

Book review

«Microfluidique», ouvrage coordonné par Stéphane Colin

Cet ouvrage collectif s'inscrit dans la série Microsystèmes du traité EGEM (Electronique–Génie Electrique–Microsystèmes) publié aux éditions Hermès Science. Il comporte neuf chapitres rédigés par 15 spécialistes d'un domaine qui connaît aujourd'hui un essor considérable dû à la miniaturisation de structures et de composants mécaniques ou électroniques. L'enjeu est de mieux comprendre la physique des écoulements dans des conduites dont le diamètre hydraulique est de l'ordre du micromètre. Si l'engouement actuel pour la microfluidique s'explique par ces développements technologiques, il ne faut cependant pas oublier que le médecin et physiologiste Jean-Marie Poiseuille a établi sa fameuse loi en 1844 en étudiant des réseaux microcirculatoires du poumon de la grenouille, que Maxwell a envisagé dès 1879 que des gaz puissent glisser sur des parois et que la relation qu'il obtint fut vérifiée expérimentalement par Knudsen en 1909 qui proposa des critères donnant les limites d'application des approches macroscopiques. Ces recherches sont à l'origine des modifications des conditions aux limites des équations de Navier–Stokes lorsque la longueur caractéristique est de l'ordre de quelques libres parcours moyens des molécules. Les travaux de ces pionniers de la microfluidique sont rappelés à plusieurs reprises dans cet ouvrage et l'on s'en félicite.

Dans le premier chapitre, S. Colin, coordinateur des différentes contributions, commence par retracer l'historique de la microfluidique et insiste avec justesse sur la distinction qu'il importe de faire entre effets d'échelles et micro-effets. Une intéressante discussion portant sur la dépendance de nombres adimensionnels classiques avec la longueur caractéristique et sur les nombres adimensionnels liés directement aux micro-effets est ainsi présentée. Cette partie donne un aperçu des particularités des micro-écoulements et introduit les problèmes posés par leur modélisation. Des exemples de techniques de pompage originales sont ensuite succinctement décrits et ce chapitre introductif se termine par un aperçu des techniques de micro-usinage et des applications de la microfluidique en insistant sur les difficultés rencontrées dans la métrologie des écoulements très confinés.

Le chapitre suivant est concentré sur les écoulements gazeux dans les microsystèmes alors que le chapitre 3 porte sur les micro-écoulements de liquides. Cette distinction est nécessaire car les effets de surfaces sont radicalement différents pour les gaz et pour les liquides à cause des différences considérables entre les libres parcours moyens. Dans le cas des gaz (chapitre 2) les auteurs montrent que, sous certaines conditions, l'approche macroscopique de la mécanique des fluides classique reste applicable moyennant l'introduction de conditions aux limites de glissement de vitesse et de saut de température dont l'expression peut être simple (de type Fourier) ou faisant intervenir des dérivées normales à la paroi d'ordre supérieur. Cette description dépend de la valeur du paramètre de raréfaction local et les auteurs présentent une classification très intéressante des régimes d'écoulement pouvant être décrits par l'approche macroscopique ou nécessitant le recours à l'approche moléculaire, présentée dans ce chapitre en partant de l'équation de Boltzmann. Cet exercice est particulièrement difficile lorsque le nombre de page alloué aux auteurs est limité mais la rédaction, certes difficile à suivre, a le mérite de fournir une synthèse qui apporte au lecteur une bonne appréhension de la démarche scientifique à laquelle il faut alors recourir. Le traitement des micro-écoulements liquides est discuté dans le chapitre 4. L'auteur montre que les équations de la mécanique des milieux continus restent applicables à l'échelle micrométrique mais qu'il faut tenir compte des forces moléculaires aux interfaces liquide/solide, d'origine électromagnétique. Ce problème est abordé en considérant plus spécifiquement les écoulements électro-osmotiques qui nécessitent d'introduire le concept de double couche électrique créée par l'apparition d'une couche pariétale chargée électriquement. Lorsque la dimension caractéristique d'une conduite devient inférieure au micron, on entre alors dans le domaine de la nanofluidique, le recours aux techniques de la dynamique moléculaire est aussi nécessaire mais la question du choix d'un potentiel adéquat devient critique, notamment pour des fluides complexes. Ce chapitre se termine par une courte revue de travaux récents portant sur les méthodes électrocinétiques de contrôle actif des microécoulements.

