

Jean **Desmons**

AIDE-MÉMOIRE

# Froid industriel

**5<sup>e</sup> édition**

Préface de Louis **Lucas**

Président de l'Association française du froid

Directeur honoraire de l'Institut internationale du froid

**DUNOD**

Graphisme de couverture : Nicolas HUBERT

Photographie de couverture : © Matveev Aleksandr/Shutterstock.com

Illustrations intérieures : Ursula et Alain BOUTEVILLE-SANDERS

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1<sup>er</sup> juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, Paris, 2006, 2010, 2014, 2018, 2023

11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff

[www.dunod.com](http://www.dunod.com)

ISBN 978-2-10-084784-6

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

# 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	III
Avant-propos	XIV
Quelques symboles graphiques utilisés dans l'ouvrage	XVI

## A

---

### Généralités sur le froid industriel

<b>1 • Spécificités du froid industriel</b>	<b>2</b>
<b>2 • Les fluides frigorigènes utilisés en froid industriel</b>	<b>4</b>
2.1 Généralités	4
2.2 Termes ou expressions spécifiques des fluides frigorigènes	5
2.3 Classification et caractéristiques de base des fluides frigorigènes	6
2.4 Qualités d'un bon fluide frigorigène	9
2.5 Quelques éléments de physiques se rapportant aux fluides frigorigènes	11
2.6 Le R134a	15
2.7 Le R404A (FX 70)	18
2.8 Le R407F (Performax LT)	23
2.9 L'ammoniac (NH <sub>3</sub> )	27
2.10 Le dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> )	31

2.11	Le R-455A (Solstice L 40 X)	34
2.12	Solstice Ze ou R-1234ze	39
2.13	Solstice yf R-1234yf	40
2.14	Étude comparative entre le R404A, le R507, le R717 et le R407F	43
<b>3</b>	<b>• Étude de la compression monoétagée</b>	<b>51</b>
3.1	Généralités	51
3.2	Étude d'une machine à compression monoétagée	52
3.3	Étude de la même machine, la température d'ébullition passant de $-10\text{ °C}$ à $-30\text{ °C}$	55
3.4	Conclusion	57
<b>4</b>	<b>• Étude de la compression biétagée</b>	<b>58</b>
4.1	Généralités	58
4.2	Étude comparative entre la compression monoétagée et la compression biétagée	58
4.3	Détermination de la pression intermédiaire	66
4.4	Exemple de machines biétagées disponibles	67
<b>5</b>	<b>• Compresseurs industriels à pistons monoétagés</b>	<b>69</b>
5.1	Principales caractéristiques des compresseurs à pistons monoétagés	69
5.2	Réduction de puissance	70
5.3	Lubrification	75
<b>6</b>	<b>• Compresseurs à vis</b>	<b>81</b>
6.1	Comportement des compresseurs à vis comparativement aux compresseurs à pistons	82
6.2	Principe de fonctionnement des compresseurs à vis	83
6.3	Rendement volumétrique des compresseurs à vis	84
6.4	Compresseurs monovis	85
6.5	Compresseurs bivis	87
6.6	Réduction de puissance des compresseurs à vis	88
6.7	Suralimentation des compresseurs à vis	93
6.8	Fonctionnement d'un compresseur à vis en dehors des conditions normales de marche	98
6.9	Volume index (Vi) des compresseurs à vis	99
6.10	Lubrification	101
6.11	Exemples de centrales frigorifiques équipées de compresseurs à vis	104

<b>7 • Pompes à fluide frigorigène</b>	<b>107</b>
<b>8 • Différentes technologies possibles des machines industrielles</b>	<b>110</b>
8.1 Installation à compression biétagée sans sous-refroidissement intermédiaire	110
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	113
8.3 Installation à compression biétagée avec bouteille intermédiaire à injection partielle sans sous-refroidissement	115
8.4 Installation à compression biétagée avec bouteille intermédiaire à injection partielle avec sous-refroidissement	116
8.5 Installation à compression étagée avec bouteille intermédiaire à injection totale	118
8.6 Installation à compression biétagée à injection totale avec refroidisseur intermédiaire, bouteille séparatrice basse pression et à alimentation par pompe des évaporateurs	120
8.7 Installation à compression biétagée avec production de froid à la pression intermédiaire	122
8.8 Étude comparative entre les différentes technologies de machines à compression biétagée	124
8.9 Installation comportant plusieurs fluides frigorigènes, appelée « machine en cascade »	137
<b>9 • Différentes technologies permettant l'alimentation en fluide frigorigène liquide d'évaporateurs ou de séparateurs</b>	<b>144</b>
9.1 Alimentation en fluide frigorigène liquide à partir d'un régleur manuel et d'un régulateur de niveau à élément thermostatique et pressostatique	144
9.2 Contrôle de niveau par contrôleur électromagnétique	147
9.3 Contrôleur de niveau électronique	148
9.4 Contrôleur de niveau optoélectronique	149
9.5 Contrôle de niveau à partir d'un régulateur modulant à servocommande et flotteur basse pression	150
9.6 Contrôle de niveau à partir d'un régulateur modulant à servocommande et flotteur haute pression	153
<b>10 • Comparaison des alimentations sèches et noyées des évaporateurs</b>	<b>157</b>
10.1 Alimentation sèche	157
10.2 Alimentation noyée	159

