-dire qui conditionnent l'évolution de celui-ci. Mais la question qui se pose à ce stade est celle de l'universalité de la turbulence développée : les 'objets' élémentaires seront-ils les mêmes, ou au moins comparables, quelque soit le type d'écoulement turbulent et le nombre de Reynolds ? Pour répondre à cette question, préalable à toute avancée théorique, il faut oeuvrer tels les chimistes du 19ème, en effectuant un travail fastidieux qui tombe vite dans l'oubli de l'histoire, à savoir identifier pour un très grand nombre d'écoulements turbulents ces 'objets' et interactions élémentaires, puis essayer de les regrouper en une classification générale. Deux démarches, en fait complémentaires, sont alors possibles: celle du chimiste 'analytique', qui inventorie les molécules que l'on rencontre à l'état naturel en étudiant un très grand nombre de réactions chimiques, et celle du chimiste de 'synthèse' qui, en combinant différents atomes, forme de nouvelles molécules. Par analogie, en turbulence on peut procéder selon les deux démarches suivantes: soit on analyse un très grand nombre de réalisations du même écoulement pour dégager les modes propres dominants, soit on observe quelles sont les structures, les 'molécules' de turbulence, qui se forment sous l'effet de la dynamique turbulente quand on part de fonctions élémentaires, qui joueraient ainsi le rôle d'atomes. Ces deux démarches, essentiellement expérimentales, peuvent être effectuées aussi bien en laboratoire qu'à partir d'expériences numériques calculées à l'ordinateur.

L'étude des écoulements turbulents est encore dans une phase préscientifique, car on ne dispose pas aujourd'hui d'une théorie unifiée permettant de prédire l'évolution de n'importe quel écoulement turbulent. Hans Liepmann, l'ancien directeur du laboratoire d'aérodynamique

de Caltech, faisait remarquer en 1997 que: '*Aussi longtemps que l'on ne saura pas prédire la traînée d'un cylindre placé dans un écoulement turbulent à partir des seuls premiers principes, on aura toujours pas compris la turbulence*'. Il nous reste à souhaiter qu'une approche plus fructueuse se dégage à partir de nouvelles observations expérimentales ou numériques et en faisant appel aux nouvelles méthodes qui voient aujourd'hui le jour en mathématiques et en physique théorique.

'Il se peut que la prochaine grande ère de l'éveil de l'intelligence humaine crée une méthode pour comprendre le contenu qualitatif des équations. Aujourd'hui nous ne le pouvons pas. Aujourd'hui nous en pouvons pas voir que les équations de l'écoulement de l'eau contiennent des choses telles que la structure turbulente en forme d'enseigne de barbier que l'on observe entre deux cylindres tournants. Aujourd'hui nous ne pouvons pas voir si l'équation de Schrödinger contient les grenouilles, les compositeurs de musique, ou la morale, ou si elle ne les contient pas. Nous ne pouvons pas dire s'il faut ou non quelque chose comme Dieu, au-delà de tout cela. Et ainsi nous pouvons tous nous permettre d'avoir des opinions bien arrêtées dans l'un ou l'autre sens.'

(Feynman, Lecture Notes on Physics)