Le chapitre 4 présente les écoulements physiologiques. Le lecteur aborde ici une thématique nouvelle dont les applications ne peuvent que le sensibiliser au plus profond de lui-même. Je trouve ce chapitre particulièrement intéressant bien qu'il soit en rupture par rapport aux trois précédents. Il est clair que ses auteurs n'appartiennent pas, au sens strict, à la même communauté scientifique et que l'approche descriptive et expérimentale est privilégiée. L'origine de la micro-fluidique est ici beaucoup mieux justifiée que par des applications technologiques récentes et la rédaction de ce chapitre passionnant a le mérite de donner une dimension humaine et historique à cette aspect de la mécanique des fluides et de la thermique. A mon avis, ce chapitre aurait été dû le second de cet ouvrage.

L'aspect thermique est abordé dans le chapitre 5 en centrant le propos sur la microélectronique. Ce choix ne me paraît pas être le plus judicieux, même si les transferts thermiques sont l'un des facteurs limitant de l'augmentation de la rapidité de calcul des micro-processeurs. Renommer l'équation de l'énergie «Equation de transfert» est certes innovant mais prête à confusion avec l'équation de transfert radiatif (ETR). Ce chapitre montre néanmoins que l'aspect thermique (on pourrait ajouter «massique») de la microfluidique ne doit pas être ignoré et que la dynamique des effets pariétaux influe fortement sur les échanges de chaleur. Le chapitre 6 porte sur les écoulements diphasiques. Connaissant la difficulté des expérimentateurs et des théoriciens à mesurer et à établir des théories relativement unifiées pour caractériser les écoulements avec changement de phase dans les configurations macroscopiques, le lecteur ne s'étonnera pas de la modestie des rédacteurs de ce chapitre qui avouent, à juste titre, que l'état des connaissances dans le domaine des écoulements diphasiques très confinés reste très partiel, voir confidentiel. Le mérite de cette contribution est d'établir un bilan de l'état des connaissances récentes sur cette question, de fournir une bibliographie étoffée et récente et de donner un aperçu des propriétés spécifiques des écoulements dans les microcanaux et des applications actuelles ou projetées.

Le chapitre 7 présente différentes méthodes de mesures des grandeurs caractérisant localement ou globalement un écoulement monophasique en régime permanent ou en régime transitoire. Les auteurs présentent essentiellement les adaptations qu'il est nécessaire d'apporter à des techniques usuelles en mécanique des fluides afin d'appréhender les microécoulements. Ce chapitre, bien documenté, montre avec concision que les mesures locales (champs de vitesse en particulier) et en régime transitoire restent encore difficiles à réaliser alors que les mesures globales en régime permanent sont relativement bien maîtrisées.

Les deux derniers chapitres de l'ouvrage sont centrés sur les applications des microsystèmes en distinguant les systèmes utilisant des fluides (chapitre 8) et ceux basés sur la technologie MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems). Le chapitre consacré aux microsystèmes utilisant des fluides est riche de nombreux exemples, notamment dans le domaine biomédical. Le lecteur y découvre une grande variété de systèmes déjà opérationnels et les auteurs, grâce à une présentation très dynamique, ont le mérite de captiver le lecteur au travers d'exemples bien choisis et faisant foisonner son imagination sur les développements futurs de la microfluidique. Le dernier chapitre semble un peu déconnecté du reste de l'ouvrage puisqu'il s'agit essentiellement de décrire les potentialités des technologies MEMS afin de mettre en œuvre un contrôle actif de «grands écoulements» (sous entendu écoulements turbulents externes). Après avoir présenté des notions sur le contrôle de la traînée et montré que le réseau de capteurs et actionneurs doit être extrêmement serré afin que l'action sur les grandeurs pariétale puisse être efficace, les auteurs décrivent différents types de microcapteurs de pression et de sondes de frottement pariétal utilisant la technologie MEMS.

Cet ouvrage couvre donc un large panorama sur les développements théoriques et appliqués de la microfluidique. Il s'adresse aussi bien aux spécialistes du domaine qu'aux ingénieurs de R&D ou aux étudiants en master de mécanique ou de physique qui auront aussi accès à de très nombreuses références bibliographiques.

Guy Lauriat

Adresse e-mail : lauriat@univ-mlv.fr

Disponible sur Internet le 21 avril 2005