

Avant-propos

« Le secret du changement consiste
à concentrer son énergie pour créer du nouveau,
et non pas pour se battre contre l'ancien. »

Dan Millman, artiste, écrivain,
recordman, sportif (1946 -)

Après plusieurs années d'enseignement des techniques de l'ingénieur liées à l'énergie – d'abord en tant que *teaching assistant* à l'université de Californie (USA) et par la suite en tant que maître de conférences puis professeur à l'École des Mines de Rabat (Maroc) – j'ai pu, par la force de la providence, avoir assez de temps pour réaliser un objectif qui est resté pendant longtemps dans ma longue liste de priorités, sans pour autant avoir la possibilité de passer en tête de cette liste. Il s'agit de la préparation d'une *série d'ouvrages sur l'ingénierie de l'énergie*. Ces ouvrages me paraissaient nécessaires comme source de référence complète et cohérente, aussi bien en tant qu'outil d'enseignement et d'assimilation des techniques pour les élèves ingénieurs, qu'en tant que source de vérification de l'information et de récapitulation des méthodes de calcul pour les ingénieurs pratiquants. Cette série est constituée de neuf volumes :

- **volume 1** : *Transferts d'énergie et de matière : approche bilancielle et concepts de base* ;
- **volume 2** : *Transferts d'énergie par conduction* ;
- **volume 3** : *Transferts d'énergie par convection* ;
- **volume 4** : *Transferts d'énergie par rayonnement* ;
- **volume 5** : *Transferts de matière et estimation des données physiques* ;

- volume 6 : *Conception et calcul des échangeurs de chaleur* ;
- volume 7 : *Ingénierie de l'énergie solaire thermique* ;
- volume 8 : *Ingénierie de l'énergie solaire photovoltaïque* ;
- volume 9 : *Ingénierie de l'utilisation rationnelle de l'énergie*.

L'utilité d'une telle série est évidente étant donné que, dans la littérature scientifique francophone, il n'existe pas de documents destinés à l'enseignement de l'ingénierie de l'énergie qui soient à la fois ludiques et complets, partant de l'élémentaire pour aboutir aux principes et équations de conception et de dimensionnement des équipements industriels.

Le présent document constitue le troisième volume de cette série. Il concerne l'étude des transferts de chaleur par convection.

Comme nous allons le voir, les méthodes de calcul établies dans ce document sont d'applications multiples en ingénierie : calcul des échangeurs de chaleur, utilisation rationnelle de l'énergie, amélioration de la dissipation de chaleur dans les circuits électroniques, etc.

En vue de permettre à l'étudiant de mettre en œuvre le plus rapidement possible les concepts nouveaux, une série d'exercices est présentée, avec solutions, à la fin du document. Ces exercices ont été construits pour correspondre, le plus possible, à des situations réelles relevant de la pratique industrielle ou de la vie de tous les jours.

Introduction

Si la conduction revêt une grande importance dans la transmission de l'énergie thermique à travers les milieux continus, notamment solides, les transferts de la chaleur dans les appareillages industriels (échangeurs thermiques, évaporateurs, etc.) font intervenir, très souvent, des échanges entre des fluides (gaz ou liquides) et des parois solides (Leontiev, 1985). En effet, dans la plupart des situations, on doit chauffer un liquide ou un gaz en le mettant en contact avec une surface chaude, ou encore refroidir un fluide par le contact avec une surface froide. *Pour résoudre de tels problèmes, les développements relatifs à la conduction ne sont plus applicables, étant donné qu'il y a une différence de taille : en convection, le fluide concerné est en mouvement.*

Ainsi, on s'intéressera dans ce document aux échanges thermiques par convection entre des solides et des *fluides en mouvement*.

Généralement, le mouvement du fluide est de deux types :

– il est *induit* par les gradients de température qui existent dans le système, sans intervention d'aucun organe externe (pompe, compresseur ou autre). On parlera dans ce cas de *convection naturelle* ou *libre* ;

– il est *créé* par un organe externe de mise en mouvement du fluide (pompe, ventilateur, etc.). On parlera dans ce cas de *convection forcée*.

Mais, que le mouvement soit naturel ou forcé, on se trouve devant un problème où les équations qui décrivent la dynamique du fluide sont couplées à celles qui traduisent le bilan thermique. Il faudra donc résoudre, simultanément, les équations qui traduisent les bilans d'énergie et de quantité de mouvement (équations de Navier Stokes : voir Bird, Stewart et Lightfoot, 1975 ; Kays et Crawford, 1993 ; Giovannini et Bédard, 2012). Le problème est donc loin d'être simple et cette difficulté a poussé les

différents chercheurs à proposer des méthodes d'approximation qui permettent d'aboutir à des résultats pratiques.

