

# **FLUIDES EN ÉCOULEMENT**

## **Méthodes et modèles**

**Jacques PADET**

*Professeur Émérite à l'Université de Reims*

Seconde édition revue et augmentée

# 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 thermo-convection. 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*

# TABLE DES MATIÈRES

## PRÉSENTATION

**Préface de la 1<sup>ère</sup> édition**

**Prologue de la 1<sup>ère</sup> édition**

**Prologue de la 2<sup>ème</sup> 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. – Eléments 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. – Equations 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. – *Ecoulement plan*

1.4.2. – *Fonction de courant*

1.4.3. – *Ecoulement 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 particulière*

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*

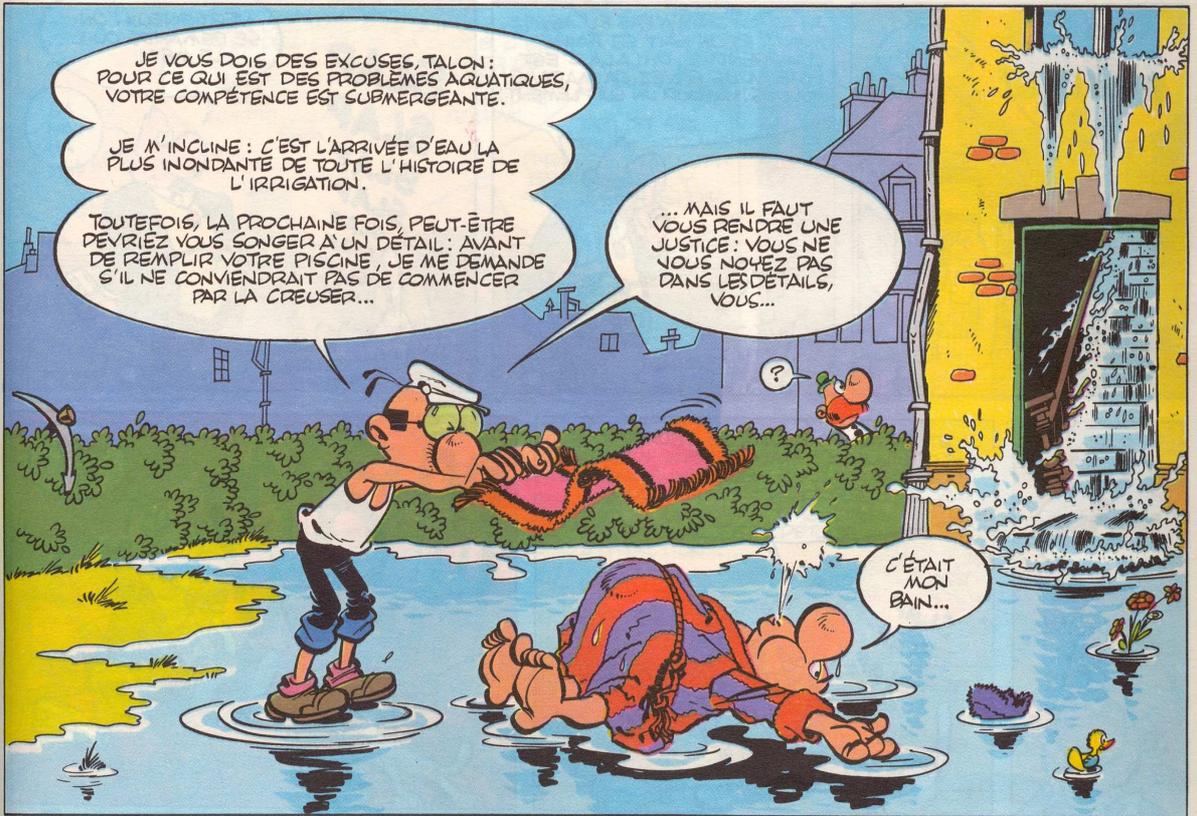
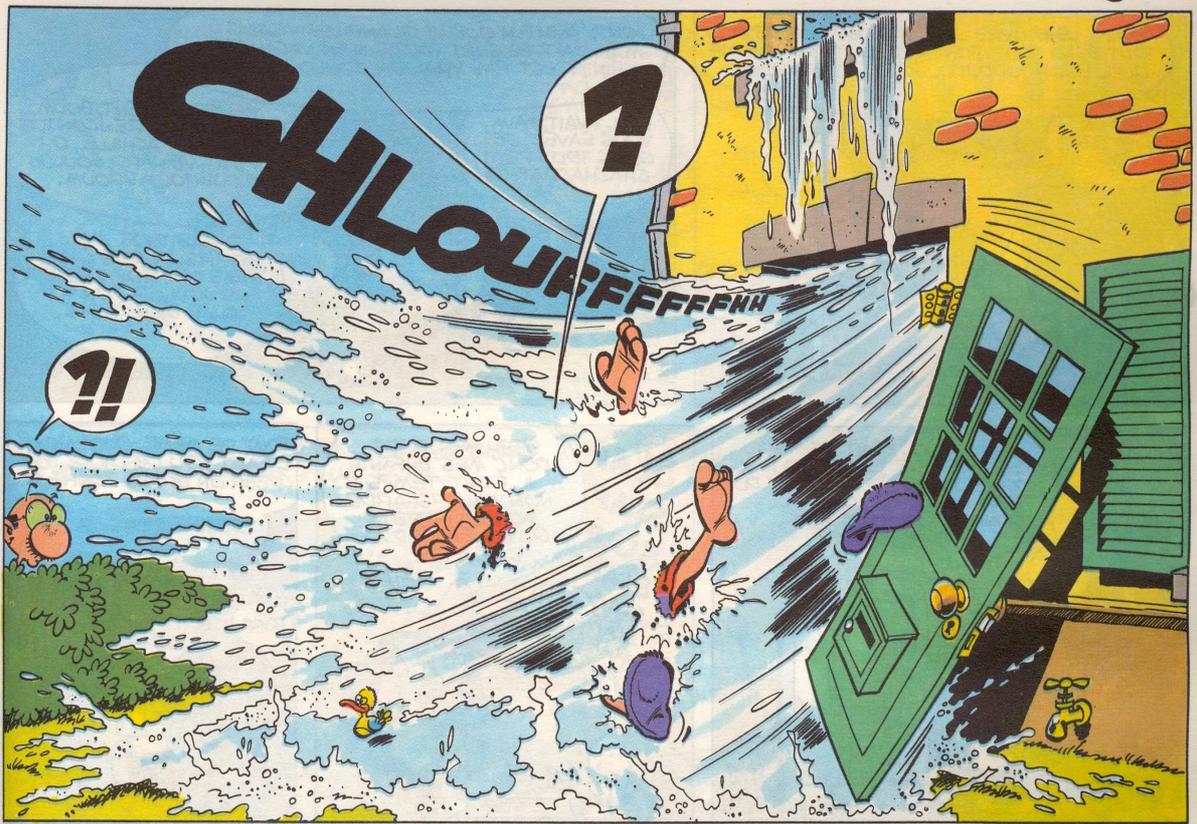
### CHAPITRE 3. – **Que faire de la turbulence ?**

