



C O L L E C T I O N
D I R I G É E P A R J E A N B O R N A R E L

G R E N O B L E

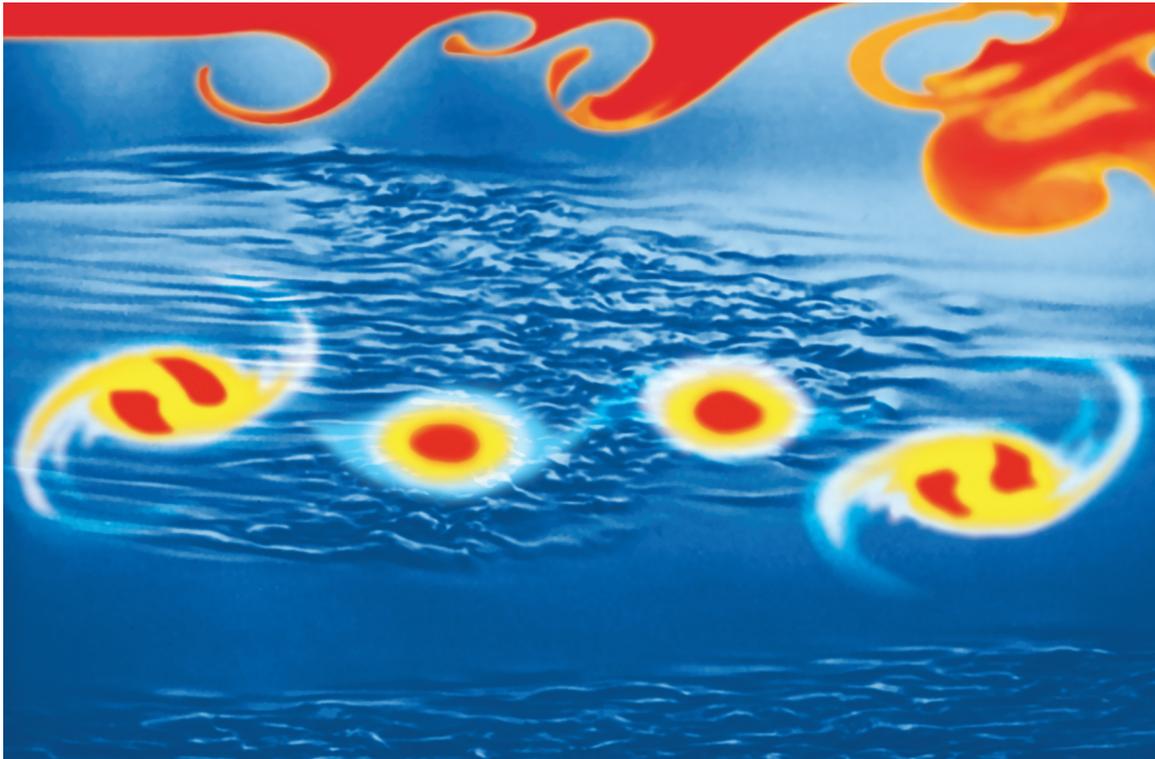
S C I E N C E S

TURBULENCE



Nouvelle édition

 **Marcel LESIEUR**



TURBULENCE

Grenoble Sciences

Grenoble Sciences est un centre de conseil, expertise et labellisation de l'enseignement supérieur français. Il expertise les projets scientifiques des auteurs dans une démarche à plusieurs niveaux (référés anonymes, comité de lecture interactif) qui permet la labellisation des meilleurs projets après leur optimisation. Les ouvrages labellisés dans une collection de Grenoble Sciences ou portant la mention « Sélectionné par Grenoble Sciences » (*Selected by Grenoble Sciences*) correspondent à :

- des projets clairement définis sans contrainte de mode ou de programme,
- des qualités scientifiques et pédagogiques certifiées par le mode de sélection (les membres du comité de lecture interactif sont cités au début de l'ouvrage),
- une qualité de réalisation assurée par le centre technique de Grenoble Sciences.

Directeur scientifique de Grenoble Sciences

Jean BORNAREL, Professeur émérite à l'Université Joseph Fourier, Grenoble 1

On peut mieux connaître Grenoble Sciences en visitant le site web :

<https://grenoble-sciences.ujf-grenoble.fr>

On peut également contacter directement Grenoble Sciences :

Tél : (33) 4 76 51 46 95, e-mail : grenoble.sciences@ujf-grenoble.fr

Livres et pap-ebooks

Grenoble Sciences labellise des livres papier (en langue française et en langue anglaise) mais également des ouvrages utilisant d'autres supports. Dans ce contexte, situons le concept de **pap-ebook** qui se compose de deux éléments :

- un **livre papier** qui demeure l'objet central avec toutes les qualités que l'on connaît au livre papier,
- un **site web compagnon** qui propose :
 - › des éléments permettant de combler les lacunes du lecteur qui ne posséderait pas les prérequis nécessaires à une utilisation optimale de l'ouvrage,
 - › des exercices pour s'entraîner,
 - › des compléments pour approfondir un thème, trouver des liens sur internet, etc.

