

**La  
Rpf**

SÉRIE | FROID ET GÉNIE CLIMATIQUE

Francis Meunier

Paul Rivet

Marie-France Terrier

# FROID INDUSTRIEL

**2<sup>e</sup> édition**

**DUNOD**

2-621-7-1

**2-621-7-1**

Francis Mesnier

Paul Rivet

Marie-France Terrier

# **FROID INDUSTRIEL**

2<sup>e</sup> édition

**La Rpf**

DUNOD

# TABLE DES MATIÈRES

---

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| Avant-propos              | XI  |
| Notations et abréviations | XII |

## A

---

### Production du froid

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 • Thermodynamique et transferts thermiques</b>                            | <b>3</b>  |
| 1.1 Rappels de thermodynamique   | 3         |
| 1.2 Cycles de production du froid à deux ou trois températures                 | 6         |
| 1.3 Échanges thermiques  | 19        |
| <b>2 • Cycles thermodynamiques de production du froid</b>                      | <b>41</b> |
| 2.1 Cycle de Carnot conventionnel  | 41        |
| 2.2 Nouveau cycle de Carnot  | 41        |
| 2.3 Cycle à compression mécanique de vapeur                                    | 43        |
| 2.4 Cycles à compression mécanique de gaz                                      | 46        |
| 2.5 Cycles à gaz à compression mécanique et à détente avec changement de phase | 50        |
| 2.6 Cycle à compression thermique de vapeurs                                   | 55        |
| <b>3 • Fluides frigorigènes</b>  | <b>61</b> |
| 3.1 Introduction historique  | 61        |
| 3.2 Nomenclature des fluides frigorigènes                                      | 62        |
| 3.3 Propriétés recherchées pour les fluides frigorigènes                       | 65        |
| 3.4 Mélanges de fluides frigorigènes   | 84        |
| 3.5 Hydrocarbures : exemple du propane (R-290)                                 | 97        |
| 3.6 Comparaison entre fluides frigorigènes                                     | 98        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 3.7      | Dioxyde de carbone (R-744)  | 105        |
| 3.8      | Les nouvelles règles de l'art   | 113        |
| 3.9      | Fluides frigorigènes les plus utilisés  | 113        |
| <b>4</b> | <b>Machine frigorifique mono-étagée, à compression mécanique de vapeur</b>      | <b>117</b> |
| 4.1      | Description du cycle de référence : machine mono-étagée parfaite                | 117        |
| 4.2      | Machine réelle à compression de vapeur  | 126        |
| 4.3      | Cycle à compression isotherme avec échangeur liquide-vapeur                     | 138        |
| 4.4      | Conclusions   | 140        |
| <b>5</b> | <b>Compresseurs à pistons</b>   | <b>141</b> |
| 5.1      | Principe de fonctionnement  | 141        |
| 5.2      | Compresseur à pistons parfait sans volume mort                                  | 142        |
| 5.3      | Compresseur à pistons parfait avec espace mort                                  | 145        |
| 5.4      | Évolutions du rendement volumétrique d'un compresseur parfait                   | 148        |
| 5.5      | Analyse énergétique d'un compresseur parfait                                    | 150        |
| 5.6      | Évolutions de la PME d'un compresseur parfait                                   | 151        |
| 5.7      | Compresseur réel à pistons  | 154        |
| 5.8      | Conclusions   | 161        |
| <b>6</b> | <b>Rendements d'un compresseur</b>  | <b>163</b> |
| 6.1      | Bilan énergétique d'un compresseur  | 163        |
| 6.2      | Rendements d'un compresseur   | 165        |
| 6.3      | Étude des variations du rendement volumétrique                                  | 173        |
| 6.4      | Étude des variations du rendement indiqué                                       | 178        |
| 6.5      | Étude des rendements mécanique et effectif                                      | 173        |
| 6.6      | Estimation de la température réelle des vapeurs au refoulement d'un compresseur | 180        |
| <b>7</b> | <b>Cycles bi-étagés</b>   | <b>183</b> |
| 7.1      | Systèmes bi-étagés avec deux compresseurs                                       | 185        |
| 7.2      | Systèmes avec un compresseur bi-étagé   | 198        |
| 7.3      | Autres types de circuits bi-étagés  | 205        |
| 7.4      | Cycles en cascade   | 207        |
| 7.5      | Cas particulier des cascades au CO <sub>2</sub>                                 | 213        |
| 7.6      | Conclusion  | 214        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>8 • Dimensionnement d'une machine frigorifique à compression mécanique de vapeur</b> | <b>215</b> |
| 8.1 Établissement du régime interne   | 216        |
| 8.2 Détermination des composants d'une machine frigorifique                             | 225        |
| 8.3 Détermination du coefficient de performance   | 241        |
| 8.4 Tendances   | 243        |
| <b>9 • Compression thermique de vapeur : le froid à sorption</b>                        | <b>245</b> |
| 9.1 Absorption liquide  | 246        |
| 9.2 Systèmes à sorption solide  | 264        |
| 9.3 Impact environnemental des systèmes à sorption                                      | 273        |
| <b>10 • Froid renouvelable : solaire, éolien, géothermie et biomasse</b>                | <b>277</b> |
| 10.1 Les deux filières de froid renouvelable  | 277        |
| 10.2 Les deux filières du froid solaire   | 278        |
| 10.3 Le froid renouvelable à compression mécanique de vapeur                            | 279        |
| 10.4 La filière thermique de froid renouvelable   | 282        |
| 10.5 Tendances du froid renouvelable  | 285        |
| <b>11 • Modélisation et simulation</b>  | <b>287</b> |
| 11.1 Calcul des propriétés thermodynamiques et des cycles                               | 288        |
| 11.2 Simulation de composants   | 290        |
| 11.3 Simulation dynamique en régime transitoire d'un système frigorifique global        | 294        |
| 11.4 Cas particulier de la FDD (détection et diagnostic de pannes)                      | 297        |

