

# PRÉFACE

---

Le froid artificiel est associé à la plupart de nos activités : alimentation, ambiance des logements et lieux de travail, déplacements, loisirs, santé... Ceci résulte notamment de la miniaturisation des installations, possible à partir des années 1935-1950 par le développement des chlorofluorocarbures (CFC), qui a mis à notre portée réfrigérateurs, congélateurs, climatiseurs domestiques et automobiles, vitrines de vente, fontaines d'eau glacée, etc.

Cette explosion des petits équipements n'enlève rien à l'importance ni aux merveilleuses évolutions de ces machines frigorifiques industrielles qui, cachées au grand public, contribuent à la conservation ou à la préparation des aliments, permettent de produire de l'eau glacée pour les procédés ou la maîtrise des ambiances, de garnir les patinoires... Ce « froid industriel » peut certes impressionner le débutant, comme le dit si bien Jean Desmons, avant de devenir la passion de celui qui apprend à le maîtriser !

Un « aide-mémoire » ? Que l'on s'initie ou que l'on œuvre chaque jour sur des machines, chacun en a besoin, tant ce « froid industriel » recouvre de procédés différents, pour apporter des réponses adaptées aux situations rencontrées. Ce champ d'activité, aussi exigeant que varié, est aussi le terrain d'évolutions considérables, qui échappent au public : les compresseurs, à piston comme à vis, ne cessent de se perfectionner, tout comme les échangeurs, composants variés, modes de commande et automatismes ; l'évolution est, entre autres, stimulée par les contraintes environnementales (protection de l'ozone stratosphérique, lutte contre le réchauffement climatique), des mesures de sécurité plus strictes, le coût des salaires et de l'énergie. Cet ouvrage rend bien compte de cette évolution ; il intègre les nouveautés, même en cours d'adoption dans l'industrie, ce qui sera précieux pour les praticiens autant que pour les étudiants.

« Aide-mémoire », cet ouvrage l'est, certes, en aidant, de façon classique, à retrouver ce dont on a besoin ; il l'est aussi en aidant le lecteur à faire travailler sa créativité et son intelligence. Ainsi, dans ses études de cas, fort intéressantes, il ne traite pas toutes les solutions mais guide le lecteur dans une analyse qui attire l'attention sur les écueils à éviter et les analyses à faire.

Une telle approche supposait à la fois une grande expérience industrielle et un grand sens de la pédagogie. Jean Desmons est l'homme idéal pour nous le proposer, lui qui a combiné avec bonheur, dans sa carrière, entreprise et enseignement.

L'attention à l'autre et le sens du bien commun qui guident son action, appréciée par tous, au sein de l'Association française du froid, transparaissent du reste dans l'approche qu'il propose tout au long de ce livre.

Puisse le lecteur en accepter la contagion et progresser aussi dans ces qualités humaines. Tout en profitant à la qualité du travail accompli, cet ouvrage contribuera alors aussi à donner une saveur toute spéciale aux efforts qu'il implique.

**Louis Lucas**

Président de l'Association française du froid  
Directeur honoraire de l'Institut international du froid

# TABLE DES MATIÈRES

---

Préface	V
Avant-propos	XVII
Avertissement	XIX
Quelques symboles graphiques utilisés dans l'ouvrage	XX

## A

---

### Généralités sur le froid industriel

<b>1 •</b> Spécificités du froid industriel	<b>3</b>
<b>2 •</b> Les fluides frigorigènes utilisés en froid industriel	<b>5</b>
2.1 Qualités d'un bon fluide frigorigène	5
2.2 Quelques éléments de physiques se rapportant aux fluides frigorigènes	7
2.3 Le R22	11
2.4 Le R134a	14
2.5 Le R404A (FX 70)	16
2.6 Le R407F (Performax LT)	20
2.7 L'ammoniac (NH <sub>3</sub> )	23
2.8 Le dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> )	26
2.9 Étude comparative entre le R404A, le R507, le R717 et le R407F	28

