

LA PRODUCTION DE FROID DANS LE MILIEU AGRO-ALIMENTAIRE, INDUSTRIEL ET TERTIAIRE

Impacts environnementaux et applications techniques

auteur : Alex Bertrand

cahier 04
février 2006

Les cahiers de la production propre publiés par le Centre de Ressources des Technologies pour l'Environnement (CRTE)



CENTRE DE RESSOURCES DES TECHNOLOGIES POUR
L'ENVIRONNEMENT
UNE STRUCTURE DU MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT
ET DU CRP HENRI TUDOR



CENTRE DE RECHERCHE PUBLIC
HENRI TUDOR
www.tudor.lu

Avant-propos

Le froid est devenu une forme d'énergie importante dans notre société. Utilisée dans un grand nombre de secteurs et sous de nombreuses formes (conservation de denrées périssables, climatisation, refroidissement de procédés industriels etc.), elle n'est cependant pas sans effet sur notre milieu naturel.

Les systèmes frigorifiques à compression nécessitent en effet pour leur fonctionnement l'utilisation de fluides frigorigènes, qui ont généralement des impacts néfastes pour l'environnement. Les chlorofluorocarbures (CFC), ainsi que les hydrochlorofluorocarbures (HCFC), considérés jusqu'aux années 80 comme des réfrigérants « miracles » en raison de leurs excellentes propriétés physiques, ne peuvent plus être utilisés en raison de leur capacité de destruction de la couche d'ozone stratosphérique. De plus, même si les fluides de remplacement (les HFC et les fluides naturels tels l'ammoniac), sont neutres vis-à-vis de la couche d'ozone, ils n'en demeurent pas moins dangereux pour notre milieu naturel : effet de serre, acidification, etc. D'autres facteurs, tels la consommation énergétique, le bruit, l'utilisation et le traitement de l'eau de refroidissement, ont également des répercussions sur l'environnement.

Ceci rend difficile l'élaboration ou l'amélioration des installations frigorifiques : non seulement le système doit atteindre son but primaire, c.-à-d. produire du froid, mais de plus, ses émissions ne doivent pas engendrer d'effets néfastes sur l'environnement.

C'est afin de faciliter ces choix que ce cahier de la production propre a été rédigé. Il décrit les principaux problèmes environnementaux rencontrés dans le domaine de la production du froid et donne un aperçu des possibilités d'optimisation des réfrigérants, de la consommation énergétique, de l'utilisation de l'eau dans les tours de refroidissement et de l'impact sonore. Le sujet étant vaste, les optimisations proposées ici ne sont pas exhaustives. L'expérience d'un bureau d'ingénieur et d'un frigoriste peuvent s'avérer utiles pour compléter les mesures reprises dans ce document.

Ce cahier s'adresse principalement aux entreprises qui se trouvent dans la situation de devoir développer ou d'améliorer leur installation. Notons qu'une version plus synthétique (guide de la production propre) a également été élaborée. Destinée aux techniciens responsables de l'entretien, elle reprend les mesures pratiques mentionnées dans ce document.

Table des matières

1	LES SYSTEMES FRIGORIFIQUES ET LEURS IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT.....	11
1.1	LA DESTRUCTION DE LA COUCHE D'OZONE STRATOSPHERIQUE	11
1.1.1	La couche d'ozone	11
1.1.2	Les systèmes frigorifiques et la couche d'ozone	11
1.2	L'EFFET DE SERRE	13
1.2.1	Le problème de l'effet de serre	13
1.2.2	Les systèmes frigorifiques et la valeur TEWI	13
1.3	L'ACIDIFICATION	15
1.3.1	Le phénomène d'acidification anthropique	15
1.3.2	Les systèmes frigorifiques et l'acidification anthropique	15
1.4	L'OZONE TROPOSPHERIQUE	16
1.4.1	L'ozone troposphérique	16
1.4.2	Les systèmes frigorifiques et l'ozone troposphérique.....	16
1.5	LES CONCLUSIONS	17
2	LES FLUIDES FRIGORIGENES.....	18
2.1	LES RÉFRIGÉRANTS.....	18
2.1.1	Les classes de réfrigérants	19
2.1.2	Le R134a.....	22
2.1.3	Le R404A	24
2.1.4	Le R407C	26
2.1.5	Le R410A	28
2.1.6	Le R717 (ammoniac)	30
2.1.7	Le R290 (propane)	32
2.1.8	Le R744 (dioxyde de carbone)	34
2.1.9	Le R718 (eau)	36
2.1.10	Comparaison des fluides frigorifiques.....	38
2.2	LES ÉMISSIONS DE FLUIDES FRIGORIGÈNES	40
2.2.1	Les émissions fugitives.....	41
2.2.2	Les dégradations d'étanchéité	41
2.2.3	Les pertes par éléments de sécurité	42
2.2.4	Les ruptures de composants	43
2.2.5	Les pertes par manipulations des fluides	43
2.2.6	Les pertes accidentelles	44
2.2.7	Les pertes en fin de vie.....	44
2.3	LA SUBSTITUTION DE RÉFRIGÉRANTS.....	46
2.3.1	Les critères de substitution	46
2.3.2	Les fluides de substitution du R22	48

3	L'INSTALLATION TECHNIQUE	52
3.1	LES TECHNIQUES DISPONIBLES	52
3.1.1	Le système à absorption	52
3.1.2	Le système à compression à air	53
3.1.3	Le système à adsorption	53
3.1.4	Le système thermoélectrique	53
3.2	LE SYSTÈME À COMPRESSION	54
3.2.1	Les composants principaux.....	54
3.2.2	Le principe de fonctionnement d'un système à compression	57
3.2.3	Les configurations.....	57
3.3	L'OPTIMISATION ÉNERGÉTIQUE DE L'INSTALLATION	60
3.3.1	L'adaptation des températures de condensation et d'évaporation	60
3.3.2	Le sous-refroidissement	61
3.3.3	Le différentiel de régulation de la température d'évaporation	62
3.3.4	La variation de vitesse.....	63
3.3.5	Le free-cooling	64
3.3.6	L'exploitation de l'énergie frigorifique.....	65
4	L'EAU DE REFROIDISSEMENT	68
4.1	LA CONSOMMATION EN EAU.....	68
4.1.1	L'eau de pluie	68
4.1.2	La configuration du circuit d'eau de refroidissement des condenseurs	68
4.1.3	Les pertes d'eau par évaporation	69
4.1.4	Les pertes par purges.....	69
4.1.5	Les pertes par éclaboussures	70
4.1.6	Les pertes par fuites de composants	70
4.2	LE TRAITEMENT DES EAUX DE REFROIDISSEMENT	71
4.2.1	Les mesures générales préventives	72
4.2.2	Les mesures anti-corrosion	72
4.2.3	Les traitements anti-tartre	73
4.2.4	Les mesures contre l'encrassement.....	73
4.2.5	Les mesures anti-organismes	73
4.2.6	Les eaux de purges traitées chimiquement	74
5	LES NUISANCES SONORES.....	76
5.1	LES MESURES DE PRÉVENTION	76
5.2	LES MESURES D'ATTÉNUATION.....	77

6	LA LEGISLATION CONCERNANT LA PRODUCTION DE FROID	78
6.1	LA LÉGISLATION LUXEMBOURGEOISE.....	78
6.1.1	La loi modifiée du 10 juin 1999 relative aux établissements classés.....	78
6.1.2	La loi modifiée du 17 juin 1994 relative à la prévention et à la gestion des déchets.....	79
6.1.3	La loi du 14 avril 1992 portant réglementation de la mise sur le marché de substances qui appauvrissent la couche d'ozone.....	79
6.1.4	La loi modifiée du 5 août 1993 concernant l'utilisation rationnelle de l'énergie....	80
6.1.5	La loi du 29 juillet 1993 concernant la protection et la gestion de l'eau.....	80
6.1.6	Le règlement grand-ducal du 13 février 1979 concernant le bruit dans les alentours immédiats des établissements et des chantiers.....	80
6.1.7	Le règlement grand-ducal du 18 avril 2004 relatif au contrôle de fuites dans des équipements frigorifiques et climatiques.....	81
6.2	LA LÉGISLATION EUROPÉENNE.....	82
6.2.1	Le règlement (CE) n° 2037/2000 du parlement européen et du conseil du 29 juin 2000 relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone.....	82
6.2.2	La proposition de règlement du parlement européen et du conseil relatif à certains gaz à effet de serre fluorés 2003/0189 (COD).....	82
7	ANNEXES	84
7.1	GLOSSAIRE.....	84
7.2	LE CALCUL DE LA VALEUR TEWI.....	88
8	BIBLIOGRAPHIE	93
9	LISTE DES ADRESSES UTILES	96

Liste des figures

figure 1-1 : répartition des sources anthropiques de gaz chlorés dans la stratosphère en 1999 [17]	11
figure 1-2 : émissions de gaz à effet de serre au Luxembourg en 2001, calculés selon la méthode IPCC [19]	13
figure 1-3 : source des émissions de gaz à effets de serre d'une installation frigorifique.....	14
figure 1-4 : émissions de substances acidifiantes au Luxembourg en 2000 [20].....	15
figure 3-1 : schéma de principe d'un système à absorption.....	52
figure 3-2 : schéma de principe d'un système à compression	57
figure 3-3 : cycle thermodynamique d'un système à compression	57
figure 3-4 : schéma de principe d'un système indirect côté évaporation	58
figure 3-5 : schéma de principe d'un système à compression biétagée	59
figure 3-6 : cycle thermodynamique d'un système à compression biétagée (ligne interrompue, comportement du système monoétagé consécutif)	59
figure 3-7 : variation d'enthalpie de compression suite à une réduction de la pression/température	60
figure 3-8 : sous-refroidissement du cycle.....	61
figure 3-9 : variation de la température d'évaporation	62
figure 3-10 : températures mensuelles moyennes sur une période de 9 ans [45].....	64

Liste des tableaux

tableau 2-1 : caractéristiques du R134a [9][3][43][16][18][7][47]	23
tableau 2-2 : caractéristiques du R404A [3][43][44][16][18][7][47]	25
tableau 2-3 : caractéristiques du R407C [3][43][44][16][18][7][47].....	27
tableau 2-4 : caractéristiques du R410A [3][16][18][7][43][47]	29
tableau 2-5 : caractéristiques du R717 [10][43][11][23][7][3][47]	31
tableau 2-6 : caractéristiques du R290 [12][43][13][16][23][3][7][47]	33
tableau 2-7 : caractéristiques du R744 [14][43][3][7][16][18][47]	35
tableau 2-8 : caractéristiques du R718 [3][16][23].....	37
tableau 2-9 : comparaison des propriétés principales des fluides frigorigènes	38
tableau 3-1 : amélioration du COP par diminution de la différence de température entre l'évaporation et la condensation du R22 (pour la variation d'évaporation - caractéristiques de base : $t_{\text{cond.}}$: 30°C, sous-refroidissement : 5K, surchauffe : 10K, pour la variation de condensation - caractéristiques de base : $t_{\text{évap.}}$: 0°C, sous-refroidissement : 5K, surchauffe : 10K) [1].....	60
tableau 3-2 : amélioration du COP par sous-refroidissement (pour $t_{\text{évap.}}$: -15°C, $t_{\text{cond.}}$: 30°C et rendement du compresseur 70% par rapport à la compression isentropique) [1]	61
tableau 3-3 : augmentation de la consommation électrique d'un compresseur en fonction du différentiel de température et de la charge thermique (fluide R22, $t_{\text{cond.}}$: 30,5°C, $t_{\text{évap.}}$: 0°C, température de consigne : 16°C, puissance électrique : entre 1,75 et 1,9 kW) [38].....	62
tableau 3-4 : réduction de la consommation électrique d'un compresseur à vitesse variable par rapport à un compresseur à vitesse fixe, (fluide R22, $t_{\text{cond.}}$: 35°C, $t_{\text{évap.}}$: 0°C, compresseurs de type Scroll, puissance électrique : 2,2 kW (vitesse fixe), 3,5 kW (vitesse variable), vitesse de rotation : 2 950 tr/min (vitesse fixe), 6 750 tr/min (vitesse variable) [39]	63
tableau 3-5 : estimation des gains énergétiques annuels d'une installation de free-cooling installée au Luxembourg (climatisation d'un local IT à une température de 23°C, temps de fonctionnement du système : 8 736 heures, free-cooling réalisée par deux aérorefroidisseurs, fonctionnement transitoire compresseur - free-cooling entre 9 et 15°C, puissance compresseur : 2 x 3,75 kW _{élec.}) [46].....	65
tableau 5-1 : puissance sonore de systèmes de refroidissement non atténués [27]	76
tableau 6-1 : niveaux de bruit à ne pas dépasser, à l'intérieur d'agglomérations, à la limite de la propriété la plus proche.....	81
tableau 7-1 : définition des phrases R et S selon annexes III et IV de la directive européenne 2001/59/CE	85
tableau 7-2 : groupe de sécurité selon la norme EN 378 [2]	86

tableau 7-3 : facteurs de définition de la valeur TEWI	88
tableau 7-4 : valeurs GWP de réfrigérants du type HFC [18]	89
tableau 7-5 : valeurs GWP de réfrigérants naturels [23]	90
tableau 7-6 : calcul de la valeur GWP du R404A	90
tableau 7-7 : taux de fuite annuel en % de la charge théorique de l'installation [21].....	91
tableau 7-8 : durée de vie théorique n tenant compte de transformations importantes [21].....	91
tableau 7-9 : taux de récupération α_{recovery} en % de la charge théorique de l'installation [21].....	91
tableau 7-10 : temps de fonctionnement d'installation de climatisation, (charges internes de chaleur: 30 W/m ²) [24]	92
tableau 7-11 : facteurs β des principaux réseaux luxembourgeois en 2001 [22]	92

Abréviations

AB	Alkylbenzène
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
CAS	Chemical Abstracts Service
CED2	Code Européen des Déchets (version 2)
CFC	Chlorofluorocarbure
COP	Coefficient Of Power
COV	Composés Organiques Volatiles
CRTE	Centre de Ressources des Technologies pour l'Environnement
EIPPCB	European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau
FEDIL	Fédération Des Industriels Luxembourgeois
GWP	Global Warming Potential
HC	Hydrocarbure
HCFC	Hydrochlorofluorocarbure
HFC	Hydrofluorocarbure
ILK	Institut für Luft- und Kältetechnik
ITM	Inspection du Travail et des Mines
IPCC	Integrated Pollution Prevention and Control
LCA	Life Cycle Assessment
MAK	Maximale Arbeitsplatzkonzentration
MSDS	Material Safety Data Sheet
ODP	Ozone Depletion Potential
TEWI	Total Equivalent Warming Impact
PAG	Polyalkylèneglycol
PAO	Polyalphaoléfine
POE	Polyolester
PFC	Perfluorocarbures
POCP	Photochemical Ozone Creation Potential
WMO	World Meteorological Organization

1 Les systèmes frigorifiques et leurs impacts sur l'environnement

Les impacts sur le milieu naturel des installations de production de froid ne se limitent pas aux fluides frigorigènes, mais proviennent également d'autres sources. Ce chapitre décrit les principaux problèmes environnementaux rencontrés dans le domaine du froid et donne un aperçu des causes principales de ces différentes formes de pollution.

1.1 La destruction de la couche d'ozone stratosphérique

1.1.1 La couche d'ozone

La couche d'ozone nous protège de rayons solaires ultra-violet nocifs pour l'homme et pour son environnement. Ces rayons peuvent causer des brûlures et cataractes chez les êtres vivants, la réduction du taux de croissance auprès de certaines plantes, etc. [5]. Cette couche d'ozone s'est appauvrie, au fil de ces dernières années, par réaction chimique avec certains atomes qui proviennent de la décomposition p.ex. de chlorofluorocarbures (CFC), de halons... Les scientifiques prévoient que les effets dus à l'homme sur la couche d'ozone devraient diminuer graduellement pour disparaître vers la moitié de ce siècle.



Pour en savoir plus :

<http://www.wmo.ch/web/arep/ozone.html>

Rapport scientifique concernant l'appauvrissement de la couche d'ozone, par l'organisation mondiale de météorologie (WMO), 2002

1.1.2 Les systèmes frigorifiques et la couche d'ozone

L'appauvrissement de la couche d'ozone est dû à des substances chlorées et bromées émises dans l'atmosphère. Bien que les molécules bromées aient dans la plupart des cas un potentiel élevé d'appauvrissement de la couche d'ozone (la valeur ODP, Ozone Depletion Potential), ce sont les molécules chlorées qui jouent un rôle prépondérant dans ce problème, car celles-ci sont émises en quantités plus importantes.

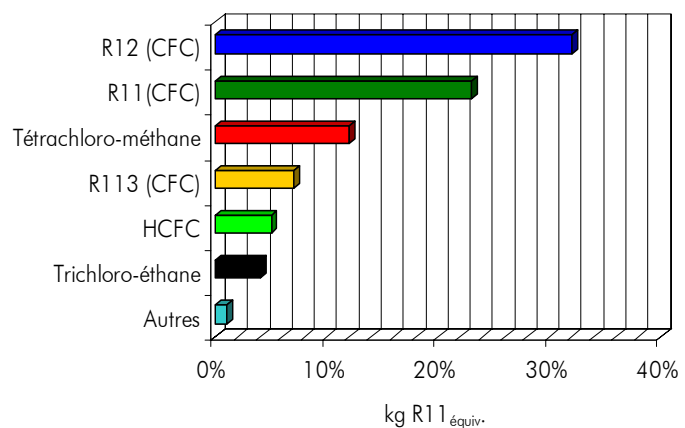


figure 1-1 : répartition des sources anthropiques de gaz chlorés dans la stratosphère en 1999 [17]

La figure 1-1, qui reprend les gaz chlorés principaux de source anthropique, met en évidence l'amplitude de l'impact qu'ont les installations de production de froid sur l'appauvrissement de la couche d'ozone, car c'est en tant que

réfrigérants que les CFC et HCFC sont le plus couramment utilisés. Ceux-ci sont partiellement interdits d'application selon le protocole de Montréal, et doivent être remplacés par des fluides n'ayant pas d'impact sur la couche d'ozone, du type hydrofluorocarbonés ou naturels.

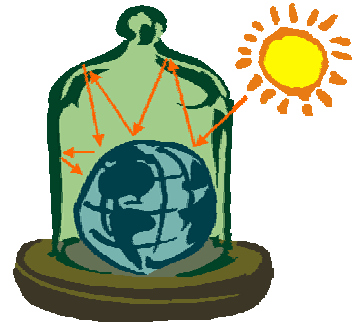


- Du point de vue de l'appauvrissement de la couche d'ozone, l'impact principale d'une installation de production de froid provient, dans le cas de l'utilisation de CFC ou de HCFC, de son réfrigérant. Les fluides de substitution sont généralement considérés comme n'ayant pas d'impact sur la couche d'ozone (voir chapitre 2.1.1 concernant les HFC).
- La contribution des émissions dues à la consommation énergétique est négligeable.

1.2 L'effet de serre

1.2.1 Le problème de l'effet de serre

Notre planète et l'atmosphère qui l'entoure sont réchauffés par le biais de rayonnement solaire. Une partie de ce rayonnement est reflétée alors qu'une autre partie est absorbée, soit par la surface terrestre, soit par les gaz situés dans l'atmosphère. Une partie de la chaleur est donc conservée dans notre atmosphère, comme dans une serre. Ce phénomène, au départ naturel, a pris au fil du dernier siècle de l'ampleur, car la quantité des émissions de ces gaz absorbants (les gaz à effet de serre, tels le CO_2) a fortement augmenté, entraînant des changements climatiques importants (fonte des glaces polaires, désertification, précipitations accrues, etc.). L'évolution du phénomène est d'une telle ampleur qu'un grand nombre d'initiatives, dont le protocole de Kyoto, ont été prises pour mettre un frein à ce développement.



Pour en savoir plus :

<http://www.ipcc.ch/>

Rapport concernant les changements climatiques, par le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC), 2001

1.2.2 Les systèmes frigorifiques et la valeur TEWI

Parmi les gaz à effet de serre, le dioxyde de carbone (CO_2) est la substance ayant quantitativement l'impact le plus important. C'est le produit principal de toute installation de combustion : voitures, production d'énergie, procédés industriels, etc. Les gaz fluorés, qui comprennent dans la figure 1-2 les émissions de hydrofluorocarbures (HFC), de perfluorocarbures (PFC) et d'hexafluorure de soufre (SF_6), sont composés à 27% (de 0,5% des émissions totales) de HFC nécessaire à la production de froid stationnaire.