<b>11 • Problèmes d'huile avec les fluides frigorigènes en alimentation de type noyée</b>	<b>164</b>
11.1 Cas où l'huile est moins dense et miscible avec le fluide frigorigène	164
11.2 Cas où l'huile est plus dense et non miscible avec le fluide frigorigène	168
<b>12 • Dégivrages</b>	<b>169</b>
12.1 Dégivrage par les gaz chauds avec différentiel de pression entre les gaz chauds et la ligne liquide	170
12.2 Dégivrage par les gaz chauds sans différentiel de pression	174
12.3 Évaporateur en froid industriel	177
<b>13 • Les Centrales frigorifiques</b>	<b>179</b>
13.1 Généralités	179
13.2 Centrales à plusieurs compresseurs	179
13.3 Régulation HP et BP flottantes	180
13.4 L'huile dans les centrales frigorifiques	192
13.5 Exemple de modularité des centrales frigorifiques	196
13.6 Étude d'une centrale frigorifique existante d'un hypermarché de conception spécifique	197
13.7 Quelques exemples de centrales frigorifiques	201
<b>14 • Régulateurs de pression et vannes</b>	<b>204</b>
14.1 Vannes amont et aval	204
14.2 Vannes à commande directe	206
14.3 Régulateurs frigorifiques à servocommande	206
14.4 Différents pilotages des vannes principales	209
<b>15 • Les fluides frigopORTEURS</b>	<b>214</b>
15.1 Généralités	214
15.2 Refroidissement direct	214
15.3 Refroidissement indirect	214
15.4 Avantages des installations à fluide frigopORTEUR	216
15.5 Inconvénients de la réfrigération indirecte	216
15.6 Les différents types de fluides frigopORTEURS	217
15.7 Les circuits frigopORTEURS	231
<b>16 • Le CO<sub>2</sub> comme fluide frigorigène</b>	<b>236</b>
16.1 Généralités	236
16.2 Avantages du CO <sub>2</sub>	244
16.3 Inconvénients du CO <sub>2</sub>	244

16.4	Le CO <sub>2</sub> vis-à-vis de l'eau	245
16.5	Le CO <sub>2</sub> et l'ammoniac	247
16.6	Dégivrage des installations au CO <sub>2</sub>	250
<b>17</b>	<b>• Sécurités et contrôles en froid industriel</b>	<b>252</b>
17.1	Sécurités et contrôles concernant la partie électrique	252
17.2	Sécurités et contrôles concernant le domaine aéraulique	252
17.3	Sécurités et contrôles concernant le domaine hydraulique	253
17.4	Sécurités et contrôles dans le domaine frigorifique	253
17.5	Sécurité incendie	266
<b>18</b>	<b>• Problèmes des sols en température négative</b>	<b>267</b>
18.1	Apport par ventilation	268
18.2	Apport par chauffage	268
18.3	Remarques de responsables d'entrepôts frigorifiques confrontés à des problèmes de chauffage des sols	268
<b>19</b>	<b>• Soupapes d'équilibrage</b>	<b>269</b>
19.1	Calcul des pressions s'exerçant sur les parois d'une chambre froide	269
19.2	Soupape d'équilibrage hydraulique	270
19.3	Soupape d'équilibrage à clapet	271
<b>20</b>	<b>• Isolation thermique – Bilan frigorifique</b>	<b>274</b>
20.1	Étude d'une paroi plane	274
20.2	Étude des températures d'une tuyauterie isolée	277
20.3	Bilans frigorifiques	280
<b>21</b>	<b>• Congélation et surgélation</b>	<b>286</b>
21.1	Généralités	286
21.2	Différences entre congélation et surgélation	286
21.3	La surgélation dans l'industrie agroalimentaire	288
21.4	Différentes techniques de surgélation	289
21.5	Tunnel de congélation à fonctionnement discontinu	290
21.6	Tunnel de congélation à fonctionnement continu à production de froid mécanique	292
21.7	Tunnel de congélation à fonctionnement continu utilisant un fluide cryogénique	293
21.8	Congélateur à plaques	294
21.9	Congélateur à lit fluidisé	295
21.10	Surgélateur spiral	297