Le livre du **pap-ebook** est autosuffisant et certains lecteurs n'utiliseront pas le site web compagnon. D'autres l'utiliseront et ce, chacun à sa manière. Un livre qui fait partie d'un pap-ebook porte en première de couverture un logo caractéristique et le lecteur trouvera la liste de nos sites compagnons à l'adresse internet suivante :

<https://grenoble-sciences.ujf-grenoble.fr/pap-ebooks>

Grenoble Sciences bénéficie du soutien du **Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche** et de la **Région Rhône-Alpes**.

Grenoble Sciences est rattaché à l'**Université Joseph Fourier** de Grenoble.

ISBN 978 2 7598 1018 5

© EDP Sciences 2013

TURBULENCE

Marcel LESIEUR



17, avenue du Hoggar
Parc d'Activité de Courtabœuf - BP 112
91944 Les Ulis Cedex A - France

Turbulence

Cet ouvrage, labellisé par Grenoble Sciences, est un des titres du secteur *Sciences de la Matière* de la *Collection Grenoble Sciences* d'EDP Sciences, qui regroupe des projets originaux et de qualité. Cette collection est dirigée par Jean BORNAREL, Professeur émérite à l'Université Joseph Fourier, Grenoble 1.

Comité de lecture de l'ouvrage

- Pierre AVERBUCH, directeur de recherche honoraire au CNRS
- Olivier MÉTAIS, professeur à Grenoble Institut National Polytechnique
- René MOREAU, professeur émérite à Grenoble Institut National Polytechnique, membre de l'Académie des sciences
- Philippe NOZIÈRES, chercheur à l'Institut Laue Langevin de Grenoble, professeur honoraire au collège de France, membre de l'Académie des sciences, de la National Academy of Sciences et de l'American Academy of Art and Sciences

Cet ouvrage a été suivi par Stéphanie TRINE & Laura CAPOLO pour la partie scientifique et par Stéphanie TRINE, Sylvie BORDAGE & Olivier PASSALACQUA pour sa réalisation pratique, avec la collaboration de Laurent NICOLAIDIS et Patrick DESSENNE pour les figures. L'illustration de couverture est l'œuvre d'Alice GIRAUD, d'après «simulation bidimensionnelle de l'écoulement dans un canal plan muni d'une marche descendante», avec l'aimable autorisation du Professeur A. SILVEIRA NETO, Université de Uberlandia (Brésil) ; «simulation de l'instabilité d'une nappe tourbillonnaire», M. P. COMTE, équipe MOST du LEGI, Grenoble ; «photo d'une tache turbulente dans une couche limite», B. CANTWELL, D. COLES & P. DIMATOKIS, 1978, *J. Fluid Mech*, **87**, p. 641-672 © Cambridge University Press, reproduit avec permission.

Autres ouvrages labellisés sur des thèmes proches (chez le même éditeur)

L'air et l'eau (*R. Moreau*) • Turbulence et déterminisme (*M. Lesieur, en collaboration avec l'institut universitaire de France*) • La Cavitation. Mécanismes physiques et aspects industriels (*J. P. Franc et al.*) • Les milieux aérosols et leurs représentations (*A. Mailiat*) • Mécanique. De la formulation lagrangienne au chaos hamiltonien (*C. Gignoux & B. Silvestre-Brac*) • Problèmes corrigés de mécanique et résumés de cours. De Lagrange à Hamilton (*C. Gignoux & B. Silvestre-Brac*) • Introduction à la mécanique statistique (*E. Belorizky & W. Gorecki*) • Mécanique Statistique. Exercices et problèmes corrigés (*E. Belorizky & W. Gorecki*) • Outils mathématiques à l'usage des scientifiques et ingénieurs (*E. Belorizky*) • Description de la symétrie. Des groupes de symétrie aux structures fractales (*J. Sivardière*) • Energie et environnement. Les risques et les enjeux d'une crise annoncée (*B. Durand*) • L'énergie de demain (*Groupe Energie de la Société Française de Physique, sous la direction de Jean-Louis Bobin, Elisabeth Huffer & Hervé Nifenecker*) • En physique, pour comprendre (*L. Viennot*) • Naissance de la Physique (*M. Soutif*) • L'Asie, source de sciences et de techniques (*M. Soutif*)

et d'autres titres sur le site internet : <https://grenoble-sciences.ujf-grenoble.fr>

Préface

de la première édition

Quoi de plus fascinant que le fabuleux spectacle des fluides en mouvement offert par la nature au regard de chacun : vagues déferlantes inlassablement jetées et brisées sur les récifs, nuages ou fumées aux volutes infiniment renouvelées... Comme l'eau vive des torrents, tous ces fluides apparaissent **insaisissables**. Qui demeurerait insensible à la beauté de ces écoulements, à la fois permanente et toujours recommencée, quel chercheur resterait insensible au défi de leur modélisation ? Tel est bien l'enjeu : **saisir l'insaisissable** ! Et il est presque paradoxal qu'au début du XXI^e siècle, alors que l'on a pu comprendre et modéliser de nombreux phénomènes à l'échelle des microparticules (domaine de la mécanique quantique) ou à l'échelle de l'Univers (domaine de la mécanique relativiste), les écoulements des fluides les plus courants, comme l'eau et l'air, phénomènes à l'échelle humaine, à l'exacte portée de notre vue, de notre ouïe, de notre toucher, soient encore aussi mystérieux, alors qu'ils appartiennent au domaine de la mécanique classique. Un mot résume ce grand défi scientifique, que Marcel Lesieur a choisi comme titre de ce livre : *Turbulence*.

