

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	XI
Notations et abréviations	XII

A

Production du froid

1 • Thermodynamique et transferts thermiques	3
1.1 Rappels de thermodynamique	3
1.2 Cycles de production du froid à deux ou trois températures	6
1.3 Échanges thermiques	20
2 • Cycles thermodynamiques de production du froid	43
2.1 Cycle de Carnot	43
2.2 Cycle à compression mécanique de vapeur	43
2.3 Cycles à compression mécanique de gaz	47
2.4 Cycles à gaz à compression mécanique et à détente avec changement de phase	51
2.5 Cycle à compression thermique de vapeurs	57
3 • Fluides frigorigènes	59
3.1 Introduction historique	59
3.2 Nomenclature des fluides frigorigènes	61
3.3 Propriétés recherchées pour les fluides frigorigènes	64
3.4 Mélanges de fluides frigorigènes	83
3.5 Hydrocarbures : exemple du propane (R-290)	100
3.6 Comparaison entre fluides frigorigènes	101
3.7 Dioxyde de carbone (R-744)	105

3.8 Les nouvelles règles de l'art	115
3.9 Fluides frigorigènes les plus utilisés	115
3.10 Un avenir sans HFC est-il possible ?	120
4 • Machine frigorifique mono-étagée, à compression mécanique de vapeur	123
4.1 Description du cycle de référence : machine mono-étagée parfaite	123
4.2 Machine réelle à compression de vapeur	132
4.3 Cycle à compression isotherme avec échangeur liquide-vapeur	145
4.4 Conclusions	147
5 • Compresseurs à pistons	149
5.1 Principe de fonctionnement	149
5.2 Compresseur à pistons parfait sans volume mort	150
5.3 Compresseur à pistons parfait avec espace mort	153
5.4 Évolutions du rendement volumétrique d'un compresseur parfait	156
5.5 Analyse énergétique d'un compresseur parfait	159
5.6 Évolutions de la PME d'un compresseur parfait	163
5.7 Compresseur à pistons réels	167
5.8 Conclusions	173
6 • Rendements d'un compresseur	175
6.1 Bilan énergétique d'un compresseur	175
6.2 Rendements d'un compresseur	177
6.3 Étude des variations du rendement volumétrique	188
6.4 Étude des variations du rendement indiqué	193
6.5 Étude des rendements mécanique et effectif	194
6.6 Estimation de la température réelle des vapeurs au refoulement d'un compresseur	195
7 • Cycles bi-étagés	199
7.1 Systèmes bi-étagés avec deux compresseurs	201
7.2 Systèmes avec un compresseur bi-étagé	217
7.3 Autres types de circuits bi-étagés	224
7.4 Cycles en cascade	227
7.5 Conclusion	233

8	Dimensionnement d'une machine frigorifique à compression mécanique de vapeur	235
8.1	Établissement du régime interne	236
8.2	Détermination des composants d'une machine frigorifique	245
9	Compression thermique de vapeur : le froid à sorption	263
9.1	Absorption liquide	264
9.2	Systèmes à sorption solide	286
9.3	Impact environnemental des systèmes à sorption	296
9.4	Systèmes à sorption pour production combinée d'énergies mécanique et thermique	302
10	Modélisation et simulation	305
10.1	Calcul des propriétés thermodynamiques et des cycles	305
10.2	Simulation de composants	308
10.3	Simulation en régime permanent d'un système frigorifique global	311
10.4	Simulation dynamique en régime transitoire d'un système frigorifique global	312

B

Technologie du froid mécanique

11	Composants	317
11.1	Généralités sur les compresseurs	317
11.2	Compresseurs à pistons	318
11.3	Hélico-compresseurs ou compresseurs à vis	334
11.4	Compresseurs rotatifs à palettes	355
11.5	Compresseurs scroll ou spiro-compresseurs	357
11.6	Compresseurs centrifuges	362
11.7	Échangeurs de chaleur	372
11.8	Condenseurs	382
11.9	Évaporateurs	386
11.10	Autres échangeurs	391
11.11	Capacités sous pression	394
11.12	Détendeurs et systèmes de détente	400
11.13	Canalisations frigorifiques et accessoires	409
11.14	Pompes à eau et à frigoporteur	413
11.15	Refroidisseurs atmosphériques	413
11.16	Matériel de régulation	416