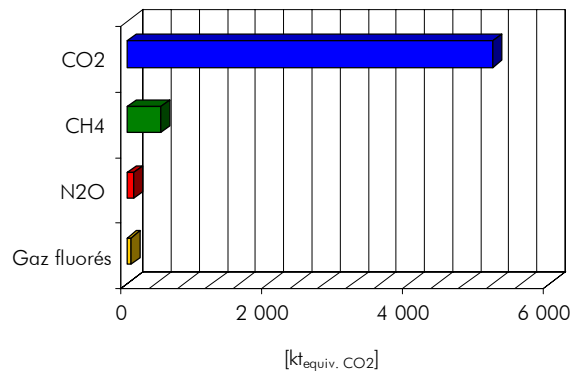


figure 1-2 : émissions de gaz à effet de serre au Luxembourg en 2001, calculés selon la méthode IPCC [19]

Les systèmes frigorifiques ont deux sources potentielles d'émissions de gaz à effet de serre: leur consommation en énergie et leur réfrigérant. Pour pouvoir déterminer l'importance de ces émissions l'une par rapport à l'autre, la norme européenne EN 378 préconise la méthode du calcul de la valeur TEWI (Total Equivalent Warming Impact). A titre d'exemple, la valeur TEWI de l'installation suivante a été déterminée (voir détail du calcul chapitre 7.2) :

Secteur d'application	Industrie
Durée de vie de l'installation n	15 a
Puissance frigorifique	1428 kW
COP	2,86
Temps de fonctionnement	8 000 hrs/a
Type de réfrigérant	R134a
Charge m	1300 kg
GWP	1300
Taux de fuite annuel L	15%
Taux de récupération α_{Recovery}	50%
Facteur β d'émission de CO ₂ par kWh	0,64 kg/kWh

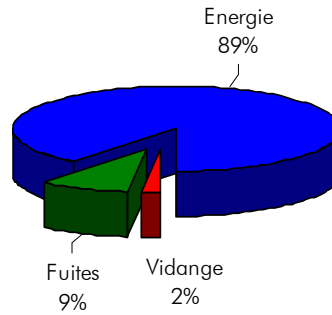


figure 1-3 : source des émissions de gaz à effets de serre d'une installation frigorifique

De manière générale, et comme le démontre l'exemple ci-dessus, il peut être assumé que la consommation énergétique est la source primaire d'émission de gaz à effet de serre d'une installation frigorifique au Luxembourg. Les réfrigérants, même de type HFC, n'ont proportionnellement qu'un impact réduit.

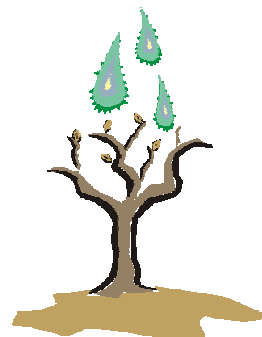


- L'impact principal d'une installation à compression sur l'effet de serre provient de sa consommation en énergie électrique.
- L'émission de réfrigérant a, même dans le cas de l'utilisation de HFC, un impact environnemental minime.

1.3 L'acidification

1.3.1 Le phénomène d'acidification anthropique

L'acidification est un phénomène de déséquilibre acido-basique du milieu naturel. Il réduit le potentiel de croissance des plantes, détruit certains nutriments nécessaires au milieu végétal et détériore les bâtiments anciens. Le problème d'acidification est régional, à l'opposé des problèmes de la couche d'ozone et de l'effet de serre, car les émissions des substances nocives n'affectent que les régions avoisinant leurs sources. L'acide sulfurique (H_2SO_4) et l'acide nitrique (HNO_3) sont les deux substances les plus importantes dans le cadre du phénomène d'acidification. Au Luxembourg, ces substances proviennent essentiellement de la combustion de carburants routiers et d'émissions de procédés industriels. Pour limiter l'impact de ces substances, le protocole de Göteborg a fixé des plafonds d'émissions, que les différents pays doivent avoir atteint pour 2010.



1.3.2 Les systèmes frigorifiques et l'acidification anthropique

Les installations frigorifiques contribuent de manière indirecte au phénomène d'acidification. D'un côté, la consommation de courant consommé au Luxembourg (réseau CEGEDEL) implique en grande partie la combustion de lignite, un type de charbon émetteur de substances acidifiantes. D'un autre côté, les fluides frigorifiques actuellement utilisés ont également un effet d'acidification : l'impact de l'ammoniac est assez important et les HFC peuvent se décomposer en acide fluorhydrique (HF) et / ou en acide trifluoroacétique (TFA). En première approximation, l'application d'une méthode similaire à celle de la détermination de la valeur TEWI permet d'assumer que la consommation énergétique représente de loin la source principale d'émissions de substances acidifiantes, et ce même dans le cas de l'utilisation de l'ammoniac en tant que réfrigérant.

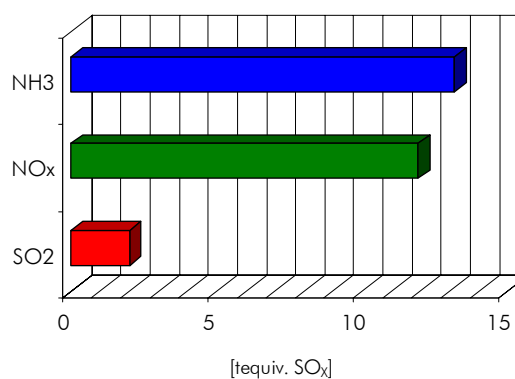


figure 1-4 : émissions de substances acidifiantes au Luxembourg en 2000 [20]

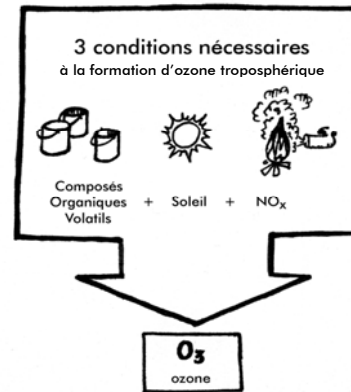


- La consommation énergétique est la source principale de l'impact d'acidification d'une installation de production de froid.
- L'ammoniac est le réfrigérant au potentiel acidifiant le plus élevé, mais la décomposition de certains fluides halogénés, comme p.ex. le R134a, peut également mener à des substances acidifiantes tels l'acide trifluoroacétique ou l'acide fluorhydrique

1.4 L'ozone troposphérique

1.4.1 L'ozone troposphérique

L'ozone troposphérique est une substance polluante généralement rencontrée dans les villes à forte densité de circulation. Comme le phénomène d'acidification, ce type d'ozone est une forme de pollution locale, dangereuse pour l'homme (problème d'asthme et de migraines) et son environnement (réduction de la photosynthèse et de la fixation de certaines substances par les plantes). Il est produit à partir de réactions chimiques impliquant des composés organiques volatils (COV comme p.ex. les hydrocarbures), ainsi que des oxydes d'azotes (NO_x). Les émissions de ces précurseurs sont limitées par le protocole de Göteborg.



1.4.2 Les systèmes frigorifiques et l'ozone troposphérique

Bien que leur impact soit relativement réduit par rapport aux autres sources de polluants précurseurs d'ozone troposphérique, les installations de production de froid jouent un rôle dans ce domaine. En effet, la consommation énergétique contribue, par l'émission de NO_x et de COV lors de sa production, à cet effet. Seul les réfrigérants du type hydrocarbures (HC), comme p.ex. le R290, jouent un rôle direct dans la formation d'ozone troposphérique (les valeurs attribuées aux HFC se situent à la limite du mesurable et sont donc négligeables [47]). En comparant l'impact des émissions dues à la consommation énergétique à celui des émissions d'un fluide frigorigère de type HC, il apparaît que la consommation en électricité est la source majeure des substances polluantes. Cependant, l'impact environnemental du fluide frigorigère est probablement plus important que dans le cadre de l'effet de serre ou du phénomène d'acidification.



- La source principale d'une installation frigorifique de substances entraînant la création d'ozone troposphérique est sa consommation énergétique.
- Les fluides frigorigères, hormis les hydrocarbures, n'ont pas d'impact direct sur cet effet.

1.5 Les conclusions

A partir de l'analyse de ces problèmes environnementaux, il apparaît clairement que :

- la consommation énergétique des systèmes fonctionnant majoritairement à l'électricité (systèmes à compression mécanique) est la source majeure de polluants contribuant à l'effet de serre, l'acidification anthropique et, en ampleur plus réduite, la formation d'ozone troposphérique,
- les fluides frigorigènes peuvent, selon leur type, avoir un impact direct sur les problèmes environnementaux que sont l'appauvrissement de la couche d'ozone et la création d'ozone troposphérique. Les CFC et HCFC étant interdits respectivement en voie d'être interdits, leur rôle dans le cadre de la déplétion de la couche d'ozone devrait s'amenuiser au fil du temps.

Sur base de ces faits, il est donc possible d'en conclure que :

- l'optimisation de l'efficacité énergétique des installations frigorigènes est la mesure principale pour réduire leurs impacts environnementaux. Cette conclusion n'exclue cependant pas le réfrigérant des critères de choix et de décision lors de l'élaboration de l'installation. Les caractéristiques des fluides frigorigènes déterminent également le coefficient de performance (COP) de l'installation, les rendant partie intégrante du concept du système,
- les émissions de fluides frigorigènes, tous types confondus, doivent être évitées le plus possible. Non seulement les fuites de réfrigérants nuisent à l'environnement, mais de plus, le bon fonctionnement de l'installation frigorigène s'en trouvera diminué.

Bien que comparativement moins important car d'un impact plus réduit, l'utilisation de l'eau à des fins de refroidissement ainsi que l'impact sonore des condenseurs posent également problème vis-à-vis du milieu naturel et doivent être pris en compte lors de la planification d'un système frigorigène.

Pour en savoir plus :

http://www.waermepumpe.ch/fe/Fr_LCA_SB.pdf

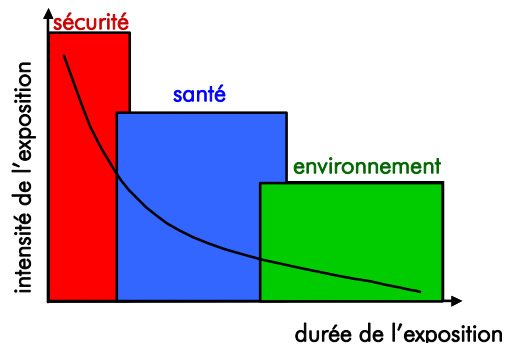
http://www.waermepumpe.ch/fe/Fr_LCA_SB_Anh.pdf

Etude LCA de fluides frigorigènes, par l'Office Fédérale de l'Energie suisse, 1999

2 Les fluides frigorigènes

Bien que, dans le cadre des systèmes frigorifiques, l'impact environnemental de la consommation énergétique soit prépondérant, il est indéniable que les réfrigérants possèdent un certain potentiel de risque envers l'homme et son environnement. Ce risque peut être défini comme étant proportionnel à :

- Les effets de la substance (p.ex l'effet d'appauvrissement de la couche d'ozone, l'effet de serre, etc.), mais également à
- l'exposition auquel l'homme et/ou l'environnement sont soumis.



Le risque d'une exposition de courte durée à une substance nocive est donc comparable au risque d'une exposition de longue durée à une substance peu nocive. Ainsi les mesures de réduction du risque peuvent se faire soit au niveau de la réduction des effets (substitution des réfrigérants) soit au niveau de l'exposition (réduction des fuites). Il est cependant important de noter que, dans la pratique, l'analyse des risques des substances s'avère difficile, car les multiples effets en jeu sont difficilement comparables à un niveau purement scientifique.

2.1 Les réfrigérants

Afin de fournir du froid de manière efficace et durable, le fluide frigorigène doit avoir les caractéristiques suivantes :

- posséder de bonnes propriétés thermodynamiques (puissance frigorifique volumique élevée, bonne conductivité thermique, etc.),
- être compatible avec les matériaux et les huiles classiques,
- être non toxique pour l'homme et pour l'environnement,
- être ininflammable et
- avoir un coût raisonnable.

Ces différentes propriétés sont techniquement contradictoires, car l'amélioration d'une des caractéristiques entraîne souvent la détérioration d'une autre (p.ex l'augmentation de nombres d'atomes d'hydrogène dans la molécule du réfrigérant réduit sa stabilité atmosphérique, mais augmente son potentiel d'inflammabilité). Le choix du réfrigérant doit être réalisé de manière à trouver un juste milieu entre ces différentes caractéristiques, et ce en fonction des besoins spécifiques en froid du site considéré.

2.1.1 Les classes de réfrigérants

Les fluides frigorigènes actuellement utilisés peuvent être subdivisés en deux groupes principaux :

- les réfrigérants naturels et
- les réfrigérants halogénés.

Les réfrigérants naturels

Les réfrigérants naturels, comme l'ammoniac ou le dioxyde de carbone, sont des substances trouvées dans la nature. Les hydrocarbures, molécules ne contenant que des atomes de carbone et d'hydrogène, en font partie. Dus à leur structure moléculaire, ces fluides naturels présentent des caractéristiques fortement différentes d'un réfrigérant à l'autre. L'utilisation de ceux-ci entraîne, pour des raisons de sécurité, des contraintes techniques souvent plus complexes que les réfrigérants halogénés, mais ont globalement un impact environnemental absolu plus réduit par rapport à ces derniers. Certains de ces produits, comme l'ammoniac ou le propane, sont soumis à des mesures de sécurité spéciales dans le cadre de l'obtention de l'autorisation d'exploitation.

Les réfrigérants halogénés

Les fluides frigorigènes du groupe des halocarbures, c.-à-d. les CFC, les HCFC et les HFC, sont les plus répandus au monde. Ceux-ci ont comme éléments principaux des atomes de carbone et de fluor ainsi que, selon le cas, des atomes d'hydrogène et/ou de chlore. La proportion de ces atomes dans la molécule détermine les propriétés physiques du réfrigérant.

Les CFC (Chlorofluorocarbures)

Les CFC, tels le R11 ou le R12, sont des substances composées uniquement d'atomes de carbone, de fluor et de chlore. Cette composition implique une grande stabilité chimique, entraînant ainsi une haute durée de vie de ces molécules dans l'atmosphère. Celles-ci peuvent soit être dissociées sous l'effet de rayons ultra-violet, soit neutralisées par le biais p.ex. de dioxyde d'azote. Les CFC sont généralement des réfrigérants ininflammables et possédant de bonnes propriétés physiques, mais possèdent un effet nocif sur la couche d'ozone. Selon l'article 4.1 du règlement CE 2037/2000, la mise sur le marché et l'utilisation de CFC en Europe sont, sauf quelques rares exceptions, interdites.

Les HCFC (Hydrochlorofluorocarbures)

Les molécules de HCFC, comme p.ex. le R22, sont composées d'atomes de carbone, de fluor, de chlore et d'hydrogène. Ils sont chimiquement moins stables et se dissocient en partie lors de leur passage dans l'atmosphère. Comme les CFC, ils sont pratiquement ininflammables et ont de bonnes caractéristiques thermiques. Leur impact environnemental sur la couche d'ozone est plus réduit que celui des CFC. A partir du 1^{er} janvier 2010, la mise sur le marché de HCFC sera interdite dans l'Union Européenne (article 4.3 du règlement CE 2037/2000), alors que certaines utilisations de ces réfrigérants sont déjà interdites ou le seront sous peu (article 5.1).

Les HFC (Hydrofluorocarbures)

Les HFC, comme p.ex. le R134a, sont des molécules composées d'hydrogène, de fluor et de carbone. Ceux-ci ont été développés ces dernières années pour remplacer les CFC et HCFC. Des mélanges de différents HFC, comme le R404A, permettent d'adapter les propriétés physiques des fluides frigorigènes à des besoins spécifiques. Leur inflammabilité est légèrement plus élevée que celle des HCFC, sans pour autant causer des problèmes quelconques.

Les HFC sont des gaz à potentiel d'effet de serre élevé. Ils peuvent de plus se décomposer, selon leur structure, en acide fluorhydrique (HF) et / ou en acide trifluoroacétique (TFA), mais ne sont pas considérés comme appauvrissant la couche d'ozone stratosphérique. Il est pourtant intéressant de noter que leur production peut nécessiter l'utilisation de CFC et de HCFC. L'impact reste cependant marginal et peut être encore réduit par traitement des effluents gazeux par combustion, ramenant ainsi l'impact des HFC au niveau des fluides naturels. [7]

Les hydrofluorocarbures ne sont actuellement pas couverts d'interdiction. Cependant, une première proposition de règlement « relatif à certains gaz à effet de serre fluorés » du parlement et du conseil européen du 11 août 2003 a été déposée. Cette proposition prévoit, entre autre, l'interdiction de la mise sur le marché de systèmes à évaporation directe non confinés utilisant des HFC comme réfrigérant (article 8 et annexe II). De plus, l'exploitation au Luxembourg d'une installation de production de froid fonctionnant au HFC est limitée à certaines applications déterminées dans le cadre de la procédure des établissements classés.

La nomenclature des fluides frigorigènes:

La dénomination la plus classique des réfrigérants est celle de leur numéro de réfrigérant (R22, R134a). Ce type de dénomination, défini par l'ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) dans sa norme 34 (Standard 34), est unique pour chaque réfrigérant et est reconnu internationalement. Cette nomenclature permet de déterminer le type de fluide, respectivement sa composition, en fonction du nombre repris dans la dénomination. Les règles principales sont les suivantes :

- De manière générale, le préfixe R désigne le terme « réfrigérant ». Les substances halogénées sont également désignées par les préfixes « CFC », « HCFC » et « HFC ». Les producteurs utilisent souvent leur marque de réfrigérant comme préfixe. Exemple : R22, HCFC22, SOLKANE® 22 désignent tous le même réfrigérant.
- Les réfrigérants halogénés ont la nomenclature la plus complexe, qui répond aux règles suivantes :
 - Le premier chiffre en partant de la droite est le nombre d'atomes de fluor,
 - Le deuxième chiffre de la droite est le nombre d'atomes d'hydrogène plus 1,
 - Le troisième chiffre de la droite est le nombre d'atomes de carbone moins 1 (s'il est nul, il n'est pas indiqué),
 - Le quatrième chiffre de la droite est le nombre de liaisons carbone-carbone insaturées (s'il est nul, il n'est pas indiqué),
 - Le nombre d'atomes de chlore se déduit en soustrayant les atomes de fluor et d'hydrogène du nombre total d'atomes pouvant se lier au carbone : 4 pour le méthane (CH₄), 6 pour l'éthane (C₂H₆), etc.
 - Exemple : R0022 : 2 atomes de fluor, (2-1) atome d'hydrogène, (0+1) atome de carbone, (4-2 atomes de fluor-1 atome d'hydrogène) atome de chlore =CHClF₂,
 - Dans le cas d'isomères asymétriques de la série éthane, des lettres en minuscule sont rajoutées à la fin. Exemple : R134a.
- Les mélanges zéotropes (voir chapitre 2.1.3) se voient attribuer la série 400. Les numéros sont concédés selon leur point d'ébullition successif. Les lettres majuscules suivantes caractérisent les différentes proportions de fluides purs dans le mélange. Exemple : R404A
- Les mélanges azéotropes sont désignés par la série 500. Exemple : R507
- Les composés organiques sont généralement de la série 600 correspond à celle des fluides halogénés. Les numéros sont attribués de manières successives. Exemple : R600a (Exception : la nomenclature ayant comme base le propane a la série 200)
- Les composés non-organiques sont repris par la série 700. Les numéros spécifiques sont attribués en fonction de leur masse molaire. Exemple : R717 (l'ammoniac a une masse molaire de 17 g/mol)

2.1.2 Le R134a

Généralités

Le R134a, un HFC, est largement utilisé dans le domaine de la climatisation, le conditionnement de nourriture et la production de froid industriel. Etant un réfrigérant à composante unique, son comportement lors de changement d'état isobare est stable. Il est ininflammable et non toxique, et est un excellent fluide de remplacement du R12.

Caractéristiques techniques

Le R134a possède une puissance frigorifique volumique peu élevée, nécessitant ainsi une puissance de compresseur relativement importante. C'est un fluide théoriquement à bonne efficacité énergétique et qui possède une conductivité thermique moyenne faible. Sa température de refoulement au compresseur est relativement basse. [30] [31]

Caractéristiques environnementales

L'utilisation du R134a n'a pas d'impact direct sur la couche d'ozone (voir chapitre 2.1.1). Bien que ce soit un gaz à effet de serre relativement élevé, sa bonne efficacité énergétique entraîne une consommation énergétique modique et limite ainsi l'impact environnemental de l'installation frigorifique dans ce domaine. La décomposition du R134a est probablement source d'acide trifluoroacétique (TFA) ainsi que d'acide fluorhydrique (HF). Notons que les valeurs d'acidification des HFC repris dans ce document sont des estimations réalisées dans le cadre d'une étude écobilan ([7]) et ne peuvent être utilisées qu'à des fins de comparaison entre les différents fluides. L'importance de ces produits est de toute manière négligeable par rapport à celui entraîné par la consommation énergétique. L'effet de ce réfrigérant (et des HFC en général) sur la création d'ozone troposphérique est d'environ 0,001 kg Ethylène_{equiv.} et se situe dans la marge d'erreur du modèle. Leur impact dans ce domaine peut donc être considéré comme négligeable. [7] [47]

Contraintes légales

Son potentiel d'effet de serre entraîne certaines limitations dans le cadre de l'obtention de l'autorisation d'exploitation de l'installation. Aucune mesure de sécurité spéciales ne sont requises pour le R134a, mais des conditions concernant le confinement de l'installation peuvent être imposées.