Le lecteur le plus jeune, même si sa formation scientifique ne lui a pas encore fourni les bases de la mécanique des fluides, doit ressentir de façon innée l'importance cruciale du phénomène de turbulence, d'où provient systématiquement une certaine **incertitude** sur les valeurs mesurées ou calculées : incertitude sur la largeur du panache de fumée, incertitude sur la dispersion du polluant, incertitudes sur les valeurs de la portance qui permet à l'avion de voler et de la traînée que doit vaincre la poussée du moteur... Au pays de la turbulence, l'**aléatoire** est la règle. Mais ce caractère aléatoire, cependant, ne suffit pas à définir la turbulence (le mouvement brownien n'est pas un mouvement turbulent). Et déjà les difficultés commencent : qu'il est donc malaisé de proposer une définition satisfaisante de ce phénomène ! Favre *et al.* [73] (p. 18) disent qu'*un écoulement est turbulent lorsqu'il comporte un très grand nombre de tourbillons de dimensions très variées*. Dans l'introduction de cet ouvrage, Marcel Lesieur caractérise la turbulence, à la fois par les qualificatifs **désordonnée**, **aléatoire**, **chaotique**, et par deux de ses propriétés essentielles : **imprévisibilité** (ou grande sensibilité aux conditions initiales) et **mélange**.

L'étudiant doit ressentir une relative insatisfaction devant ces définitions différentes, dont certaines demeurent floues et dont d'autres ressemblent fort à des pétitions de principe. Le chercheur, familier de la difficulté, accepte de définir la turbulence à partir de ses propriétés les plus universelles et les plus caractéristiques, parce qu'il sait qu'au niveau des propriétés, enfin, des lois sont bien établies (c'est grâce à elles que les ingénieurs peuvent concevoir et calculer des machines aussi fiables que les avions modernes). En particulier, certaines valeurs moyennes, mesurées avec précision, sont tout à fait reproductibles (le débit moyen dans un tuyau, ou le flux de chaleur moyen traversant une couche fluide, à titre d'exemples). Un préjugé diffus et implicite se dégage en effet de l'immense littérature consacrée à la turbulence : **il doit bien exister quelque chose de simple** dans ce monde d'apparente complexité ! Tous les efforts des chercheurs engagés dans cette aventure ont effectivement pour objectif cette quête d'une lumière qui simplifierait la description des phénomènes turbulents et qui permettrait de construire la théorie susceptible de tous les prédire.

Cet ouvrage de Marcel Lesieur est une promenade détendue à travers les écoulements turbulents. Partant du spectacle de la nature, ou quelques fois d'écoulements industriels, l'auteur se comporte comme un guide et commence par éduquer le regard du lecteur. Voir et distinguer les **tourbillons** isolés est un premier stade, les reconnaître dans leur état éphémère et enchevêtré au sein de la turbulence en est un second, acquérir une première notion des conséquences pratiques de la présence de turbulence en est encore un autre. Tout au long de cet ouvrage, mis à part quelques paragraphes spécialisés, Marcel Lesieur initie à la turbulence, comme à une **science d'observation**. Mais à tous les pourquoi ou comment, il faut bien proposer des réponses. Pour cela, l'auteur résume les bases scientifiques de la mécanique des fluides et permet au lecteur de comprendre **la formation des tourbillons** à partir d'une instabilité, **leurs interactions** à l'aide du théorème de Kelvin et de la loi de Biot et Savart, et, finalement, **leur déclin** à la fin du processus de cascade à cause de la viscosité. Expert des techniques de simulation numérique des écoulements turbulents, l'auteur propose aussi sa vision des apports récents des méthodes numériques qui, écrit-il, *nous ont redonné la vue : le brouillard s'est dissipé, la superbe beauté et la simplicité de la turbulence sont apparues.*

La lecture de cet ouvrage m'a procuré de très agréables moments de bonheur scientifique, je ne doute pas que beaucoup de lecteurs partageront ce sentiment et je souhaite que, parmi les plus jeunes, certains y trouvent leur vocation. Les enseignants y trouveront une multitude d'exemples et de splendides photographies à montrer à leurs étudiants. Les ingénieurs, même s'ils sont déjà familiers du calcul de certains écoulements industriels, auront plaisir, grâce à ce livre, à pouvoir évaluer les limites des techniques d'aujourd'hui et à s'initier à celles de demain. Et les chercheurs, capables de discuter, critiquer, voire contester certains points de vue, y trouveront les racines de nouvelles idées ou réflexions.

René Moreau
*Professeur émérite à Grenoble INP
Membre de l'Académie des sciences*

Avant-propos, remerciements...

