

FLUIDES EN ÉCOULEMENT

Méthodes et modèles

Jacques PADET

Professeur Émérite à l'Université de Reims

Seconde édition revue et augmentée

TABLE DES MATIÈRES

PRÉSENTATION

Préface de la 1^{ère} édition

Prologue de la 1^{ère} édition

Prologue de la 2^{ème} édition

Nomenclature

CHAPITRE 1. – Bases physiques et théoriques. Bilans et lois de comportement

Préambule

1.1. – Principales caractéristiques des milieux fluides

1.1.1. – Continuité des milieux fluides

1.1.2. – Déformabilité des fluides

1.1.3. – Viscosité des fluides : approche expérimentale

1.2. – Éléments de rhéologie

1.2.1. – Déformations

1.2.2. – Dilatation volumique

1.2.3. – Contraintes

1.2.4. – Fluides newtoniens

1.2.5. – Application : calcul de la contrainte locale \vec{T} dans un cas simple

1.3. – Équations de bilans

1.3.1. – Relations générales entre flux et sources

1.3.2. – Bilan de masse

1.3.3. – Bilan de quantité de mouvement

1.3.4. – Bilan d'énergie mécanique

1.3.5. – Bilans d'énergie et d'enthalpie

1.3.6. – Prise en compte de la diffusion dans les équations de bilans

1.3.7. – Bilans d'entropie et d'exergie

1.4. – Vorticité et fonction de courant

1.4.1. – Écoulement plan

1.4.2. – Fonction de courant

1.4.3. – Écoulement axisymétrique

1.5. – Formulation générale d'un problème d'écoulement anisotherme

Annexes au chapitre 1

1.A.1. – Les bilans sur un domaine mobile et le concept de dérivée particulaire

1.A.2. – Calculs relatifs au bilan de quantité de mouvement

1.A.3. – Calculs relatifs au bilan d'énergie cinétique

1.A.4. – Bilan d'entropie : formulation classique

1.A.5. – Expression des équations de bilans en coordonnées cylindriques

CHAPITRE 2. – **Similitude et adimensionnement**

- 2.1. - Problématique
- 2.2. – Premiers apports de l'expérience
 - 2.2.1. – *Expérience de Reynolds*
 - 2.2.2. – *Expérience de la plaque plane*
 - 2.2.3. – *Exploitation des expériences*
- 2.3. – Les fondements de la similitude
 - 2.3.1. – *Forme adimensionnelle d'une équation de bilan*
 - 2.3.2. – *Les critères de similitude*
 - 2.3.3. – *Conditions de validité de la similitude*
- 2.4. – Panorama des critères de similitude
 - 2.4.1. – *Les principes et l'usage*
 - 2.4.2. – *Le critère de similitude temporelle*
 - 2.4.3. – *Les critères de similitude relatifs aux sources de quantité de mouvement*
 - 2.4.4. – *Les critères de similitude relatifs aux sources de masse*
 - 2.4.5. – *Les critères de similitude relatifs aux sources d'énergie*
 - 2.4.6. – *Le critère de similitude relatif à l'équation d'état du fluide*
- 2.5. – Paramètres de couplage et autres nombres sans dimension
 - 2.5.1. – *Couplage entre des sources ne relevant pas des mêmes bilans*
 - 2.5.2. – *Comparaison entre sources dans un même bilan*
 - 2.5.3. – *Autres nombres sans dimension usuels*
- 2.6. – Similitude et adimensionnement : le bon usage
 - 2.6.1. – *Les diverses significations des nombres sans dimension*
 - 2.6.2. – *Intérêt de la similitude*
 - 2.6.3. – *Similitude partielle et ordres de grandeur*
 - 2.6.4. – *Mises en garde*
- Annexes au chapitre 2
 - 2.A.1. – *Tableaux récapitulatifs des termes de sources et des nombres sans dimension*
 - 2.A.2. – *Sur l'analyse dimensionnelle et l'analyse d'échelle*
 - 2.A.3. – *Critères de similitude relatifs aux bilans d'entropie et d'exergie*
 - 2.A.4. – *Grandeurs géométriques de référence dans un bilan intégral*

CHAPITRE 3. – **Que faire de la turbulence ?**

- 3.1. – Données expérimentales
- 3.2. – Théorie statistique locale de la turbulence
 - 3.2.1. – *Équations de bilans aux valeurs moyennes*
 - 3.2.2. – *Équation de bilan pour les fluctuations*
 - 3.2.3. – *Le principe des fermetures en un point*
- 3.3. – Une application de la théorie statistique locale : le modèle pseudo-laminaire
 - 3.3.1. – *Caractérisation d'un transfert laminaire*
 - 3.3.2. – *L'idée directrice du modèle pseudo-laminaire*
 - 3.3.3. – *Diffusion turbulente de masse*
 - 3.3.4. – *Diffusion turbulente de quantité de mouvement*
 - 3.3.5. – *Diffusion turbulente de chaleur*
 - 3.3.6. – *Résolution du problème thermoconvectif*
- 3.4. – Modèles locaux basés sur des équations d'appoint
 - 3.4.1. – *Modèle à une équation dynamique d'appoint ou modèle $k-l$*
 - 3.4.2. – *Modèle $k-\varepsilon$ standard*