R134a	
Nom chimique / Composition	(1,1,1,2) - Tetrafluoroethane
Type	Halogéné (HFC)
Numéro CAS	811-97-2
Masse molaire [g/mol]	102,03
Température critique [°C]	100,6
Pression critique [bar]	40,56
Température d'ébullition (à pression atmosphérique) [°C]	-26,1
Plage d'application de température[°C]	-25 à +15
Compatibilité avec les métaux	Alliages de plomb, de zinc et d'aluminium avec plus de 2% de masse de magnésium devraient être évités
Compatibilité avec les huiles	Huiles synthétiques type PAG et POE
Phrases R	Non classé comme préparation dangereuse
Phrases S	Non classé comme préparation dangereuse
ODP [kg R11-equiv.]	0
GWP ₁₀₀ [kg CO ₂ -equiv.]	1 300
Acidification [kg SO _x -equiv.] ¹	0,96
POCP [kg Ethylène-equiv.]	0
Groupe de sécurité	A1
Valeurs MAK [ppm]	1 000
Autorisation d'exploitation	Utilisation limitée par l'Administration de l'Environnement

tableau 2-1 : caractéristiques du R134a [9][3][43][16][18][7][47]

¹ voir « caractéristiques environnementales » chapitre 2.1.2

2.1.3 Le R404A

Généralités

Le R404A est une composition de R143a, R125 et de R134a. Il fait partie des fluides zéotropes (série des R400, à l'opposée des fluides azéotropes de la série R500), qui ne se comportent pas comme des fluides homogènes lors de la condensation respectivement l'évaporation : les différents composants peuvent changer d'état de manière indépendante, c.-à-d. qu'elles fractionnent. Ce problème entraîne des contraintes techniques (utilisation restrictive d'évaporateurs noyés, difficulté de remplissage en cas de fuite, etc.) et une réduction de l'efficacité énergétique de l'installation (conductivité thermique diminuée). Le taux de glissement de température du R404A, qui est la différence de température du réfrigérant dans la zone du changement d'état, est peu élevé (0,7K), de sorte qu'il est souvent considéré comme étant un réfrigérant à caractère quasi-azéotropique. Le R404A est essentiellement utilisé dans la réfrigération commerciale de basse température, mais peut également trouver des applications dans la climatisation. Ininflammable, il est également non toxique et, en raison de ses propriétés, souvent comparés au R507. [3]

Caractéristiques techniques

Le R404A n'a guère une bonne efficacité énergétique. Il nécessite cependant un compresseur de puissance plus réduite que celui du R134a et possède une conductivité thermique relativement intéressante. Son glissement de température étant faible, les restrictions concernant l'utilisation d'évaporateurs noyés dans le cas de fluides zéotropes ne s'appliquent généralement pas. [31]

Caractéristiques environnementales

Le R404A n'a pas d'effet direct sur la couche d'ozone. Dû à l'utilisation de R143a et de R125, deux fluides à fort potentiel d'effet de serre, le R404A est cependant un réfrigérant à valeur GWP très élevée. Son impact direct sur l'effet de serre, bien que plus réduit par rapport à celui de la consommation énergétique, est plus important que la plupart des réfrigérants de type HFC. Les conclusions concernant son effet d'acidification ainsi que son impact sur la création d'ozone troposphérique sont identiques à celles du R134a. [7]

Contraintes légales

Pour des raisons d'impact sur l'effet de serre, l'Administration de l'Environnement prévoit, dans le cadre de l'utilisation du R404A, des restrictions concernant son utilisation. Des mesures de sécurité supplémentaires ne sont pas obligatoires, mais des conditions concernant le confinement de l'installation peuvent être imposées.

R404A	
Nom chimique / Composition	R125 - R143a - R134a (52% - 44% - 4%)
Type	Mélange zéotrope (HFC)
Numéro CAS	-
Masse molaire [g/mol]	-
Température critique [°C]	72,1
Pression critique [bar]	37,3
Température d'ébullition (à pression atmosphérique) [°C]	-45,9
Plage d'application de température[°C]	-45 à 0
Compatibilité avec les métaux	Alliages de plomb, de zinc et d'aluminium avec plus de 2% de masse de magnésium devraient être évités
Compatibilité avec les huiles	Huiles synthétiques de type POE
Phrases R	Non classé comme préparation dangereuse
Phrases S	Non classé comme préparation dangereuse
ODP [kg R11-equiv.]	0
GWP ₁₀₀ [kg CO ₂ -equiv.]	3 800
Acidification [kg SO _x -equiv.]	sans indication
POCP [kg Ethylène-equiv.]	0
Groupe de sécurité	A1/A1
Valeurs MAK [ppm]	500
Autorisation d'exploitation	Utilisation limitée par l'Administration de l'Environnement

tableau 2-2 : caractéristiques du R404A [3][43][44][16][18][7][47]

2.1.4 Le R407C

Généralités

Le R407C est un mélange zéotrope composé de R32, R125 et de R134a. Il est surtout utilisé dans le domaine de la climatisation, mais aussi dans le domaine du froid positif et négatif. Bien que le R32 soit inflammable, le R407C est considéré comme ininflammable et non toxique. [3]

Caractéristiques techniques

De manière générale, le R407C possède les mêmes caractéristiques que le R22, le rendant un excellent candidat pour le remplacement de ce dernier. Il n'a pas une efficacité énergétique très élevée et sa puissance frigorifique volumique ainsi que sa conductivité thermique sont moyennes. Son effet zéotropique doit être tenu en compte lors de l'élaboration de l'installation (éviter les composants collectant le réfrigérant liquide, comme les évaporateurs noyés, car ils augmentent l'effet de fractionnement), celui-ci étant très important (7,2K). Suite à une fuite, le remplissage de réfrigérant peut s'avérer difficile, car la concentration de certaines composantes peut avoir changé. [31]

Caractéristiques environnementales

Le R407C n'a pas d'effet direct sur la couche d'ozone. Son potentiel d'effet de serre théorique est du même ordre de grandeur que le R134a. L'effet d'acidification n'est pas important comparé à celui de la consommation énergétique, et son potentiel de contribution à la création d'ozone troposphérique est négligeable.

Contraintes légales

Le potentiel d'effet de serre du R407C entraîne des restrictions de la part de l'Administration de l'Environnement. Des mesures de sécurité supplémentaires ne sont pas obligatoires, mais des conditions concernant le confinement de l'installation peuvent être imposées.

R407C	
Nom chimique / Composition	R134a - R125 - R32 (52% - 25% - 23%)
Type	Mélange zéotrope (HFC)
Numéro CAS	-
Masse molaire [g/mol]	-
Température critique [°C]	86,8
Pression critique [bar]	46,2
Température d'ébullition (à pression atmosphérique) [°C]	-43,8
Plage d'application de température[°C]	-40 à +5
Compatibilité avec les métaux	Alliages de plomb, de zinc et d'aluminium avec plus de 2% de masse de magnésium devraient être évités
Compatibilité avec les huiles	Huiles synthétiques de type POE
Phrases R	Non classé comme préparation dangereuse
Phrases S	Non classé comme préparation dangereuse
ODP [kg R11-equiv.]	0
GWP ₁₀₀ [kg CO ₂ -equiv.]	1 700
Acidification [kg SO _x -equiv.] ²	1,12
POCP [kg Ethylène-equiv.]	0
Groupe de sécurité	A1/A1
Valeurs MAK [ppm]	1 000
Autorisation d'exploitation	Utilisation limitée par l'Administration de l'Environnement

tableau 2-3 : caractéristiques du R407C [3][43][44][16][18][7][47]

² voir « caractéristiques environnementales » chapitre 2.1.2

2.1.5 Le R410A

Généralités

Le R410A est un mélange de R125 et de R32, qui trouve son application dans le domaine de la climatisation et du froid positif. C'est un réfrigérant à comportement quasi-azéotropique, car son glissement de température est minime. Il est ininflammable et non-toxique. [3]

Caractéristiques techniques

L'intérêt principal du R410A est sa production frigorifique volumique élevée, ce qui permet la construction de systèmes de taille réduite. Par contre, ce réfrigérant travaille à des pressions plus élevées que les fluides « classiques », d'où la nécessité d'utiliser des composants spéciaux. Son coefficient de performance théorique est du même ordre de grandeur que celui du R407C, et sa conductivité thermique est élevée (réduction de la taille des échangeurs). Sa haute température de refoulement à la sortie du compresseur est à tenir en compte lors de l'élaboration de l'installation. [31]

Caractéristiques environnementales

Comme tout nouveau fluide mis sur le marché, le R410A n'affecte pas la couche d'ozone. Son potentiel d'effet de serre est moyen par rapport à celui des autres HFC. En raison de ses différentes composantes, son potentiel d'acidification est, pour un HFC, relativement élevé, mais se situe encore en dessous du niveau de l'ammoniac. Sa contribution à la création d'ozone troposphérique est négligeable.

Contraintes légales

Du à son potentiel d'effet de serre, l'utilisation du R410A est limitée par l'Administration de l'Environnement. Des mesures de sécurité supplémentaires ne sont pas obligatoires, mais des conditions concernant le confinement de l'installation peuvent être imposées.

R410A	
Nom chimique / Composition	R125 - R32 (50% - 50%)
Type	Mélange zéotrope (HFC)
Numéro CAS	-
Masse molaire [g/mol]	-
Température critique [°C]	71,8
Pression critique [bar]	48,9
Température d'ébullition (à pression atmosphérique) [°C]	-51,6
Plage d'application de température[°C]	-50 à 0
Compatibilité avec les métaux	Alliages de plomb, de zinc et d'aluminium avec plus de 2% de masse de magnésium devraient être évités
Compatibilité avec les huiles	Huiles synthétiques de type POE
Phrases R	Non classé comme préparation dangereuse
Phrases S	Non classé comme préparation dangereuse
ODP [kg R11-equiv.]	0
GWP ₁₀₀ [kg CO ₂ -equiv.]	2 000
Acidification [kg SO _x -equiv.] ³	1,28
POCP [kg Ethylène-equiv.]	0
Groupe de sécurité	A1/A1
Valeurs MAK [ppm]	1 000
Autorisation d'exploitation	Utilisation limitée par l'Administration de l'Environnement

tableau 2-4 : caractéristiques du R410A [3][16][18][7][43][47]

³ voir « caractéristiques environnementales » chapitre 2.1.2

2.1.6 Le R717 (ammoniac)

Généralités

L'ammoniac a été l'un des premiers réfrigérants utilisés dans le domaine de la production de froid. De par ses propriétés thermodynamiques avantageuses, il est essentiellement utilisé dans le domaine de la production de froid industriel et alimentaire. C'est cependant un réfrigérant inflammable, corrosif et hautement toxique (groupe de sécurité B2, [2]), dont l'utilisation entraîne des coûts de l'ordre de 300 à 400% plus élevés par rapport à une installation classique fonctionnant avec un réfrigérant de type HFC.

Caractéristiques techniques

L'ammoniac est l'un des fluides frigorifiques, énergétiquement parlant, les plus efficaces. Sa puissance frigorifique volumique entraîne l'utilisation d'installation de petite taille, et sa conductivité thermique est élevée, réduisant la taille des échangeurs. Son caractère corrosif et toxique entraîne cependant une série de contraintes architecturales (p.ex. système indirect) et matérielles (p.ex. composants spéciaux), qui, dans la pratique, limitent l'impact positif de ces propriétés thermodynamiques (augmentation de la consommation énergétique pour les pompes supplémentaires, etc.). [30] [31] [33]

Caractéristiques environnementales

L'ammoniac n'a d'impact ni sur la couche d'ozone, ni sur l'effet de serre, et il n'est pas considéré comme étant une substance à potentiel de création d'ozone troposphérique. Par contre, son émission contribue fortement au problème d'acidification local. Son coefficient de performance permet cependant de limiter les émissions de substances polluantes liées à la consommation énergétique.

Contraintes légales

Le contact de l'ammoniac mène à des brûlures de la peau ainsi qu'à l'inflammation des yeux, qui peut avoir comme conséquence la perte de la vue. Son inhalation affecte le système respiratoire (brûlures) et peut provoquer des oedèmes du larynx et des poumons. Pour réduire le danger que représente la toxicité de l'ammoniac, un certain nombre de mesures doivent être prises, comme:

- prévoir un système de ventilation forcée du local technique avec une installation d'absorption,
- utiliser un système indirect. La quantité d'ammoniac s'en trouvera réduite, et les fuites confinées au local technique, qui lui devra être étanche,
- limiter l'accès au local technique...

La prescription ITM-CL 110 de l'Inspection du Travail et des Mines intitulée : „Installations frigorifiques pour la production de froid de confort et de froid technique fonctionnant à l'ammoniac » est le document de référence concernant les mesures de sécurité nécessaires pour l'installation et l'exploitation de ce genre d'installation. Le non-respect des mesures décrites dans cette prescription peut entraîner le refus, de la part de l'ITM, d'octroyer l'autorisation d'exploitation.

R717	
Nom chimique / Composition	Ammoniac
Type	Naturel
Numéro CAS	7664-41-7
Masse molaire [g/mol]	17,03
Température critique [°C]	132,50
Pression critique [bar]	113,50
Température d'ébullition (à pression atmosphérique) [°C]	-33,40
Plage d'application de température[°C]	-35 à +10
Compatibilité avec les métaux	S'attaque à l'aluminium, au cuivre et au zinc ainsi qu'aux alliages contenant ces métaux
Compatibilité avec les huiles	Huiles minérales, PAO et AB (non miscibles)
Phrases R	10 – 23 – 34 – 50
Phrases S	9 – 16 – 26 – 36 / 37 / 39 – 45 – 61
ODP [kg R11-equiv.]	0
GWP ₁₀₀ [kg CO ₂ -equiv.]	< 1
Acidification [kg SO _x -equiv.]	1,88
POCP [kg Ethylène-equiv.]	0
Groupe de sécurité	B2
Valeurs MAK [ppm]	25
Autorisation d'exploitation	Mesures spécifiques requises par l'Inspection du Travail et des Mines

tableau 2-5 : caractéristiques du R717 [10][43][11][23][7][3][47]

2.1.7 Le R290 (propane)

Généralité

Le propane est un gaz naturel principalement utilisé comme combustible, mais trouvant également des applications en tant que réfrigérant. Son application principale dans le domaine du froid se situe dans le milieu du froid domestique, avec des développements dans le domaine industriel et agro-alimentaire. C'est un réfrigérant à la toxicité comparable au HFC, mais extrêmement inflammable (groupe de sécurité A3, [2]). A cette date, il n'existe pas d'installation de taille importante fonctionnant au R290 au Luxembourg.

Caractéristiques techniques

Le R290 est un réfrigérant aux excellentes propriétés thermodynamiques : puissance frigorifique réduite, bonne efficacité énergétique et bonne conductivité thermique. Cependant, sa haute inflammabilité implique l'utilisation d'un système frigorifique indirect, ainsi que des mesures de sécurité importantes (système de ventilation, détecteur de gaz, formation du personnel, etc.). De nouvelles solutions techniques garantissant un niveau de sécurité plus élevé sont en voie de développement. [31]

Caractéristiques environnementales

D'un point de vue environnemental, le propane est très recommandable. Il ne détruit pas la couche d'ozone, et son impact sur l'effet de serre est négligeable par rapport aux HFC. A un haut degré de pureté, le propane ne se décompose pas en éléments acides. Il contribue cependant de manière directe à la création d'ozone troposphérique. [13]

Contraintes légales

Son inflammabilité élevée a empêché jusqu'à maintenant son application à grande échelle dans la production de froid. Au-delà d'une quantité de propane de 150 g, seul un concept de sécurité poussé permet d'obtenir l'autorisation d'exploitation de la part de l'ITM.

R290	
Nom chimique / Composition	Propane
Type	Naturel (hydrocarbure)
Numéro CAS	74-98-6
Masse molaire [g/mol]	44,11
Température critique [°C]	96,8
Pression critique [bar]	42,6
Température d'ébullition (à pression atmosphérique) [°C]	-42,1
Plage d'application de température[°C]	-40 à +10
Compatibilité avec les métaux	Alliages avec plus de 2% de masse de magnésium, ainsi que l'usage de zinc devraient être évités
Compatibilité avec les huiles	Huiles à haut degré de viscosité
Phrases R	12
Phrases S	9 - 16
ODP [kg R11-equiv.]	0
GWP ₁₀₀ [kg CO ₂ -equiv.]	< 1 ⁴
Acidification [kg SO _x -equiv.]	sans indication
POCP [kg Ethylène-equiv.]	0,42
Groupe de sécurité	A3
Valeurs MAK [ppm]	1 000
Autorisation d'exploitation	Utilisation limitée par l'Inspection du Travail et des Mines

tableau 2-6 : caractéristiques du R290 [12][43][13][16][23][3][7][47]

⁴ En tenant compte de l'effet indirect du R290, la valeur GWP atteint alors 6,82 [23]

2.1.8 Le R744 (dioxyde de carbone)

Généralités

En tant que réfrigérant, le R744 est essentiellement utilisé dans les pompes à chaleur et les systèmes de production de froid agro-alimentaire de basse température (système en cascade fonctionnant à l'ammoniac ou aux HFC). Des solutions concernant l'utilisation de CO₂ dans le domaine des températures positives sont en voie d'être développés. Le dioxyde de carbone est ininflammable et non toxique.

Caractéristiques techniques

Sa basse température critique limite ses possibilités d'application, obligeant le système à fonctionner à pression élevée (35 à 100 bar, selon la puissance installée) à l'aide de compresseurs spéciaux. Sa production frigorifique volumique permet cependant une réduction importante du diamètre des conduites de réfrigérant ainsi que de la taille du compresseur. L'efficacité énergétique théorique peut être considérée comme étant similaire à celle des HFC.

Caractéristiques environnementales

Le dioxyde de carbone est un réfrigérant sans grand impact sur l'environnement. Il ne contribue ni à la destruction de la couche d'ozone, ni à la production d'ozone troposphérique, et son effet de serre direct est minime comparé aux fluides halogénés.

Contraintes légales

Aucune contrainte légale spéciale ne s'oppose à l'application du CO₂ comme réfrigérant. Seul des mesures de sécurité spéciales contre les risques d'asphyxie sont requises par l'ITM (p.ex. un détecteur de CO₂ au point le plus bas).

R744	
Nom chimique / Composition	Dioxyde de carbone
Type	Naturel
Numéro CAS	124-38-9
Masse molaire [g/mol]	44,01
Température critique [°C]	31,1
Pression critique [bar]	73,8
Température d'ébullition (à pression atmosphérique) [°C]	-78,5
Plage d'application de température[°C]	-55 à 0
Compatibilité avec les métaux	En voie d'analyse
Compatibilité avec les huiles	En voie d'analyse
Phrases R	Non classé comme préparation dangereuse
Phrases S	Non classé comme préparation dangereuse
ODP [kg R11-equiv.]	0
GWP ₁₀₀ [kg CO ₂ -equiv.]	1
Acidification [kg SO _x -equiv.]	sans indication
POCP [kg Ethylène-equiv.]	0
Groupe de sécurité	A1
Valeurs MAK [ppm]	5 000
Autorisation d'exploitation	Mesures spécifiques requises par l'Inspection du Travail et des Mines

tableau 2-7 : caractéristiques du R744 [14][43][3][7][16][18][47]

2.1.9 Le R718 (eau)

Généralités

L'idée d'utiliser l'eau comme réfrigérant principal a existé dès les débuts du génie frigorifique, car certaines de ses propriétés thermodynamiques s'y prêtent parfaitement et son impact écologique est nul. Son utilisation s'étend actuellement aux installations industrielles de puissance élevée.

Caractéristiques techniques

L'inconvénient technique principal de l'eau est sa faible densité de vapeur (par comparaison, l'ammoniac a une densité de 4 900 g/m³, alors que l'eau n'atteint que 9,4 g/m³). Ceci implique une production frigorifique volumique beaucoup plus réduite pour l'eau et donc une taille plus importante de l'installation. De plus, sa température d'ébullition à pression atmosphérique étant très élevée, une partie du processus doit être réalisé sous très basse pression (de l'ordre de 5 à 200 mbar). Selon la configuration, un système fonctionnant au R718 peut atteindre un COP plus élevé par rapport aux autres systèmes. Ces systèmes, proposées par l'ILK Projekt-gmbH à Dresde, n'existent pour l'instant que pour des puissances frigorifiques situées entre 650 et 1 000 kW_{th}. [15].

Caractéristiques environnementales

La vapeur d'eau fait partie des gaz à effet de serre. Cependant, l'impact des émissions de source anthropiques est négligeable par rapport aux quantités se trouvant de manière naturelle dans l'atmosphère. Son bon coefficient de performance entraîne des émissions réduites liées à la consommation en énergie.

Contraintes légales

Aucune contrainte légale spéciale ne s'oppose à l'application de l'eau en tant que réfrigérant principal.