21.11 Règles générales concernant la surgélation	298
21.12 Rendement d'un système de congélation	298

## **B**

### Cas concrets d'installations

<b>22 • Entrepôt frigorifique polyvalent</b>	<b>300</b>
22.1 Fluides utilisés	300
22.2 Schéma de principe	301
22.3 Principe de fonctionnement et description	302
22.4 Cycle frigorifique de principe	306
22.5 Réfrigération des quais	308
<b>23 • Patinoire</b>	<b>310</b>
23.1 Compresseurs	310
23.2 Condensation	310
23.3 Contrôle des niveaux de fluide frigorigène	311
23.4 Évaporateur à plaques	311
23.5 Circuit frigoporteur	312
23.6 Choix du frigoporteur	312
23.7 Schéma de principe	312
23.8 Cycle de fonctionnement sur diagramme enthalpique	314
23.9 Neige produite par la piste de patinage	316
23.10 Composants d'une piste de patinage	318
23.11 Patinoire à ciel ouvert	318
23.12 Projet de remodelage d'une patinoire	319
23.13 Remarques sur les condenseurs évaporatifs	321
<b>24 • Entrepôt frigorifique</b>	<b>325</b>
24.1 Production du froid	325
24.2 Compresseurs	325
24.3 Cycle de fonctionnement et description succincte	327
24.4 Dégivrage	330
24.5 Huile	332
24.6 Refroidissement des halls d'accès	333

<b>25 • La chaîne du froid</b>	<b>335</b>
25.1 Définition	335
25.2 Conséquences de la rupture de la chaîne du froid	335
25.3 Évolution de la chaîne du froid	336
25.4 Réflexion sur le maillon transport	336
25.5 Contrôles de la chaîne du froid	336
25.6 Exemple de chaîne du froid : chaîne du froid des produits aquatiques	337
<b>26 • La chaîne du froid du beurre</b>	<b>343</b>
26.1 Généralités	343
26.2 Les tanks à lait	343
26.3 Collecte du lait	346
26.4 Le lait à la laiterie	346
26.5 Beurrerie	347
<b>27 • La chaîne du froid du saucisson sec</b>	<b>354</b>
27.1 Généralités	354
27.2 Matériel spécifique du fabricant de saucisson : le matériel d'étuvage et de séchage	355
27.3 Étapes de la fabrication	356
27.4 Évolutions psychrométriques	358
27.5 Séchage thermodynamique	360
27.6 Ventilation	361
27.7 Régulation	363
<b>28 • Fabrication de la bière</b>	<b>364</b>
28.1 Constituants de la bière	364
28.2 Fabrication de la bière	364
28.3 Conclusions et remarques	367
<b>29 • Les abattoirs industriels</b>	<b>368</b>
29.1 Généralités	368
29.2 Différents types de locaux à température contrôlée	368
29.3 Chambre ou tunnel de ressuage	369
29.4 Chambre de maturation ou chambre de conservation	372
29.5 Laboratoire ou salle de découpe	373
29.6 Salle des ventes	374
29.7 Chambre d'abats blancs	374
29.8 Chambre d'abats rouges	375

29.9	Chambre de consigne	375
29.10	Chambre de saisie	375
29.11	Tunnel de surgélation	375
29.12	Chambre de stockage des produits surgelés	376
<b>30</b>	<b>• Étude d'installations</b>	<b>377</b>
30.1	Étude n° 1	377
30.2	Étude n° 2	383
30.3	Étude n° 3 – Étude d'une installation au CO <sub>2</sub> fonctionnant en transcritique	391
30.4	Étude n° 4	401
30.5	Étude n° 5	413

## C

---

### Cas concrets de pannes et dépannages

<b>31</b>	<b>• Défaut de conception d'un collecteur d'aspiration</b>	<b>422</b>
31.1	Éléments succincts de l'installation	422
31.2	Coups de liquide	422
31.3	Intervention	422
31.4	Constatations et conclusion	423
<b>32</b>	<b>• Défaut de conception de bouteilles séparatrices</b>	<b>424</b>
32.1	Éléments succincts de l'installation	424
32.2	Casse mécanique	424
32.3	Dépannage	425
32.4	Explication	426
32.5	Solutions envisagées et remèdes	426
<b>33</b>	<b>• Défaut de conception de pompes à fluide frigorigène</b>	<b>427</b>
33.1	Éléments succincts de l'installation	427
33.2	Grippage des pompes	427
33.3	Intervention	428
33.4	Constatations et conclusion	430

<b>34 • Arrêt des compresseurs par les pressostats différentiels d'huile</b>	<b>431</b>
34.1 Éléments succincts de l'installation	431
34.2 Coupures	431
34.3 Intervention	432
34.4 Remèdes	434
<b>35 • Évolution des produits</b>	<b>435</b>
35.1 Généralités	435
35.2 Exemple d'évolutions de vannes principales	436
35.3 Nouveaux composants polyvalents	439
<b>36 • Pannes et dépannages électriques</b>	<b>443</b>
36.1 Exemples concrets de pannes	443
36.2 Méthodologie de dépannage	452
<b>Annexe • Réglementations et normes</b>	<b>455</b>
<b>Index</b>	<b>461</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 interdits de même que les fluides à fort impact sur le réchauffement climatique (GWP : *Global Warming Potential*) ;
- 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.