- 3.4.3. – Variantes du modèle $k - \varepsilon$ standard
- 3.4.4. – Modèle $k - \omega$
- 3.4.5. – Les taux de turbulence
- 3.5. – Description non locale de la turbulence
 - 3.5.1. – Limites de la théorie statistique locale
 - 3.5.2. – Coefficients de corrélation entre grandeurs fluctuantes
- 3.6. – Échelles de turbulence
 - 3.6.1. – Approche physique
 - 3.6.2. – Macro – échelles
 - 3.6.3. – Micro – échelles
 - 3.6.4. – A propos du nombre de Reynolds turbulent
 - 3.6.5. – Simulation des grandes structures
 - 3.6.6. – Simulation numérique directe
- 3.7. – Production d'entropie turbulente
- Annexes au chapitre 3
 - 3.A.1. – Turbulence et non-linéarité
 - 3.A.2. – Calcul des grandeurs moyennes dans un écoulement turbulent
 - 3.A.3. – Écoulements turbulents à masse volumique variable
 - 3.A.4. – Équations de bilans pour les corrélations $\overline{c v_j}$, $\overline{v_j v_k}$ et $\overline{\theta v_j}$
 - 3.A.5. – Équation de bilan pour l'énergie cinétique de turbulence k
 - 3.A.6. – Équation de bilan de $\overline{c^2}$
 - 3.A.7. – Équation de bilan pour la dissipation ε

CHAPITRE 4. – Dynamique des écoulements laminaires externes

- 4.1. – Présentation
 - 4.1.1. – Les différentes catégories d'écoulements
 - 4.1.2. – Couplage entre le champ de vitesse et le champ de température
- 4.2. – Comportement d'un fluide en écoulement externe au voisinage d'une paroi
 - 4.2.1. – Données expérimentales
 - 4.2.2. – Conditions aux limites
 - 4.2.3. – Retour à l'expérience
- 4.3. – Hypothèses et équations de la couche limite
 - 4.3.1. – Fluide visqueux isochore
 - 4.3.2. – Approximation du fluide parfait
 - 4.3.3. – Écriture adimensionnelle des équations de la couche limite
- 4.4. – Solutions auto-similaires des équations de la couche limite : méthode différentielle
 - 4.4.1. – Bases de la méthode
 - 4.4.2. – Champ des vitesses dans la couche limite
 - 4.4.3. – Contrainte à la paroi et traînée de frottement
 - 4.4.4. – Épaisseur de couche limite
 - 4.4.5. – Coefficient de frottement et grandeurs adimensionnées
 - 4.4.6. – Ordres de grandeur des principaux paramètres
- 4.5. – Extension de la méthode différentielle
 - 4.5.1. – Écoulements à gradient de vitesse extérieure
 - 4.5.2. – Écoulements sur une paroi perméable
 - 4.5.3. – Écoulements sur une paroi inclinée ou sur un dièdre
 - 4.5.4. – Généralisation

- 4.6. – Méthode du bilan semi-intégral
 - 4.6.1. – Objectifs
 - 4.6.2. – Principe de la méthode
 - 4.6.3. – Équation intégral-différentielle de l'écoulement
 - 4.6.4. – Interprétation de δ_1 et δ_2
 - 4.6.5. – Comment se servir de l'équation de Karman
 - 4.6.6. – Résolution de l'équation de Karman : méthode de Pohlhausen
 - 4.6.7. – L'épaisseur de couche limite dans le modèle de Pohlhausen
 - 4.6.8. – Mise en œuvre pratique de la méthode de Pohlhausen
 - 4.6.9. – Cas particulier d'un écoulement extérieur à vitesse uniforme. Essai comparatif Blasius - Pohlhausen
- 4.7. – Jets laminaires
 - 4.7.1. – Introduction aux jets
 - 4.7.2. – Le jet plan laminaire noyé
 - 4.7.3. – Le jet laminaire axisymétrique

