

AIDE-MÉMOIRE

Froid industriel

La RPF & www.larpf.fr

L'offre d'information bimédia des professionnels
de la réfrigération



10 numéros par an

- Une analyse détaillée des évolutions techniques et réglementaires.
- Des retours d'expériences d'installateurs sur des réalisations complexes.
- Une rubrique "spéciale ENR".
- L'actualité marquante du secteur commentée par les professionnels.



À tout moment sur www.larpf.fr avec vos codes d'accès

- Un accès aux ressources métiers en illimité à des documents de référence (textes législatifs, bases documentaires multimédia, schémas techniques,...).
- Des dossiers d'experts délivrés par des professionnels reconnus : des cas concrets, des retours d'expériences, etc.
- Tous les articles archivés de la RPF.
- Une base de données produits et services et un annuaire Pro.

Pour vous abonner, rendez-vous sur www.larpf.fr/Boutique
ou contactez-nous au 01 53 26 48 00

Jean **Desmons**

AIDE-MÉMOIRE

Froid industriel

3^e édition

Préface de Louis **Lucas**

Président de l'Association française du froid

Directeur honoraire de l'Institut internationale du froid

**La
Rpf**

DUNOD

Graphisme de couverture : Nicolas HUBERT

Photographie de couverture : © AP – fotolia.com

Illustrations intérieures : Ursula et Alain BOUTEVEILLE-SANDERS

<p>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.</p> <p>Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} 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</p>	<p>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).</p>
--	---

DANGER
**LE PHOTOCOPIAGE
TUE LE LIVRE**

© Dunod, Paris, 2006, 2010, 2014

ISBN 978-2-10-070943-4

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

A

Généralités sur le froid industriel

1 • Spécificités du froid industriel	3
2 • Les fluides frigorigènes utilisés en froid industriel	5
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 (NH3)	23
2.8 Le dioxyde de carbone (CO2)	26
2.9 Étude comparative entre le R404A, le R507, le R717 et le R407F	28

3 •	Spécificités de la compression monoétagée	37
4 •	Principe de la compression biétagée	41
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
5 •	Compresseurs industriels à pistons monoétagés	47
5.1	Principales caractéristiques des compresseurs à pistons monoétagés	47
5.2	Réduction de puissance	49
5.3	Lubrification	53
6 •	Compresseurs à vis	59
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 bivis	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	Volume index (Vi) des compresseurs à vis	77
6.10	Lubrification	79
6.11	Exemples de centrales frigorifiques équipées de compresseurs à vis	83
7 •	Pompes à fluide frigorigène	87
8 •	Différentes technologies possibles des machines industrielles	91
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 régulateur 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

12 • Dégivrages	137
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
13 • Les Centrales frigorifiques	147
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
14 • Régulateurs de pression et vannes	163
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
15 • Les fluides frigopORTEURS	173
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
16 • Le CO₂ comme fluide frigorigène	195
16.1 Généralités	195
16.2 Avantages du CO ₂	203
16.3 Inconvénients du CO ₂	203
16.4 Le CO ₂ vis-à-vis de l'eau	204
16.5 Le CO ₂ et l'ammoniac	206
16.6 Dégivrage des installations au CO ₂	209

17 •	Sécurités et contrôles en froid industriel	211
17.1	Sécurités et contrôles concernant la partie électrique	211
17.2	Sécurités et contrôles concernant le domaine aéraulique	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
18 •	Problèmes des sols en température négative	227
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
19 •	Soupapes d'équilibrage	229
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
20 •	Isolation thermique	235
20.1	Étude d'une paroi plane	235
20.2	Étude des températures d'une tuyauterie isolée	239
21 •	Congélation et surgélation	243
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

22	• Installation monoétagée à deux températures différentes et à récupération de chaleur	257
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
23	• Entrepôt frigorifique polyvalent	265
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
24	• Abattoir à volailles	275
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
25	• Patinoire	307
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
26	• Entrepôt frigorifique	323
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
27	• La chaîne du froid	333
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
28	• La chaîne du froid du beurre	341
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

29 • La chaîne du froid du saucisson sec	353
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
30 • Fabrication de la bière	363
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

31 • Défaut de conception d'un collecteur d'aspiration	371
31.1 Éléments succincts de l'installation	371
31.2 Coups de liquide	371
31.3 Intervention	371
31.4 Constatations et conclusion	372
32 • Défaut de conception de bouteilles séparatrices	373
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

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

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.