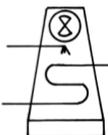
Cet ouvrage s'adresse principalement :

- 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, Geneglace, Grasso, Hallscrew, Hermetic, Isotechnica, Johnson Controls, Lactalis, Lèbre-FMI, Legrand, Mycom, ProFroid, Raffel, Schneider, Searle, Sériaco, Trane, US Reco.

# QUELQUES SYMBOLES GRAPHIQUES UTILISÉS DANS L'OUVRAGE

---



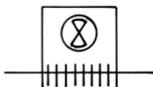
Condenseur évaporatif



Robinet manuel



Vanne principale  
pilotée



Condenseur à air



Vanne électromagnétique



Vanne 3 voies  
motorisée



Condenseur à eau



Soupape de sûreté



Vanne d'équilibrage  
2 voies



Compresseur



Contrôleur de niveau



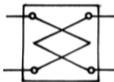
Flotteur basse ou haute  
pression



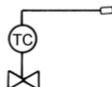
Pompe



Clapet anti-retour



Échangeur à plaques



Détendeur thermostatique



Vanne à pression  
constante



Vase d'expansion



Filtere déshydrateur

# A

---

## Généralités sur le froid industriel

# 1 • SPÉCIFICITÉS DU FROID INDUSTRIEL

---

Compte tenu de l'importance des puissances en jeu, la production du froid est généralement assurée par des centrales à plusieurs compresseurs.

Le coût des évaporateurs représentant une part importante du prix de ces installations, il est recherché une performance optimale de ces échangeurs. L'alimentation en « noyé » est donc la plus fréquente ; la technologie du régime noyé nécessite dans la plupart des cas l'utilisation de pompes à fluide frigorigène.

Du fait des débits importants en fluide frigorigène, les organes d'alimentation sont souvent spécifiques à ces installations.

En congélation ou en conservation de denrées surgelées, la compression biétagée est généralement nécessaire.

Les consommations d'énergie électrique étant très importantes, il est recherché une haute pression minimale. Les tours de refroidissement ouvertes (à chaleur latente) sont de ce fait très utilisées, les condenseurs évaporatifs se rencontrent également. Notons cependant que les problèmes de légionellose imposent une maintenance très stricte de ces matériels.

Dans le but d'optimiser le fonctionnement, les réglages et les choix technologiques doivent être les meilleurs possibles.

Les quantités de fluide frigorigène étant importantes, on doit porter une attention toute particulière au contrôle de l'étanchéité des installations. Il convient donc, à la conception de ces machines, de rechercher la technologie conduisant à une quantité de fluide frigorigène minimale.

Les installations récentes sont régulées à partir de régulateurs ou d'automates numériques. Ces régulations permettent d'optimiser au maximum le fonctionnement de ces machines : la gestion optimale de la consommation d'énergie

est l'une des possibilités offertes (délestages, fonctionnement prioritaire aux heures creuses...).

Les fluides frigorigènes utilisés en froid industriel sont spécifiques : ils sont caractérisés principalement par une production frigorifique au mètre cube aspiré importante, permettant de limiter les cylindrées des compresseurs, donc leur coût. En outre, la recherche d'un confinement maximal du fluide frigorigène entraîne la réalisation quasi systématique d'une étude de faisabilité de ces installations avec fluide frigoporteur.

Les vannes sont généralement à servocommande.

Les applications pratiques du froid industriel concernant les denrées périssables sont nombreuses : abattoirs, conserveries, entrepôts frigorifiques, laiteries, chocolateries, séchoirs à saucissons, brasseries, sociétés productrices de crème glacée, fromageries, etc.

Les autres applications sont également nombreuses et variées : patinoires, installations de dessalage de l'eau de mer, chimie, pétrochimie, séchoirs à céréales et autres, process de concentration, etc.

En résumé, fiabilité maximale et consommation d'énergie électrique minimale sont sans doute les critères essentiels que retiennent les concepteurs de ces machines.

## 2 • LES FLUIDES FRIGORIGÈNES UTILISÉS EN FROID INDUSTRIEL

---

### 2.1 Généralités

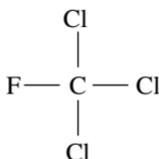
La prise de conscience environnementale a conduit à la recherche de fluides frigorigènes ayant le moins d'impact possible sur l'environnement. Le premier impact environnemental constaté a été la dégradation de l'ozone stratosphérique due au chlore. L'ozone stratosphérique ( $O_3$ ) fait office de bouclier en ce qui concerne des rayonnements solaires ayant un impact négatif sur les êtres vivants sur terre. Les molécules  $O_3$  bloquent en effet de nombreux rayonnements solaires et les réfléchissent vers l'espace. Le maintien de la couverture terrestre par une couche d'ozone est donc crucial. En conséquence, les fluides les plus chlorés ont d'abord été abandonnés, il s'agit des **CFC (R12, R11, etc.)**.

