



Open Archive TOULOUSE Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in : <http://oatao.univ-toulouse.fr/>
Eprints ID : 15567

To cite this version : Thual, Olivier *Hydrodynamique et mécanique des fluides*. (2015) In: L'eau à découvert. CNRS Éditions, Paris, FR, pp. 30-31. ISBN 978-2-271-08829-1

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr

Hydrodynamique et mécanique des fluides

Olivier Thual

Qu'il s'agisse du milliard de km^3 de l'océan, du million de km^3 dans le sous-sol ou des milliers de km^3 dans les rivières, canaux ou canalisations, l'eau est en perpétuel mouvement. L'hydrodynamique* étudie ces mouvements des échelles les plus grandes jusqu'à celles permettant encore de décrire la matière de manière continue (c'est-à-dire pour des échelles encore très largement supérieures à la taille des molécules).

Si l'utilisation du mouvement de l'eau était déjà bien maîtrisée dans l'antiquité pour l'irrigation des cultures ou l'adduction d'eau potable, des progrès significatifs en hydrodynamique ont été réalisés grâce à des scientifiques comme Blaise Pascal, Isaac Newton, Daniel Bernoulli, Leonhard Euler, Jean le Rond d'Alembert, George Stokes, Claude-Louis Navier ou Osborne Reynolds. Ces développements scien-

tifiques ont accompagné l'utilisation de l'eau comme source d'énergie (des moulins du Moyen Âge, aux usines hydroélectriques du début de l'ère industrielle). Les modélisations utilisées pour étudier le mouvement de l'eau se sont ensuite généralisées à un très grand nombre d'écoulements de liquides et même de gaz, et une nouvelle discipline est apparue : la « mécanique des fluides »*.

La compressibilité* des fluides peut être négligée pour un grand nombre d'écoulements, qu'il s'agisse de liquides mais aussi, de manière non intuitive, de gaz. Il suffit pour cela que la vitesse du fluide soit négligeable par rapport à la vitesse du son qui est de l'ordre de 340 m/s dans l'air et de 1500 m/s dans l'eau. Dans ce qui suit, les écoulements sont donc considérés comme incompressibles.

Fluide parfait ou visqueux ?

L'énergie volumique d'une « particule fluide »* de masse volumique ρ , avec un mouvement de vitesse V , est la somme de sa pression* p , de son énergie potentielle volumique $\rho g z$ (g est la gravité et z l'altitude) et de son énergie cinétique volumique $\frac{1}{2}\rho V^2$. Lorsque cette énergie est conservée, le fluide est dit « parfait »*(Bernoulli 1738) ce qui est le cas lorsque les frottements visqueux sont négligeables. En aérodynamique, la conservation de l'énergie permet d'expliquer, par exemple, la portance d'une aile d'avion due au déficit de pression résultant d'une survitesse sur son extrados*. En hydrodynamique, cette énergie, souvent appelée

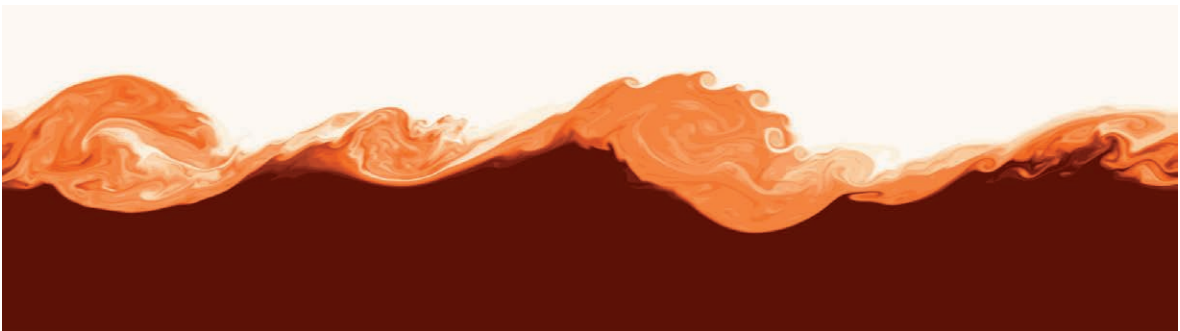


Fig. 1 – Simulation numérique du mélange de deux couches fluides de masse volumiques et de viscosités différentes. L'instabilité due au cisaillement de vitesse génère une hiérarchie de tourbillons. Le « nombre de Reynolds »* est l'ordre du millier

« charge hydraulique », est une grandeur essentielle pour décrire les grandes lignes d'un écoulement dans un réseau de conduites ou dans des canaux ouverts.

