

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*

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