Ce n'est que très récemment que j'ai envisagé le projet d'écrire une deuxième édition de ce livre. J'avais eu d'autres obligations professionnelles et éditoriales. En fait, des présentations et discussions avec des collègues de toutes disciplines (à l'Académie des sciences en particulier) m'ont convaincu du besoin pédagogique impérieux de présenter les avancées de la mécanique des fluides et de la turbulence dans un contexte moins spécialisé que les journaux de recherche. Il est aussi évident que, dans la vie pratique des gens, la turbulence se présente dans le cadre de problèmes graves (pénurie de carburant aggravée par la traînée des véhicules, tornades, transport de pollution chimique ou radioactive...) ou même de catastrophes (cyclones, tsunamis, tempêtes, inondations, crash d'avions...). Enfin le traitement de texte L^AT_EX se prête bien à l'insertion de figures et photos couleur. J'ai pu ainsi ajouter quelques documents personnels qui ne figuraient pas dans la première édition. Celle-ci était dédiée à un bébé qui est maintenant un colosse, intéressé par les ordinateurs et les robots. Son petit frère, avant-centre et sprinter, et qui veut tous les détails mathématiques en classe, a insisté pour qu'il y ait des équations thermodynamiques. Mes deux filles, de fibre plus littéraire, m'ont aussi beaucoup soutenu.

Je remercie les membres du comité de lecture, Pierre Averbuch, Olivier Métais, René Moreau et Philippe Nozières, pour leurs critiques constructives à propos des deux éditions. René m'a en outre fait l'amitié d'écrire une préface qui est toujours d'actualité.

Je remercie mes collaborateurs et anciens thésards de l'équipe « Modélisation et simulation de la turbulence » du LEGI à Grenoble, en particulier les professeurs d'université Jean-Pierre Chollet (UJF-Grenoble), Pierre Comte (Poitiers), Yves Dubief (Vermont, États-Unis), Carlos Flores (Mexico), Eric Lamballais (Poitiers), Olivier Métais (Grenoble INP), Aristeu Silveira-Neto (Uberlândia, Brésil), Chantal Staquet (UJF-Grenoble), ainsi que Christophe Brun, Éric David, Frédéric Ducros, Yves Fouillet, Élodie Garnier, Marc-André Gonze, Philippe Moinat et Jorge Silvestrini. Leurs superbes résultats ont largement alimenté le contenu scientifique et esthétique du livre. Une mention spéciale dans la deuxième édition pour Patrick Bégou, qui a géré l'en-

semble des illustrations avec le personnel très compétent de Grenoble Sciences. Je remercie aussi chaleureusement tous ceux qui m'ont fourni documents et photos.

Bien sûr, ce livre n'aurait jamais vu le jour sans l'aide éclairée de Jean Bornarel, directeur de la collection Grenoble Sciences.

Je suis enfin très reconnaissant à tous les organismes de recherche et les groupes industriels qui m'ont donné pendant de nombreuses années les moyens de mener cette réflexion sur la turbulence : Grenoble INP, le CNRS, l'UJF, le CEA, le CNES, Dassault, le ministère de la Défense, PSA, Renault.

Marcel Lesieur
Grenoble, décembre 2012

Table des matières

Chapitre 1 – Introduction	1
1.1. Préambule	1
1.2. À la rencontre de la turbulence aérodynamique	1
1.3. Turbulence atmosphérique	5
1.4. Turbulence hydrodynamique	8
1.5. Turbulence océanique	9
1.6. Géophysique interne	10
1.7. Turbulence astrophysique	11
1.8. Fluides du corps humain	14
1.9. Turbulence, imprédictabilité et chaos	15
1.9.1. Imprédictabilité	15
1.9.2. À quoi les simulations numériques servent-elles ?	18
1.9.3. Mélange	20
1.10. En conclusion	21
Chapitre 2 – Mécanique des fluides élémentaire	23
2.1. De Newton à Helmholtz et Kelvin	23
2.1.1. Bilans de masse et vitesse	24
2.1.2. Fluide newtonien	25
2.1.3. Dissipation et irréversibilité	27
2.1.4. Bilan thermodynamique	28
2.1.5. Transport et non-linéarité	31
2.1.6. Tourbillon et vorticité	31
2.2. Les principes de Bernoulli	34
2.2.1. Premier principe de Bernoulli	34
2.2.2. Deuxième principe de Bernoulli	39

2.3. Du laminaire au turbulent	39
2.3.1. Écoulement de Poiseuille	40
2.3.2. Écoulement de Couette	42
2.3.3. Couche limite	42
2.3.4. Couche de mélange	44
2.4. Similitude	46
2.5. Certains effets des fluides turbulents	47
Chapitre 3 – Instabilités et tourbillons	49
3.1. Spirales de Kelvin-Helmholtz	49
3.1.1. Critère de stabilité de Lord Rayleigh	51
3.1.2. Équation d’Orr-Sommerfeld	51
3.1.3. Simulation numérique bidimensionnelle	52
3.1.4. Tourbillons et dépressions	58
3.1.5. Appariements et dipôles	58
3.2. Les allées tourbillonnaires de von Karman	59
3.3. Tourbillons longitudinaux	64
3.3.1. Filaments tourbillonnaires	64
3.3.2. Tourbillons en épingle à cheveux	65
3.3.3. Modèle de nappes de vitesse	70
3.4. Effets de gravité et problèmes de climat	71
3.4.1. Convection thermique	71
3.4.2. Stratification stable	78
Chapitre 4 – La turbulence développée	83
4.1. Retour vers la transition	83
4.2. La théorie de Kolmogorov	84
4.2.1. Kolmogorov-1941 (espace physique)	85
4.2.2. Kolmogorov-1941 (espace de Fourier)	86
4.2.3. Exercice d’analyse dimensionnelle	87
4.2.4. Problèmes théoriques sur Kolmogorov-1941	87
4.2.5. Vérification expérimentale	88
4.2.6. Vérification par modèle spectral EDQNM	90
4.2.7. L’échelle de Kolmogorov	91
4.2.8. Cascade d’hélicité	92
4.2.9. Intermittence interne	92
4.2.10. Les objets fractals	94