<b>3 •</b>	<b>Spécificités de la compression monoétagée</b>	<b>37</b>
<b>4 •</b>	<b>Principe de la compression biétagée</b>	<b>41</b>
4.1	Étude comparative entre la compression monoétagée et la compression biétagée	41
4.2	Description succincte d'une machine à compression biétagée	42
4.3	Détermination de la pression intermédiaire	43
4.4	Exemple de machines biétagées disponibles	44
<b>5 •</b>	<b>Compresseurs industriels à pistons monoétagés</b>	<b>47</b>
5.1	Principales caractéristiques des compresseurs à pistons monoétagés	47
5.2	Réduction de puissance	49
5.3	Lubrification	53
<b>6 •</b>	<b>Compresseurs à vis</b>	<b>59</b>
6.1	Comportement des compresseurs à vis comparativement aux compresseurs à pistons	60
6.2	Principe de fonctionnement des compresseurs à vis	61
6.3	Rendement volumétrique des compresseurs à vis	62
6.4	Compresseurs monovis	63
6.5	Compresseurs bisis	65
6.6	Réduction de puissance des compresseurs à vis	66
6.7	Suralimentation des compresseurs à vis	71
6.8	Fonctionnement d'un compresseur à vis en dehors des conditions normales de marche	76
6.9	Volumétrie (Vi) des compresseurs à vis	77
6.10	Lubrification	79
6.11	Exemples de centrales frigorifiques équipées de compresseurs à vis	83
<b>7 •</b>	<b>Pompes à fluide frigorigène</b>	<b>87</b>
<b>8 •</b>	<b>Différentes technologies possibles des machines industrielles</b>	<b>91</b>
8.1	Installation à compression biétagée sans sous-refroidissement intermédiaire	91
8.2	Installation à compression biétagée avec contrôle de la température de fin de compression du compresseur haute pression par injection de fluide frigorigène à la pression intermédiaire	94

8.3	Installation à compression biétagée avec bouteille intermédiaire à injection partielle sans sous-refroidissement	96
8.4	Installation à compression biétagée avec bouteille intermédiaire à injection partielle avec sous-refroidissement	97
8.5	Installation à compression étagée avec bouteille intermédiaire à injection totale	99
8.6	Installation à compression biétagée à injection totale avec refroidisseur intermédiaire, bouteille séparatrice basse pression et à alimentation par pompe des évaporateurs	101
8.7	Installation à compression biétagée avec production de froid à la pression intermédiaire	103
8.8	Installation comportant plusieurs fluides frigorigènes, appelée « machine en cascade »	105 109

## **9 • Différentes technologies permettant l'alimentation en fluide frigorigène liquide d'évaporateurs ou de séparateurs** 111

9.1	Alimentation en fluide frigorigène liquide à partir d'un régleur manuel et d'un régulateur de niveau à élément thermostatique et pressostatique	111
9.2	Contrôle de niveau par contrôleur électromagnétique	114
9.3	Contrôleur de niveau électronique	115
9.4	Contrôleur de niveau optoélectronique	116
9.5	Contrôle de niveau à partir d'un régulateur modulant à servocommande et flotteur basse pression	117
9.6	Contrôle de niveau à partir d'un régulateur modulant à servocommande et flotteur haute pression	120

## **10 • Comparaison des alimentations sèches et noyées des évaporateurs** 125

10.1	Alimentation sèche	125
10.2	Alimentation noyée	127

## **11 • Problèmes d'huile avec les fluides frigorigènes en alimentation de type noyée** 131

11.1	Cas où l'huile est moins dense et miscible avec le fluide frigorigène	131
11.2	Cas où l'huile est plus dense et non miscible avec le fluide frigorigène	135