Des fluides moins chlorés (les **HCFC**) ont alors été majoritairement employés. Cependant, la prise de conscience environnementale étant de plus en plus répandue, les **HCFC** ont à leur tour été supprimés (**R22, etc.**). Des fluides non chlorés ont alors été largement utilisés (**HFC**). Parmi ces **HFC**, certains ont un impact très négatif sur le réchauffement climatique. On parle de **GWP** (*Global Warming Potential*). L'activité humaine est génératrice d'importantes productions thermiques, une grande partie des rayonnements qui en découle s'évacue vers la stratosphère. Certaines molécules en bloquant ces rayonnements contribuent à produire l'effet de serre, c'est le cas des fluides à fort **GWP**. En conséquence, les **HFC** présentant de forts **GWP** sont actuellement de moins en moins utilisés et sont remplacés par des fluides à faible **GWP**.

Dès 2020, la législation F-gaz stipule l'interdiction de tout fluide frigorigène vierge à **PRG** supérieur à **2 500 kg Eq. CO<sub>2</sub>** pour l'entretien et la maintenance d'équipement de réfrigération ayant une charge supérieure à **40 t. Eq. CO<sub>2</sub>** (correspondant à **10,2 kg de R404A**). À partir de 2030, cette interdiction sera étendue à l'utilisation de ce fluide régénéré ou recyclé pour ce même objectif.

## 2.2 Termes ou expressions spécifiques des fluides frigorigènes

- **ODP** : *ozone depletion power* ou potentiel de destruction de l'ozone.  
La molécule qui sert de référence au calcul de l'ODP est le **R11**. Le R11 est le trichlorofluorométhane dont la formule est **CCl<sub>3</sub>F**.



**ODP du R11 = 1**

Les fluides comportant un ou plusieurs atomes de chlore dans leur molécule ont un ODP supérieur à zéro. Tous les fluides chlorés sont actuellement interdits.

- **GWP** : *Global Warming Potential* ou potentiel de réchauffement global.  
Le fluide qui sert de référence au GWP est le CO<sub>2</sub> dont la valeur est égale à 1. L'abréviation GWP est souvent associée à l'indice **100 (GWP<sub>100</sub>)**, cela veut dire que l'impact du réchauffement couvre une période de 100 ans. Cet indice caractérise l'action d'un composé chimique sur l'effet de serre.
- **TEWI** : *Total Equivalent Warming Impact* ou impact de réchauffement total équivalent.

C'est un concept qui caractérise l'impact global d'un équipement sur le réchauffement climatique durant toute sa durée de vie opérationnelle. Cet indice comprend l'effet direct dû aux fuites de fluide frigorigène et l'effet indirect provenant des émissions de CO<sub>2</sub> dues à la consommation d'énergie nécessaire au fonctionnement de cette installation.

## 2.3 Classification et caractéristiques de base des fluides frigorigènes

### 2.3.1 CFC : abréviation de chlorofluorocarbone

Le plus connu des CFC était le R12.

**ODP du R12 = 1**

**GWP<sub>100</sub> du R12 = 10 900** selon IPCC 4 et 10 200 selon IPCC 5

Température d'ébullition à la pression atmosphérique : - 29,8 °C.

La molécule du R12 est constituée d'un atome de carbone, de 2 atomes de chlore et de 2 atomes de fluor.

La production des CFC donc du R12 a été interdite à partir du 1<sup>er</sup> janvier 1995.

### 2.3.2 HCFC : abréviation de hydrochlorofluorocarbone

Le plus connu des HCFC est le R22.

Le R22 est un fluide chloré : **ODP = 0,055**.

**GWP<sub>100</sub> = 1 810** selon IPCC 4 et 1 760 selon IPCC 5.

Température d'ébullition à la pression atmosphérique : - 40,8 °C.

La molécule du R22 est constituée d'un atome de carbone, d'un atome de chlore, d'un atome d'hydrogène et de 2 atomes de fluor.

L'utilisation des HCFC, donc du R22 a été interdite à partir du 1<sup>er</sup> janvier 2015.

### 2.3.3 Les HFC : abréviation de hydrofluorocarbone

Le plus connu des HFC est le R134a.

**ODP de ce fluide : 0.**

**GWP<sub>100</sub> = 1 430** selon IPCC 4 et 1 300 selon IPCC 5.

Température d'ébullition à la pression atmosphérique : - 26,08 °C.

L'indice « a » indique que la molécule est isomérique.