4.3. Dispersion et diffusion turbulentes	96
4.3.1. Loi de Richardson	96
4.3.2. Diffusion cohérente et incohérente	97
4.4. Turbulence en amortissement libre	99
4.5. Tourbillons cohérents	100
4.5.1. Couche de mélange	101
4.5.2. Tourbillons longitudinaux secondaires	102
4.5.3. Couche limite	104
4.5.4. Turbulence isotrope tridimensionnelle	106
4.5.5. Nouveaux moyens de reconnaissance des tourbillons	108
4.5.6. Dislocations et défauts	109
4.6. Turbulence bidimensionnelle	113
4.6.1. Tourbillons bidimensionnels	114
4.6.2. Turbulence bidimensionnelle : point de vue statistique	116
4.6.3. Dispersion à deux dimensions	120
4.6.4. Distribution énergétique atmosphérique	120
Chapitre 5 – Modélisation et simulation numériques	123
5.1. Turbulence et équation de Navier-Stokes	123
5.2. Les contraintes turbulentes de Reynolds	125
5.3. Viscosité turbulente	128
5.3.1. Longueur de mélange de Prandtl	128
5.3.2. Modèles $K - \epsilon$ et RANS	130
5.4. Modèles spectraux en turbulence isotrope	131
5.5. Les grands enjeux du calcul scientifique	135
5.5.1. Méthodes numériques des simulations directes	136
5.5.2. Transformée de Fourier	141
5.5.3. Calculateurs vectoriels et parallèles	142
5.6. Simulation des grandes échelles	146
5.6.1. SGE de la vitesse	146
5.6.2. SGE du scalaire passif	147
5.6.3. Modèles de Smagorinsky	148
5.6.4. SGE dans l'espace de Fourier	149
5.6.5. Modèles de la fonction de structure	149
5.7. La modélisation industrielle : passé et futur	151

Chapitre 6 – Turbulence aérodynamique	153
6.1. Introduction	153
6.2. Ondes sonores et chocs	158
6.2.1. Ondes sonores	158
6.2.2. Effet Doppler	161
6.2.3. Chocs	161
6.3. Aérodynamique subsonique	166
6.4. Aérodynamique supersonique et hypersonique	172
6.4.1. Couche de mélange compressible	172
6.4.2. Couche limite compressible	178
6.4.3. Avion spatial	181
6.5. Contrôle de turbulence	184
6.5.1. Contrôle dans les couches limites	185
Chapitre 7 – Fluides de l’environnement	189
7.1. Introduction	189
7.2. Atmosphère terrestre : généralités	189
7.2.1. La circulation de Hadley	190
7.2.2. Les alizés	190
7.2.3. Hautes et moyennes latitudes	192
7.3. Équilibre géostrophique	192
7.3.1. Le vent thermique	196
7.3.2. Conservation de la vorticité potentielle	197
7.4. Instabilité barocline	200
7.4.1. Principes de base	200
7.4.2. Simulations numériques	202
7.4.3. Avez-vous déjà vu des tempêtes anticycloniques ?	204
7.5. Turbulence quasi géostrophique	205
7.5.1. Modèles N-couches	206
7.5.2. Modèle à ρ continu	207
7.6. Cyclones et tornades atmosphériques	207
7.6.1. Les cyclones tropicaux	207
7.6.2. Les tornades	209
7.7. Rotation ou stratification à échelle moyenne	211
7.7.1. Pourquoi le sillage de la Soufrière est-il asymétrique ?	211
7.7.2. Théorème de Taylor-Proudman	213
7.7.3. Écoulements cisailés tournants	213

7.7.4. Simulation des grandes échelles du vent sur le Grand Colon	219
7.8. Circulation océanique	220
7.8.1. Circulation moyenne dans les bassins	220
7.8.2. Les tourbillons océaniques	222
7.8.3. Les upwellings et El Niño	224
7.9. Géophysique interne	226
7.10. Jupiter	226
Chapitre 8 – Conclusion	229
8.1. L'imprédictabilité	229
8.2. Le mélange	231
8.3. Tourbillons et instabilités	232
8.4. Simulations et modélisations numériques	235
8.5. Turbulence et philosophie	238
Bibliographie	241
Index	257

Vj ku'r ci g'kpvgpvkqpcmf 'igh'dnc pm

Chapitre 1

Introduction

1.1. Préambule

Commençons par un avertissement. Ce livre ne parlera essentiellement que de turbulence dans les fluides. De mon point de vue, ce concept est large et regroupe des situations allant d'états fortement tridimensionnels à bidimensionnels. On verra beaucoup d'illustrations de la turbulence sous différentes conditions (observations, mesures, simulations numériques) dans diverses parties du texte.