R718	
Nom chimique / Composition	Eau
Type	Naturel
Numéro CAS	7732-18-5
Masse molaire [g/mol]	18,02
Température critique [°C]	374,2
Pression critique [bar]	221,0
Température d'ébullition (à pression atmosphérique) [°C]	100
Plage d'application de température[°C]	> 5
Compatibilité avec les métaux	Implique un traitement anti-corrosif
Compatibilité avec les huiles	Pratiquement pas de contact huile-eau
Phrases R	Non classé comme préparation dangereuse
Phrases S	Non classé comme préparation dangereuse
ODP [kg R11-equiv.]	0
GWP ₁₀₀ [kg CO ₂ -equiv.]	non déterminé
Acidification [kg SO _x -equiv.]	0
POCP [kg Ethylène-equiv.]	0
Groupe de sécurité	A1
Valeurs MAK [ppm]	-
Autorisation d'exploitation	-

tableau 2-8 : caractéristiques du R718 [3][16][23]

2.1.10 Comparaison des fluides frigorigères

Fluide frigorigère		R22	R134a	R404A	R407C	R410A
Technique	Nom chimique / Composition	Chlorodifluorométhane	(1,1,1,2) - Tetrafluoroéthane	R125 / R143a / R134a (52% / 44% / 4%)	R134a / R125 / R32 (52% / 25% / 23%)	R125 / R32 (50% / 50%)
	Type	HCFC	HFC	Mélange zéotrope (HFC)	Mélange zéotrope (HFC)	Mélange zéotrope (HFC)
	Plage d'application de température [°C]	-40 à +10	-25 à +15	-45 à 0	-40 à +5	-50 à -0
Environnement	ODP [kg R11-equiv.]	0,05	0	0	0	0
	GWP ₁₀₀ [kg CO ₂ -equiv.]	1 700	1 300	3 800	1 700	2 000
	Acidification [kg SO _x -equiv.] ⁵	1,11	0,96	sans indication	1,12	1,28
	POCP [kg Ethylène-equiv.]	0	0	0	0	0
Sécurité	Groupe de sécurité	A1	A1	A1/A1	A1/A1	A1/A1
	Valeurs MAK [ppm]	500	1 000	500	1 000	1 000
Généralités	Autorisation d'exploitation	Utilisation en grande partie interdite	Utilisation limitée par l'Administration de l'Environnement	Utilisation limitée par l'Administration de l'Environnement	Utilisation limitée par l'Administration de l'Environnement	Utilisation limitée par l'Administration de l'Environnement

tableau 2-9 : comparaison des propriétés principales des fluides frigorigères

⁵ voir « caractéristiques environnementales » chapitre 2.1.2

Fluide frigorigène		R22	R717	R290	R744	R718
Technique	Nom chimique / Composition	Chlorodifluorométhane	Ammoniac	Propane	Dioxyde de Carbone	Eau
	Type	HCFC	Naturel	Naturel (hydrocarbure)	Naturel	Naturel
	Plage d'application de température[°C]	-40 à +10	-35 à +10	-40 à +10	-55 à 0	>5
Environnement	ODP [kg R11-equiv.]	0,05	0	0	0	0
	GWP ₁₀₀ [kg CO ₂ -equiv.]	1 700	< 1	< 1	1	non déterminé
	Acidification [kg SO _x -equiv.] ⁶	1,11	1,88	sans indication	sans indication	0
	POCP [kg Ethylène-equiv.]	0	0	0,42	0	0
Sécurité	Groupe de sécurité	A1	B2	A3	A1	A1
	Valeurs MAK [ppm]	500	25	1 000	5 000	-
Généralités	Autorisation d'exploitation	Utilisation en grande partie interdite	Mesures spécifiques requises par l'Inspection du Travail et des Mines	Utilisation limitée par l'Inspection du Travail et des Mines	Mesures spécifiques requises par l'Inspection du Travail et des Mines	-

tableau 2-9 : comparaison des propriétés principales des fluides frigorigènes (suite)

⁶ voir « caractéristiques environnementales » chapitre 2.1.2

2.2 Les émissions de fluides frigorigènes

Bien que la source principale de pollution d'un système frigorifique à compression soit sa consommation électrique, il s'avère impératif d'éviter au maximum l'émission de réfrigérant dans l'atmosphère.

Ces émissions peuvent être classées selon 7 types selon leurs origines:

- émissions fugitives (p.ex. raccords),
- dégradations d'étanchéités,
- pertes par élément de sécurité,
- ruptures de composants,
- pertes par manipulations des fluides,
- pertes accidentelles et
- pertes en fin de vie.

Selon le secteur, l'âge, la taille et le type du système considéré, certaines causes de fuites sont plus prévalantes que d'autres. Les différents types de causes repris ci-dessous peuvent servir de première approximation pour l'analyse de fuites d'une installation frigorifique. [25] Un règlement grand-ducal concernant le contrôle de fuites dans des équipements frigorifiques et climatiques utilisant des CFC; HCFC et HFC a été émis en date du 18 avril 2004 (voir chapitre 6.1.7).

Les symptômes

Les symptômes suivants peuvent être une première indication de perte de réfrigérant : [34]

- la présence d'huile sur l'extérieur du circuit,
- un niveau trop bas dans la bouteille de liquide,
- le voyant liquide montre des bulles quand le système est en marche,
- l'évaporateur n'atteint pas la température prévue sur toute la surface,
- un fonctionnement plus fréquent ou continu du compresseur,
- la surchauffe plus élevée du compresseur, dans le cas où celui-ci est refroidi par le réfrigérant.

Notons que ces symptômes peuvent également indiquer un autre problème technique, sans que la fuite de réfrigérant n'en soit obligatoirement la cause.

2.2.1 Les émissions fugitives

Les émissions fugitives, communément appelées « fuites », sont les pertes de réfrigérants auxquelles l'on attribue généralement les émissions dues aux raccords de circuit. Elles dépendent du fluide, de la pression, du nombre et de la qualité des raccords du système.

Des campagnes d'études de pertes de charge frigorifique (tous types d'installations confondus) ont relevé des inétanchéités sur certains éléments comme p.ex.: [25] [26]

- les raccords bordés,
- les voyants de liquide,
- les raccords de type « flare » (raccords vissés),
- les brides,
- les évaporateurs,
- les détendeurs,
- les joints de filtres.

Les solutions suivantes permettent de réduire partiellement ces fuites : [25]

- réaliser des tests de pression et à vide lors de la première mise en route de l'installation, de manière à repérer les défauts de montage,
- veiller à l'accessibilité des différents composants, de façon à pouvoir effectuer facilement et rapidement des mesures d'étanchéité et des réparations de raccords,
- surveiller le taux de corrosion du système et y prendre les mesures adéquates pour prévenir tout risque de fuite,
- remplacer les raccords à visser (p.ex. du type « flare ») par des raccords brasés propres (raccord par capillarité) ou soudés, ou, si ce n'est pas possible, préférer les raccords à visser coniques aux cylindriques (ces derniers sont moins étanches),
- faire réaliser les travaux de soudure par une personne qualifiée,
- ne pas se limiter à la vérification du circuit de la salle machine, mais faire également vérifier les composants situés à distance.

2.2.2 Les dégradations d'étanchéité

Les sources de pertes reprises ici sont les dégradations d'étanchéité. Ces dégradations proviennent non seulement de l'utilisation, mais également des variations de température et de pression et des vibrations du système. Les quantités de pertes par non-étanchéité sont en partie dépendantes de la quantité de charge frigorifique de l'installation : les installations à charges réduites pourront perdre la totalité de leur charge à partir d'un élément défectueux, alors que l'impact sur le fonctionnement d'une installation de grande taille sera relativement moins important. Ces dégradations d'étanchéité sont une source importante de pertes de fluide dans le secteur agro-alimentaire, alors que dans les secteurs tertiaire et industriel, une bonne conception et exploitation permettent de réduire l'impact de ce problème.

Les composants repris ci-dessous ont été relevés comme étant souvent non-étanches:

- les têtes d'électrovannes,
- les robinets (presse-garniture, isolation),
- les éléments Schrader, un dispositif auto-obstruant pour les prises de pressions rapides (vanne-à-souder).

Les mesures suivantes permettent de pallier certains de ces problèmes : [25]

- utiliser une pâte d'étanchéité adaptée à la fréquence de montage/démontage des détenteurs: plus le mouvement sera fréquent (p.ex. filtres), plus la pâte devra être flexible,
- lors de la manipulation de la presse-garniture, desserrer et bien resserrer l'écrou pour éviter qu'il ne se dévisse lors de la rotation de la partie mobile,
- vérifier la position du dispositif de la vanne-à-souder, ceux-ci peuvent ne plus être étanches après utilisation,
- dans le cas de compresseurs ouverts, la garniture d'étanchéité du couplage entre le moteur et le compresseur peut se détériorer au fil du temps et est donc un élément à surveiller,
- veiller à ce que chaque vanne soit équipée de son capuchon d'étanchéité,
- les bouchons d'étanchéité doivent être de bonne qualité et leur état surveillé, (risque de déformation des élastomères par le gel),
- vérifier la compatibilité de l'étanchéité envers l'huile et le réfrigérant, pour éviter toute détérioration accélérée de l'élastomère.

2.2.3 Les pertes par éléments de sécurité

Les émissions dues aux systèmes de sécurité du circuit frigorifique sont des pertes liées au dysfonctionnement de l'installation. Leur régulation demande cependant souvent à être optimisée. Dans le cas d'une régulation trop sensible, les instruments réagissent trop rapidement et libèrent inutilement du réfrigérant. De plus, leur étanchéité peut être limitée en fonction de l'importance et du nombre de déclenchements. Les émissions dues à ces éléments sont difficilement quantifiables, car selon l'instrument considéré, les quantités seront réduites (p.ex. soupapes de sécurité) ou importantes (p.ex. disques de rupture).

Les principaux composants pouvant poser ce genre de difficulté sont les suivants :

- les disques de rupture,
- les soupapes de sécurité,

Les possibilités suivantes permettent de résoudre certaines de ces difficultés : [25]

- s'assurer de la qualité de l'échange de chaleur du condenseur (positionnement adéquat, encrassement et endommagements réduits, bonne ventilation) pour éviter une augmentation de pression du système et ainsi le dégazage du réfrigérant,

- vérifier à écarter tout problème pouvant causer une surpression de l'installation pour éviter un déclenchement de la soupape de sécurité ou même du disque de rupture. (p.ex. échauffement rapide du fluide lors de l'arrêt du système avec circulation du circuit secondaire (système indirect ou système à cascade),
- éviter au mieux l'introduction d'air lors de la charge du fluide, car celui-ci sera évacué par le groupe de purge ensemble avec une partie du réfrigérant,
- utiliser une bouteille tirée au vide pour la récupération d'effluents des groupes de purge, de manière à réduire les émissions de réfrigérant dans l'atmosphère,
- utiliser le groupe de purge comme système de détection de fuite, car des purges fréquentes sont le signe de pénétration d'air dans le système, et donc d'inétanchéités dans le cas de système fonctionnant en sous-pression,
- vérifier les soupapes ayant atteint 90% de leur pression de tarage, car elles peuvent avoir perdu de leur étanchéité,
- installer une soupape de sécurité en série avec le disque de rupture, réduisant ainsi les inétanchéités du premier et empêchant la perte totale de charge du second.

2.2.4 Les ruptures de composants

Les ruptures de composants de systèmes sont des phénomènes peu courants, de provenances diverses :

- non-respect des normes techniques lors de la conception et de l'installation du système,
- mauvaise compatibilité du fluide frigorigène avec le lubrifiant du système, menant à la détérioration des joints,
- traitement de l'eau insuffisant ou non-existant, avec comme résultat la corrosion des composants,
- utilisation de la tuyauterie comme marche-pied,
- sur-serrage des écrous, avec rupture lors du dévissage,
- percements ou ruptures d'éléments dues à des vibrations,
- absence de maintenance.

Les quantités de fuites émises lors de ces avaries sont difficilement quantifiables mais peuvent mener à la perte totale de la charge en réfrigérant. La mauvaise mise en œuvre de l'installation de production de froid est la raison majeure de ces ruptures. Une bonne conception, un contrôle détaillé et régulier du chantier ainsi qu'une bonne maintenance permettent de contrevenir à ces difficultés. [25]

2.2.5 Les pertes par manipulations des fluides

A l'occasion de la mise en marche et de la maintenance de systèmes de production de froid, la charge et le vidage du circuit frigorigène sont nécessaires. Ces manipulations suivantes peuvent cependant constituer des sources de pertes de fluide frigorigène:

- mauvais arrangements des circuits de raccordement,
- absence ou mauvaise fermeture des robinets d'isolation,
- purge du fluide résiduel du récipient de charge,
- absence de vidange du réfrigérant avant le remplacement d'éléments du système,
- efficacité réduite du système de récupération de fluide.

Les quantités d'émission sont surtout dépendantes de l'efficacité du système de récupération, les pertes causées par la charge du fluide étant faibles. Les pertes dues à la manipulation de réfrigérants peuvent être une des sources principales d'émissions de systèmes rencontrés dans le secteur tertiaire et le secteur industriel. Le taux de récupération peut fortement varier, entre 80% pour les installations de récupération classiques (exemple d'un système de surpression à l'air sec) à des taux de 95 % de la charge totale pour les récupérations poussées (exemple d'un système à pompes pneumatiques et à vide). Des taux de récupération plus réduits peuvent être obtenus si la manipulation n'est pas effectuée selon les règles de l'art. Notons de plus qu'une certaine quantité de réfrigérant reste mélangée dans le lubrifiant.

Les pertes dues à la manipulation de réfrigérants peuvent être limitées, entre autres, par les mesures suivantes :

- externaliser au possible les pièces isolables, de manière à réduire le nombre d'ouvertures et donc le vidage de l'installation,
- optimiser la fréquence des maintenances importantes requérant le vidage du système,
- utiliser une tubulure de prélèvement d'huile pour en vérifier sa qualité, au lieu d'effectuer son changement systématique,
- réaliser une analyse des interventions, puis, en fonction de leurs fréquences et des pertes s'y accompagnant, chercher à les optimiser de manière à réduire les émissions de réfrigérants. [25]

2.2.6 Les pertes accidentelles

Tout comme les pertes par ruptures de composants, les pertes de fluides frigorigènes dues aux accidents (incendies, explosion, etc.) peuvent être aussi importantes que diverses. Les causes de ces accidents sont de caractère exceptionnel, auxquelles aucune solution généralisée ne peut être proposée.

2.2.7 Les pertes en fin de vie

Arrivés en fin de vie, les systèmes frigorigènes doivent être vidés de leurs fluides, puis démantelés. Cette vidange est obligatoire pour les CFC et HCFC, selon l'article 16 du règlement CE 2037/2000 relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone. Les méthodes de vidange de l'installation sont les mêmes que celles utilisées dans le cadre de la maintenance (voir plus haut). Notons que la personne chargée de la récupération doit, dans le cas de l'utilisation de CFC, avoir un agrément pour la vidange d'installations (loi du 14 avril 1992 portant réglementation de la mise sur le marché de substances qui appauvrissent la couche d'ozone). Les CFC, HCFC et HFC

sont, selon la loi du 17 juin 1994 relative à la prévention et à la gestion des déchets, considérés comme déchets dangereux. Ils sont liés aux obligations définies par cette loi ainsi que par le règlement grand-ducal du 11 décembre 1996 relatif aux déchets dangereux.

Différentes méthodes de détection de fuites ont été développées au fil du temps, en fonction de la taille de l'installation, du type de réfrigérant et du niveau de précision requis : [25]

Détection globale par variation de pression : installation soumise à une surpression (azote) puis sous-pression (pompe à vide), avec mesure de la variation de la pression interne.

Avantages : localisation des fuites, méthode simple de contrôle pour les installations neuves ou hors-service, intéressante pour les fuites de petites tailles non-détectables sous pression normale,

Inconvénients : méthode manquant de précision, ne permet pas la quantification du taux de fuite.

Détection globale par coloration : détection d'inétanchéité par introduction d'un colorant marquant l'endroit de la fuite, respectivement par fluorescence : traceur fluorescent visible à l'aide d'une lampe UV (selon le système, installé directement lors du montage).

Avantages : localisation exacte des fuites,

Inconvénients : ne permet pas la quantification du taux de fuite.

Détection globale par pesée de bouteille de remplissage : pesée des bouteilles de réfrigérants avant et après le remplissage de l'installation.

Avantages : permet de déterminer le taux de fuite global de l'installation, méthode complémentaire aux autres nommées ici,

Inconvénients : précision de la méthode dépendante du protocole de mesure, ne permet pas la localisation des fuites.

Détection locale par détecteur manuel : mesure de la quantité de réfrigérant dans l'air par l'entremise d'un appareil de mesure électronique (système à diode, à conductibilité thermique, etc.).

Avantages : méthode très précise, localisation des fuites,

Inconvénients : convient pour les fuites ponctuelles, quantification du taux de fuite très difficile car nécessite la mesure de tous les composants non-étanches, encrassement rapide et pouvant fausser les mesures.

Détection locale par eau savonneuse : observation de fuites par l'apparition de bulles dues au badigeonnement d'eau savonneuse.

Avantages : méthode simple, localisation des fuites,

Inconvénients : convient pour les fuites ponctuelles, ne permet pas la quantification du taux de fuite.

2.3 La substitution de réfrigérants

L'interdiction des CFC par le règlement CE 2037/2000 ainsi que des HCFC par la loi du 14 avril 1992 implique le remplacement, sous une forme ou une autre, du système frigorifique. Ce remplacement peut prendre la forme soit :

- de l'entièreté de l'installation, ce qui représente une solution simple, mais généralement coûteuse,
- du réfrigérant par un autre neutre vis-à-vis de la couche d'ozone, une solution selon le cas difficile à réaliser et pouvant avoir certaines conséquences sur la production frigorifique.

Pour les installations en fin de vie ou ayant des problèmes techniques (inétanchéité, pannes, mauvaise efficacité énergétique, etc.), le remplacement total de l'installation s'avère plus intéressant que la simple substitution du réfrigérant. D'un autre côté, le remplacement du fluide frigorifique peut être réalisé, dans les limites du techniquement possible, sur des installations relativement neuves ou étant encore en bon état de fonctionnement. Les critères de choix entre ces deux solutions sont multiples et doivent, entre autres, tenir compte des aspects suivants :

- faisabilité technique,
- coûts financiers,
- conditions de garantie du frigoriste.

2.3.1 Les critères de substitution

Bien que la substitution du fluide frigorifique soit une solution moins onéreuse que le remplacement total du système, elle n'est pas toujours possible. L'installation a été conçue pour un réfrigérant aux caractéristiques bien précises auxquelles celles du nouveau réfrigérant peuvent ne pas correspondre. Pour éviter, ou du moins limiter, les problèmes liés à la substitution de fluide (réduction de la puissance frigorifique, endommagement du système, etc.), les propriétés des différents réfrigérants à disposition doivent correspondre le plus possible à celles du fluide à remplacer.

Propriétés thermodynamiques

La production frigorifique volumique, qui est la quantité de froid produit par volume de réfrigérant, permet de voir l'impact théorique de la substitution du réfrigérant sur la puissance frigorifique de l'installation. Elle se détermine en multipliant l'enthalpie d'évaporation par la densité de vapeur à l'entrée du compresseur et varie en fonction de la température d'évaporation [31]. Pour une température d'évaporation de 0°C et une température de condensation de 50°C, le R22 a une production frigorifique volumique d'environ 3030 kJ/m³, alors que celle du R134a atteint 1820 kJ/m³ : le compresseur doit dans ce cas être remplacé afin de couvrir cette différence. Il est conseillé de vérifier la variation de puissance frigorifique avant la substitution : dans le cas d'un écart minime, celui-ci peut être compensé par un sous-refroidissement du réfrigérant à sa sortie du condenseur. [31]

Un aperçu de la variation de l'efficacité énergétique du système due à la substitution du fluide peut être obtenu en comparant le coefficient de performance (COP) théorique des deux fluides (par le

diagramme de Mollier, selon la relation $COP = \frac{h_2 - h_1}{h_3 - h_2}$, ou $h_2 - h_1$ est la différence d'enthalpie survenant lors de l'évaporation et $h_3 - h_2$ la différence d'enthalpie due à la compression.). Pour une température d'évaporation de 0°C, une surchauffe de 5K et une température de condensation de 45°C, le R22 atteint théoriquement un COP de 4,3, alors que, pour les mêmes températures, le R404A n'atteint qu'un COP de 3,4. Cependant, il est important de noter que cette méthode ne tient pas compte de toutes les propriétés du réfrigérant ou de l'installation. Elle ne peut donc servir qu'en première approximation pour la comparaison entre différents fluides.

La pression de condensation du fluide de substitution doit pouvoir être supportée par le système (détendeur, conduites, etc.). Dans le cas, p. ex., du remplacement du R22, le R410A n'est pas repris comme fluide de remplacement. En effet, pour une température de condensation de 40°C, le R22 atteint une pression de 15 bar, alors que la pression du R410A serait de 24 bar, nécessitant éventuellement le remplacement d'une grande partie des composants. [3] [29].

La température critique du fluide doit être compatible avec les besoins en froid. Le réfrigérant R23 est un fluide dont la température critique atteint 26°C, il ne pourra donc être utilisé à des fins de climatisation.

La température de refoulement au compresseur doit se tenir dans les limites tolérées par l'installation. L'augmentation de température du réfrigérant lors de la compression peut atteindre, selon le fluide, une température relativement élevée : pour un cycle monoétagé, $t_{vap.} : -10^\circ C$, $t_{cond.} : 40^\circ C$, surchauffe : 10 K et une compression idéale (isentropique), la température de refoulement du R22 atteint 75°C, l'ammoniac par contre 126°C. [1]

La conductivité thermique du fluide, importante pour le transfert de chaleur lors de la condensation et de l'évaporation, joue particulièrement un rôle dans le cas de l'utilisation de réfrigérants zéotropes. Le glissement de température peut réduire l'efficacité énergétique de l'installation si les mesures adéquates n'ont pas été prises (remplacement des évaporateurs noyés, etc.).