CHAPITRE 5. - Dynamique des écoulements turbulents externes

- 5.1. - Couche limite sur une plaque plane sans gradient de vitesse extérieure
 - 5.1.1. - Données expérimentales et interprétation
 - 5.1.2. - Équations de la couche limite turbulente
 - 5.1.3. - Loi de paroi à un paramètre et structure de la couche limite
 - 5.1.4. - Hypothèse de l'équilibre local dans le modèle $k - \varepsilon$
 - 5.1.5. - Vitesse et température dans la loi à un paramètre
 - 5.1.6. - Calcul avec le modèle $k - \varepsilon$: loi de paroi à deux paramètres
- 5.2. - Structure bidimensionnelle de la couche limite turbulente : méthode différentielle
 - 5.2.1. - Principe de la méthode
 - 5.2.2. - Équation générale
 - 5.2.3. - Conditions aux limites
 - 5.2.4. - Mise en forme analytique de la viscosité turbulente
 - 5.2.5. - Calcul pratique de U , τ_p et δ
 - 5.2.6. - Prise en compte de la rugosité de la paroi
- 5.3. - Méthode semi-intégrale et lois approchées
 - 5.3.1. - Écoulements avec gradient de vitesse extérieure
 - 5.3.2. - Écoulements sans gradient de vitesse extérieure
 - 5.3.3. - Loi de vitesse U/U_∞
 - 5.3.4. - Coefficient de frottement sur une paroi perméable
 - 5.3.5. - Coefficient de frottement sur une paroi rugueuse
- 5.4. - Jets libres turbulents
 - 5.4.1. - Présentation et hypothèses
 - 5.4.2. - Le jet plan noyé
 - 5.4.3. - Le jet axisymétrique noyé
- 5.5. - Jets pariétaux turbulents
 - 5.5.1. - Spécificités des jets pariétaux noyés
 - 5.5.2. - Le jet pariétal plan noyé
 - 5.5.3. - Le jet pariétal axisymétrique noyé
- 5.6. - Portée d'un jet - Effet Coanda
 - 5.6.1. - Définition
 - 5.6.2. - Évaluation
 - 5.6.3. - Comparaisons

5.6.4. - Jet unique ou jets multiples ?