- 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. – *Variante 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  $\varepsilon$*

## **Éléments 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...

## 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<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> 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?<sup>(1)</sup> 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 ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ )	$D_h$	: diamètre hydraulique (m)
$b$	: demi - hauteur d'une canalisation rectangulaire	$D_A$	: diffusivité du constituant A dans un mélange ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ )
$c$	: fluctuation d'une grandeur $C$	$D_C$	: diffusivité de la grandeur $C$ ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ )
$ex$	: exergie massique ( $\text{J}.\text{kg}^{-1}$ )	$Ec$	: nombre d'Eckert
$g$	: accélération de la pesanteur ( $\text{m}.\text{s}^{-2}$ )	$Eu$	: nombre d'Euler
$h$	: coefficient de convection thermi - que ( $\text{W}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ )	$Fr$	: nombre de Froude
	: enthalpie massique ( $\text{J}.\text{kg}^{-1}$ )	$Gr$	: nombre de Grashof
$k$	: coefficient de convection massique ( $\text{m}.\text{s}^{-1}$ )	$J_0$	: poussée d'un jet (N)
	: énergie cinétique de turbulence ( $\text{m}^2.\text{s}^{-2}$ )	$K_i$	: facteur de perte de charge en ligne sur une branche $i$
$k_j$	: facteur de perte de charge singulière sur une branche $j$	$L$	: longueur d'une canalisation, d'une plaque plane (m)
$l$	: longueur de mélange (m)	$Le$	: nombre de Lewis
	: épaisseur d'un canal rectangulaire (m)	$L_0$	: largeur d'une buse de soufflage (m)
$p$	: pression statique (Pa)	$Nu$	: nombre de Nusselt
$p^*$	: pression motrice (Pa)	$Pe$	: nombre de Péclet
$q_v, q$	: débit - volume ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ )	$Pr$	: nombre de Prandtl
$q_m$	: débit - masse ( $\text{kg}.\text{s}^{-1}$ )	$P_\mu$	: puissance dissipée par viscosité (W)
$q_l$	: source volumique	$P_u$	: puissance utile d'une pompe (W)
$\vec{q}_s$	: source surfacique	$R$	: rayon d'un cylindre (m)
$r$	: distance à un axe (m)	$Re$	: nombre de Reynolds
$s$	: entropie massique ( $\text{J}.\text{kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )	$Re_c$	: nombre de Reynolds critique
$t$	: temps (s)	$Ri$	: nombre de Richardson
$u, v, w$	: composantes du vecteur fluctuation de vitesse $\vec{v}$	$S$	: surface d'un domaine $\mathcal{D}$ , section d'une canalisation ( $\text{m}^2$ )
$x_c$	: abscisse de transition laminaire - turbulent		: nombre de Strouhal
$y^+$	: ordonnée adimensionnée = $y/\delta$	$Sc$	: nombre de Schmidt
		$St$	: nombre de Stanton
$Bo$	: nombre de Boussinesq	$T$	: température (K)
$C$	: densité volumique d'une grandeur extensive	$\Delta T$	: écart de température (K ou °C)
$C_f$	: coefficient de frottement	$U, V, W$	: composantes du vecteur vitesse $\vec{V}$ ( $\text{m}.\text{s}^{-1}$ )
$C_p$	: chaleur massique à pression constante ( $\text{J}.\text{kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )	$U_m$	: vitesse maximale dans un écoulement
$C_x$	: coefficient de traînée	$U_\infty$	: vitesse d'un écoulement extérieur
$\overline{D}$	: diamètre d'un tube (m)	$U_\tau$	: vitesse de frottement ( $\text{m}.\text{s}^{-1}$ )
$\underline{\underline{D}}$	: tenseur des taux de déformation, de composantes $\varepsilon_{ij}$ ( $\text{s}^{-1}$ )	$V_{db}, V$	: vitesse de mélange (débitante)
		$X$	: charge d'un écoulement (Pa ou $\text{J}.\text{m}^{-3}$ )
		$\Delta X$	: 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
$\beta$	: dilatabilité du fluide ( $K^{-1}$ )
$\beta(x)$	: longueur caractéristique dans un jet ou une couche limite
$\Gamma$	: critère de similitude
$\delta$	: épaisseur de couche limite dynamique (m)
$\delta_l$	: épaisseur de déplacement (m)
$\delta_2$	: épaisseur de quantité de mouvement
$\varepsilon$	: dissipation turbulente ( $J.kg^{-1}.s^{-1}$ ) : rugosité d'une paroi (m)
$\zeta$	: coefficient de perte de charge singulière
$\eta$	: ordonnée adimensionnée = $y/\beta(x)$ ou $r/\beta(x)$
$\theta$	: fluctuation de température
$\lambda$	: conductivité thermique ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )
$\Lambda$	: coefficient de perte de charge en ligne = $4 C_f$
$\mu$	: viscosité dynamique ( $kg.m^{-1}.s^{-1}$ ou Pa.s)
$\mu_A$	: potentiel chimique du constituant A dans un mélange réactif ( $J.kg^{-1}$ )
$\nu$	: viscosité cinématique ( $m^2.s^{-1}$ )
$\xi$	: ordonnée adimensionnée = $yU_\tau/\nu$
$\rho$	: masse volumique ( $kg.m^{-3}$ )
$\rho_A$	: masse volumique d'un constituant A dans un mélange
$\Sigma$	: surface latérale d'une canalisation
$\overline{\tau}$	: tenseur des contraintes de viscosité
$\vec{\tau}$	: vecteur contrainte visqueuse
$\tau_p$	: contrainte pariétale ( $N.m^{-2}$ )
$\tau'_{jk}$ (ou $\tau_t$ )	: contrainte turbulente (tension de Reynolds) (Id.)
$d\tau$	: élément de volume (dans une intégrale)
$\Phi$	: fonction de dissipation ( $W.m^{-3}$ )
$\Omega$	: vorticité ( $s^{-1}$ )
$\omega$	: 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* ( $\nu$ ) et le *v* minuscule ( $\nu$ ), ce qui embrouille beaucoup la lecture de nombreuses formules.