

INTRODUCTION

Les procédés d'isolation, de chauffage et de ventilation des bâtiments sont en profonde mutation. Tout en assurant le confort des occupants, les technologies évoluent de façon à réaliser des économies d'énergie et à s'adapter à de nouvelles sources énergétiques. D'autre part la conception et la gestion des installations font de plus en plus appel à des moyens informatiques.

Dans ce contexte, on peut s'étonner que cet ouvrage insiste davantage sur les connaissances de base nécessaires au génie climatique plutôt que sur les techniques nouvellement apparues dans le domaine de la maîtrise de l'énergie. Pour pouvoir s'adapter facilement aux évolutions technologiques, il nous a semblé que les concepteurs et les installateurs devaient avant tout bien connaître les fondements de la thermique du bâtiment.

C'est pourquoi la première partie de cet ouvrage traite des lois fondamentales régissant les transferts de chaleur. Nous nous sommes volontairement limités à l'étude des régimes permanents qui sont utilisés dans la plupart des projets. Les régimes transitoires ne sont évoqués que par leurs conséquences. Ces lois sont immédiatement appliquées à des thèmes relatifs au génie climatique.

L'approche en seconde partie du bilan thermique des locaux conduit à la détermination des besoins en chaleur et aux techniques de l'isolation thermique.

L'émission calorifique ainsi que l'analyse technologique des corps de chauffe seront envisagées ultérieurement comme une application directe des notions de thermique. La même liaison entre les aspects théoriques et technologiques sera également développée dans l'étude de la production de chaleur.

Le contexte réglementaire particulièrement développé en génie climatique occupe une place réduite dans cet ouvrage. Plutôt que de paraphraser les textes réglementaires, nous avons préféré en justifier les principes physiques sous-jacents. Cependant, nous ne saurions trop encourager nos lecteurs à bien connaître les textes en vigueur et à en suivre l'actualisation. Le technicien trouvera dans les chapitres suivants un utile « retour aux sources » et l'étudiant un premier outil de travail. Nous souhaitons par cet ouvrage faciliter à chacun leur adaptation aux nouvelles techniques du génie climatique.

TABLE DES MATIÈRES

Première partie

NOTIONS SUR LES ÉCHANGES DE CHALEUR

CHAPITRE I : chaleur, énergie..... 7

1) Notion de chaleur

- 1.1) Aspect physiologique de la chaleur
- 1.2) Aspect physique de la chaleur

2) Rapport entre la thermique et la thermodynamique

3) Modes de transfert de la chaleur

- 3.1) Conduction
- 3.2) Rayonnement
- 3.3) Convection
- 3.4) Changement d'état

4) Notion de température

- 4.1) Échelles thermométriques
- 4.2) Température absolue

5) Enthalpie d'un système

- 5.1) État d'un système
- 5.2) Énergie interne
- 5.3) Enthalpie

CHAPITRE II : échanges de chaleur par rayonnement..... 13

1) Rayonnement calorifique

2) Émittance totale et monochromatique

3) Réception d'un rayonnement

- 3.1) Éclairement
- 3.2) Répartition de l'énergie
- 3.3) Différents facteurs à envisager

4) Aspect géométrique des échanges par rayonnement

- 4.1) Intensité énergétique
- 4.2) Luminance
- 4.3) Cas particulier du modèle de Lambert

5) Lois d'émission du corps noir

- 5.1) Corps noir
- 5.2) Loi de Planck
- 5.3) Loi de Wien
- 5.4) Courbes de Planck
- 5.5) Loi de Stéfan-Boltzmann

6) Lois d'émission des corps réels

- 6.1) Émissivité directionnelle monochromatique
- 6.2) Généralisation. Lois de Kirchhoff