5.6.5. - Jets pulsés et jets vibrés

5.6.6. - L'effet Coanda

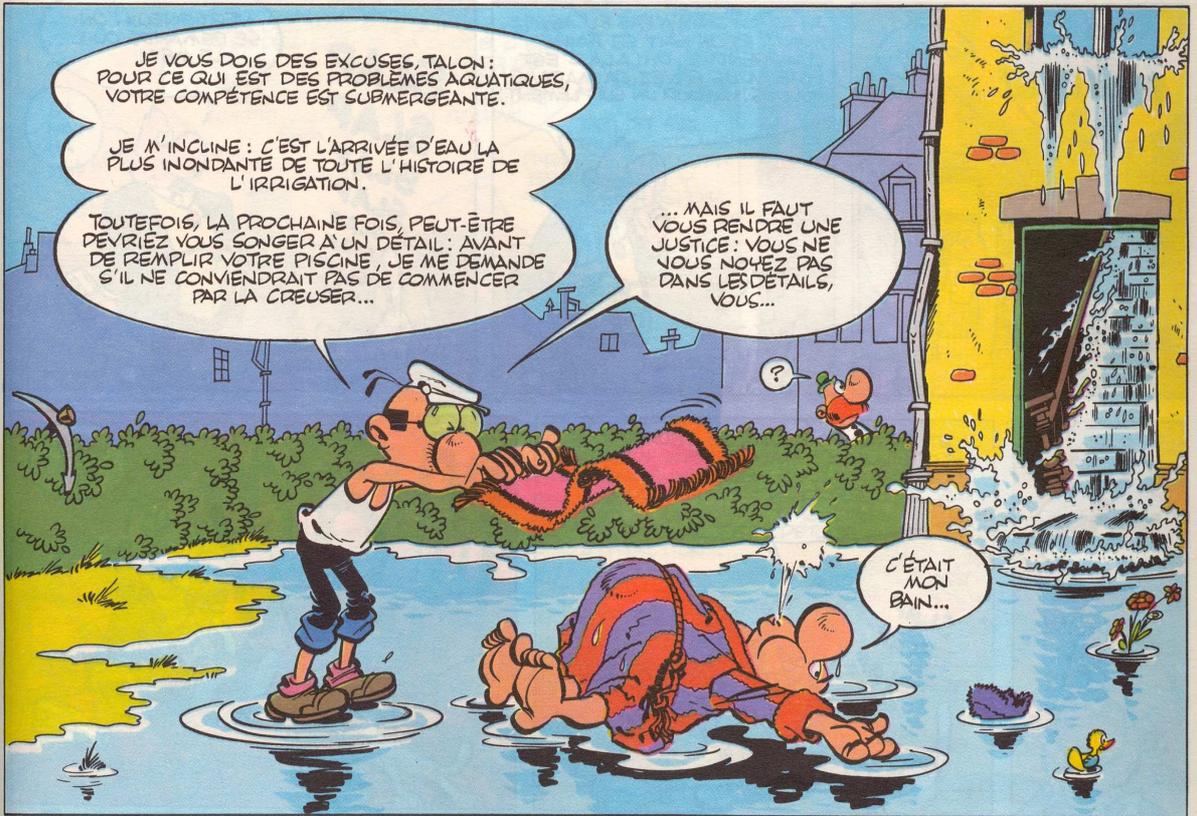
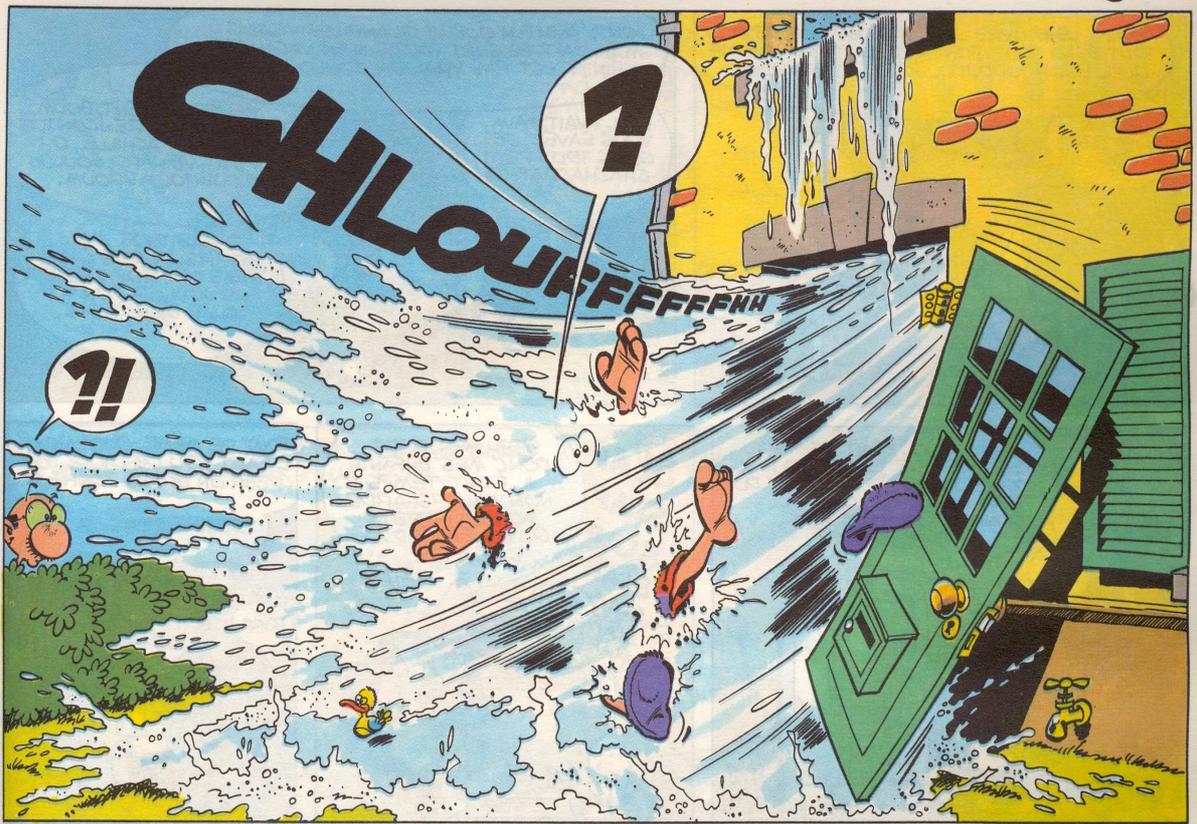
Annexes au chapitre 5

5.A.1. - L'équation de Karman en régime turbulent

5.A.2. - Retour sur le jet rond laminaire : un échec de la théorie

Eléments de bibliographie

Index alphabétique des matières



JE VOUS DOIS DES EXCUSES, TALON :
POUR CE QUI EST DES PROBLÈMES AQUATIQUES,
VOTRE COMPÉTENCE EST SUBMERGEANTE.

JE M'INCLINE : C'EST L'ARRIVÉE D'EAU LA
PLUS INONDANTE DE TOUTE L'HISTOIRE DE
L'IRRIGATION.

TOUTEFOIS, LA PROCHAINE FOIS, PEUT-ÊTRE
DEVRIEZ VOUS SONGER À UN DÉTAIL : AVANT
DE REMPLIR VOTRE PISCINE, JE ME DEMANDE
S'IL NE CONVENDRAIT PAS DE COMMENCER
PAR LA CREUSER...

... MAIS IL FAUT
VOUS RENDRE UNE
JUSTICE : VOUS NE
VOUS NOYEZ PAS
DANS LES DÉTAILS,
VOUS...

C'ÉTAIT
MON
BAIN...

PRÉFACE

de la première édition

Je dois expliquer au lecteur pour quelles raisons j'écris la préface de ce livre.