Compatibilité avec l'huile de système

L'utilisation d'huile dans le circuit frigorifique est nécessaire pour lubrifier les parties mécaniques, pour assurer l'étanchéité de composants et, selon le cas, pour le refroidissement du compresseur. Malgré l'utilisation de séparateur d'huile, une partie de celle-ci peut se retrouver dans le circuit frigorifique ensemble avec le réfrigérant et doit être recirculée vers le compresseur. Si les deux ne sont pas miscibles (deux phases distinctes comme p.ex. dans le cas de l'ammoniac et d'une huile minérale), des mesures spéciales, comme p.ex. des conduites supplémentaires, doivent être prévues. Si l'huile et le fluide savent se mélanger, la recirculation du lubrifiant est réalisée avec le réfrigérant.

Dans le cas du remplacement du fluide frigorifique, l'aptitude à cette miscibilité doit être vérifiée. En effet, une réduction de celle-ci risque de réduire l'efficacité de l'installation (mauvaise lubrification du compresseur, accumulation d'huile dans les coudes, détérioration de l'échange thermique, etc.) De plus, un mauvais choix d'huile peut mener à une réaction entre le réfrigérant et le lubrifiant, qui sont la cause de différents problèmes (réduction de l'effet lubrifiant, changement des qualités thermodynamiques du fluide, endommagement de l'installation, etc.) En dernier lieu, la nouvelle huile doit pouvoir conserver ses propriétés selon les paramètres de fonctionnement de l'installation (tem-

pérature, pression, etc.). Notons que, dans le cas de compresseur hermétique, la substitution d'huile s'avère très difficile et nécessite généralement le remplacement de cet élément. [1] [3] [29]

Compatibilité envers les métaux et autres matériaux

Les HFC ne posent pas de problèmes majeurs envers les métaux généralement utilisés dans le domaine du froid. Il faut cependant tenir compte de la réactivité du mélange réfrigérant-huile-eau envers les métaux pour éviter tout endommagement excessif par corrosion du système. Par contre, des mesures particulières doivent être prises quant à l'utilisation de l'ammoniac. Mis en présence d'humidité et d'oxygène (p.ex. en cas d'inétanchéité), il peut s'avérer être fortement corrosif : les alliages en cuivre ou en laiton sont à éviter. [29] [3]

Mis à part les métaux, une installation frigorifique comprend divers autres matériaux, comme p.ex. des fibres ou des laques (isolation électrique), des élastomères (étanchéité), etc., dont la compatibilité avec le réfrigérant et l'huile jouent un certain rôle. Ces derniers peuvent réagir avec ces matériaux et mener à leur détérioration (gonflement, séchage, dissolution, etc.). Les élastomères sont sensibles à ce genre de réaction, et une attention toute particulière doit leur être donnée lors de la substitution du réfrigérant. Notons que les étanchéités ne se composent pas uniquement d'élastomères, mais aussi d'autres matériaux (durcisseur, etc.) dont le comportement envers les nouveaux fluides et huiles peuvent également poser problème. [3]

Un déshydrateur, qui par des substance hydrophile (p.ex. sels) permet de réduire le taux d'humidité du système, est souvent ajouté au circuit de froid. Ces substances étant spécifiques au réfrigérant du circuit, il est nécessaire de vérifier la compatibilité entre celles-ci et le nouveau fluide frigorifique. Dans la pratique, le déshydrateur est changé systématiquement. [29] [3]

De manière générale, il est toujours conseillé de demander avis auprès d'un frigoriste en ce qui concerne la compatibilité du réfrigérant de substitution envers les différents éléments de l'installation. Celui-ci pourra faire une première évaluation des risques d'encrassements et d'humidification, ainsi que de l'impact des restes de chlore et d'huiles sur le fonctionnement du système.

2.3.2 Les fluides de substitution du R22

Le R22 couvre un tel éventail d'applications dans le domaine du froid qu'il s'avère difficile de déterminer un seul et unique réfrigérant de substitution (comme cela peut être le cas du R12 par le R134a). Selon l'application, différentes possibilités sont à disposition, entraînant toutes cependant certains inconvénients et difficultés techniques.

Le R134a

Le R134a est, de par son niveau de pression et de température critique, utilisé comme fluide de remplacement dans le domaine de la climatisation (température $>6^{\circ}\text{C}$) et du froid positif (température entre 0 et 6°C). Il a une production frigorifique volumique largement plus réduite que celle du R22 (de l'ordre de 30 à 50%), ce qui entraîne généralement le remplacement du compresseur. Certaines installations récentes fonctionnant au R22 et utilisant un turbocompresseur ont été préparées au remplacement par du R134a, ce qui réduit le nombre de pièces à remplacer lors de la substitution. L'utilisation de ce réfrigérant n'entraîne normalement pas de réduction de l'efficacité

énergétique, dans certains cas celle-ci peut même être plus élevée que lors de l'utilisation du R22. Sa température de refoulement au compresseur est relativement faible et sa conductivité thermique à l'état gazeux est même meilleure que celle du R22. L'huile du système doit être complètement remplacée : le R22 est principalement utilisé avec des huiles minérales et des huiles alkylbenzènes (AB), des lubrifiants avec lesquels le R134a ne montre que peu de miscibilité. Il est généralement conseillé d'utiliser des huiles de type polyalkylène glycol (PAG) ou, mieux car moins hygroscopiques que ces dernières, des huiles polyesters (POE) et de remplacer les filtres. L'utilisation de caoutchouc fluoré comme matériau d'étanchéité est, pour des raisons de déformation, déconseillé. [3] [29] [30] [31]

Le R404A

Ayant une température critique relativement basse, le R404A est surtout utilisé dans le domaine des températures positives et négatives. Sa puissance frigorifique volumique est pratiquement du même ordre de grandeur que celle du R22 : le remplacement du compresseur n'est donc pas obligatoirement nécessaire. L'impact du COP plus réduit est en partie compensé par une bonne conductivité thermique sous forme gazeuse. Le R404A se comporte pratiquement comme un mélange azéotropique (glissement de température très faible) et ne pose pas les problèmes rencontrés avec le R407C ou le R417A. Sa pression de système est légèrement supérieure, la température de refoulement à la sortie du compresseur fortement inférieure à celle du R22. L'utilisation d'huiles de type PAG n'est pas requise. Il est surtout conseillé par les producteurs de réfrigérants ainsi que par les constructeurs de compresseurs d'utiliser des huiles de type POE. Les caoutchoucs fluorés comme matériau d'étanchéité sont déconseillés. [3] [29] [30] [31]

Le R407C

Le R407C est largement répandu dans la climatisation, car il possède à ce niveau de température une puissance frigorifique volumique similaire à celle du R22. Dans le domaine du froid positif et dans celui du froid négatif, cette puissance frigorifique volumique est plus réduite. C'est un fluide dont l'efficacité énergétique est inférieure, mais dont la pression de système, la température critique et la température de refoulement sont similaires à celles du R22. Les huiles et les matériaux compatibles avec le R404A le sont également avec le R407C. Son inconvénient principal est son glissement de température élevé : celui-ci peut fortement réduire la conductivité thermique du réfrigérant, ainsi que la puissance frigorifique de l'installation. Les évaporateurs noyés doivent si possible être remplacés et le fonctionnement de l'installation régulièrement surveillée quant :

- aux fuites (variation de la concentration des différentes composantes du fluide, menant à des changements de fonctionnement de l'installation),
- à la miscibilité de l'huile (enrichissement de certaines composantes du fluide frigorifique dans celle-ci avec comme effet le changement de la concentration des réfrigérants),
- aux échangeurs de chaleurs (réduction de l'efficacité de l'échange de chaleur par une mauvaise répartition du fluide) etc. [3] [29] [30] [31] [32]

Le R417A

Le R417A trouve son application principale en climatisation, mais aussi dans le domaine du froid positif et négatif. Malgré une production frigorifique volumique moindre, le remplacement du compresseur n'est pas obligatoirement nécessaire. Son efficacité énergétique ainsi que sa température critique sont du même ordre de grandeur que celle du R22. La pression de système ainsi que la température à la sortie du compresseur sont moins importantes. Bien que le R417A soit un mélange contenant du R600a, il n'est pas repris par l'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) comme fluide inflammable. Les difficultés du R407C liées à son fractionnement sont également rencontrées ici, car le R417A a un glissement de température important. Les mesures décrites précédemment concernant l'utilisation de substances zéotropiques sont donc de mise. L'intérêt principal de ce réfrigérant est qu'il est considéré comme étant un drop-in ne nécessitant pas le remplacement du lubrifiant, qu'il soit du type minéral ou AB. Le R417A est miscible avec des huiles de type POE. Les matériaux généralement utilisés pour les installations fonctionnant au R22 ne posent pas, selon le producteur du réfrigérant, de problèmes particuliers [29] [30] [32] [33]

Le R507A

Le R507 a des propriétés similaires à celles du R404A. Il est surtout utilisé dans le domaine des températures positives et négatives à cause de sa température critique relativement basse. Sa puissance frigorifique volumique est du même ordre de grandeur que celle du R22 : le remplacement du compresseur peut ne pas être nécessaire. La production de froid nécessite plus d'énergie, car le COP théorique du R507C est plus réduit. Son niveau de pression de système est légèrement plus grand que celui du R22, et sa température de refoulement au compresseur est moindre. La conductivité thermique, sous forme gazeuse, est plus importante et la compatibilité avec les huiles et matériaux est la même qu'avec le R404A. L'intérêt principal de ce fluide est son caractère azéotropique, ce qui permet de conserver les composants de type noyés (p.ex. évaporateurs). [3] [29] [30] [31] [32]

Le R290

Le R290, de par ses caractéristiques, pourrait trouver application dans le domaine de la climatisation, du froid positif et du froid négatif. Bien que sa production frigorifique volumique soit plus basse que celle du R22, la différence n'est normalement pas assez importante pour entraîner le remplacement du compresseur. C'est un réfrigérant à bonne efficacité énergétique, et dont ni le niveau de pression, ni la température critique et ni la température de refoulement au compresseur ne posent de problème dans le cadre de la substitution du R22. Par rapport à ce dernier, la conductivité thermique du R290 est même meilleure. L'importante miscibilité du propane dans l'huile, entraînant une réduction de la viscosité, implique l'utilisation d'un lubrifiant à viscosité adaptée : l'utilisation d'huile de type PAG, analysée dans le cadre d'un projet de recherche du Forschungsrat Kältetechnik e.V., a donné de bons résultats. Les élastomères du type chloropren utilisés pour le R22 peuvent en principe être utilisés, mais d'autres matériaux (p.ex. caoutchouc fluoré) sont mieux adaptés quant à l'utilisation avec du propane. Le problème de taille du R290, et des hydrocarbures en général, est sa haute inflammabilité. Les mesures nécessaires (protection contre l'explosion, etc.) pour garantir la sécurité du personnel sont importantes et, dans le cadre de la

substitution de réfrigérants, très complexe, ce qui rend le propane peu intéressant en tant que fluide de remplacement. [29] [30] [31] [32]

Le R717

L'ammoniac trouve son application principale dans le secteur du froid de climatisation, positif et négatif. Sa production frigorifique volumique dépasse celle du R22, alors que leurs efficacités énergétiques sont équivalentes. Le niveau de pression du système et la température critique ne s'opposent pas à une substitution, la température de refoulement au compresseur est cependant élevée. L'ammoniac est un réfrigérant ayant une excellente conductivité thermique. En raison de sa réactivité envers différents matériaux généralement utilisés pour les systèmes fonctionnant au R22, ainsi qu'à cause des importantes mesures de sécurité devant être prises pour garantir la sécurité du site (au Luxembourg, les installations à l'ammoniac doivent pour des raisons de sécurité se situer sur le toit, alors que les installations au R22 sont souvent installées au sous-sol), l'utilisation du R717 en tant que fluide de substitution n'est généralement pas intéressante. [29] [30] [31] [32]

3 L'installation technique

Ce troisième chapitre traite de l'aspect technique des installations. Il couvre brièvement différentes possibilités de production de froid, tels l'absorption, puis décrit le fonctionnement, les composants et les configurations des groupes à compression. Un dernier volet concerne certaines mesures d'optimisation énergétique de ces systèmes.

3.1 Les techniques disponibles

Produire du froid correspond à extraire de la chaleur excédentaire. Cette chaleur enlevée du milieu considéré (local, substance, etc.) ne peut être détruite, mais seulement transportée vers un autre milieu, généralement par un fluide. Ce fluide transporte la chaleur de deux manières différentes :

1. soit en se réchauffant, c.-à-d. en changeant sa température. La chaleur transportée est alors dite « sensible »,
2. soit en changeant d'état, c.-à-d. en se transformant, généralement d'un liquide en un gaz. La chaleur utilisée pour effectuer ce changement d'état est alors appelée « latente ». La majorité des installations de production de froid fonctionnent selon ce principe.

3.1.1 Le système à absorption

Les systèmes à absorption nécessitent pour leur fonctionnement de l'énergie thermique, l'énergie électrique se limitant aux différentes périphéries (pompe, ventilation, etc.). Le réfrigérant (généralement de l'eau ou de l'ammoniac), après son changement d'état dans l'évaporateur (liquide → vapeur), est absorbé par une substance ayant une affinité pour le fluide (p.ex. une solution saline à base de bromure de lithium pour l'eau, de l'eau pour l'ammoniac). La solution (eau/sel ou $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$), redevenue liquide, voit sa pression augmentée par une pompe et est ensuite chauffée à l'aide d'une source thermique (cogénération, collecteurs solaires, etc.). Cet apport de chaleur permet la séparation du réfrigérant de la solution par évaporation. Le réfrigérant est ensuite conduit vers le condenseur, où la chaleur pourra être dissipée. La substance absorbante, ayant retrouvé son état initial après l'apport de chaleur, est réinjectée vers l'absorbeur. Le cycle est complété par la détente du réfrigérant, ce qui le ramène à sa pression d'évaporation.

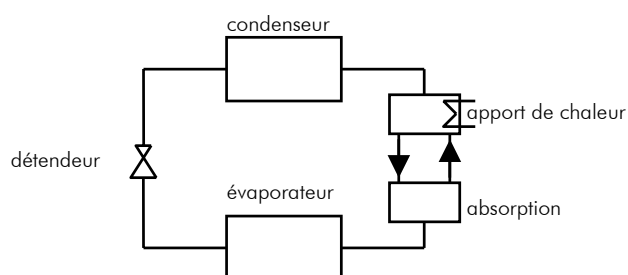


figure 3-1 : schéma de principe d'un système à absorption

Les installations à absorption ont un coefficient de performance plus réduit que les systèmes à compression. Pour cette raison, l'utilisation de système à absorption directe est à déconseiller. Une application intéressante de cette technique se fait en relation avec une installation de cogénération (l'on parlera alors de trigénération). Le COP du système frigorifique ne s'en trouve pas amélioré, mais l'utilisation supplémentaire de l'énergie thermique excédentaire permet d'augmenter l'efficacité énergétique de l'ensemble du système. Une autre possibilité, nécessitant encore une cer-

taine optimisation, est l'utilisation de capteurs solaires thermiques comme source de chaleur, ainsi que la récupération de chaleur sur des procédés à températures élevés. [1] [6]

3.1.2 Le système à compression à air

Contrairement aux systèmes à compression ou à absorption qui utilisent le principe de changement d'état, le système à compression à air fonctionne à la chaleur sensible, c.-à-d. que le gaz utilisé (généralement de l'air) se réchauffe, respectivement se refroidit, mais ne change pas d'état. L'énergie utilisée ici est du type mécanique. Ce genre de système a, de par les déviations du cycle de Carnot et de l'utilisation de l'air, un coefficient de performance relativement bas et n'est appliqué que dans des cas spéciaux (p.ex. climatisation aérienne). [6]

3.1.3 Le système à adsorption

Le système à adsorption, au lieu d'absorber le fluide dans une solution, l'adsorbe, c.-à-d. le concentre à la surface d'un solide. Ce système utilise de l'énergie thermique ainsi que l'eau (réfrigérant) avec du zéolithe (adsorbant), respectivement l'ammoniac et des sels chlorés comme substances. Ce genre de système n'a qu'une application limitée, p.ex. pour des systèmes frigorifiques reliés à des collecteurs solaires. [6]

3.1.4 Le système thermoélectrique

Le système thermoélectrique utilise l'effet Peltier, qui consiste en la variation de température de deux métaux différents soudés l'un à l'autre, quand ceux-ci se voient appliquer une tension continue. La performance énergétique est relativement faible et la puissance limite ce système à certaines applications spécifiques (p.ex. le refroidissement de systèmes électriques). [6]

3.2 Le système à compression

Le système à compression, qui utilise le principe de la chaleur latente, est un type de système relativement peu complexe fonctionne à l'énergie mécanique. Une fois installée et optimisée, cette installation est fiable et atteint un bon coefficient de performance. C'est de loin le système frigorifique le plus répandu. [1]

3.2.1 Les composants principaux

Un circuit frigorifique classique est composé de 4 éléments principaux :

- un évaporateur,
- un compresseur,
- un condenseur et
- un détendeur.

D'autres éléments (p.ex. bouteille de liquide, déshydrateur, filtre, etc.) sont encore rajoutés en fonction des spécificités du système et du réfrigérant.

L'évaporateur

L'évaporateur est un échangeur de chaleur à travers lequel circule le fluide frigorifique, qui extrait de la chaleur du milieu à refroidir en s'évaporant. Un évaporateur peut fonctionner selon deux principes :

- en mode sec ou
- en mode noyé.

Un évaporateur en mode sec voit sa quantité de réfrigérant adaptée de manière à ce que la totalité du fluide soit vaporisée et surchauffée à sa sortie (les coups de liquide, qui peuvent endommager le compresseur, sont ainsi évités). La quantité de réfrigérant nécessaire est moins importante qu'avec les évaporateurs noyés. L'inconvénient de ce type de système est que seulement une partie de la surface d'échange de l'appareil n'est utilisée pour l'évaporation, réduisant ainsi son efficacité thermique.

L'évaporateur en mode noyé est en permanence rempli de réfrigérant à l'état liquide, offrant une surface maximale pour l'échange de chaleur. Un système de séparation des phases liquide/gaz est nécessaire pour éviter toute intrusion de liquide dans le compresseur. De plus, la séparation fluide/huile et l'utilisation de réfrigérants zéotropes (p.ex. R407C) peuvent poser problèmes. [1] [6]

Le compresseur

Le compresseur est l'élément du système qui réalise la mise sous pression du fluide frigorigène, nécessaire à la condensation à température externe du réfrigérant. C'est le principal consommateur en énergie de l'installation, de sa performance dépend donc en partie l'efficacité énergétique de l'installation.

Il existe deux types différents de compresseurs :

- les compresseurs volumétriques et
- les compresseurs centrifuges.

Les compresseurs volumétriques réalisent l'effet de compression par la variation du volume, soit par translation ou par rotation, dans lequel se trouve le réfrigérant. D'utilisation relativement souple, ces compresseurs couvrent une large gamme de puissance et de débit volumique. Les grandeurs physiques influençant le rendement de ces compresseurs sont principalement la pression d'aspiration p_0 et la pression de refoulement p_c (et donc indirectement leur température réciproque). Généralement, le coefficient de performance de ces éléments s'améliore quand :

- la température, respectivement la pression d'évaporation augmente et
- la température, respectivement la pression de condensation diminue.

La différence de température, respectivement de pression, doit donc être réduite au minimum techniquement possible pour permettre une bonne efficacité énergétique.

Les compresseurs centrifuges, ou turbocompresseurs, produisent l'effet de compression en accélérant le fluide par l'entremise d'une roue à aubage, puis en convertissant cette énergie cinétique en pression dans un diffuseur. Ces compresseurs sont essentiellement utilisés dans le cas de débits volumétriques élevés. Les variations de fonctionnement doivent être évitées, car celles-ci peuvent engendrer une forte réduction de l'efficacité du compresseur.

Ces différents types de compresseurs existent sous trois configurations : ouvert, semi-hermétique et hermétique. Les compresseurs ouverts ont leur moteurs situés en dehors de l'élément réalisant la compression. Etant reliés par l'arbre du compresseur, le joint d'étanchéité à cet endroit doit être particulièrement surveillé pour éviter les pertes de réfrigérant et l'entrée d'air dans le circuit. Les compresseurs semi-hermétiques ont leur moteur monté avec le compresseur dans une même unité ouvrable. Ils sont plus étanches que les compresseurs ouverts mais, en raison de leur accès aux différents composants, l'étanchéité des parties amovibles reste à surveiller. Les groupes hermétiques, quant à eux, sont complètement fermés et présentent donc un complète étanchéité. Leur réparation n'est cependant pas possible [1] [6]

Le condenseur / l'échangeur externe

Le condenseur est un échangeur transmettant la chaleur interne emmagasinée par le réfrigérant vers un médium externe, en général l'air ou l'eau. Les condenseurs sont différenciés selon trois types :

- le condenseur à air,
- le condenseur à eau et
- le condenseur à évaporation.

Les condenseurs à air/aérorefroidisseurs sont principalement utilisés sur des installations de petite et de moyenne puissance. Ces systèmes fonctionnent par le biais de ventilateurs, qui forcent le passage de l'air le long d'éléments (tubes, etc.) remplis de vapeur de frigorigène (système direct) ou d'eau (système indirect). Les intérêts principaux de ce type de système sont sa consommation nulle

en eau et une maintenance simple. Par contre, l'air ayant une capacité thermique spécifique plus réduite que l'eau, le compresseur et les ventilateurs ont une taille et une consommation énergétique plus importante (la surconsommation en énergie des ventilateurs peut atteindre les 15% de la consommation totale du système frigorifique). La quantité de réfrigérant nécessaire est également plus importante par rapport à un système à condenseur à eau.