Constitution de la molécule : 2 atomes de carbone, 2 atomes d'hydrogène et 4 atomes de fluor.

Le R134a est à ce jour très utilisé, cependant, son potentiel de réchauffement étant relativement élevé (1 300), son remplacement par des fluides à faible GWP est dès à présent envisagé.

### 2.3.4 Les azéotropes

Les azéotropes sont des mélanges. Les azéotropes ont un comportement analogue aux fluides purs, c'est-à-dire qu'à l'état saturant, leur relation pression-température est constante. Ils sont classés dans la série des R500. Le premier azéotrope mis au point est le R500, le second est le R501, etc. Exemple d'azéotrope : le R507A dont la composition est la suivante :

50 % de R125 ; 50 % de R134a

**ODP = 0**

**GWP<sub>100</sub> = 3 985** selon IPCC 4

Température d'ébullition à la pression atmosphérique : - 47,1 °C.

### 2.3.5 Les zéotropes

Les zéotropes sont des mélanges. Ils sont classés dans la série des R400, leur appellation correspond à l'ordre de leur codification : R401 ; R402, etc. Ces mélanges ont des glissements de température. Les glissements correspondent à des changements de température lors du changement d'état à pression constante. En fonction des fluides, ces glissements peuvent varier de quelques dixièmes de degré jusqu'à 10 °C.

Exemple de fluide zéotrope : R404A

Composition : 44 % de R125 ; 52 % de R143a et 4 % de R134a.

Température d'ébullition à la pression atmosphérique : - 46,5 °C (température de bulle) et - 45,7 (température de rosée).

Le glissement de ce fluide est donc de 0,8 °C.

La température de bulle correspond à la température de début d'ébullition, la température de rosée correspond à la température de fin d'ébullition.

**ODP = 0.**

**GWP<sub>100</sub> = 3 922** selon IPCC 4 et 3 943 selon IPCC 5.

### 2.3.6 Les fluides naturels... ou fluides à faible GWP

Les seuls fluides naturels sont en fait l'air et l'eau. Le CO<sub>2</sub>, le propane, l'isobutane et l'ammoniac sont tous transformés chimiquement. Dire qu'ils sont naturels n'est donc pas exact, il vaut mieux les qualifier de fluides à faible GWP. Ils sont classés dans la série des R700. L'appellation normalisée est R700 auquel il faut ajouter la valeur de la masse moléculaire.

Exemple :

L'eau (H<sub>2</sub>O) = R(700 + 2 + 16) = R718

L'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) =  $R(700 + 14 + 3) = R717$

**ODP = 0**

**GWP<sub>100</sub> = 0**

Le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) =  $R(700 + 12 + 32) = R744$

**ODP = 0**

**GWP<sub>100</sub> = 1**

### 2.3.7 Les hydrocarbures

Il s'agit de composés chimiques dont la molécule ne contient que du carbone et de l'hydrogène.

Exemple :

– le propane (**R290**)

Température d'ébullition à la pression atmosphérique normale : – 42 °C

**ODP = 0**

**GWP = 3**

– l'isobutane (**R600a**) ou méthylpropane

Température d'ébullition à la pression atmosphérique normale : – 11,7 °C

**ODP = 0**

**GWP = 3**

Ces fluides étant très inflammables, leur utilisation est limitée aux petites puissances, par exemple le froid domestique et dans les équipements hermétiques scellés.

Par ailleurs, la manipulation de ces fluides demande une formation spécifique préalable.

### 2.3.8 Les HFO

HFO est l'abréviation de hydrofluorooléfine. Il s'agit là de fluides de synthèse. Les HFO sont des fluides récents à ODP zéro et à faible GWP.

Ce faible GWP s'explique par la faible durée de vie de la molécule dans l'atmosphère.

La gamme des HFO est déjà importante, citons par exemple :

– le solstice yf : **HFO-1234 yf**

**GWP = 4** selon IPCC 4 et inférieur à 1 selon IPCC 5 ;

– le solstice ze : **HFO-1234 ze**

**GWP = 7** selon IPCC 4 et inférieur à 1 selon IPCC 5 ;

– le solstice zd : **HFO-1233 zd**

- GWP = 5** selon IPCC 4 et 1 selon IPCC 5 ;  
 – le solstice N 13 : **HFO blend (R-450A)**  
 GWP = 605 selon IPCC 4 et 547 selon IPCC 5.

## 2.4 Qualités d'un bon fluide frigorigène

- La consommation d'énergie électrique des installations frigorifiques industrielles représente une part importante des frais de fonctionnement, la recherche de fluides frigorigènes à effet frigorifique maximal est donc évidente.

$$\text{Effet frigorifique ou COP} = \frac{\text{Puissance frigorifique}}{\text{Puissance électrique absorbée}}$$

Il importe donc que 1 kWh d'énergie électrique consommée permette d'évacuer le maximum d'énergie thermique (en kWh) du médium à refroidir.