J'ai rencontré Jacques Padet il y a deux ans à peine lorsque, pour la première fois, il m'a parlé de son projet de mettre au point une rédaction de ses cours pour la publier. Ce qui m'a le plus frappé, chez ce jeune collègue, c'est la vision personnelle de sa discipline dont il parlait avec une grande chaleur. Or je suis de plus en plus convaincu qu'il serait désastreux que tous les professeurs de mécanique présentent un enseignement développant avec quelques changements mineurs une même architecture conceptuelle, proposant une progression semblable dans l'organisation des différents chapitres, exposant les mêmes méthodes et des justifications ou des démonstrations mettant en œuvre essentiellement les mêmes idées. Je crois que, quelques années après avoir suivi un cours, un étudiant n'en garde un certain souvenir que s'il a senti que l'enseignement reçu traduisait chez son professeur une vision cohérente, fruit d'une connaissance approfondie et d'une longue réflexion ainsi que le souci de transmettre avec toute la limpidité possible à ceux qui l'écoutent ou qui le lisent quelque chose de tout ce qui l'enchant et l'émerveille dans la contemplation de la science à laquelle il se consacre. Il importe donc qu'une discipline comme la mécanique des fluides puisse être présentée selon des angles de prises de vues différents, chaque auteur axant l'exposé sur les perspectives vers lesquelles il veut engager le lecteur et dans un style exprimant la sensibilité.

Ce n'est donc pas parce que Jacques Padet jetait sur la mécanique des fluides un regard semblable au mien que je l'ai encouragé à réaliser son projet, mais si j'ose dire au contraire, parce que son regard était fort différent et que je sentais mon collègue capable de décrire le paysage qu'il découvrait avec un enthousiasme communicatif propre à séduire des étudiants insensibles à des exposés plus classiques, peut être plus logiques, mieux ordonnés mais qui n'auraient pas ces accents d'humour, ce ton engageant créant une certaine proximité entre des interlocuteurs, entre professeur et étudiant.

L'auteur avec raison ne cache pas l'horizon qu'il vise : ce sont tous les phénomènes de thermoconvection. Les sujets abordés, les concepts mis en évidence, les méthodes, les nombreuses remarques les illustrant sont choisis pour atteindre cet objectif. Il faut, certes, en être averti, mais le domaine des applications visé reste suffisamment vaste pour attirer un grand nombre de lecteurs. On trouve donc en premier lieu dans ce livre une formulation des équations de la mécanique des fluides à partir des équations de bilan et une longue étude sur la similitude reposant, non sur la considération d'un problème et de ses équations, mais sur l'examen de chaque équation prise indépendamment — ce qui entraîne certes des redites mais a l'avantage de faire revenir le lecteur plusieurs fois sur les concepts essentiels. Ensuite tous les autres chapitres traitent des écoulements turbulents et des couches limites laminares et turbulentes. Un dernier chapitre est consacré aux écoulements dans les canalisations.

Voici donc un ouvrage original qui soulèvera peut-être certaines objections mais qui, à mes yeux, a le grand intérêt, je le répète, de donner une vision personnelle et très vivante des bases de la mécanique des fluides en vue des phénomènes de thermoconvection. Je pense que beaucoup y trouveront un regard neuf et des voies d'approche fructueuses pour aborder l'étude des phénomènes difficiles, si importants pour comprendre notre environnement ou maîtriser nombre de nos activités techniques. Et par surcroît, ils découvriront peut-être ce que l'étude d'une discipline scientifique peut apporter à celui qui s'y consacre : une contemplation et un émerveillement, c'est-à-dire, le fruit d'une activité culturelle, au même titre que toute autre activité culturelle. C'est ce que je leur souhaite.

Paul GERMAIN
*Secrétaire perpétuel
de l'Académie des sciences
Octobre 1990*

PROLOGUE de la première édition

Dans une hiérarchie, tout employé a tendance à s'élever à son niveau d'incompétence.

L'incompétence créatrice consiste à créer l'impression que l'on a déjà atteint son niveau d'incompétence.

Principe de PETER

La décision de rédiger un ouvrage est toujours difficile à prendre, même si l'on ne mesure véritablement l'ampleur de la tâche que lorsqu'il est trop tard pour s'arrêter. Au départ, il faut donc des objectifs mobilisateurs. L'architecture générale, le plan de l'ouvrage et la forme de l'exposé en découlent naturellement.

Il est bon que le lecteur soit averti dès l'abord des choix de l'auteur, afin d'utiliser dans les meilleures conditions le matériel qu'on lui propose. Voici donc les principaux objectifs de ce livre, et leurs conséquences pratiques.

OBJECTIF DOCUMENTAIRE

La première chose est de préciser ce que l'on veut dire, et à qui on souhaite le dire.

