

## Avant-propos

« La vraie force est celle qui rayonne par le savoir. »

Antonin Artaud  
*L'Ombilic des limbes* (1925)

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 ouvrage constitue le quatrième volume de cette série. Il concerne l'étude des transferts de chaleur par rayonnement.

Comme nous allons le voir, le rayonnement est l'un des modes les plus importants de transfert de l'énergie. Même dans l'espace intersidéral, ce mode permet de véhiculer le rayonnement solaire et donc d'apporter l'énergie nécessaire à la vie sur la Terre. Intimement lié au transfert des ondes électromagnétiques, le rayonnement obéit à des règles et des équations spécifiques dont les applications sont multiples en ingénierie.

En vue de permettre à l'étudiant de mettre en œuvre le plus rapidement possible les techniques de calcul spécifiques aux transferts par rayonnement, une série d'exercices est présentée, avec solutions, à la fin de ce 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 et la convection sont des modes importants de transfert de la chaleur dans les équipements industriels, le rayonnement peut, dans certaines conditions, représenter le mode prépondérant. C'est le cas par exemple des échanges qui s'effectuent dans les fours industriels et dans les foyers des chaudières.

C'est également grâce au rayonnement thermique que l'énergie émise par le Soleil se propage à travers différents milieux pour arriver jusqu'à la Terre ; traversant ainsi les espaces interstellaires comprenant les poussières et les gaz extrêmement diffus qui existent dans de la Voie lactée, ou encore les vides interaéraux, puis l'atmosphère terrestre.

Mais le transfert par rayonnement se caractérise par une spécificité essentielle qui le différencie par rapport à la conduction et à la convection. En effet, comme nous l'avons vu dans la première partie, le transfert de la chaleur par rayonnement peut s'effectuer entre corps, à distance, sans qu'il y ait besoin d'un « milieu-support » à travers lequel l'énergie doit être véhiculée. En réalité, dans ce mode de transfert, la chaleur peut être échangée même entre des surfaces séparées par du vide. Bien entendu, le rayonnement peut également avoir lieu entre surfaces séparées par de l'air ou par n'importe quel milieu homogène ou non.

Cette possibilité de transfert de l'énergie peut donc avoir lieu sans nécessiter ni contact-continuité (comme dans la conduction) ni fluide-support (comme dans la convection). Ceci est en réalité une caractéristique qui est intimement liée à la nature même des phénomènes qui engendrent les échanges par rayonnement et surtout, à l'essence même de l'énergie rayonnante. Comme nous nous le présenterons dans le [chapitre 1](#), l'énergie rayonnante est essentiellement de nature ondulatoire. Elle est générée par le transfert d'ondes électromagnétiques entre surfaces. Ces ondes

transportent des photons. L'énergie rayonnante est, par conséquent, également de nature corpusculaire.

L'analyse des échanges d'énergie par rayonnement utilise un ensemble de paramètres spécifiques qui sont présentés dans le [chapitre 2](#) de cet ouvrage. Comme nous allons le voir dans le [chapitre 3](#), l'étude du rayonnement de la matière est largement facilitée par l'introduction d'un composant dont le comportement radiatif est idéal. Il s'agit de ce que l'on appelle un *corps noir* dont le rayonnement est complètement régi par des lois telles que la loi de Planck, la loi de Stefan-Boltzmann ou encore les lois de Wien.

L'introduction du corps noir est en réalité un outil qui permet l'étude des corps réels dont la méthode d'analyse et les propriétés rayonnantes seront traitées dans le [chapitre 4](#). Le rayonnement de toute surface réelle est ainsi lié à celui du corps noir idéal à travers l'*émissivité* ; alors que la méthode d'analyse des échanges radiatifs entre surfaces séparées par un milieu transparent sera présentée dans le [chapitre 5](#).

Par ailleurs, les échanges radiatifs entre surfaces dépendent des positions géométriques qu'occupent ces dernières dans l'espace. Cette particularité est prise en compte dans les calculs en utilisant les *facteurs d'angle* dont les méthodes pratiques de calcul seront traitées dans le [chapitre 6](#).

Les bilans radiatifs entre surfaces noires et grises seront présentés dans les [chapitres 7](#) et [8](#) respectivement. L'établissement de ces bilans est souvent facilité par l'introduction d'analogues électriques (voir le [chapitre 9](#)).

Dans certaines situations, on désire réduire les échanges par rayonnement entre surfaces. Ceci est généralement accompli en introduisant des filtres entre ces dernières. Le [chapitre 10](#) montre que la mise en place de filtres peut conduire à des réductions importantes des puissances échangées.

Dans un autre registre, on rencontre souvent dans les fours et les chaudières des échanges par rayonnement entre des surfaces séparées par des milieux qui ne sont pas transparents. En effet, des derniers sont souvent chargés de molécules de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), de vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O) et de traces de SO<sub>2</sub>, de NO<sub>x</sub> et d'hydrocarbures imbrûlés. Dans ces conditions (voir le [chapitre 11](#)), le milieu participe à l'échange.

Enfin, pour aider à l'assimilation des méthodes de calcul présentées dans cet ouvrage, le [chapitre 12](#) sera réservé à une série d'exercices pratiques et à la présentation de leurs solutions ; alors que les données physiques nécessaires aux calculs sont regroupées en annexe (base de données).