Les condenseurs à eau sont utiles pour les installations de taille importante. De l'eau circule le long de tubes ou de plaques remplis de réfrigérant, lui soustrayant ainsi son énergie thermique. La consommation énergétique due aux pompes est minime par rapport à la consommation des condenseurs à air. Les principaux inconvénients sont les produits chimiques utilisés pour le traitement de l'eau et de la consommation de celle-ci (voir chapitre 4). Pour réduire l'impact de ce problème, l'eau, au lieu d'être rejetée à l'égout, est circulée à travers une tour de refroidissement, qui, de par les ventilateurs utilisés pour le déplacement d'air, nécessite de l'énergie supplémentaire. Le refroidissement à l'eau étant dépendant de la température, l'utilisation de ventilateurs à vitesse variables permet d'adapter le fonctionnement de la tour de refroidissement à cette température, et donc d'économiser de l'énergie.

Il existe également des refroidisseurs à évaporation, dit généralement « hybrides », qui utilisent les deux principes air/eau. En période d'été, le fluide à refroidir (que ce soit réfrigérant ou frigoporteur) est refroidi une première fois à travers une batterie d'échange à travers laquelle circule un courant d'air forcé par un ventilateur (chaleur sensible), puis une seconde fois par un corps d'échange sur lequel est pulvérisé de l'eau (chaleur latente et chaleur sensible). L'eau ruisselée est également utilisée pour réaliser un refroidissement (adiabatique) de l'air circulant à travers le refroidisseur, diminuant ainsi sa température. En période intermédiaire, ou la température externe est déjà plus basse, le refroidissement n'est plus réalisé que par le déplacement de l'air de long du corps d'échange. Cet air subit encore un refroidissement adiabatique, mais la consommation en eau est plus réduite. Quand la température extérieure est assez basse, seul le ventilateur est nécessaire pour réaliser le refroidissement du fluide. Les grands avantages de ces systèmes sont qu'ils sont peu encombrants, plus efficaces énergétiquement, et qu'ils consomment moins d'eau que les refroidisseurs à eau. Le prix d'investissement de ces installations est cependant plus élevé que celui des autres systèmes. [1] [6]

Le détendeur

Pour compléter le cycle frigorifique, le circuit doit pouvoir revenir à sa pression de départ. Ceci est réalisé par le détendeur, qui règle également le débit et la surchauffe du réfrigérant sortant de l'évaporateur. Les principaux détendeurs, pour les évaporateurs de type sec, sont :

- soit thermostatiques,
- soit électroniques.

Les détendeurs thermostatiques sont les modèles les plus répandus. Ils sont bien connus des installateurs et leur prix est raisonnable, mais ont, entre autre, l'inconvénient d'être mal adapté à des variations importantes de charge thermique et de pression de condensation. Pour éviter ces problèmes, des détendeurs à orifices multiples ont été développés, permettant l'ouverture en cascade de plusieurs orifices.

Les détendeurs électroniques, plus chers, permettent d'obtenir une régulation précise, même lors d'un fonctionnement en puissance réduite, et n'ont pas les inconvénients cités du détendeur thermostatique. [1] [6]

L'alimentation des évaporateurs noyés est généralement réalisée par des appareils à alimentation soit directe (p.ex. réglé par un flotteur), soit indirecte (par commande électronique), qui permettent de régler le niveau de liquide dans le corps d'échange.

3.2.2 Le principe de fonctionnement d'un système à compression

Le réfrigérant, qui se trouve dans l'évaporateur à l'état de vapeur (mélange liquide-gaz), absorbe la chaleur (effet de froid) en changeant d'état, devenant gazeux tout en gardant une pression constante. Ce fluide est ensuite entraîné par le compresseur, qui augmente sa pression. Une fois la température de condensation atteinte, le réfrigérant, en changeant à nouveau son état, libère la charge thermique du milieu interne vers le milieu externe par voie du condenseur. Le détendeur permet au fluide de retrouver sa pression et sa température initiale et ainsi de recommencer le cycle frigorifique.

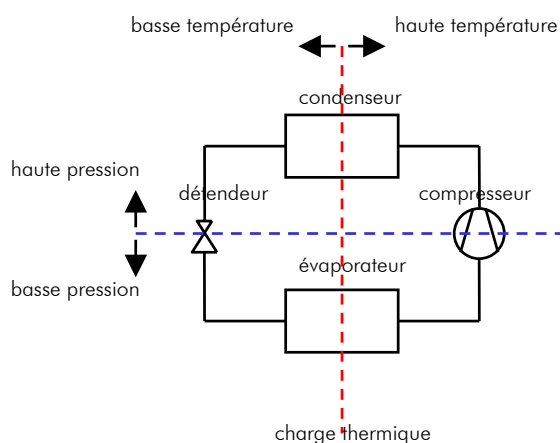


figure 3-2 : schéma de principe d'un système à compression

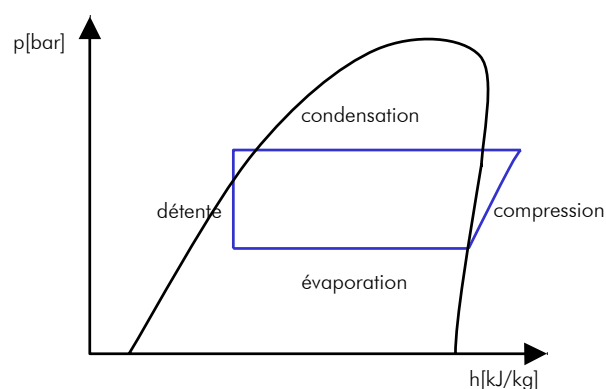


figure 3-3 : cycle thermodynamique d'un système à compression

3.2.3 Les configurations

Les systèmes directs/indirects

Un système direct est une installation dont le transfert de chaleur est réalisé par le réfrigérant, à l'opposé du système indirect, qui lui utilise un fluide intermédiaire, le frigoporteur, entre l'évaporateur et la charge thermique, respectivement le condenseur et le milieu externe.

La figure 3-2 est l'exemple-type d'un système direct. Il est surtout utilisé pour des installations de petites tailles, et à nombre d'évaporateurs réduits. Les principaux avantages du système direct sur le système indirect sont sa faible consommation énergétique (selon le niveau de température et de l'installation, de l'ordre de 15 à 25 %, voir plus, [4] [35]), et donc des frais courants moins élevés, ainsi qu'un besoin réduit en place. Selon la configuration, les coûts d'investissements peuvent également s'avérer être plus limités. [1] [6] [35]

Les systèmes indirects trouvent surtout leur application dans les installations de grande taille. Le transport du froid s'effectuant par le frigoporteur (eau glycolée, CO₂, coulis, etc.), la quantité de réfrigérant nécessaire s'en trouve fortement réduite. Ceci permet également de confiner le réfrigérant à un seul local (obligatoire pour les réfrigérants dangereux, type ammoniac ou propane) et de simplifier la régulation de température. De plus, les systèmes indirects offrent plus de flexibilité quant à la géographie de l'installation : il est plus simple de changer la configuration d'un circuit de frigoporteur que de réfrigérants. [1] [6]

Du point de vue environnemental, le choix entre une configuration directe ou indirecte peut s'avérer délicat:

- les systèmes directs, en raison de leur principe de fonctionnement, nécessitent un volume de réfrigérant important pouvant mener à de sérieuses émissions de réfrigérant en cas de fuite,
- les systèmes indirects ont une consommation énergétique supérieure liée à la consommation des composants auxiliaires (pompes) et aux pertes de température de l'échangeur de chaleur.

Les impacts environnementaux d'installations de petite et de moyenne taille sont principalement dus à la consommation énergétique. Par contre, dans le cas d'installations de grande configuration, le volume de réfrigérant nécessaire peut être proportionnellement plus élevé. Une analyse comparative, selon la méthode TEWI (voir chapitre 7.2), peut alors s'avérer nécessaire pour pouvoir déterminer le système ayant l'effet polluant le plus réduit.

Les systèmes polyétagés

Le système polyétagé est une méthode répandue dans les installations à puissance élevée des milieux industriel et agro-alimentaire, utilisée dans le cas de grands écarts de température entre l'évaporation et la condensation. Elle fait circuler le fluide frigorigène non pas à travers un, mais plusieurs compresseurs reliés en série. Dans le cas d'un système biétagé, le réfrigérant, à l'état gazeux, voit sa pression augmenter jusqu'à une pression intermédiaire par un compresseur basse pression, puis est refroidi jusqu'à son point de saturation (une récupération de chaleur permettra d'augmenter l'efficacité énergétique du système). Toujours sous forme gazeuse, le fluide est ensuite aspiré par le compresseur haute-pression, qui le comprime jusqu'à la pression finale de condensation. Cette méthode permet ainsi d'adapter le cycle frigorifique aux caractéristiques thermodynamiques du réfrigérant et aux besoins en charge frigorifique. Notons qu'il existe des compresseurs spéciaux polyétagés, aussi bien volumétrique que centrifuge, plus compacts que des compresseurs séparés.

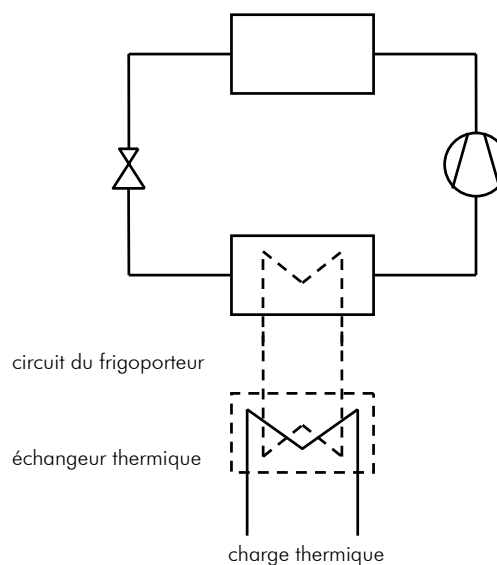


figure 3-4 : schéma de principe d'un système indirect côté évaporation

L'utilisation d'un système polyétagé offre une certaine sécurité de service : leur comportement en charge partielle est meilleur que celle d'un système monoétagé, car adaptable, et en cas de panne d'un des compresseurs, l'installation, selon la configuration, ne se trouvera pas complètement à l'arrêt. La température de refoulement au compresseur du réfrigérant est plus réduite qu'en mode monoétagé, et son efficacité énergétique est plus importante. La technique polyétagée est cependant plus coûteuse, et son fonctionnement plus complexe. [1] [36]

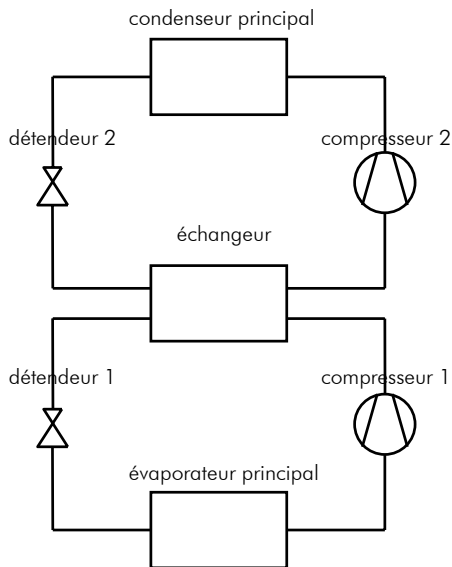


figure 3-5 : schéma de principe d'un système à compression biétagée

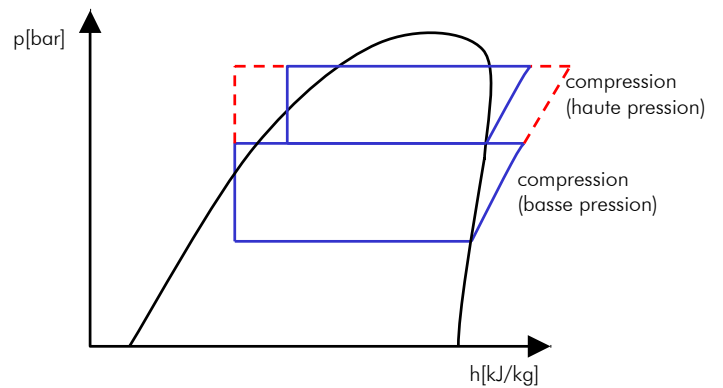


figure 3-6 : cycle thermodynamique d'un système à compression biétagée (ligne interrompue, comportement du système monoétagé consécutif)

3.3 L'optimisation énergétique de l'installation

Un certain nombre de solutions techniques ainsi qu'une maintenance rigoureuse permettent de fortement réduire la consommation énergétique du système. Les différentes possibilités présentées ci-dessous (chapitres 3.3.1 à 3.3.5) sont principalement intéressantes lors de la planification de l'installation, mais peuvent également être appliquées sur des systèmes existants (veiller cependant à demander l'avis d'un expert en la matière, pour éviter tout problème de dysfonctionnement).

3.3.1 L'adaptation des températures de condensation et d'évaporation

Le fonctionnement d'un système frigorifique est défini, entre autres, par la différence de température entre la condensation et l'évaporation. En réduisant cette différence, l'enthalpie de compression s'en trouve réduite, le compresseur travaille de manière plus efficace et la puissance frigorifique s'en trouve augmentée. Cet effet sur l'efficacité énergétique s'accroît pour des températures de condensation de plus en plus basses ainsi que pour des températures d'évaporation de plus en plus élevées, d'où l'intérêt d'optimiser ces températures (et ainsi celle du milieu à refroidir) aux besoins réels ⁷.

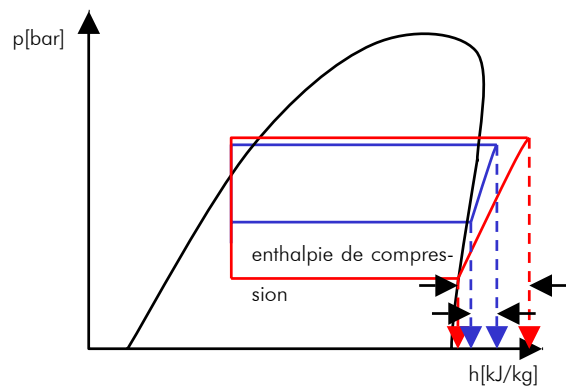


figure 3-7 : variation d'enthalpie de compression suite à une réduction de la pression/température

	Amélioration de la puissance frigorifique par variation de température [%/K]	Augmentation du COP par variation de température [%/K]
Diminution de la température de condensation de 40 à 30°C	0,6	2,6
Augmentation de la température d'évaporation de -5 à +5°C	3,5	3,4

tableau 3-1 : amélioration du COP par diminution de la différence de température entre l'évaporation et la condensation du R22 (pour la variation d'évaporation - caractéristiques de base : $t_{cond} : 30^{\circ}C$, sous-refroidissement : 5K, surchauffe : 10K, pour la variation de condensation - caractéristiques de base : $t_{évap} : 0^{\circ}C$, sous-refroidissement : 5K, surchauffe : 10K) [1]

Un moyen d'adapter la température de condensation à la température extérieure est celui de la méthode dite de la « haute pression flottante ». Au lieu d'utiliser un détendeur thermostatique classique, peu adapté à la variation de pression de condensation, il est plus judicieux d'utiliser des détendeurs à orifices multiples ou, mieux, de type électronique, qui permettent d'adapter la pression (et donc la température) de condensation de consigne à la température du milieu extérieur. En plus

⁷ Notons que l'efficacité maximale du fluide frigorifique est généralement atteinte pour une pression de condensation située entre 5 et 15% et une pression d'évaporation située entre 50 et 85 % de la pression critique du réfrigérant. [4]

des avantages nommés ci-dessus, cette méthode a également l'intérêt de réduire le temps de fonctionnement du compresseur, et donc d'augmenter sa longévité. La réduction de la température de condensation est cependant limitée par une pression de condensation minimum. Celle-ci empêche la formation de gaz (« flash-gas ») dans la partie liquide du circuit frigorifique, néfaste au bon fonctionnement de l'installation. Une possibilité de diminuer cette limite est de réaliser un sous-refroidissement du réfrigérant (voir ci-dessous). [1]

La température d'évaporation est dépendante du milieu ou du procédé à refroidir, et est donc difficile à optimiser. Seul dans le cas de charges thermiques variables (p.ex. meubles froids) peut-elle être adaptée grâce à un système de régulation relié au détendeur électronique, qui définit la température du système en fonction de la charge. [37]

3.3.2 Le sous-refroidissement

Le sous-refroidissement du réfrigérant en-dessous de son point de saturation (chaleur sensible) permet d'améliorer non seulement la puissance frigorifique (réduisant ainsi la taille du compresseur) mais aussi le coefficient de performance de l'installation en augmentant l'enthalpie d'évaporation disponible (l'enthalpie nécessaire à la compression ne changeant pas, voir figure 3-8). L'effet sur la consommation énergétique, variable selon le réfrigérant, est d'autant plus grand que le rapport entre la capacité thermique massique c (sous forme liquide) et l'enthalpie d'évaporation est importante. Il diminue avec l'accroissement du sous-refroidissement.

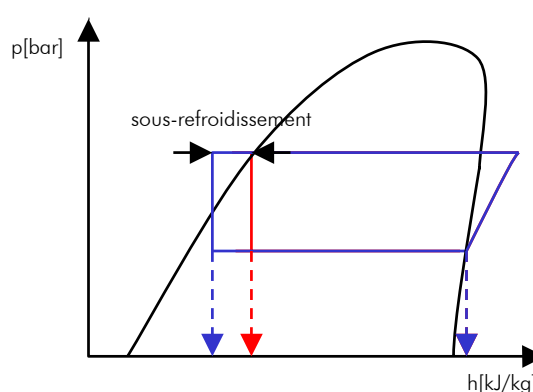


figure 3-8 : sous-refroidissement du cycle

	Augmentation du COP par degré de sous-refroidissement [%/K]	Rapport $c/\Delta h_{\text{évap.}}$ [1/K]
R22	0,76	0,00560
R134a	0,96	0,00655
R717	0,42	0,00357

tableau 3-2 : amélioration du COP par sous-refroidissement (pour $t_{\text{évap.}}$: -15°C , $t_{\text{cond.}}$: 30°C et rendement du compresseur 70% par rapport à la compression isentropique) [1]

Une première possibilité de réaliser ce sous-refroidissement est d'utiliser les vapeurs du réfrigérant à leur sortie de l'évaporateur. Cette méthode, généralement appelée « sous-refroidissement accentué » est surtout indiquée quand l'augmentation de la température de refoulement au compresseur ne pose pas de problème (contre-indiqué pour l'ammoniac) ainsi que dans le cas d'un réchauffement inévitable des vapeurs.

Une autre possibilité, le « sous-refroidissement augmenté », est d'utiliser un compresseur auxiliaire. Bien que l'augmentation de puissance soit toujours valable, l'amélioration de l'efficacité énergétique devient nulle à partir d'un certain point, de par la surconsommation du second compresseur.

Ce système nécessite une étude préalable déterminant le sous-refroidissement optimal pour l'installation.

Une dernière possibilité de refroidir le fluide frigorigère à sa sortie du condenseur est d'utiliser une source ayant une température plus basse que celle du réfrigérant : eau des tours de refroidissement, etc. Cette méthode, plus intéressante dans le domaine de la climatisation et du froid positif, est gratuite et permet de plus d'utiliser, selon le cas, des sources de froid nécessitant une élévation de température. [1]

3.3.3 Le différentiel de régulation de la température d'évaporation

La température de l'évaporateur, pour un compresseur à vitesse fixe, n'est pas constante : elle varie entre deux niveaux de températures qui servent de référence pour le déclenchement et l'arrêt de l'installation frigorifique (méthode du « tout ou rien »). La température moyenne entre ces deux niveaux correspond à la température nominale requise. Quand la température supérieure est atteinte, un système de régulation fait fonctionner l'installation frigorifique jusqu'à ce que la température limite inférieure soit obtenue. L'écart entre ces deux températures, appelé « différentiel de température », règle le mode de fonctionnement de l'installation: plus celui-ci sera grand, plus la fréquence de fonctionnement du système sera réduite, mais plus la durée de fonctionnement de l'installation sera longue.