7) Échanges d'énergie par rayonnement entre surfaces

- 7.1) Surfaces planes infinies se faisant face
- 7.2) surfaces enrobantes
- 7.3) Échange entre surfaces élémentaires noires
- 7.4) Échange entre surfaces finies noires
- 7.5) Échange entre surfaces non noires
- 7.6) Linéarisation

8) Milieux transparents

CHAPITRE III : conduction de la chaleur..... 35

1) Régime établi. Régime transitoire

2) Définition des grandeurs thermiques de conduction

- 2.1) Flux thermique
- 2.2) Tubes de flux
- 2.3) Isothermes

3) Loi de Fourier

- 3.1) Présentation élémentaire
- 3.2) Loi de Fourier généralisée

4) Équation de la conduction

- 4.1) Présentation élémentaire
- 4.2) Étude générale
- 4.3) Nature de l'équation de conduction

5) Conditions limites

6) Résistance de contact

7) Conductivité thermique

- 7.1) Influence de la température
- 7.2) Influence de l'humidité

8) Exemples de problèmes de conduction en régime permanent établi

- 8.1) Modèle du mur
- 8.2) Modèle du cylindre
- 8.3) Modèle de la sphère
- 8.4) Éléments multicouches
- 8.5) Montage « parallèle »

9) Méthodes générales de résolution des problèmes de conduction en régime établi permanent

- 9.1) Étude analytique du problème
- 9.2) Méthodes numériques
- 9.3) Méthodes analogiques

10) Les régimes transitoires

- 10.1) Méthodes analytiques
- 10.2) Méthodes numériques
- 10.3) Méthodes analogiques
- 10.4) Cas simplifié

CHAPITRE IV : échanges de chaleur par convection.... 59

- 1) Mise en équation de la convection
- 2) Loi expérimentale de Newton
- 3) Analyse dimensionnelle. Théorème de Buckingham
- 4) Étude de la convection forcée
 - 4.1) Grandeurs adimensionnelles
 - 4.2) Écoulement dans un tube
 - 4.3) Écoulement autour d'un tube
- 5) Étude de la convection naturelle
 - 5.1) Grandeurs adimensionnelles
 - 5.2) Étude expérimentale en espace libre
 - 5.3) Étude expérimentale en espace limité

CHAPITRE V : exemple d'échanges thermiques combinés 69

- 1) Étude des échanges de chaleur
 - 1.1) Convection eau-cuve
 - 1.2) Conduction
 - 1.3) Échanges extérieurs
- 2) Échange global eau-local
- 3) Évolution de la température de l'eau
- 4) Échauffement de l'eau
- 5) Application numérique
- 6) Conclusion

CHAPITRE VI : changements d'état..... 75

- 1) Différents états de la matière
- 2) Chaleur latente de changement d'état
- 3) Coexistence des divers états de la matière
 - 3.1) Règles des phases
 - 3.2) Diagramme d'équilibre pression - température
 - 3.3) Diagramme d'équilibre pression - volume massique
- 4) Enthalpie et diagramme enthalpique

5) Changement d'état et transfert de chaleur

- 5.1) Échange entre une surface et un fluide en ébullition
- 5.2) Échange entre une surface et un gaz en cours de liquéfaction
- 5.3) Évaporation à partir d'une surface libre

CHAPITRE VII : notion de confort thermique..... 85

- 1) Thermophysiologie humaine
 - 1.1) Métabolisme
 - 1.2) Échanges corps - ambiance
 - 1.3) Mécanismes thermorégulateurs
 - 1.4) Température résultante sèche
- 2) Maîtrise du confort thermique
 - 2.1) Vêtements
 - 2.2) Action sur l'environnement. Température résultante
 - 2.3) Conditions intérieures à réaliser
- 3) Mesure de la température résultante sèche
 - 3.1) Thermomètre classique
 - 3.2) Thermomètre résultant

Seconde partie BILAN THERMIQUE D'UN LOCAL

CHAPITRE VIII : éléments du bilan thermique..... 93

- 1) Introduction
- 2) Pertes de chaleur du local
- 3) Gains de chaleur du local
- 4) Équilibre thermique du local