Le fluide est dit « visqueux » lorsque les pertes de charge dues aux forces de frottement des particules fluides les unes contre les autres ne peuvent plus être négligées. Le comportement rhéologique* d'un milieu continu décrit les relations entre les forces et les déformations qui s'y entremêlent. L'eau appartient à la classe des « fluides newtoniens »*, caractérisés par un comportement rhéologique isotrope*, pour lequel des forces de pression coexistent avec des forces visqueuses dépendant linéairement des vitesses de cisaillement* entre les particules de fluides. Les forces visqueuses dissipent l'énergie hydrodynamique du fluide pour la transformer en chaleur.

Fluide laminaire ou turbulent ?

La viscosité cinématique ν , qui caractérise l'importance de ces forces pour un fluide donné, est responsable de la régularité des écoulements lents. En effectuant des expériences dans des conduites de diamètre D variable pour des écoulements de vitesse V variable, Reynolds a montré que cette régularité, qualifiée de « laminaire* », était perturbée lorsque le nombre sans dimension VD/ν , qui porte désormais son nom, dépassait une valeur critique de l'ordre de quelques milliers. Lorsque le « nombre de Reynolds »* augmente au-delà de la valeur critique, l'écoulement devient turbulent*, ce qui se traduit par la coexistence de tourbillons de tailles

diverses allant des échelles auxquelles l'énergie est injectée jusqu'à celles où l'énergie est dissipée sous forme de chaleur par les frottements visqueux. Pour la plupart des écoulements naturels, le nombre de Reynolds est de l'ordre du million ou du milliard et la turbulence* y est pleinement développée.

Les équations de Navier-Stokes constituent le modèle mathématique le plus détaillé pour décrire la mécanique des « fluides newtoniens »*. En modélisant sous forme de champs continus la masse volumique, la vitesse ou la pression, ils traduisent, en se limitant au cas des écoulements incompressibles, la conservation de la masse et le principe fondamental de la dynamique*. Si ces équations reproduisent fidèlement les écoulements laminaires, à l'aide de solutions analytiques ou numériques, la coexistence de tourbillons sur des échelles couvrant plusieurs ordres de grandeurs empêche de les utiliser telles quelles pour décrire les écoulements turbulents. En effet, la puissance des ordinateurs ne permet la « simulation numérique directe »* de ces équations que pour des nombres de Reynolds ne dépassant pas quelques milliers (figure 1). Cette difficulté est contournée par le développement de « modèles de turbulence »*, qui s'efforcent de décrire le comportement collectif des tourbillons aux échelles plus petites que celles que l'ordinateur est capable d'appréhender. Il s'agit, par exemple, d'une résolution de l'ordre de quelques kilomètres dans un modèle de circulation atmosphérique pour la prévision du temps, du kilomètre dans un modèle de circulation océanique

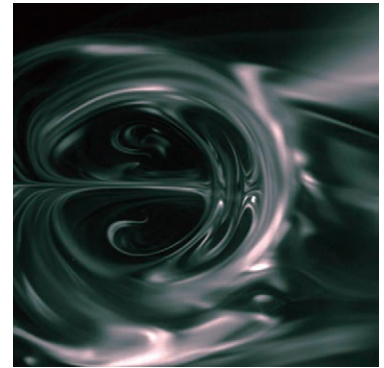


Fig. 2 – Visualisation expérimentale d'un dipôle tourbillonnaire dans une cuve peu profonde. Un éclairage laser et l'injection d'un colorant permettent de visualiser l'écoulement dans un plan horizontal.

et de quelques mètres pour l'écoulement d'une rivière.

Contrairement à la physique statistique, qui décrit de manière élégante le comportement macroscopique des phénomènes de petites échelles bien identifiées, le continuum d'énergie occupant toutes les échelles du spectre d'énergie des écoulements fluides n'a pas permis, jusqu'à maintenant, le développement d'une théorie aboutie de la turbulence. Il est donc nécessaire de recourir à des expériences en laboratoire ou sur le terrain (essais en soufflerie, campagnes en mer, données météorologiques, etc.) afin de documenter les comportements complexes et variés des écoulements fluides (figure 2). En dépit de son recours à des concepts mathématiques avancés, l'hydrodynamique est donc une science où l'expérience demeure indispensable pour de nombreuses applications pratiques (hydraulique, aéronautique, océanographie, etc.).

Référence bibliographique

- O. THUAL – *Hydrodynamique de l'environnement*, Éditions de l'École Polytechnique, 2010.