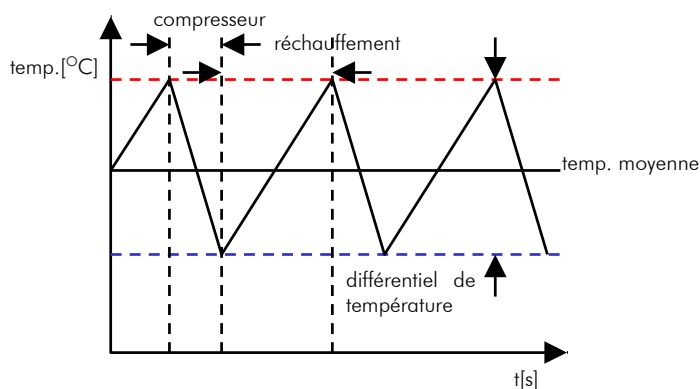


figure 3-9 : variation de la température d'évaporation

Pour optimiser l'installation, il est nécessaire d'utiliser un différentiel réduit. Plus l'écart de température est grand, plus la température d'évaporation réellement atteinte est basse. La consommation électrique du compresseur s'en trouve également accrue, et la température du milieu ou du procédé à refroidir perd en stabilité. L'impact de cette méthode varie en fonction de la charge thermique : une réduction du différentiel de température de 2°C est plus efficace pour des charges thermiques partielles basses qu'élevées. L'inconvénient majeur de cette mesure est que le compresseur est déclenché plus fréquemment, ce qui augmente son usure et diminue sa longévité. [1]

% de la charge thermique maximale [%]	Différentiel de température [K]	Consommation énergétique sur 1 heure [kWh]	Variation de la consommation énergétique du compresseur [%]
20	4	0,45	-
	6	0,52	12,6
80	4	1,55	-
	6	1,62	4,2

tableau 3-3 : augmentation de la consommation électrique d'un compresseur en fonction du différentiel de température et de la charge thermique (fluide R22, $t_{cond.}$: 30,5°C, $t_{évap.}$: 0°C, température de consigne : 16°C, puissance électrique : entre 1,75 et 1,9 kW) [38]

3.3.4 La variation de vitesse

Le compresseur

Les performances énergétiques de l'installation peuvent être améliorées en faisant varier la vitesse de rotation du compresseur. La variation de la vitesse de rotation est généralement réalisée par variation de fréquence. Cette méthode, fonctionnant grâce à un système électronique, permet une régulation précise de la production frigorifique en fonction de la puissance électrique du compresseur.

La variation de vitesse de rotation par variation de fréquence, théoriquement applicable sur tous les types de compresseurs, est plus utilisée sur les compresseurs de type Scroll (spiro-orbitaux) et à vis, car les compresseurs à vitesse variables ont des vitesses de rotation relativement élevées (pour permettre une plage de régulation plus grande et pour des raisons de lubrification), auxquels les compresseurs à pistons ne se prêtent guère (vitesse de fonctionnement limitée par les pistons) et posent problèmes aux compresseurs centrifuges (augmentation du taux de compression, qui nécessite alors une réduction de la température d'évaporation ou de condensation).

Les intérêts de cette méthode par rapport à celle du compresseur à vitesse fixe et à régulation par différentiel de température sont, entre autres, l'augmentation de l'efficacité énergétique du système (surtout en charge thermique partielle et variante), et une utilisation plus souple du moteur (augmentation de la longévité, réduction du courant de démarrage).

Taux de charge thermique maximale [%]	Réduction de la consommation énergétique du compresseur à vitesse variable [%]
20	42,5
30	27,8
50	12,8
70	5,1
80	2,5
100	0

tableau 3-4 : réduction de la consommation électrique d'un compresseur à vitesse variable par rapport à un compresseur à vitesse fixe, (fluide R22, $t_{\text{cond.}}$: 35°C, $t_{\text{évap.}}$: 0°C, compresseurs de type Scroll, puissance électrique : 2,2 kW (vitesse fixe), 3,5 kW (vitesse variable), vitesse de rotation : 2 950 tr/min (vitesse fixe), 6 750 tr/min (vitesse variable) [39]

L'application de cette méthode n'est cependant pas sans inconvénients. Dans le cas d'un système indirect à débit constant, la vitesse variable du compresseur fait dévier la température d'évaporation de sa valeur de consigne. Pour éviter cela, il peut s'avérer nécessaire de faire varier le débit du frigoporteur en fonction du débit interne.

Un autre inconvénient est que l'application de ce système est restreinte par la lubrification du moteur. Les anciens compresseurs ont été initialement conçus pour fonctionner à une vitesse fixe, à laquelle correspond un débit d'huile donné. Pour les systèmes dont la pompe de lubrification est liée au même moteur, une vitesse réduite peut mener à une insuffisance en huile. Ce problème peut être résolu en utilisant un entraînement indépendant de la pompe ou en limitant la vitesse inférieure du système. [39] [40]

Les auxiliaires

Les composants auxiliaires du système frigorifique, c.-à-d. les pompes et les ventilateurs, peuvent bénéficier de l'adaptation de la puissance électrique de leur moteur en fonction du besoin frigorifique. Pour les ventilateurs, cette technique est principalement intéressante dans le cas de l'utilisation de la haute pression flottante. La solution classique, en l'occurrence réduire le nombre de ventilateurs en fonctionnement, ne permet qu'une adaptation étagée du débit, et entraîne une mauvaise répartition de l'air sur le corps d'échange (une grande partie s'échappant alors par les orifices de ventilateurs à l'arrêt et non plus le long du corps d'échange). La régulation à débit d'air variable permet d'éviter ces inconvénients, et donc d'améliorer l'efficacité énergétique du système. Les pompes, tout comme les ventilateurs, peuvent par l'entremise de la vitesse variable adapter leur débit en fonction des besoins réels de l'installation. [1]

3.3.5 Le free-cooling

Pour les sites nécessitant du froid tout au long de l'année (refroidissement de processus industriel, chaîne de meuble frigorifique, climatisation de locaux informatiques, etc.), une possibilité relativement simple de produire du froid est d'utiliser les températures externes. Cette technique, appelée free-cooling, permet en effet d'économiser une grande quantité d'énergie électrique, ne nécessitant ainsi que de l'énergie pour les circuits secondaires (pompes, ventilateurs). Le compresseur n'est ainsi déclenché qu'en dernier recours, quand la température extérieure est trop élevée. Théoriquement, une différence de 1 degré entre le milieu extérieur et le fluide dans le système permet déjà l'utilisation de cette technique. En pratique, cette différence de température dépend du système et du niveau de température et peut donc fortement varier. Le free-cooling peut être utilisé, pour des températures de système relativement élevées, à partir d'une température externe (bulbe sec) de 14°C (free-cooling applicable durant 5 700 heures, soit 65% de l'année [45]). Le free-cooling des systèmes de climatisation est déclenché vers les 8-10°C (3 300, respectivement 4 100 heures, soit 38% respectivement 47% de l'année).

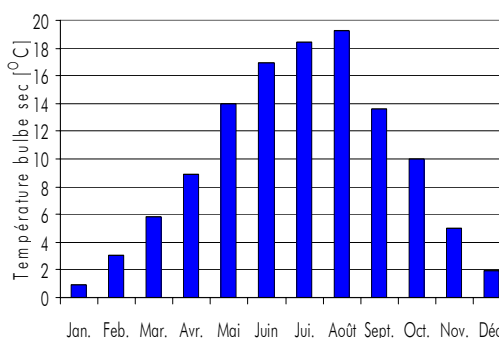


figure 3-10 : températures mensuelles moyennes sur une période de 9 ans [45]

Le free-cooling peut être réalisé par des aérorefroidisseurs ou par des tours de refroidissement. L'utilisation des refroidisseurs hybrides, bien que plus chers, est de plus en plus répandue. Le point important dans le domaine du free-cooling est le déclenchement du compresseur en fonction de la température du système de refroidissement : celui-ci doit être parfaitement adapté aux conditions extérieures et au système pour permettre une utilisation maximale du free-cooling.

Fonctionnement du compresseur [hrs/a]	Fonctionnement en free-cooling [hrs/a]	Energie économisée par la prise en charge du free-cooling [kWh] ⁸
5 621	3 115	23 000

tableau 3-5 : estimation des gains énergétiques annuels d'une installation de free-cooling installée au Luxembourg (climatisation d'un local IT à une température de 23°C, temps de fonctionnement du système : 8 736 heures, free-cooling réalisée par deux aérorefroidisseurs, fonctionnement transitoire compresseur - free-cooling entre 9 et 15°C, puissance compresseur : 2 x 3,75 kW_{élec.}) [46]

3.3.6 L'exploitation de l'énergie frigorifique

Complémentaires à l'optimisation de la production frigorifique, certaines mesures techniques ainsi qu'une exploitation soignée permettent de réduire les besoins en froid et la surconsommation en énergie.

Les mesures générales d'exploitation (tout secteur)

- tenir le taux de fuite de réfrigérants à un minimum, pour éviter un fonctionnement accru de l'installation,
- ne pas obstruer les corps d'échange et les canaux de ventilation, de manière à faciliter le transfert de chaleur,
- limiter les pertes de pression du circuit par l'entretien régulier (nettoyage, remplacement des filtres) de l'installation, ainsi que par un choix adéquat des composants et de l'architecture du système,
- optimiser le dégivrage : une fréquence de dégivrage trop élevée peut en effet entraîner une surconsommation en énergie de la part du système de dégivrage, alors qu'une fréquence trop réduite nuira à l'efficacité énergétique de l'installation,
- surveiller le niveau de fluide dans le corps d'échange dans le cas de l'utilisation d'évaporateurs noyés, les tubes à refroidir doivent être immergés pour garantir un bon échange thermique.

La réduction des charges thermiques :

- utiliser le refroidissement naturel nocturne du bâtiment par le biais du système de ventilation, de manière à réduire les besoins en production de froid (tout secteur),
- veiller à la bonne efficacité énergétique des différents appareils électriques et mécaniques, leurs pertes, qui prennent la forme de charge thermique, seront plus réduites (p.ex. préférer les écrans d'ordinateurs de type LCD aux types tubes cathodiques, etc.) (tout secteur),
- optimiser l'intensité lumineuse aux besoins réels et utiliser des lampes à basse consommation d'énergie ou des tubes néons, réduisant ainsi la charge thermique due à la lumière artificielle (tout secteur),

⁸ N'est tenu en compte ici qu'uniquement la couverture de la production de froid par free-cooling. D'autres facteurs déterminants (changement de puissance, etc.) ne sont pas repris ici.

- pour les locaux à grande surface vitrée, utiliser du vitrage de bonne qualité (coefficient de transmission U réduit) et un système d'ombrage, de manière à réduire les charges thermiques solaires (secteur tertiaire),
- diminuer la température de chauffage durant les périodes de fermeture, non seulement l'énergie de chauffage sera économisée, mais, de plus, les meubles frigorifiques devront moins travailler (secteur agro-alimentaire),
- éviter l'entreposage à température plus élevée de denrées refroidies, quand celles-ci sont destinées à être stockées dans un milieu à basse température (secteur agro-alimentaire),
- regrouper les sites nécessitant du froid, ceci permet de réduire les pertes du réseau de distribution (secteur industriel). Dans le cas de meubles frigorifiques, cette méthode a de plus l'avantage de produire un espace frais centralisé, ou le système de ventilation peut fonctionner à des températures moins importantes (secteur agro-alimentaire),
- préférer un système de production de froid centralisé aux meubles frigorifiques mobiles, car ces derniers libèrent directement leur chaleur dans la surface de vente et représentent ainsi une charge de chaleur supplémentaire (secteur agro-alimentaire).

La conservation de l'énergie frigorifique :

- éviter les ponts thermiques entre deux éléments de températures différentes (tout secteur),
- isoler thermiquement les éléments du circuit frigorifique aux endroits où le besoin en froid est nul (conduites de distribution, panneaux des chambres froides, etc.). Veiller de plus au maintien et à l'état de l'isolation, car celle-ci peut se déplacer suite à des contraintes mécaniques ou à des mauvaises fixations, ou bien être détériorée par l'humidité (utiliser un pare-vapeur) ou par des rongeurs (tout secteur),
- installer un mécanisme de fermeture ainsi que des joints d'étanchéité aux portes des locaux climatisés (chambres froides, local informatique), cette mesure permet de réduire non seulement les pertes, mais également l'introduction d'humidité (tout secteur),
- utiliser des rideaux pour les meubles frigorifiques non pourvus de portes (secteur agro-alimentaire).

La récupération de chaleur

La récupération de chaleur sur le groupe de froid ne contribue pas nécessairement à l'amélioration de l'efficacité énergétique du système frigorifique. L'intérêt principal de cette méthode est qu'elle permet d'améliorer le bilan énergétique du chauffage du site en utilisant des sources de chaleur inexploitées. La performance énergétique du système frigorifique peut s'en trouver diminuée, car la température nécessaire au système de production de chaleur (chauffage et/ou eau chaude) peut s'avérer plus élevée que la température de condensation normale. Dans le cas d'une couverture importante du besoin en chaleur par la récupération de chaleur, une comparaison des apports liés à la récupération améliorée (augmentation de la température de condensation du système) par rapport à la réduction de l'efficacité énergétique du système frigorifique peut s'avérer intéressante. [6]

4 L'eau de refroidissement

Bien qu'utilisée à d'autres fins dans le domaine du froid, l'eau trouve principalement son application en tant que refroidisseur de condenseurs. Ses traitements, nécessaires au bon fonctionnement de l'installation, ainsi que sa consommation peuvent avoir un certain impact sur l'environnement et demandent souvent à être optimisés.

4.1 La consommation en eau

4.1.1 L'eau de pluie

Les eaux de refroidissement proviennent généralement du circuit d'eau potable, car l'emploi d'eaux naturelles (fleuves, puits) n'est plus qu'en de très rares exceptions toléré par l'Administration de l'Environnement. L'eau potable est cependant coûteuse et son application à des fins de refroidissement, tenant compte du conditionnement qu'elle subit, représente un certain gaspillage de ressources naturelles.

Une alternative ne présentant pas ces inconvénients est d'utiliser les eaux de pluie. L'application de cette technique dans le domaine du froid implique cependant certaines contraintes et difficultés qui doivent être prises en compte lors de l'élaboration du système :

- l'eau de pluie contient plus d'impuretés que l'eau potable (bactéries, CO₂, poussières, etc.) et nécessite un traitement plus intensif,
- le mélange de deux types d'eau différents (eau de pluie et eau potable) entraîne des complications concernant l'efficacité du traitement, car celui-ci nécessite une surveillance plus importante pour permettre un fonctionnement adéquat du système.

4.1.2 La configuration du circuit d'eau de refroidissement des condenseurs

L'utilisation de l'eau comme liquide de refroidissement des condenseurs peut être réalisée de trois manières différentes : [27]

- par circuit à passage unique,
- par circuit ouvert ou
- par circuit fermé.

Le circuit à passage unique soutire l'eau d'un milieu (p.ex. une conduite d'eau potable) et la fait circuler à travers le système de refroidissement pour ensuite la rejeter dans un milieu adjoint (p.ex. une canalisation d'eaux usées). Ce procédé a comme intérêt d'être simple et techniquement peu coûteux. Son importante consommation en eau (pouvant atteindre les 86 l/h par kW_{th} [27]) fait cependant qu'il n'est guère plus réalisé.

Un circuit ouvert distribue l'eau, après l'avoir fait circuler dans l'échangeur/condenseur du circuit froid, à l'intérieur d'une tour de refroidissement. L'eau ainsi refroidie est ensuite recueillie dans un bassin pour être repompée dans le circuit. La consommation en eau de ce système est réduite (en première approximation, entre 2 à 6 l/h par kW_{th} [27] [6]).

Le refroidissement d'un circuit fermé s'effectue par arrosage d'un échangeur à l'intérieur d'une tour de refroidissement. L'eau d'arrosage est récupérée par un bassin, puis recirculée dans la tour. Par rapport au circuit ouvert, ce système possède les avantages et inconvénients suivants :

- l'eau à refroidir n'entre pas en contact avec le milieu extérieur, ce qui réduit les quantités de produits de traitement nécessaires,
- la consommation énergétique est, de par l'échangeur et la pompe supplémentaire, plus importante.

La consommation en eau se situe dans le même ordre de grandeur que celle du circuit ouvert.

4.1.3 Les pertes d'eau par évaporation

L'évacuation de la chaleur excédentaire du milieu à refroidir est réalisée en grande partie par évaporation et convection. La quantité d'eau perdue par évaporation peut atteindre les 2 l/h par kW_{th} [6].

Les mesures suivantes permettent une certaine réduction des pertes en eau d'évaporation : [27]

- recycler au maximum la chaleur excédentaire, p.ex. par récupération de chaleur. Ceci permet de réduire la quantité d'énergie à transmettre au milieu extérieur, et donc l'évaporation de l'eau,
- privilégier les tours de refroidissements hybrides, car en raison de leur fonctionnement en mode « sec », leur consommation est moins importante que celles des tours classiques.

4.1.4 Les pertes par purges

L'évaporation de l'eau entraîne une série de problèmes, tels l'accumulation d'éléments réduisant l'efficacité de l'échange thermique et la corrosion. Une purge régulière permet de limiter cette accumulation, mais implique la décharge d'une certaine quantité d'eau qui peut se situer entre 0,6⁹ à 3 l/h par kW_{th} [6]. Cette valeur peut donc fortement varier en fonction de la qualité de l'eau et du traitement nécessaire.

Il existe plusieurs possibilités pour limiter la quantité d'eau de purge [27]:

- réaliser un prétraitement (filtration, etc.) de l'eau avant son utilisation comme liquide de refroidissement,
- analyser en continu la qualité de l'eau (dureté, conductivité, etc.), de manière à optimiser la fréquence, respectivement le débit des purges (requiert un certain niveau d'expérience). L'encrassement des capteurs de conductivité est à surveiller, car celui-ci peut rapidement fausser les mesures des sondes et ainsi la régulation,
- éviter le plus possible la stagnation de l'eau (propice au développement bactériologique) dans le circuit par une architecture et une maintenance appropriée,

⁹ Estimation

- traiter chimiquement l'eau en fonction des substances et des concentrations présentes (adoucissant, anti-corrosion, etc.) (voir chapitre 4.2).

4.1.5 Les pertes par éclaboussures

Les pertes par éclaboussures comprennent non seulement les quantités d'eau qui s'échappent de la tour de refroidissement par déviation (due à des mouvements d'air et à l'architecture du système et qui atterrissent à côté du bassin de récupération), mais aussi l'eau s'échappant sous forme de gouttes transportée par la vapeur. Les pertes par éclaboussures peuvent atteindre environ 1 l/h par kW_{th}. [6]

Pour éviter ce genre de perte, différentes mesures peuvent être prises :

- utiliser des séparateurs de gouttes, qui, par déviation de la vapeur d'air, permettent de récupérer une partie de l'eau sous forme liquide contenue dans la vapeur,
- veiller à ce que la tour soit fermée des quatre côtés, de manière à ce que l'eau retombe dans le bassin de récupération,
- veiller à l'étanchéité de la tour, celle-ci peut se dégrader ou se déformer au fil du temps.

4.1.6 Les pertes par fuites de composants

La quantité des pertes d'eau due aux fuites par les composants (conduites, échangeurs de chaleur) est faible par rapport aux autres sources de pertes mentionnées plus haut. Cependant, le problème de ces fuites ne se limite pas seulement au gaspillage de cette ressource, mais implique également l'introduction d'humidité dans le circuit frigorifique dans le cas de l'inétanchéité du condenseur.

Pour limiter ces problèmes, les points suivants sont à tenir en compte : [27]

- utiliser les matériaux appropriés résistant à la corrosion (p.ex. acier inoxydable),
- tenir compte des vibrations, celles-ci peuvent provoquer des ruptures ou des déplacements de raccords,
- faire fonctionner l'installation à la température et à la pression prévue pour éviter des contraintes anormales,
- veiller à la qualité de l'eau et à l'état de corrosion du matériel, à la rigueur, utiliser des produits anti-corrosion.

4.2 Le traitement des eaux de refroidissement

L'utilisation de l'eau à des fins de refroidissement entraîne certains problèmes : hormis la corrosion pour laquelle elle est directement responsable de la réaction, l'eau permet également le transport d'éléments menant au :

- dépôt de sels,
- l'encrassement et
- la contamination par microorganismes

de l'installation, qui peuvent mener à des effets nuisibles pour le système respectivement l'être humain.

La corrosion est une attaque chimique ou électrochimique du métal liée à la présence de différentes substances (p.ex. oxygène, produit acidifiant), de corps étrangers (p.ex. encrassement, microorganismes) et/ou due aux propriétés (p.ex. température, débit de l'eau) du système. Pour les installations de refroidissement, la corrosion entraîne une détérioration des composants métalliques, avec comme conséquence possible la perte de fluide (frigoporteur ou réfrigérant), l'endommagement de composants ou l'arrêt de l'installation. La corrosion est également responsable de dépôt de particules dans le système, menant à l'obstruction des conduites et donc à la diminution de l'efficacité énergétique de l'installation. Dans le cas de circuits fermés, la corrosion est le seul problème à devoir être pris en compte, les autres n'engendrant pas vraiment de grandes difficultés dans le circuit.

Le dépôt de sels, généralement repris sous le terme d'entartrage, est une formation de cristaux suite à une augmentation de la concentration (dureté) en minéraux dans le liquide et à leur précipitation dans le circuit. Ce dépôt est influencé par l'acidité et la température du milieu, ainsi que par le débit d'eau. Les sels fréquemment rencontrés sont, entre autres, le carbonate de calcium, le phosphate de calcium, différents silicates, etc. Le tartre réduit l'efficacité de l'échange de chaleur, car il agit comme isolant à l'intérieur des conduites (conductivité thermique et surface d'échange réduite), et peut mener à l'arrêt de l'installation. En outre, ces dépôts facilitent le développement de la corrosion.

L'encrassement du système est dû au dépôt de particules insolubles sur l'enveloppe interne des composants. Dépendant du type d'eau, les éléments responsables de l'encrassement sont généralement le sable, l'argile, des oxydes ferreux, etc. Tout comme l'entartrage, cet encrassement réduit l'efficacité de l'échange thermique et encourage la corrosion.