Le COP peut varier de **0,6 à 3** dans les applications classiques en froid industriel, voire au-delà ou en de ça dans les applications particulières.

- Le coût des installations frigorifiques industrielles est important, les compresseurs en représentent une part significative.
- La recherche de fluides frigorigènes permettant de faibles cylindrées est donc évidente.

Cette faible cylindrée est possible à partir de fluide présentant une forte production frigorifique volumétrique (en kilojoules par mètre cube aspiré). La production frigorifique volumétrique dépend des deux facteurs suivants :

- forte chaleur latente d'ébullition (**kJ/kg**) ;
- faible volume massique des vapeurs à l'aspiration (**m<sup>3</sup>/kg**).

$$\begin{aligned} \text{Production frigorifique volumétrique} = \\ \frac{\text{Chaleur latente d'ébullition}}{\text{Volume spécifique des vapeurs à l'aspiration}} = \frac{\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}} = \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \end{aligned}$$

Les deux caractéristiques ci-dessus sont prioritairement prises en compte lors du choix d'un fluide frigorigène.

### Remarque

Il est à noter qu'un fluide frigorigène peut être doté d'une forte production frigorigène volumétrique et développer un faible effet frigorigène (COP).

Le choix d'un fluide doit prioritairement tenir compte du COP.

Le COP est le reflet de la consommation énergétique de l'installation sur la durée de sa vie.

Le TEWI est le reflet de la consommation énergétique et de l'impact sur l'effet de serre de l'installation sur la durée de sa vie.

### ■ Autres qualités demandées à un fluide frigorigène

- Faible taux de compression.
- Basse pression supérieure à la pression atmosphérique en fonctionnement normal.
- Faible température de fin de compression (une température élevée n'est pas favorable à la stabilité chimique de l'huile et du fluide frigorigène).
- Miscibilité à l'huile. La miscibilité huile fluide frigorigène est indispensable pour assurer le retour de l'huile au compresseur. La sélection de l'huile est donc importante. Cette remarque vaut surtout pour les installations à alimentation sèche des évaporateurs.
- Prix compétitif.
- Bonne disponibilité.
- Faible toxicité.
- Recherche des fuites faciles.
- Faible volume massique du liquide (influence sur le prix des canalisations liquides).
- Faible influence sur le réchauffement climatique (GWP).

De très nombreuses autres qualités sont à prendre en compte, telles que l'influence sur l'ozone et l'effet de serre, l'influence sur les composants de l'installation, la non-inflammabilité, la non-explosibilité, l'absence d'action sur les denrées entreposées, etc.

Le choix d'un fluide n'est donc pas toujours très évident, c'est un compromis entre de multiples critères : lors du choix, que privilégie-t-on ?

- Le coût à l'installation.
- Le COP (consommation d'énergie) et le TEWI.
- L'environnement.
- La sécurité du personnel.
- La maintenance.

- Le temps de retour sur investissement, etc.

Notons enfin que quelquefois, le client et les bureaux d'études imposent un fluide.

### Remarque

Certains fluides étant intéressants dans la plupart des domaines mais présentant un potentiel d'effet de serre global élevé sont actuellement évités.

Les fluides ayant un GWP supérieur à 1 500 pourront être utilisés jusqu'en 2025. À partir de 2030, les fluides frigorigènes devront avoir un GWP inférieur à 150 (voir la F-GAZ).

## 2.5 Quelques éléments de physiques se rapportant aux fluides frigorigènes

Les fluides frigorigènes se déclinent sous trois formes : les fluides purs, les mélanges azéotropiques et les mélanges zéotropiques.

### 2.5.1 Les fluides purs

#### ■ Lois d'ébullition des fluides purs

- Sous une même pression, le liquide pur commence toujours à bouillir à la même température.
- Pendant toute la durée de l'ébullition, la température reste constante si la pression reste constante.

#### ■ Lois de condensation des fluides purs

- Sous une même pression, la vapeur commence toujours à se condenser à la même température.
- Pendant toute la durée de la condensation, la température reste constante si la pression reste constante.

### 2.5.2 Les mélanges azéotropes (série des R500)

■ Exemple de fluide azéotropique : le R507.

Le R507 est constitué de **50 % de R125** et de **50 % de R143a**.

Ce fluide a un glissement quasi nul, ses températures de changement d'état sont donc constantes dans la mesure où les pressions sont constantes. Les fluides azéotropiques se comportent donc comme des fluides purs.

### 2.5.3 Les fluides zéotropiques (série des R400)

■ Exemples de fluide zéotropiques : le R404A, le R407C, etc.

Les fluides zéotropiques sont caractérisés par un glissement de température. Le *glissement* est l'écart de température entre le début et la fin du changement d'état physique d'un fluide à pression constante.