En ce qui concerne la mécanique des fluides, et la thermoconvection qui la prolonge, beaucoup d'étudiants et d'ingénieurs croient discerner un désagréable hiatus entre la présentation des bases physiques et théoriques, très structurée, et l'aspect « recette de cuisine » qui préside souvent à leur usage pratique.

Par un exposé aussi cohérent que possible, nous avons voulu montrer que cette prévention est en grande partie injustifiée, et inciter les praticiens à sortir de leurs formulaires pour regarder d'un peu plus près les mécanismes physiques qu'ils ont à mettre en œuvre. Si l'on songe que les processus liés aux écoulements de fluides affectent non seulement la quasi totalité de nos activités industrielles et domestiques mais aussi nombre de phénomènes naturels (de l'agriculture à la météorologie) et qu'ils peuvent être encore beaucoup mieux maîtrisés, le jeu en vaut probablement la chandelle.

A qui adresser un tel discours? Pas aux étudiants débutants qui souhaitent une simple initiation, ni aux chercheurs spécialistes de la discipline. A tous les autres donc, c'est-à-dire selon la terminologie usuelle aux « étudiants de 2^e et 3^e cycle, élèves-ingénieur, ingénieurs, chercheurs débutants ».

Il en résulte un ouvrage de synthèse, ni formulaire ni encyclopédie, dans lequel l'accent est mis de préférence sur les fondements physiques et théoriques. Certaines méthodes ont fait l'objet d'une systématisation, d'un approfondissement, ou d'une présentation renouvelée. On insiste particulièrement sur la cohérence des raisonnements, et sur leur articulation avec l'expérience. Les hypothèses de calcul et leurs implications sont détaillées et rappelées d'une manière parfois surabondante, mais il n'est pire danger que d'utiliser une démarche, une équation ou une formule en dehors des conditions dans lesquelles elle est valide. Le problème n'est pas ici de couper les cheveux en quatre, mais la nécessité des approximations (légitime pour le physicien et indispensable pour l'ingénieur) ne doit être en aucun cas équivalente à un manque de rigueur. La qualité du raisonnement est la garantie d'une approximation fiable.

Les applications traitées ne recouvrent pas de façon exhaustive toutes les préoccupations qui peuvent se manifester, mais chacune d'elles illustre avant tout une méthode (de raisonnement ou de calcul) que l'on adaptera plus facilement à des cas complexes si l'on en a bien assimilé les mécanismes.

OBJECTIF PÉDAGOGIQUE

La préoccupation pédagogique est déjà perceptible dans les considérations qui précèdent, mais nous avons cherché à la renforcer le plus possible, tant dans la présentation que dans le contenu.

C'est ainsi que pour bien montrer l'unité de l'ensemble, nous nous sommes conformés à une démarche stricte : mettre en place les structures de la théorie, c'est-à-dire ses invariants méthodologiques (bilans, similitude...), puis les utiliser de façon systématique pour élaborer des modèles, en ayant recours à un nombre minimal d'hypothèses phénoménologiques. Ce mode de présentation parfois qualifié d'axiomatique, permet d'assurer la logique interne d'une théorie, et il en ressort presque toujours une meilleure compréhension des rapports entre les différentes grandeurs physiques.

En outre, chaque chapitre est abordé par une introduction où sont précisées et justifiées les lignes directrices de l'exposé, et se conclut par un résumé qui est une sorte d'aide-mémoire.

Quant aux calculs, ils ne constituent pas une fin en eux-mêmes, mais l'expérience de l'enseignement montre que s'ils ne sont pas suivis avec aisance par le lecteur, ils font facilement écran à la compréhension physique des choses. Ainsi avons-nous banni des phrases rituelles comme : « on montre facilement que... », « un calcul élémentaire donne... », etc.

Aucun calcul n'a donc été tronqué; les plus fastidieux sont parfois rejetés en annexe. Dans les autres, nous nous sommes efforcés de laisser transparaître à tout moment le fil du raisonnement.

D'autre part, il faut avouer que ce texte a été conçu avec une arrière pensée : celle de le prolonger plus tard par un complément sur la thermoconvection. Les deux matières sont intimement imbriquées, et à cet égard, nous avons fait un choix peut-être critiquable en les dissociant. Ce choix a toutefois deux avantages : aborder les difficultés de façon progressive, et permettre une présentation en deux parties, la première à dominante mécanique, la seconde

à dominante thermique. Il explique en tout cas les références aux transferts convectifs qui s'égrènent au fil des chapitres.

C'est aussi dans un but éminemment pédagogique que nous avons glissé ici et là un peu d'humour. Une pointe de fantaisie est un moyen de rendre l'exposé plus digeste, et parfois de retenir l'attention du lecteur sur certains points.

Le dernier aspect de notre objectif pédagogique concerne la langue.