<b>12</b>	<b>• Dégivrages</b>	<b>137</b>
12.1	Dégivrage par les gaz chauds avec différentiel de pression entre les gaz chauds et la ligne liquide	138
12.2	Dégivrage par les gaz chauds sans différentiel de pression	142
12.3	Évaporateur en froid industriel	145
<b>13</b>	<b>• Les Centrales frigorifiques</b>	<b>147</b>
13.1	Généralités	147
13.2	Centrales à plusieurs compresseurs	147
13.3	Régulation	148
13.4	L'huile dans les centrales frigorifiques	150
13.5	Exemple de modularité des centrales frigorifiques	154
13.6	Étude d'une centrale frigorifique existante d'un hypermarché de conception spécifique	155
13.7	Quelques exemples de centrales frigorifiques	159
<b>14</b>	<b>• Régulateurs de pression et vannes</b>	<b>163</b>
14.1	Vannes amont et aval	163
14.2	Vannes à commande directe	165
14.3	Régulateurs frigorifiques à servocommande	165
14.4	Différents pilotages des vannes principales	168
<b>15</b>	<b>• Les fluides frigopORTEURS</b>	<b>173</b>
15.1	Généralités	173
15.2	Refroidissement direct	173
15.3	Refroidissement indirect	173
15.4	Avantages des installations à fluide frigopORTEUR	175
15.5	Inconvénients de la réfrigération indirecte	175
15.6	Les différents types de fluide frigopORTEURS	176
15.7	Les circuits frigopORTEURS	190
<b>16</b>	<b>• Le CO<sub>2</sub> comme fluide frigorigène</b>	<b>195</b>
16.1	Généralités	195
16.2	Avantages du CO <sub>2</sub>	203
16.3	Inconvénients du CO <sub>2</sub>	203
16.4	Le CO <sub>2</sub> vis-à-vis de l'eau	204
16.5	Le CO <sub>2</sub> et l'ammoniac	206
16.6	Dégivrage des installations au CO <sub>2</sub>	209

<b>17 •</b>	<b>Sécurités et contrôles en froid industriel</b>	<b>211</b>
17.1	Sécurités et contrôles concernant la partie électrique	211
17.2	Sécurités et contrôles concernant le domaine aéraluque	211
17.3	Sécurités et contrôles concernant le domaine hydraulique	212
17.4	Sécurités et contrôles dans le domaine frigorifique	212
17.5	Sécurité incendie	225
<b>18 •</b>	<b>Problèmes des sols en température négative</b>	<b>227</b>
18.1	Apport par ventilation	228
18.2	Apport par chauffage	228
18.3	Remarques de responsables d'entrepôts frigorifiques confrontés à des problèmes de chauffage des sols	228
<b>19 •</b>	<b>Soupapes d'équilibrage</b>	<b>229</b>
19.1	Calcul des pressions s'exerçant sur les parois d'une chambre froide	229
19.2	Soupape d'équilibrage hydraulique	230
19.3	Soupape d'équilibrage à clapet	231
<b>20 •</b>	<b>Isolation thermique</b>	<b>235</b>
20.1	Étude d'une paroi plane	235
20.2	Étude des températures d'une tuyauterie isolée	239
<b>21 •</b>	<b>Congélation et surgélation</b>	<b>243</b>
21.1	Généralités	243
21.2	Différences entre congélation et surgélation	243
21.3	La surgélation dans l'industrie agroalimentaire	245
21.4	Différentes techniques de surgélation	246
21.5	Tunnel de congélation à fonctionnement discontinu	247
21.6	Tunnel de congélation à fonctionnement continu à production de froid mécanique	249
21.7	Tunnel de congélation à fonctionnement continu utilisant un fluide cryogénique	250
21.8	Congélateur à plaques	250
21.9	Congélateur à lit fluidisé	251
21.10	Surgélateur spiral	253
21.11	Règles générales concernant la surgélation	253
21.12	Rendement d'un système de congélation	254

