

Avant-propos

« Il ne faut jamais regretter le temps
qui a été nécessaire pour bien faire. »

Joseph Joubert,
« De la sagesse »,
Pensées, essais et maximes,
Titre IX, 1866

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 (États-Unis) 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 projet 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'outils 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 deuxième volume de cette série. Il concerne l'étude des transferts de chaleur par conduction.

Comme nous allons le voir, les méthodes de calcul établies dans cet ouvrage sont d'applications multiples en ingénierie : calcul des échangeurs de chaleur, utilisation rationnelle de l'énergie, isolation thermique, trempe des métaux, 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 en fin d'ouvrage. Ceux-ci 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

La conduction est l'un des mécanismes importants de transfert de chaleur. Elle s'effectue par contact-continuité entre systèmes. L'énergie est transférée, de proche en proche, par transmission des excitations d'un atome aux atomes avoisinants.

Le présent volume de la série sur l'ingénierie de l'énergie est consacré à l'étude détaillée de la conduction de la chaleur. Elle met en évidence les équations qui régissent le phénomène, puis les applique à une série de situations pratiques. Dans ce contexte, une attention particulière est accordée aux méthodes de calcul utilisées dans les analyses visant une *utilisation rationnelle de l'énergie*. C'est, par exemple, le calcul des flux énergétiques dissipés à travers les parois des installations industrielles, l'évaluation monétaire des pertes thermiques et le choix de l'épaisseur économique d'un calorifuge.

Dans le même cadre, une grande importance est accordée aux calculs qui permettent la mise en œuvre des *réglementations thermiques du bâtiment*. Cela implique la détermination des pertes thermiques qui traversent les murs des bâtiments chauffés ou climatisés.

De telles applications sont importantes non seulement pour le respect des lois et des règlements, mais se révèlent également d'une grande utilité dans les méthodes de recherche d'économies d'énergie dans les fours, dans les conduites de vapeur, dans les réacteurs, dans les circuits de congélation, etc.

Le **chapitre 1** de ce volume est consacré à l'établissement des équations générales traduisant, dans différents systèmes de coordonnées (planes, cylindriques et sphériques), les bilans énergétiques en conduction. En effet, en partant d'une approche bilancielle, les équations de la conduction sont mises en place pour les

situations les plus générales : systèmes en régime transitoire ou stationnaire, avec ou sans génération interne d'énergie.

Par la suite ([chapitre 2](#)), ces équations sont utilisées pour résoudre un certain nombre de problèmes physiques qui représentent un intérêt pour l'ingénieur : transfert de chaleur à travers une paroi plane simple, déperdition à travers un mur composé de plusieurs parois, transfert à travers des parois cylindriques (conduites de vapeur, par exemple) ou sphériques (réservoirs de stockage). Le choix des applications traitées a été fait en se fondant sur des problèmes qui se posent habituellement dans la pratique industrielle ou dans les approches de développement durable.

Le [chapitre 3](#) de ce volume est réservé au calorifugeage. Dans ce cadre, une attention particulière a été accordée aux isolants thermiques, étant donné leur importance dans les actions de réduction des pertes d'énergie. L'annexe proposée à la fin de ce document présente un ensemble de données qui permettent non seulement d'orienter le choix du calorifuge à utiliser, mais aussi de réaliser les calculs nécessaires à la validation d'un calorifuge pour un projet donné. En effet, dans ce chapitre, les problèmes de l'isolation thermique sont traités de manière concrète par l'intermédiaire d'analyses technico-économiques qui en démontrent l'intérêt en termes de réduction des coûts globaux de production des unités industrielles.

Le [chapitre 4](#) est réservé à l'étude des pertes thermiques à travers les parois (vitrées ou non) d'un bâtiment. Ensuite, le [chapitre 5](#) aborde l'analyse des problèmes de la conduction en présence de génération d'énergie. Ils correspondent à des situations pratiques qui sont rencontrées dans les réacteurs exothermiques ou dans les tubes de combustible des réacteurs nucléaires ou encore dans les radiateurs utilisés pour dissiper les excédents de chaleur issus du fonctionnement des circuits électroniques.

Le [chapitre 6](#) détaille les différentes méthodes de résolution des problèmes de conduction en régime transitoire. Elles permettent d'apporter des réponses à des problèmes courants d'ingénierie, notamment dans le domaine de la trempe des métaux (Engel, 1998).

Le [dernier chapitre](#) de ce volume est consacré à la présentation d'un certain nombre d'exercices et de leurs solutions. Précisons que, lors du choix de ces exercices, nous avons tenté de nous rapprocher le plus possible de la réalité du terrain.