Pour des raisons variées, les ouvrages techniques écrits en français restent peu nombreux, alors même que les pouvoirs publics souhaitent réhabiliter le français comme langue scientifique. Cette prise de conscience nous semble devoir être encouragée et suivie d'effets concrets; mais elle impose également un renouveau d'exigence dans la qualité de l'expression.

Une telle attitude ne doit pas être le reflet d'un conservatisme inavoué, mais elle doit être animée par une évidence, à savoir qu'une langue est le support de la pensée, de la connaissance et de la communication.

Malheureusement, cette évidence n'en est pas une pour tout le monde. Aussi un certain mépris — souvent diffus, parfois clairement exprimé — pour la maîtrise de la langue, perceptible depuis longtemps dans l'opinion publique et dans l'enseignement, commence à faire sentir sa perversité dans les disciplines scientifiques. Comment faire un exposé intelligible (et comprendre soi-même de quoi l'on parle) si l'on n'est attentif ni à l'articulation d'un raisonnement, ni à la logique d'une phrase, ni au sens des mots?⁽¹⁾ Le franglais n'est qu'une des conséquences de cet état d'esprit, et peut-être pas la pire, même si elle doit être épilogée comme les autres.

*
* *

En fin de compte, l'entreprise est ambitieuse, et le texte proposé ne la concrétise que de manière bien imparfaite. S'il est toutefois besoin d'une caution, empruntons-la à Georges Dumézil : « L'interrogation n'est sans doute qu'une tentation, prévisible, du langage. L'homo sapiens, ou son prédécesseur, a dit "pour" parce qu'il avait des intentions, et "quoi" parce qu'il avait des ignorances. Puis, dans la plupart des langues, il a soudé les deux mots, et il ne cesse d'éprouver ce couple sur n'importe quelle matière. Ce serait trop beau s'il obtenait un sens à tous les coups! ».

*
* *

Il n'est pas certain que j'aurais mené la tâche jusqu'à son terme sans les encouragements et les conseils de mes collègues J. Martinet, J.-F. Sacadura, J.-P. Maye, et tout particulièrement de G. Charnay et J. Coirier. Je leur dois plus que de simples remerciements de circonstance.

(1) Un exemple entre cent, trouvé dans une copie d'étudiant : « La loi de l'hydrostatique est la somme des forces agissant sur le point *M*. Pour la démontrer, on prend une partie du fluide soumise aux forces auxquelles elle est soumise ».

La sympathie et l'appui dont j'ai bénéficié de la part du Professeur Paul Germain ne m'ont pas été moins précieux, et je les mesure à leur juste valeur.

Alain Gausset a redessiné une bonne partie de mes figures; elles y ont beaucoup gagné en qualité.

Enfin, je ne saurais passer sous silence le fait que cet ouvrage doit beaucoup à l'indulgence et à la compréhension de mon épouse Colette, car sa rédaction m'a servi bien des fois de prétexte pour ne pas essuyer la vaisselle.

Reims, décembre 1990

PROLOGUE de la deuxième édition

La nouvelle édition de *Fluides en écoulement, méthodes et modèles* (en abrégé : FEMM) est d'abord une réponse à l'appel lancé par Alain Degiovanni lorsqu'il était président de la Société Française de Thermique, pour mettre sur le site web de la Société des cours et recueils d'exercices. Elle sera livrée chapitre par chapitre, au rythme de la rédaction.

Par rapport à la première édition, elle comporte d'indispensables mises à jour et de nombreux compléments. L'enseignement dispensé année après année a permis aussi d'améliorer le contenu pédagogique de l'ouvrage : beaucoup de raisonnements ont ainsi été rendus plus logiques ou plus physiques. De plus, les erreurs ont été corrigées (il n'y en avait pas beaucoup, mais c'est toujours trop).

Enfin, si l'avenir le permet, cette édition rénovée servira de support (avec l'autre volet publié sous le titre *Principes des transferts convectifs*) à un recueil d'exercices avec solutions rédigées.

Reims, septembre 2008

NOMENCLATURE

*Je suis exténué. Ce matin j'ai retiré
une virgule à l'un de mes poèmes,
et ce soir je l'ai remise.*