## B

### Cas concrets d'installations

<b>22</b>	<b>• Installation monoétagée à deux températures différentes et à récupération de chaleur</b>	<b>257</b>
22.1	Schéma de principe	257
22.2	Spécificités de l'installation étudiée	257
22.3	Cycle de fonctionnement	259
22.4	Rôle des échangeurs de chaleur	260
22.5	Rôle de la vanne de démarrage	261
22.6	Contrôle de la haute pression minimale	262
<b>23</b>	<b>• Entrepôt frigorifique polyvalent</b>	<b>265</b>
23.1	Fluides utilisés	265
23.2	Schéma de principe	266
23.3	Principe de fonctionnement et description	267
23.4	Cycle frigorifique de principe	271
23.5	Réfrigération des quais	273
<b>24</b>	<b>• Abattoir à volailles</b>	<b>275</b>
24.1	Schéma de principe	275
24.2	Régulation des compresseurs haute pression	277
24.3	Huile des compresseurs haute pression	281
24.4	Étude des condenseurs et des spécificités de la condensation	283
24.5	Bouteille intermédiaire	286
24.6	Bouteille de réserve liquide	290
24.7	Séparateur basse pression	293
24.8	Évaporateurs basse température	296
24.9	Équipement frigorifique des laboratoires	299
24.10	Fabrique de glace écaille	299
24.11	Principaux éléments de sécurité	302
<b>25</b>	<b>• Patinoire</b>	<b>307</b>
25.1	Compresseurs	307
25.2	Condensation	307



25.3	Contrôle des niveaux de fluide frigorigène	308
25.4	Évaporateur à plaques	308
25.5	Circuit frigoporteur	309
25.6	Choix du frigoporteur	309
25.7	Schéma de principe	309
25.8	Cycle de fonctionnement sur diagramme enthalpique	311
25.9	Neige produite par la piste de patinage	313
25.10	Composants d'une piste de patinage	315
25.11	Patinoire à ciel ouvert	315
25.12	Projet de remodelage d'une patinoire	316
25.13	Remarques sur les condenseurs évaporatifs	318
<b>26</b>	<b>• Entrepôt frigorifique</b>	<b>323</b>
26.1	Production du froid	323
26.2	Compresseurs	323
26.3	Cycle de fonctionnement et description succincte	325
26.4	Dégivrage	328
26.5	Huile	330
26.6	Refroidissement des halls d'accès	331
<b>27</b>	<b>• La chaîne du froid</b>	<b>333</b>
27.1	Définition	333
27.2	Conséquences de la rupture de la chaîne du froid	333
27.3	Évolution de la chaîne du froid	334
27.4	Réflexion sur le maillon transport	334
27.5	Contrôles de la chaîne du froid	334
27.6	Exemple de chaîne du froid : chaîne du froid des produits aquatiques	335
<b>28</b>	<b>• La chaîne du froid du beurre</b>	<b>341</b>
28.1	Généralités	341
28.2	Les tanks à lait	341
28.3	Collecte du lait	344
28.4	Le lait à la laiterie	344
28.5	Beurrerie	345

<b>29 • La chaîne du froid du saucisson sec</b>	<b>353</b>
29.1 Généralités	353
29.2 Matériel spécifique du fabricant de saucisson : le matériel d'étuvage et de séchage	354
29.3 Étapes de la fabrication	355
29.4 Évolutions psychrométriques	357
29.5 Séchage thermodynamique	359
29.6 Ventilation	360
29.7 Régulation	362
<b>30 • Fabrication de la bière</b>	<b>363</b>
30.1 Constituants de la bière	363
30.2 Fabrication de la bière	363
30.3 Conclusions et remarques	366

## C

---

### Cas concrets de pannes et dépannages

<b>31 • Défaut de conception d'un collecteur d'aspiration</b>	<b>371</b>
31.1 Éléments succincts de l'installation	371
31.2 Coups de liquide	371
31.3 Intervention	371
31.4 Constatations et conclusion	372
<b>32 • Défaut de conception de bouteilles séparatrices</b>	<b>373</b>
32.1 Éléments succincts de l'installation	373
32.2 Casse mécanique	373
32.3 Dépannage	374
32.4 Explication	375
32.5 Solutions envisagées et remèdes	375