12	* Matériels spécifiques	421
	12.1 Matériels pour la surgélation ou la congélation	421
	12.2 Machines à glace	430
	12.3 Groupes de refroidissement de liquide	433
13	* Architecture des systèmes frigorifiques	435
	13.1 Distribution du froid	435
	13.2 Production et distribution frigorifique	436
	13.3 Centrales frigorifiques	436
	13.4 Mode d'alimentation des évaporateurs	437
	13.5 Types de circuits frigorifiques	438
	13.6 Systèmes de condensation	439
14	* Applications du froid	445
	14.1 Distribution alimentaire	445
	14.2 Restauration collective et grandes cuisines	447
	14.3 Usines agroalimentaires	447
	14.4 Locaux particuliers	448
	14.5 Entreposage	449
	14.6 Usine de crèmes glacées	451
	14.7 Laiterie et fromagerie	452
	14.8 Unités de surgélation	452
	14.9 Groupe de process	453
	14.10 Bâtiment et construction	453
	14.11 Patinoires et neige	454
	14.12 Malteries et brasseries	454
	14.13 Salaisonnerie et charcuterie	455
15	* Dégivrage	457
	15.1 Généralités	457
	15.2 Procédés de dégivrage	458
	15.3 Initialisation	458
	15.4 Arrêt	459
	15.5 Réduction des entrées d'air	459
16	* Frigoporteurs	461
	16.1 Frigoporteurs liquides	461
	16.2 Frigoporteurs liquide/vapeur	463
	16.3 Glace liquide (sorbet ou ice slurry)	464
	16.4 Accumulation de froid	469

17 * Huiles frigorigères	473
17.1 Nécessité et problèmes engendrés	473
17.2 Miscibilité	474
17.3 Solubilité et dissolution	475
17.4 Réintégration d'huile sur circuits HFC et HCFC	475
17.5 Équilibrage d'huile	477
17.6 Principales huiles frigorigères	478
18 * Froid, environnement et tendances	481
18.1 Couche d'ozone	481
18.2 Effet de serre	481
18.3 Tendances	491
Index	493

Cet ouvrage présente les différents aspects de la production du froid dans l'industrie à un moment où la profession des frigoristes est soumise à des mutations importantes consécutives à des contraintes environnementales. En effet, le métier de frigoriste a beaucoup évolué depuis le développement de la chaîne du froid. À ses débuts (juste avant et après la Seconde Guerre mondiale), le froid industriel et commercial a fait appel à des ingénieurs frigoristes qui devaient concevoir des systèmes innovants pour faire face à la demande qui explosait avec la mise en place de la chaîne du froid. C'est de cette époque que date la création de l'IFFI à qui la profession des frigoristes a confié la mission de former les ingénieurs frigoristes dont elle avait besoin. Ensuite, les technologies de production du froid se sont quelque peu stabilisées, et le rôle de frigoriste se réduisait souvent à reproduire des installations connues. C'est à cette époque qu'ont été créés les premiers BTS en Froid, et que l'IFFI s'est ouvert aux BTS et DUT et a proposé un diplôme homologué de niveau II, le DSFI. Mais, depuis une vingtaine d'années, avec l'apparition des problèmes liés à l'environnement, la situation a changé radicalement et le frigoriste est confronté à de nouveaux défis : nouveaux fluides, confinement, nouvelles approches prenant en compte l'environnement, et nouveaux règlements. Le frigoriste actuel – et plus encore le frigoriste de demain – doit innover fortement pour s'adapter aux changements imposés par les nouvelles réglementations.

C'est à ce nouveau défi que cet ouvrage s'efforce de répondre en s'appuyant sur l'expérience de l'IFFI. C'est ainsi que cet ouvrage présente l'état de l'art de la production et la technologie du froid. Compte tenu de l'évolution rapide de la technologie du froid, il n'est pas possible dans un tel ouvrage de mentionner toutes les études de R&D qui ont lieu à l'heure actuelle. Néanmoins, il nous a semblé essentiel de ne pas occulter tous les efforts qui ont été déployés pour l'émergence des HFC et ceux qui sont actuellement développés en faveur des fluides naturels de remplacement.

Cet ouvrage s'appuie sur les cours de production du froid et de technologie du froid dispensés à l'IFFI ainsi que sur des cours de la filière ingénieur énergétique (option froid et climatisation) du Cnam. Il n'aborde pas le conditionnement d'air bien qu'il soit enseigné à l'IFFI, et nous avons fait le choix de ne pas aborder des domaines importants qui sont traités dans d'autres cours de l'IFFI (régulation, électrotechnique, acoustique, MFV, transports frigorifiques, etc.) ; de même, la partie à orientation plus biologique concernant la conservation des denrées, n'est pas abordée ici bien qu'elle soit traitée à l'IFFI. Pour les échanges thermiques (chapitre 1, § 1.3), nous tenons à remercier C. Marvillet qui a accepté que nous utilisions ses notes de cours qu'il dispense à l'IFFI pour en extraire quelques pages.

Cet ouvrage ne se contente pas seulement de décrire les solutions les plus couramment retenues pour répondre aux besoins des utilisateurs, il procure également les outils qui permettront au frigoriste soucieux d'innover de proposer des solutions adaptées aux nouvelles contraintes, notamment environnementales. Cet ouvrage est accessible à des ingénieurs ainsi qu'à des techniciens possédant le niveau BTS ou DUT en énergétique.