1.2. À la rencontre de la turbulence aérodynamique

L'avion Paris-Madrid survole les Pyrénées enneigées, un jour de printemps 1992 où soufflent mistral et tramontane. Le ciel est clair, et le spectacle est magnifique. Nous sommes peut-être à 10 km d'altitude. Tout est calme. Soudain, de violentes secousses causées par la turbulence m'arrachent à cette contemplation. Même à cette altitude, le vent du nord est devenu instable en franchissant les montagnes, et les ondes de relief ainsi produites ont brusquement dégénéré en turbulence, telles les vagues déferlant à la surface de l'océan. *Mesdames et messieurs, nous traversons une zone de turbulence, veuillez attacher vos ceintures* dit l'hôtesse, phrase traditionnelle que l'on entend sans doute des centaines de fois par jour dans tous les avions du monde. Il s'agit là de *turbulence en ciel clair*. Ma brave dame de voisine s'inquiète, et je la rassure en lui disant que ce n'est là qu'une petite turbulence tranquille, et que l'avion tiendra. Rien à voir avec la turbulence très violente et réellement inquiétante rencontrée une nuit de décembre 1986 lorsque, en route vers l'Australie, le Boeing 747 passait, toujours à cette altitude, à travers de puissantes montées d'air chaud au-dessus de l'océan. C'était à l'approche de la saison des pluies, du côté des tropiques, et l'atmosphère était mise en mouvement par convection thermique, telle l'eau d'une casserole sur le feu. Sans être grand expert en mécanique des fluides, ce phénomène s'explique, au moins qualitativement, par le principe d'Archimède : l'air chauffé s'élève dans un environnement plus froid, comme s'envole un ballon d'hélium ou une montgolfière.

Dans ces instants il est dur, pour un mécanicien des fluides que sa discipline semble abandonner, de remettre son sort entre les mains de la mécanique des solides, discipline rivale. Mon expérience d'utilisateur d'avions aux quatre coins du monde, et le fait que je suis ici en train de pianoter les lignes de cette deuxième édition sur le clavier de l'ordinateur, attestent que les structures des avions tiennent, malgré les inquiétantes oscillations des ailes. Pourtant, des pilotes professionnels m'ont affirmé que même la turbulence en ciel clair pouvait détruire les avions...

Ceci nous amène d'ailleurs à la malheureuse disparition du vol Rio-Paris le 7 juin 2009 : il est possible que de fortes ascendances atmosphériques turbulentes de type convectif dans la zone de convergence intertropicale aient conduit à la perte de l'avion suite à des erreurs dans les mesures de vitesse par les sondes Pitot. Ces sondes ne peuvent prendre en compte que la vitesse relative de l'avion et du vent. En outre elles sont basées sur le premier principe de Bernoulli (voir chap. 2), où le fluide est supposé permanent et non visqueux. En fait, la lecture des boîtes noires en 2011 retrouvées au fond de l'océan après une recherche acharnée utilisant des moyens très sophistiqués tels que des mini-sous-marins, montre qu'il y a eu givrage des sondes Pitot quand l'avion a traversé cette zone. Dans ce cas, l'avion passe du mode *pilotage automatique* au pilotage manuel. Le journal *Le Figaro* (29 juillet 2011) dit qu' *il aurait suffi que le pilote (...) soit capable de maintenir l'altitude de l'avion avec son manche pour que la catastrophe soit évitée*. On parle aussi de renforcement de la formation des pilotes. Il semble cependant que l'industriel fabriquant ces sondes en avait livré auparavant aux compagnies aériennes une nouvelle version n'ayant plus ces problèmes, mais que celle-ci n'avait pas encore été installée sur cet appareil. Je pense que des études concertées des constructeurs aéronautiques internationaux devraient être menées pour développer les méthodes de mesure de vitesse du futur.

Toujours en avion, on rencontre souvent la turbulence à l'approche du sol, dans les 1 000 derniers mètres (ce que l'on appelle la couche limite atmosphérique) : c'est là que le vent en altitude est arrêté par le sol, situation instable qui provoque aussi une turbulence intense, et qui favorise la condensation de l'eau dans des nuages. En effet, la température de saturation est une fonction décroissante de la pression, et cette dernière est très faible au sein des tourbillons, comme on le verra plus loin.

Les volutes de fumée d'une cigarette, c'est encore de la turbulence. Ayant quelques difficultés à supporter ladite fumée, c'est un exemple que je n'aime pas trop donner. Et pourtant, ces volutes sont de superbes exemples d'instabilités de nappes tourbillonnaires, dont nous verrons d'autres manifestations par la suite.