CHAPITRE IX : pertes par transmission à travers les parois opaques 95

- 1) Coefficient de transmission thermique K
 - 1.1) Transfert par conduction
 - 1.2) Transferts en surface
 - 1.3) Coefficient K de transmission thermique
 - 1.4) Cas des déperditions de base
- 2) Réduction des pertes par transmission
 - 2.1) Surfaces des parois
 - 2.2) Température intérieure
 - 2.3) Température extérieure

- 2.4) Échanges superficiels
- 2.5) Épaisseur
- 2.6) Conductivité thermique. Choix des matériaux
- 2.7) Lamé d'air
- 2.8) Produits préfabriqués alvéolés
- 3) Répartition des températures**
 - 3.1) Températures de surfaces
 - 3.2) Conséquences sur le confort thermique
 - 3.3) Températures internes
 - 3.4) Influence de la disposition des couches
- 4) Points singuliers. Ponts thermiques**
 - 4.1) Coefficient linéique k
 - 4.2) Coefficient K_g
 - 4.3) Conséquences des ponts thermiques.
 - 4.4) Réduction des ponts thermiques
- 5) Influence de l'ensoleillement**

**CHAPITRE X :
éléments d'hygrothermie 117**

- 1) Diagramme de l'air humide**
- 2) Condensations superficielles**
- 3) Condensations internes**
 - 3.1) Migration de la vapeur
 - 3.2) Répartition des pressions
- 4) Protection contre la condensation interne**
 - 4.1) Technique du pare vapeur
 - 4.2) Choix des matériaux
 - 4.3) Technique de la lame d'air
 - 4.4) Isolation par l'extérieur
- 5) Cas particulier des toitures terrasses**
 - 5.1) Techniques actuelles
 - 5.2) Étude hygrothermique

**CHAPITRE XI :
transfert de chaleur à travers les
vitrages 127**

- 1) Coefficient K des vitrages**
- 2) Coefficient K des fenêtres**
- 3) Apports solaires**
 - 3.1) Ensoleillement
 - 3.2) Facteur solaire
- 4) Bilan énergétique saisonnier d'un vitrage**
- 5) Réalisation d'un double vitrage**

**CHAPITRE XII :
exemples de réalisations
technologiques 131**

- 1) Parois verticales**

2) Couvertures

3) Planchers

4) Fenêtres

5) Durabilité de l'isolation

- 5.1) Mise en contact direct avec l'eau pluviale
- 5.2) Mise en contact avec l'eau par capillarité
- 5.3) Dégradation de l'isolant

6) Caractéristiques des produits isolants

**CHAPITRE XIII :
pertes par renouvellement d'air 145**

1) Ventilation. Infiltrations

**2) Échanges thermiques par renouvellement
d'air**

- 2.1) Étude générale
- 2.2) Pertes calorifiques du local par renouvellement
d'air
- 2.3) Température de l'air

3) Valeur du débit de renouvellement d'air

- 3.1) Débit de ventilation
- 3.2) Débit d'infiltrations

**4) Réduction des pertes par renouvellement
d'air**

- 4.1) Diminution du débit
- 4.2) Diminution de la température d'air intérieur
- 4.3) Récupération d'énergie

**CHAPITRE XIV :
déperditions totales. coefficient G..... 153**

1) Déperdition totale en conditions de base

2) Coefficient G. Réglementation

CHAPITRE XV : besoins en énergie 155

1) Degrés-jours

2) Degrés-heures

3) Application au calcul des consommations

- 3.1) Apports internes
- 3.2) Facteur de couverture solaire
- 3.3) Besoins en chauffage

4) Réglementation. Coefficient B

5) Aspect économique. Optimisation

6) Opérations de rénovation

7) Méthodes de calcul et informatique

Bibliographie 167

Références 168