Depuis l'approximation proposée par Boussinesq (1901) pour résoudre les équations de la convection naturelle, plusieurs analyses ont été développées pour apporter des réponses à des problèmes classiques d'ingénierie thermique, tels que le transfert de la chaleur à un fluide en circulation forcée dans un tube (problème de Graetz), l'échange thermique entre un fluide et une plaque plane (problème de Blasius), ou encore le transfert de chaleur engendré par les forces d'Archimède en convection naturelle (problème de Boussinesq).

Ces différentes analyses aboutissent à des solutions qui peuvent être mises en œuvre en utilisant les outils numériques (Landau et Lifshitz, 1989 ; Kays et Crawford, 1993 ; Giovannini et Bédard, 2012). Ceci est fait moyennant certaines approximations, notamment sur l'incompressibilité des fluides newtoniens en convection forcée. Mais la validité de ces approximations est parfois contestée (approximation de Boussinesq : voir Lagrée, 2015) et leur justification effective se trouve surtout liée aux simplifications nécessaires pour amadouer les équations « rebelles », telles que les qualifiaient Boussinesq lui-même :

« Grâce aux simplifications alors obtenues, la question, encore très difficile et presque toujours rebelle à l'intégration, n'est plus inabordable. » (Boussinesq, 1901)

Les résultats des développements analytiques sont disponibles dans différents ouvrages (Knudsen et Katz, 1958 ; Bird, Stewart et Lightfoot, 1975 ; Landau et Lifshitz, 1989 ; Kays et Crawford, 1993 ; Giovannini et Bédard, 2012). Mais la complexité des développements et des outils à mettre en œuvre pour leur application les rend inadaptés à notre perspective qui est de *fournir des ordres de grandeur rapides pour les calculs d'ingénierie*. Ainsi, lorsque la démonstration analytique le permet et surtout pour donner un exemple de la complexité qui pourrait être rencontrée, les équations qui permettent de déterminer le coefficient de transfert sont établies ; c'est le cas de la convection forcée à l'intérieur d'une canalisation en régime laminaire (voir [chapitre 2](#)).

Dans le cas contraire, ce qui représente la majorité des situations, l'analyse dimensionnelle est appliquée pour la détermination des expressions générales des coefficients de transfert en convections forcée et naturelle, puis les corrélations disponibles pour les calculs de ces coefficients sont présentées.

C'est pour cette raison que nous nous proposons, dans le [chapitre 1](#) de ce volume, de procéder à une analyse phénoménologique de la convection qui est basée

sur une représentation de l'ensemble des complexités par un coefficient d'échange thermique par convection h , de telle sorte que le flux transféré par convection soit donné par (voir volume 1, [chapitre 2](#)) :

$$\phi = h A \Delta\theta$$

avec :

A : la surface d'échange

h : le coefficient de transfert par convection, dit encore coefficient de transfert convectif

$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$: la différence de potentiel d'échange thermique. C'est le gradient de température entre le fluide et le solide considéré

De la sorte, toute la complexité analytique du problème est regroupée dans le coefficient h dont la structure de l'expression est dévoilée par analyse dimensionnelle.

Les [chapitres 2](#) et [3](#) présentent les corrélations qui permettent de calculer le coefficient h pour un fluide circulant en convection forcée à l'intérieur de *canalisations cylindriques ou de formes quelconques*. La *convection forcée à l'extérieur de canalisations* ou autour d'objets est traitée dans le [chapitre 4](#).

Mais, si la convection forcée constitue le cas le plus courant dans les installations industrielles où la mise en mouvement du fluide est réalisée à l'aide de pompes de ventilateurs ou de compresseurs, il n'en reste pas moins que plusieurs situations de *convection naturelle* sont également rencontrées : radiateurs de chauffage central, chambres froides, dissipateurs électroniques, etc. C'est la raison pour laquelle le [chapitre 5](#) est réservé à ce type de convection.

Par ailleurs, pour des circuits particuliers qui fonctionnent à de très hautes températures (autour de 700 °C), les fluides caloporteurs habituels ne sont plus adaptés. C'est le cas des *centrales solaires à concentration* ou des *réacteurs nucléaires à neutrons rapides* où les *métaux liquides*, des *nanofluides* et parfois des *sels fondus* sont utilisés pour assurer le transfert de l'énergie produite. Bien entendu, les corrélations établies pour les fluides « ordinaires » ne sont plus valables. Des corrélations spécifiques à ce type de situations sont développées dans le [chapitre 6](#), alors que les données physiques nécessaires aux calculs sont regroupées dans l'annexe 1 (base de données).