Quand un corps aérodynamique se déplace suffisamment vite dans un fluide, air ou eau par exemple, il peut aussi déclencher de la turbulence dans son sillage ou dans les couches limites près de ses parois. La figure 1.1 montre les trajectoires du fluide (ici, de l'eau) autour d'une maquette de l'avion Concorde (vu de dessus) dans la phase d'atterrissage, visualisées par des colorants injectés dans l'écoulement (voir Werlé [240]). On remarque en particulier comment les tourbillons coniques sur les ailes (on les appelle tourbillons d'aile delta) produisent en leur sein une turbulence intense à toute petite échelle. Pourquoi utiliser de l'eau pour cette expérience ? En fait,

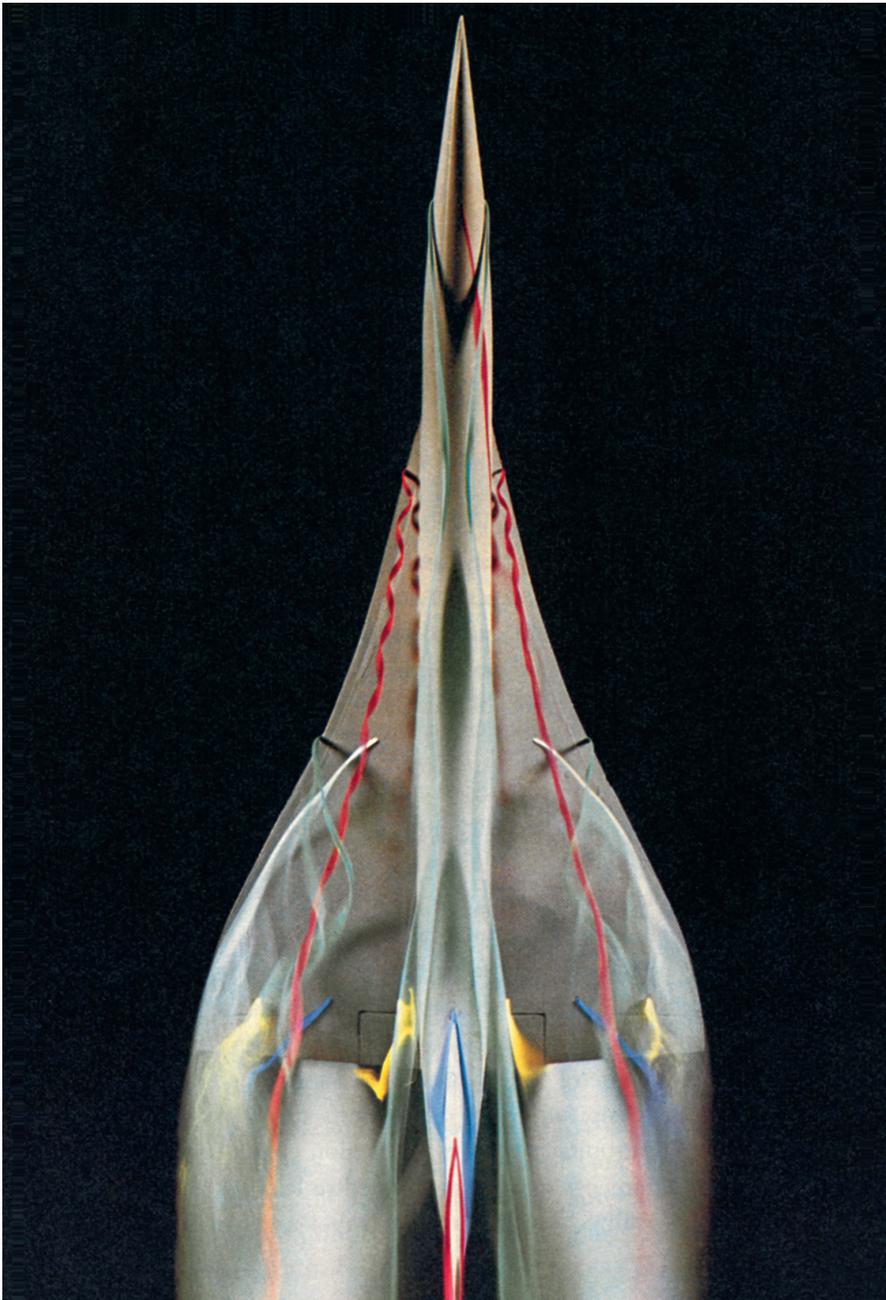


Figure 1.1 – Visualisation de l'écoulement d'eau autour d'une maquette du Concorde dans un tunnel hydrodynamique (cliché H. Werlé, ONERA)

on substitue souvent en aérodynamique expérimentale un tunnel hydrodynamique à la soufflerie : l'eau étant beaucoup moins visqueuse que l'air, ceci permet, pour des effets équivalents, de réduire la vitesse du fluide ou la taille de la maquette (voir au chapitre 2 la notion de nombre de Reynolds). On ne peut cependant étudier ainsi que des régimes de vol subsoniques, où les effets de compressibilité de l'air sont négligeables.

La fin de l'histoire du Concorde est triste, après la catastrophe de Garges-lès-Gonesse lors d'un décollage le 25 juillet 2000, et pour laquelle un premier jugement a été rendu en décembre 2010. Suite à l'éclatement d'un pneu, qui peut avoir été causé par le passage sur une petite lamelle métallique se trouvant sur la piste, des débris ont percé la paroi du réservoir de carburant qui a commencé à se vider, puis s'est embrasé pour donner naissance à une grande flamme turbulente qui a détruit le moteur. Comme l'avion avait décollé, il était perdu, n'ayant plus qu'un réacteur fonctionnant encore. L'avenir des avions de transport supersoniques stratosphériques est en fait obscurci par les questions suivantes : bruit trop important au décollage et à l'atterrissage par rapport aux normes modernes, destruction d'ozone atmosphérique, et production de gaz à effet de serre, et trop forte consommation énergétique. En outre il faut concevoir des pneus extrêmement résistants. Par contre, de petits avions d'affaires comme le Falcon sont en plein développement, même en régime légèrement supersonique. D'autres types d'avions, subsoniques, de taille moyenne, semblent aussi très intéressants. Il s'agit des ATR (Avions de Transport Régional), où les réacteurs sont à double flux : le flux secondaire est inversé et actionne une hélice. Le rendement énergétique de ces avions est bon. Ils ont un avenir réel dans les transports aériens régionaux (quelques centaines de kilomètres).