## **B**

### Technologie du froid mécanique

|  |            |
|--|------------|
| <b>12 • Composants</b>                         | <b>305</b> |
| 12.1 Généralités sur les compresseurs          | 305        |
| 12.2 Compresseurs à pistons                    | 306        |
| 12.3 Hélico-compresseurs ou compresseurs à vis | 322        |
| 12.4 Compresseurs rotatifs à palettes          | 344        |
| 12.5 Compresseurs scroll ou spiro-orbital      | 346        |
| 12.6 Compresseurs centrifuges                  | 350        |
| 12.7 Échangeurs de chaleur                     | 360        |
| 12.8 Condenseurs                               | 369        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 12.9      | Évaporateurs                                     | 376        |
| 12.10     | Autres échangeurs                                | 380        |
| 12.11     | Capacités sous pression                          | 384        |
| 12.12     | Détendeurs et systèmes de détente                | 390        |
| 12.13     | Canalisations frigorifiques et accessoires       | 398        |
| 12.14     | Pompes à eau et à frigoporteur                   | 403        |
| 12.15     | Refroidisseurs atmosphériques                    | 403        |
| 12.16     | Matériel de régulation                           | 406        |
| <b>13</b> | <b>• Matériels spécifiques</b>                   | <b>411</b> |
| 13.1      | Matériels pour la surgélation ou la congélation  | 411        |
| 13.2      | Machines à glace                                 | 419        |
| 13.3      | Groupes de refroidissement de liquide            | 423        |
| <b>14</b> | <b>• Architecture des systèmes frigorifiques</b> | <b>425</b> |
| 14.1      | Distribution du froid                            | 425        |
| 14.2      | Production et distribution frigorifique          | 426        |
| 14.3      | Centrales frigorifiques                          | 427        |
| 14.4      | Mode d'alimentation des évaporateurs             | 427        |
| 14.5      | Types de circuits frigorifiques                  | 429        |
| 14.6      | Systèmes de condensation                         | 431        |
| <b>15</b> | <b>• Applications du froid</b>                   | <b>435</b> |
| 15.1      | Distribution alimentaire                         | 435        |
| 15.2      | Restauration collective et grandes cuisines      | 437        |
| 15.3      | Usines agroalimentaires                          | 437        |
| 15.4      | Locaux particuliers                              | 439        |
| 15.5      | Entreposage                                      | 439        |
| 15.6      | Usine de crèmes glacées                          | 441        |
| 15.7      | Laiterie et fromagerie                           | 442        |
| 15.8      | Unités de surgélation                            | 443        |
| 15.9      | Groupe de process                                | 443        |
| 15.10     | Bâtiment et construction                         | 444        |
| 15.11     | Patinoires et neige                              | 444        |
| 15.12     | Malteries et brasseries                          | 444        |
| 15.13     | Salaisonnerie et charcuterie                     | 445        |
| 15.14     | Procédés divers de refroidissement               | 446        |
| <b>16</b> | <b>• Dégivrage</b>                               | <b>449</b> |
| 16.1      | Généralités                                      | 449        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 16.2      | Procédés de dégivrage   | 450        |
| 16.3      | Initialisation  | 450        |
| 16.4      | Arrêt   | 451        |
| 16.5      | Réduction des entrées d'air                                     | 451        |
| <b>17</b> | <b>• Frigoporteurs</b>  | <b>453</b> |
| 17.1      | Frigoporteurs liquides  | 453        |
| 17.2      | Frigoporteurs monophasiques liquides                            | 455        |
| 17.3      | Frigoporteurs liquide/vapeur                                    | 457        |
| 17.4      | Frigoporteurs solide/liquide                                    | 458        |
| 17.5      | Accumulation de froid   | 464        |
| <b>18</b> | <b>• Huiles frigorigènes</b>                                    | <b>467</b> |
| 18.1      | Nécessité et problèmes engendrés                                | 467        |
| 18.2      | Miscibilité   | 468        |
| 18.3      | Solubilité et dissolution                                       | 469        |
| 18.4      | Réintégration d'huile sur circuits HFC, HCFC et CO <sub>2</sub> | 469        |
| 18.5      | Équilibrage d'huile   | 471        |
| 18.6      | Principales huiles frigorigènes                                 | 472        |
| <b>19</b> | <b>• Froid, environnement et tendances</b>                      | <b>477</b> |
| 19.1      | Couche d'ozone  | 477        |
| 19.2      | Effet de serre  | 477        |
| 19.3      | Tendances   | 487        |
|           | <b>Index</b>  | <b>489</b> |