AVERTISSEMENT

Le froid industriel demande la mise en jeu d'investissements très importants ; par ailleurs, dans le domaine agroalimentaire, les denrées entreposées représentent un capital assez considérable.

Cette spécialisation « froid industriel » accepte donc encore moins « l'à-peu-près » que d'autres techniques, et demande, en conséquence, un enthousiasme, un esprit de responsabilité et un investissement personnel importants.

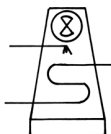
Les possibilités technologiques étant nombreuses, chaque société, chaque spécialiste, développe souvent ses propres concepts d'installation ; les installations décrites ici pourraient donc, à finalités identiques, être conçues différemment et à partir de matériels de marques différentes. Les cas concrets développés ici s'appuient sur des équipements existants.

Notons enfin que, en plus de la technologie spécifique, le spécialiste en froid industriel, pour être crédible près du client, doit avoir la connaissance – même succincte – du processus de fabrication des applications le concernant. C'est pourquoi, dans les chapitres 26 à 29, nous décrivons la chaîne du froid et nous donnons le principe d'élaboration de quelques produits. Le nombre d'applications du froid industriel étant très grand, l'étude de l'ensemble sortirait du cadre de cet aide-mémoire.

L'objectif de pérennité de ces installations fait que certains éléments sont aujourd'hui remplacés ou en voie d'être remplacés par des composants permettant de mieux répondre aux normes actuelles.

Les principes de fonctionnement restent cependant les mêmes (voir chapitre 35).

QUELQUES SYMBOLES GRAPHIQUES UTILISÉS DANS L'OUVRAGE



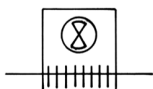
Condenseur évaporatif



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



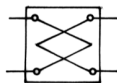
Floteur basse ou haute pression



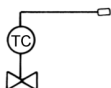
Pompe



Clapet anti-retour



Échangeur à plaques



Détendeur thermostatique



Vanne à pression constante



Vase d'expansion



Filtre déshydrateur

A

Généralités sur le froid industriel

1 • SPÉCIFICITÉS DU FROID INDUSTRIEL

A

GÉNÉRALITÉS SUR LE 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 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 frigorigène maximal est donc évidente.

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

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 frigorigène volumétrique (en kilojoules par mètre cube aspiré).

La production frigorigène volumétrique dépend des deux facteurs suivants :

- forte chaleur latente d'ébullition (**kJ/kg**) ;
- faible volume massique des vapeurs à l'aspiration (**m³/kg**).

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

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 frigorigère volumétrique et développer un faible effet frigorigère (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.

À court terme, les fluides ayant un GWP supérieur à 2 500 seraient déconseillés voire interdits.

2.2 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.

2.2.1 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.

2.2.2 Les mélanges azéotropiques (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.

2.2.3 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 :

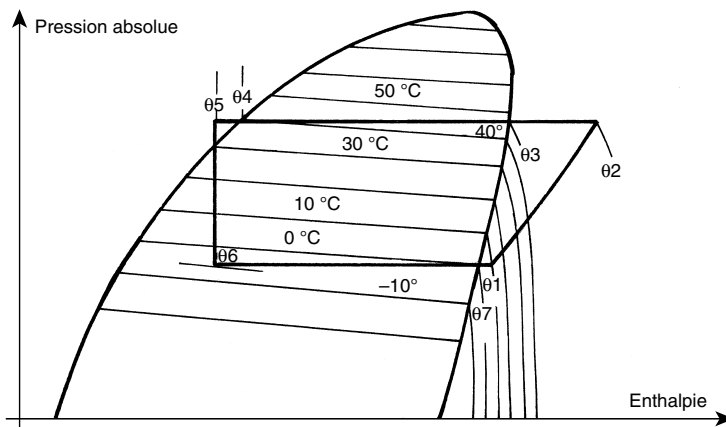


Figure 2.1 – Tracé d'un cycle sur diagramme enthalpique d'un fluide zéotropique.

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.

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

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

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

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

07 : 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 °C** de sous-refroidissement et **10 °C** de surchauffe, dans la réalité, ces valeurs sont plus proches de **5 °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.