<b>33 • Défaut de conception de pompes à fluide frigorigène</b>	<b>377</b>
33.1 Éléments succincts de l'installation	377
33.2 Grippage des pompes	377
33.3 Intervention	378
33.4 Constatations et conclusion	380
<b>34 • Arrêt des compresseurs par les pressostats différentiels d'huile</b>	<b>381</b>
34.1 Éléments succincts de l'installation	381
34.2 Coupures	381
34.3 Intervention	382
34.4 Remèdes	384
<b>35 • Évolution des produits</b>	<b>385</b>
35.1 Généralités	385
35.2 Exemple d'évolutions de vannes principales	386
35.3 Nouveaux composants polyvalents	389
<b>36 • Pannes et dépannages électriques</b>	<b>393</b>
36.1 Exemples concrets de pannes	393
36.2 Méthodologie de dépannage	402
<b>Annexe • Réglémentations et normes</b>	<b>405</b>
<b>Index</b>	<b>411</b>

# AVANT-PROPOS

---

Ayant débuté ma carrière dans une société pratiquant le froid industriel, j'ai eu l'opportunité de travailler sur des installations dans le domaine des conserveries, des laiteries, des abattoirs, des chocolateries, etc.

Ces installations, impressionnantes au début, deviennent rapidement compréhensibles pour peu qu'on s'y intéresse vraiment et s'avèrent généralement fiables et performantes grâce aux techniques utilisées.

Si l'on observe l'évolution récente des machines industrielles, on remarque les changements ou tendances suivants :

- Les compresseurs à pistons sont de plus en plus supplantés par les compresseurs à vis.
- La régulation, qui était de type tout-ou-rien, pneumatique ou analogique, est maintenant presque systématiquement de type numérique, le plus souvent communicante.
- Les fluides chlorés sont aujourd'hui abandonnés en installations neuves.
- Les puissances frigorifiques installées sont quelquefois très élevées : des enceintes de plusieurs centaines de milliers de mètre cubes ne sont plus exceptionnelles.
- Dans le but d'améliorer le confinement du fluide frigorigène, les installations à fluide frigoporteur sont de plus en plus étudiées et installées.
- Enfin, notons que les metteurs au point, qui, naguère, étaient souvent de formation mécanique, ont généralement aujourd'hui une formation de base d'électrotechniciens et d'automaticiens.

La première partie de cet ouvrage est consacrée aux bases du froid industriel. Elle aborde les notions suivantes : les fluides frigorigènes utilisés en froid industriel, les différents types de compresseurs, les différents types d'installations biétagées, etc. Nous étudions ensuite le sujet des fluides frigoporteurs, et

le cas particulier du dioxyde de carbone, qui, après avoir été abandonné, est à nouveau utilisé en tant que fluide frigorigène.

L'ouvrage présente ensuite des cas concrets : différentes installations industrielles sont décrites dans la deuxième partie, puis des exemples de dysfonctionnements sont développés dans la troisième partie.

En annexe, on trouvera des éléments concernant la législation des machines industrielles.

Cet ouvrage s'adresse principalement :

- aux étudiants en génie frigorifique car il expose de façon simple la structure et le fonctionnement d'une machine industrielle ;
- aux techniciens metteurs au point (des réglages et des cas concrets de dysfonctionnement sont étudiés) ;
- aux concepteurs de machines industrielles, différents choix technologiques étant proposés pour une application donnée.

Je remercie les sociétés suivantes, dont sont issues différentes figures et données : Alfa Laval, Arcos, Baltimore Aircool (Balticare), Bitzer, Carrier, Copeland, Danfoss, Dehon, Dunham-Bush, Friga Bohn, Geneglacé, Grasso, Hallscrew, Hermetic, Isotechnica, Johnson Controls, Lactalis, Lèbre-FMI, Legrand, Mycom, ProFroid, Raffel, Schneider, Searle, Sériaco, Trane, US Reco.