Un effet nocif de tous les avions est ce que l'on appelle la turbulence de sillage. En vol, l'extrémité des ailes génère des tourbillons longitudinaux analogues à ceux discutés ci-dessus pour le Concorde. Ces tourbillons sont en fait extrêmement cohérents et persistent longtemps, de sorte qu'ils peuvent affecter gravement le vol des avions qui suivent. Ceci est, avec le bruit, un des facteurs qui limitent la fréquence de décollage des avions dans les aéroports. Des recherches sont menées pour tenter de réduire l'effet de ces tourbillons de bout d'aile (voir Jacquin [115] pour une revue).

La turbulence engendrée par des corps aérodynamiques sera en général néfaste, car elle augmentera (parfois considérablement) la résistance du fluide (traînée), et par contre réduira la portance. Les constructeurs d'avions, trains à grande vitesse, automobiles et bateaux cherchent donc à limiter cette turbulence, afin d'améliorer les performances ou réduire la consommation en carburant du véhicule. Notons qu'une voile qui faseye produit encore de la turbulence dans son sillage. Donnons un autre exemple aérothermodynamique de nocivité de la turbulence : dans le projet de navette spatiale européenne Hermès, lors de sa rentrée dans l'atmosphère, on pouvait craindre que des bouffées de fluide extérieur très chaud (de l'oxygène dissocié à plus de 3000 K) ne soient mises au contact des parois (qui ne doivent pas dépasser 1500 K). S'il semble que toutes les précautions concernant les protections thermiques avaient été prises pour le fuselage, il y avait par contre des craintes pour la tenue de la gouverne arrière, dont la destruction peut avoir des conséquences dramatiques pour la sécurité de

l'avion. Les chercheurs et ingénieurs qui travaillent sur ce problème ont donc été amenés à développer de nouvelles techniques de calcul très sophistiquées (la simulation des grandes échelles) prenant en compte ces effets non permanents de la turbulence. Nous reviendrons sur ces méthodes de modélisation au chapitre 5. En fait le programme Hermès n'a pu échapper aux restrictions budgétaires européennes, et la compétence acquise en aérodynamique hypersonique par des dizaines d'équipes internationales au cours de ces dernières années a été réduite de façon importante. Notons cependant que des programmes de veille technologique ont été menés, en France en particulier.

La turbulence peut avoir aussi un rôle positif : le mélange turbulent doit être favorisé dans la chambre de combustion d'un moteur d'automobile, d'avion ou de fusée, afin d'obtenir un meilleur rendement. Ici, accroître la turbulence aura pour conséquences à la fois un gain énergétique et une réduction des gaz polluants émis. De grands progrès ont pu être réalisés dans le domaine de la dynamique de la combustion et du contrôle de flammes par Candel et son groupe [39]. Il est possible de faire la simulation numérique de systèmes de combustion complets (voir la revue faite dans le livre de Poinso et Veynante [195], Vervisch et Poinso [235], et Enaux *et al.* [68]). C'est ainsi que sera mis au point le moteur à essence propre, qui va contribuer à réduire de manière significative la pollution dramatique de l'environnement par l'automobile. En fait, des développements spectaculaires en propulsion automobile pour la réduction de l'émission de gaz à effet de serre sont à mettre à l'actif des véhicules électriques : véhicules hybrides, opérationnels maintenant (le mien marche très bien), et plus tard véhicules purement électriques.

1.3. Turbulence atmosphérique

Revenons à l'air de l'atmosphère : les prévisions météorologiques nous montrent tous les jours des perturbations anticycloniques ou cycloniques qui voyagent à la surface du globe. Les satellites nous ont révélé que ces zones de haute ou basse pression correspondaient à de gros tourbillons, ayant un diamètre de l'ordre de 1 000 kilomètres, et dans lesquels les nuages s'enroulent en spirale (fig. 1.2). L'évolution de ces tourbillons est en général imprévisible au-delà de quelques jours : nous avons là affaire à une turbulence quasi bidimensionnelle. On voit en particulier que, dans l'air de l'atmosphère, la turbulence peut affecter des échelles de l'ordre du centimètre ou moins (la fumée de cigarette), de la dizaine de mètres (le panache d'une cheminée d'usine), du kilomètre (les nuages, ou les tornades), ou de plusieurs centaines de kilomètres (cyclones tropicaux, ou dépressions dégénérant en tempêtes). Dans ce dernier cas (les tempêtes), la turbulence résulte de l'action conjuguée de la rotation terrestre et de fortes différences de température, phénomène appelé instabilité barocline et sur lequel nous reviendrons par la suite au chapitre 7.