**Tableau 2.1** – Exemples de glissements  
Ces valeurs de glissement correspondent à la pression de **1,013 bar**.  
Elles diffèrent sous d'autres pressions.

Fluide frigorigène	Glissement
R404A	1 °C
R407C	7 °C

#### ■ Lois d'ébullition des fluides zéotropiques

- Sous une même pression, un liquide commence toujours à bouillir à la même température.
- Sous une même pression, pendant toute la durée de l'ébullition, la température augmente.

La température de début d'ébullition est appelée *température de saturation liquide* ou *température de bulle*.

La température de fin d'ébullition est appelée *température de saturation vapeur* ou *température de rosée*.

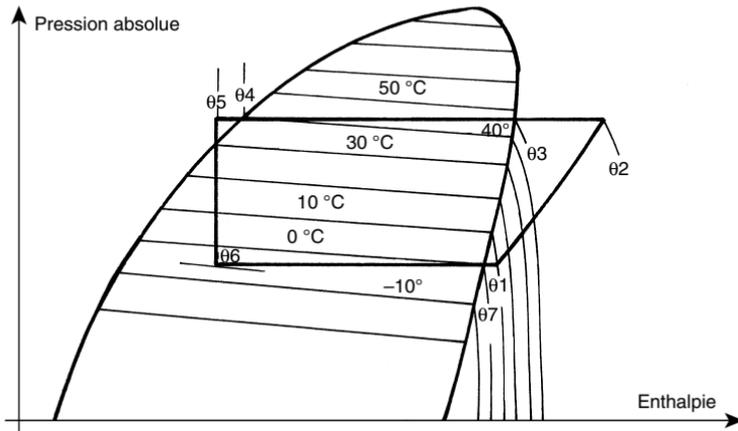
#### ■ Loi de condensation des fluides zéotropiques

- Sous une même pression, la vapeur commence toujours à se condenser à la même température.
- Sous une même pression, pendant toute la durée de la condensation, la température de condensation diminue.

La température de début de condensation est appelée *température de saturation vapeur* ou *température de rosée*.

La température de fin de condensation est appelée *température de saturation liquide* ou *température de bulle*.

Valeurs spécifiques d'un cycle sur diagramme enthalpique d'un fluide zéotropique :



**Figure 2.1** – Tracé d'un cycle sur diagramme enthalpique d'un fluide zéotropique.  
En ordonnée : la pression est en bar absolu  
En abscisse, l'enthalpie est en kJ/kg

θ1 : Température des gaz aspirés : **10 °C**.

θ2 : Température de fin de compression.

θ3 : Température de début de condensation (**47 °C**). On parle de température de rosée.

θ4 : Température de fin de condensation (**40 °C**). On parle de température de bulle.

θ5 : Température du fluide frigorigène liquide sous refroidi (**30 °C**).

θ6 : Température de début d'ébullition (**-6 °C**).

θ7 : Température de fin d'ébullition (**0 °C**). On parle de température de rosée.

### ■ La surchauffe

La surchauffe est l'écart entre la température de rosée et la température des gaz aspirés par le compresseur. La surchauffe dans l'exemple ci-dessus est  $\theta_1 - \theta_7 = 10 - 0 = 10 \text{ °C}$ .

#### Remarque

La surchauffe totale est l'addition de la surchauffe à l'évaporateur plus les apports de chaleur jusqu'à l'aspiration du compresseur.

La puissance frigorifique efficace tient compte uniquement de la surchauffe à l'évaporateur.

En fait, les installations étant souvent assez différentes, l'effet utile demande une réflexion spécifique.

### ■ Le sous-refroidissement

Le sous-refroidissement est l'écart entre la température de bulle et la température en amont de l'organe de détente. Le sous-refroidissement dans l'exemple ci-dessus est  $\theta_4 - \theta_5 = 40 - 30 = 10 \text{ °C}$ .

La température moyenne de condensation est :  $\frac{47 + 40}{2} = 43,5 \text{ °C}$ .

La température moyenne d'ébullition est :  $\frac{-6 + 0}{2} = -3 \text{ °C}$ .

#### Remarque

Il est pris ici par commodité  $10 \text{ °C}$  de sous-refroidissement et  $10 \text{ °C}$  de surchauffe, dans la réalité, ces valeurs sont plus proches de  $5 \text{ °C}$ . Chaque application a ses valeurs spécifiques.

En règle générale, une machine est très performante lorsqu'elle fonctionne avec un grand sous-refroidissement et une faible surchauffe.

### ■ Température critique

La liquéfaction d'un gaz n'est plus possible au-delà d'une température limite quelle que soit la pression exercée ; cette température limite a reçu le nom de température critique.

En froid industriel, le nombre de fluides frigorigènes possibles est important ; on trouvera entre autres : le R407F, le R404A, le R507, le R744 ( $\text{CO}_2$ ), le R17 (l'ammoniac), etc.