OSCAR WILDE

a	: diffusivité thermique ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	$\overline{\overline{D}}$: tenseur des taux de déformation, de composantes ε_{ij} (s^{-1})
b	: demi - hauteur d'une canalisation rectangulaire	D_h	: diamètre hydraulique (m)
c	: fluctuation d'une grandeur C	D_A	: diffusivité du constituant A dans un mélange ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
ex	: exergie massique ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)	D_C	: diffusivité de la grandeur C ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
g	: accélération de la pesanteur ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	Ec	: nombre d'Eckert
h	: coefficient de convection thermique ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)	Eu	: nombre d'Euler
	: enthalpie massique ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Fr	: nombre de Froude
k	: coefficient de convection massique ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Gr	: nombre de Grashof
	: énergie cinétique de turbulence ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)	J_0	: poussée d'un jet (N)
k_j	: facteur de perte de charge singulière sur une branche j	K_i	: facteur de perte de charge en ligne sur une branche i
l	: longueur de mélange (m)	L	: longueur d'une canalisation, d'une plaque plane (m)
	: épaisseur d'un canal rectangulaire (m)	Le	: nombre de Lewis
p	: pression statique (Pa)	L_0	: largeur d'une buse de soufflage (m)
p^*	: pression motrice (Pa)	Nu	: nombre de Nusselt
q_v, q	: débit - volume ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Pe	: nombre de Péclet
q_m	: débit - masse ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	Pr	: nombre de Prandtl
q_l	: source volumique	P_μ	: puissance dissipée par viscosité (W)
\vec{q}_s	: source surfacique	P_u	: puissance utile d'une pompe (W)
r	: distance à un axe (m)	R	: rayon d'un cylindre (m)
s	: entropie massique ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	Re	: nombre de Reynolds
t	: temps (s)	Re_c, Re_{xc}	: nombre de Reynolds critique
u, v, w	: composantes du vecteur fluctuation de vitesse \vec{v}	Ri	: nombre de Richardson
x_c	: abscisse de transition laminaire - turbulent	S	: surface d'un domaine \mathcal{D} , section d'une canalisation (m^2)
y^+	: ordonnée adimensionnée = y/δ		: nombre de Strouhal
		Sc	: nombre de Schmidt
Bo	: nombre de Boussinesq	St	: nombre de Stanton
C	: densité volumique d'une grandeur extensive	T	: température (K)
C_f	: coefficient de frottement	ΔT	: écart de température (K ou °C)
C_p	: chaleur massique à pression constante ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	U, V, W	: composantes du vecteur vitesse \vec{V} ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
C_{xf}	: coefficient de traînée (de frottement)	U_m	: vitesse maximale dans un écoulement
D	: diamètre d'un tube (m)	U_∞	: vitesse d'un écoulement extérieur
		U_τ	: vitesse de frottement ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
		$V_{d, V}$: vitesse de mélange (débitante)
		X	: charge d'un écoulement (Pa ou $\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$)
		ΔX	: perte de charge (Id.)
		X_m	: charge motrice d'une pompe (Id.)

Symboles divers

\mathcal{D}	: domaine d'étude
\mathcal{L}	: longueur caractéristique d'une canalisation
\overline{P}	: tenseur des quantités de mouvement
\mathcal{V}	: volume
β	: dilatabilité du fluide (K^{-1})
$\beta(x)$: longueur caractéristique dans un jet ou une couche limite
Γ	: critère de similitude
δ	: épaisseur de couche limite dynamique (m)
δ_l	: épaisseur de déplacement (m)
δ_2	: épaisseur de quantité de mouvement
ε	: dissipation turbulente ($\text{J.kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$) : rugosité d'une paroi (m)
ζ	: coefficient de perte de charge singulière
η	: ordonnée adimensionnée = $y/\beta(x)$ ou $r/\beta(x)$
θ	: fluctuation de température
λ	: conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
Λ	: coefficient de perte de charge en ligne = $4 C_f$
μ	: viscosité dynamique ($\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ou Pa.s)
μ_A	: potentiel chimique du constituant A dans un mélange réactif (J.kg^{-1})
ν	: viscosité cinématique ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)
ξ	: ordonnée adimensionnée = yU_τ/ν
ρ	: masse volumique (kg.m^{-3})
ρ_A	: masse volumique d'un constituant A dans un mélange
Σ	: surface latérale d'une canalisation
$\overline{\tau}$: tenseur des contraintes de viscosité
$\vec{\tau}$: vecteur contrainte visqueuse
τ_p	: contrainte pariétale (N.m^{-2})
τ'_{jk} (ou τ')	: contrainte turbulente (tension de Reynolds) (Id.)
$d\tau$: élément de volume (dans une intégrale)
Φ	: fonction de dissipation (W.m^{-3})
Ω	: vorticité (s^{-1})
ω	: fluctuation de vorticité turbulente
\circ	: grandeur de référence
$+$: grandeur adimensionnée

ET : *Echangeurs thermiques (cf. Bibliographie.)*

FEMM : *Fluides en écoulement, méthodes et modèles (id)*

PTC : *Principes des transferts convectifs (id)*

♣, ♦, ♥, ♠ : désignent des sous-paragraphe.
La paternité de ce symbolisme revient à J.-M. SOURIAU

⊗ *Une remarque* en passant : l'éditeur d'équations de WORD est une vraie catastrophe en mécanique des fluides : ses concepteurs n'ont pas été capables de faire une différence nette entre la lettre grecque *nu* (ν) et le *v* minuscule (ν), ce qui embrouille beaucoup la lecture de nombreuses formules.