Le circuit d'eau peut être également contaminé par des microorganismes (bactéries, algues, champignons, etc.) présents dans le milieu naturel. Ces organismes sont non seulement responsables d'effets nocifs sur l'être humain (p.ex. légionellose), mais aussi de problèmes d'encrassement biologique par la formation de biofilm et de corrosion par la production de substances oxydantes. [27] [41]

4.2.1 Les mesures générales préventives

Ces impuretés sont toutes de nature différente et ont des effets plus ou moins importants en fonction de la qualité de l'eau et du type d'installation. Elles possèdent cependant une série de points communs qui permettent de définir certaines mesures générales de prévention : [27]

- éviter les angles aigus et utiliser des matériaux à surface interne lisse, de manière à éviter la stagnation de l'eau propice au développement de microorganismes et au dépôt de substances,
- optimiser le débit du système : un débit minimum permet d'éviter la stagnation et les dépôts, alors qu'un débit trop élevé peut mener à des problèmes de corrosion par érosion,
- réaliser une filtration (filtre à sable, osmose inverse, etc.) de l'eau, permettant non seulement de retenir une partie des particules responsables de l'encrassement et du dépôt de sel, mais aussi de réduire l'introduction de microorganismes et de nutriments leur étant nécessaires, réduisant de ce fait le besoin en biocides,
- effectuer un nettoyage régulier de l'intérieur des composants (balle-éponge, jet d'eau, etc.), réduisant l'encrassement, le tartre et le biofilm à l'intérieur des conduites,
- vider, dans la mesure du possible, le circuit d'eau quand celui-ci n'est pas utilisé sur une longue période, pour éviter les dépôts de substances et le développement d'organismes (tenir compte de la surpression côté condenseur).

4.2.2 Les mesures anti-corrosion

Les mesures nommées ci-dessus sont des solutions générales. Il existe également des solutions spécifiques pouvant limiter la corrosion :

- utiliser des matériaux peu ou pas réactifs ou des métaux couverts d'une couche de protection,
- éviter le contact entre deux métaux différents, de manière à ne pas provoquer une corrosion galvanique.

En complément à ces mesures, il s'avère généralement nécessaire d'appliquer un traitement chimique, généralement composé soit de phosphates, de molybdates, de silicates, de nitrites ou d'azoles aromatiques, à l'eau d'appoint. Une alcalinité trop élevée n'est pas nécessairement bénéfique pour le système, car elle est propice à l'encrassement. En pratique, la valeur du pH se situe généralement entre un pH de 8,8 à 9,1 pour le secteur tertiaire, et entre 7,5 à 8 pour le secteur industriel et agro-alimentaire. Les produits à base de chromate, en raison de leur toxicité élevée, ne devraient plus être utilisés.

Le dosage en produit anti-corrosion peut être réalisé soit de manière manuelle, proportionnellement à la quantité d'eau d'appoint ou au taux de purge, soit par analyse de la qualité de l'eau. [27] [41]

4.2.3 Les traitements anti-tartre

Le traitement de l'eau vis-à-vis des dépôts salins peut être réalisé de différentes manières. La décarbonatation (précipitation des carbonates et des bicarbonates) et l'adoucissement (élimination des ions de calcium et de magnésium) de l'eau permettent d'éliminer les sels dissous. Des substances inhibitrices permettent de limiter les effets des dépôts de sels, p.ex. en limitant la formation cristalline.

Sur le terrain, les produits luttant contre les dépôts de sels sont souvent mêlés à ceux utilisés contre la corrosion et l'encrassement, permettant ainsi d'utiliser un seul et même système de dosage. Il peut cependant s'avérer intéressant de réaliser le dosage des produits contre la formation de sels en fonction de la conductivité électrique de l'eau, celle-ci étant fonction de la concentration saline du milieu. L'intérêt de cette méthode est l'adaptation aux besoins réels du dosage des produits, surtout intéressant dans le cas de variations importantes de la qualité de l'eau, ce qui permet de réduire la consommation des substances de traitement. Les inconvénients sont les coûts supplémentaires dus au système séparé, et un certain degré d'imprécision de la relation dosage/conductivité (les mesures peuvent être légèrement faussées par diverses substances ne contribuant pas au dépôt de sels). [27] [41]

4.2.4 Les mesures contre l'encrassement

En dehors des mesures générales nommées plus hauts, une autre possibilité de limiter les effets de l'encrassement du circuit est d'utiliser des polymères dispersants. Ceux-ci permettent d'éviter que les substances ne se déposent en augmentant leur charge électrique par absorption. Ces substances étant toutes chargées de même manière, elles se repoussent l'une l'autre et empêchent ainsi leur dépôt.

Le dosage de ces dispersants est généralement effectué avec celui des produits anti-tartre et anti-corrosion.

4.2.5 Les mesures anti-organismes

L'introduction de microorganismes peut être limitée par les mesures complémentaires suivantes :

- installer les tours de refroidissement dans une zone d'ombre, ce qui permet de réduire le développement d'organismes nécessitant de la lumière (algues),
- élever de manière rapide la température de l'eau (en cas d'arrêt de l'installation pour maintenance), de manière à réaliser une désinfection thermique,
- traiter l'eau par des rayons UV (nécessite cependant une eau assez claire) ou par ozone (peut réagir avec d'autres produits de traitement),
- réaliser une maintenance régulière de la tour de refroidissement, car c'est un endroit propice au développement d'organismes (lumière, oxygène, etc.),
- adapter les biocides en fonction des types d'organismes, des éventuels changements saisonniers, de la qualité de l'eau et de sa température

Les traitements classiques contre les microorganismes sont généralement subdivisés en biocides « oxydants », « non-oxydants » et biodispersants. Les biocides oxydants, souvent composés de chlore

ou de brome (p.ex. hypochlorite de sodium, bromure de sodium, etc.), sont des substances s'attaquant de manière générale aux organismes du circuit, empêchant ces derniers de développer rapidement une certaine tolérance à ces produits. Les biocides non-oxydants, comme p.ex. les aldéhydes glutariques, détruisent les organismes en travaillant de manière ciblée sur certaines composants des cellules (paroi cellulaire, etc.) et sont généralement utilisés en complément des biocides oxydants¹⁰. Le dernier type de produit de traitement, les biodispersants, fonctionne de la même manière que les dispersants rencontrés plus hauts. Ils s'attaquent au biofilm, permettant ainsi d'accroître l'efficacité des biocides, mais n'éliminent pas les microorganismes du circuit !

Le dosage du traitement contre les microorganismes est réalisé soit de manière continue, à intervalle régulier d'injection massive (traitement « choc »), ou en fonction de la concentration de ces substances dans le circuit. Cette dernière solution doit cependant être correctement adaptée au système : une limite inférieure trop faible risque de ne pas remplir les conditions minimales de concentration, alors qu'une limite supérieure trop élevée entraîne un rejet important de biocides dans le milieu naturel lors de la purge.

La légionellose :

La légionellose, maladie qui affecte les poumons, peut être contractée par l'entremise des panaches d'eau provenant de tours de refroidissement ou par voie aérienne en provenance des installations de ventilation. Une bonne planification, un entretien régulier ainsi qu'un traitement adéquat permettent d'éviter tout risque de contamination.

Cependant, le traitement est souvent source d'abus de la part des responsables des installations, préférant un surdimensionnement de la quantité à une utilisation rationnelle des biocides. Ces produits possédant un impact néfaste aussi bien pour l'homme que pour son environnement, leur utilisation doit en être faite avec rationalité. A cet effet, la condition-type de l'ITM concernant la légionellose, l'ITM-CL 360, reprend les mesures générales, entre autre, d'hygiène en ce qui concerne les systèmes pouvant être source d'une contamination à la bactérie « *Légoniella pneumophila* ».

4.2.6 Les eaux de purges traitées chimiquement

Bien que, dans la plupart des cas, incontournables, les produits de traitement des eaux de refroidissement (tout particulièrement les biocides) doivent être utilisés avec parcimonie. Lors du choix entre différents produits, leurs toxicités relatives doivent être comparées (phrases R des fiches de données de sécurité), et il est fortement recommandé de demander des détails au fabricant quant à la biodégradabilité de ces substances (vitesse et nocivité des substances y résultantes).

Les mesures suivantes permettent de réduire en partie les impacts environnementaux du passage de ces produits dans le milieu naturel :

¹⁰ L'utilisation de biocides peut faire l'objet d'une demande d'autorisation auprès du Ministère de la Santé, selon la loi du 24 décembre 2002 relative aux produits biocides.

- utiliser des produits rapidement biodégradables n'ayant que peu d'impact sur l'environnement,
- adapter le dosage des produits en fonction de la concentration effectivement nécessaire, de manière à en réduire leur besoin,
- fermer le robinet de purge lors d'un dosage « choc », pour éviter l'émission de produits encore actifs,
- conserver un certain niveau de température des eaux de purges, car l'hydrolyse des biocides non-oxydants s'y voit accélérée.

Pour en savoir plus :

http://eippcb.jrc.es/cgi-bin/locatemr?cvs_bref_1201.pdf

Document concernant l'application des meilleures techniques disponibles dans le domaine des systèmes de refroidissement industriel, par l'EIPPCB, 2001

5 Les nuisances sonores

Les installations frigorifiques peuvent être des sources importantes de nuisances sonores. Ces bruits proviennent d'un grand nombre de composants et l'importance de leur impact varie d'un système à l'autre. Les éléments suivants sont les sources principales de pollution acoustique dans le domaine du froid:

- les systèmes de ventilation (ventilateurs, moteurs, etc.),
- les compresseurs et les pompes,
- les tours de refroidissement, respectivement les aérorefroidisseurs.

Les systèmes de ventilation, les compresseurs et les pompes sont généralement confinés aux locaux techniques, où des activités permanentes sont relativement rares et où leur impact sonore n'est généralement pas perçu comme incommodant. Par contre, de par leur situation à l'air libre, les tours de refroidissement, respectivement les aérorefroidisseurs sont des éléments qui posent souvent problème du point de vue acoustique. Le tableau suivant indique les plages de puissances sonores de différents systèmes de refroidissement non-atténués :

Système de refroidissement	Puissance sonore [dB(A)]
Tour de refroidissement à système direct – déplacement d'air naturel	90 –110
Tour de refroidissement à système direct – déplacement d'air mécanique	80-120
Tour de refroidissement à système indirect	80-120
Tour hybride	80-120
Aérorefroidisseur	90-130

tableau 5-1 : puissance sonore de systèmes de refroidissement non atténués [27]

Les bruits des systèmes de refroidissement proviennent principalement des éléments suivants :

- les groupes de déplacement d'air mécaniques (ventilateurs, moteurs, embrayages, etc.),
- les pompes,
- l'impact des gouttes des tours de refroidissement.

Dans le cas des tours de refroidissement non atténuées acoustiquement, ce sont généralement les groupes de déplacement d'air qui sont la cause principale du bruit. Si cette source est fortement atténuée, le bruit provenant de l'eau peut alors s'avérer prédominant. Pour optimiser le système, il est conseillé de demander l'avis d'un bureau spécialisé en acoustique. [27]

5.1 Les mesures de prévention

Les mesures suivantes permettent d'éviter une partie des nuisances sonores provenant de systèmes de refroidissement : [27] [42]

- éviter les grandes surfaces réfléchissantes, qui augmentent la pression sonore,

- effectuer une maintenance régulière du système, un dysfonctionnement de composant peut être la source de bruits additionnels (p.ex. hélice de ventilateur déformée, moteurs en sur-régime, tôle mal fixée),
- installer des cuvettes ou des déflecteurs d'impacts dans les tours à eau, réduisant ainsi le bruit des gouttelettes (peut cependant entraîner des problèmes de contamination biologique dans le cas de stagnation).

5.2 Les mesures d'atténuation

Les mesures mentionnées ci-dessus ne sont pas suffisantes pour éviter complètement les émissions acoustiques. Il s'avère souvent nécessaire de réaliser une atténuation supplémentaire : [27] [42]

- tenir compte de la direction de la source sonore : celle-ci peut être soit verticale (atténuation faible dans toutes les directions), soit horizontale (atténuation variable selon la direction),
- installer le système en fonction de la distance: un dédoublement de la distance entre la source et le point d'immission correspond à une réduction de 6 dB(A) de la puissance sonore,
- augmenter le nombre de systèmes de refroidissement, tout en réduisant la puissance unitaire des composants, ce qui permet de réduire la vitesse des ventilateurs (particulièrement utile dans le cas d'aéroréfrigérant, cette mesure a l'inconvénient d'entraîner un investissement plus important, et de nécessiter une grande surface),
- utiliser des ventilateurs à impact sonore réduit (préférer les types centrifugaux aux axiaux, utiliser des systèmes à vitesse réduite ou à variateur de vitesse, etc.),
- installer des atténuateurs sonores sur les entrées et sorties d'air (solution classique particulièrement efficace dans le domaine des bandes d'octaves élevées, mais qui entraîne une augmentation de la consommation énergétique),
- installer des barrières anti-bruit : plus celles-ci sont hautes et lourdes, plus l'effet d'atténuation est efficace (méthode ici aussi particulièrement efficace dans le domaine des fréquences élevées).

Pour en savoir plus :

http://eippcb.jrc.es/cgi-bin/locatemr?cvs_bref_1201.pdf

Document concernant l'application des meilleures techniques disponibles dans le domaine des systèmes de refroidissement industriel, par l'EIPPCB, 2001

6 La législation concernant la production de froid

6.1 La législation luxembourgeoise

6.1.1 La loi modifiée du 10 juin 1999 relative aux établissements classés

Selon cette loi, tous les établissements industriels, artisanaux et commerciaux qui peuvent présenter un danger pour l'homme ou la nature doivent disposer d'une autorisation. Ces établissements sont divisés en quatre classes et deux sous-classes qui déterminent l'instance compétente en matière d'autorisations. Ainsi, les établissements de la classe 1 sont autorisés, après la procédure publique, par le ministre ayant dans ses attributions le travail et le ministre ayant dans ses attributions l'environnement. Les établissements de la classe 2 sont autorisés par le bourgmestre. Les établissements des classes 3, 3A et 3B sont soumis à une autorisation du Ministre de l'Environnement et/ou par le Ministre du Travail, sans qu'il n'y ait lieu de recourir à la procédure publique.

La nomenclature, ainsi que la classification sont établies par le règlement grand-ducal modifié du 16 juillet 1999 portant nomenclature et classification des établissements classés. Les installations de réfrigération et de climatisation (N°305) sont classifiées comme suit (selon le texte coordonné paru au mémorial A le 26 novembre 2003) :

Pour les appareils de réfrigération :

- classe 3, pour une puissance frigorifique totale située entre 20 et 50 kW,
- classe 1, pour une puissance frigorifique totale supérieure à 50 kW.

Pour les appareils de climatisations :

- classe 3, pour une puissance frigorifique totale située entre 20 et 100 kW et pour une quantité totale de réfrigérant ne dépassant pas les 30 kg,
- classe 1, pour une puissance frigorifique totale supérieure à 100 kW ou pour une quantité totale de réfrigérant dépassant les 30 kg.

Lorsque plusieurs installations d'un établissement projeté ou existant relèvent de classes différentes, l'installation présentant le risque le plus élevé, suivant sa classification, détermine le régime d'autorisation. Cette dernière détermine les conditions d'aménagement et d'exploitation selon les critères de protection de l'être humain et de son environnement, en tenant compte des meilleures techniques disponibles réalisables sans coûts excessifs. Dans le but de remplir les critères de protection envers l'homme et de son environnement, des documents ont été élaborés de la part de l'Administration de l'Environnement (formulaire F-305, exposé EXP-305) et de l'Inspection du Travail et des Mines (ITM-CL 110 concernant les installations à l'ammoniac).

Pour en savoir plus :

http://www.environnement.public.lu/guichet_virtuel/etabl_classes/energie/index.html

Formulaires concernant les établissements classés – section énergie

http://www.itm.etat.lu/condtype/cl1_16.htm

Liste des publications ITM

6.1.2 La loi modifiée du 17 juin 1994 relative à la prévention et à la gestion des déchets

Selon la loi modifiée du 17 juin 1994 relative à la prévention et à la gestion des déchets, les déchets sont les produits et substances destinés à la valorisation jusqu'à ce que ces produits ou substances, ainsi que les matières premières secondaires (tout déchet susceptible d'être réintroduit sous forme de produit, le cas échéant après traitement, dans le circuit économique.) ou l'énergie qui résultent de l'opération de valorisation soient réintroduits dans le circuit économique. Cette même loi exige entre autres la prévention et la réduction de la production et de la nocivité des déchets ainsi que la valorisation des déchets par le réemploi, le recyclage ou toute autre procédé écologiquement correct. En dernière option, les déchets finaux doivent être éliminés de manière écologiquement appropriée.

Sont considérés comme déchets, dans le cas de la production de froid, les réfrigérants et l'installation technique à leur fin de vie, ainsi que tous déchets provenant de l'utilisation et de la maintenance. Les établissements ou entreprises qui veillent au ramassage, au transport, à l'élimination ou à la valorisation de ces déchets sont soumis à l'autorisation du ministre.

L'annexe I de la présente loi reprend la classification des différents déchets dangereux, selon le Code Européen des Déchets (version 2) CED2. Les déchets issus des réfrigérants sont codés comme suit:

14 06 01* chlorofluorocarbones, HCFC, HFC

14 06 04* boues ou déchets solides contenant des solvants halogénés

14 06 05* boues ou déchets solides contenant d'autres solvants

Pour en savoir plus :

http://www.environnement.public.lu/dechets/informations_pratiques/index.html Informations pratiques concernant les déchets (liste des déchets selon CED2, etc.)

6.1.3 La loi du 14 avril 1992 portant réglementation de la mise sur le marché de substances qui appauvrissent la couche d'ozone

La loi modifiée du 14 avril 1992 s'applique aux CFC (R11, R12, R13, F112, R113, R114 et R115), à des fluorocarbones bromés (halon 1211, halon 1301 et halon 2402), au trichloroéthane 1,1,1 et au tétrachlorocarbone. Elle traite, entre autre, de la mise sur le marché et de l'utilisation des CFC sous différentes formes (réfrigérants, agents d'extinction, etc.). En ce qui concerne les fluides frigorifiques, il est interdit :

- depuis le 1^{er} janvier 1994 de produire et de mettre sur le marché ainsi que,
- depuis le 1^{er} janvier 1997, de remplir des appareils et installations qui nécessitent ces types de substances.

En fin de vie, la récupération de ces substances doit être réalisée par une personne physique ou morale dûment agréée.

6.1.4 La loi modifiée du 5 août 1993 concernant l'utilisation rationnelle de l'énergie

La loi du 5 août 1993 s'applique à la production, la transformation la distribution et l'utilisation de l'énergie au Luxembourg. Elle a, entre autres, comme objectif l'utilisation rationnelle de l'énergie ainsi que l'amélioration de l'environnement par la réduction des émissions de CO₂ due à la consommation énergétique.

Elle impose, pour les systèmes de réfrigération dépassant les 300 kW_{th}, ainsi que pour les entreprises industrielles et commerciales consommant plus de 3 GWh (toute forme d'énergie), la réalisation d'un bilan énergétique et d'une étude du potentiel d'économie d'énergie du bâtiment et de l'installation technique.

6.1.5 La loi du 29 juillet 1993 concernant la protection et la gestion de l'eau

Cette loi, qui vise les eaux superficielles et souterraines publiques ou privées, s'applique aux prélèvements, déversements, écoulements, rejets et dépôts de substances susceptibles de provoquer ou d'accroître la dégradation des eaux. Elle a pour objet la lutte contre la pollution des eaux et leur régénération. Cette loi interdit, sauf en cas d'autorisation délivrée par l'Administration de la Gestion de l'Eau:

- de jeter, de déposer ou d'introduire, directement ou indirectement, volontairement ou involontairement dans les eaux superficielles ou souterraines des substances solides, liquides ou gazeuses polluées, polluantes, ou susceptibles de polluer,
- d'y prélever directement ou indirectement de l'eau ainsi que des substances solides ou gazeuses.

Les contraintes concernant les rejets d'eaux industrielles usées dans la canalisation sont définies par la commune responsable du réseau de canalisation.

6.1.6 Le règlement grand-ducal du 13 février 1979 concernant le bruit dans les alentours immédiats des établissements et des chantiers

Ce règlement, émis dans le cadre de la loi modifiée du 21 juin 1976 relative à la lutte contre le bruit, décrit le contexte législatif concernant les nuisances sonores provenant d'entreprises entre autres industrielles, artisanales et commerciales publiques ou privées. Il fixe les niveaux de bruit totaux selon la zone d'habitation, lesquels ne doivent être dépassés, à intervalles réguliers ou de façon permanente, de plus de 10 dB(A). Ces niveaux sont des limites maximales d'un milieu, et non pas le niveau d'une seule source de bruit. De manière générale, les installations nouvellement autorisées ne doivent pas dépasser 35 dB(A) à la limite du terrain le plus proche bâti ou susceptible d'être bâti. Ce règlement ne déroge pas aux conditions fixées dans les autorisations délivrées par l'Administration de l'Environnement.

Zone	Niveau de bruit [dB(A)] période 7-22 hrs	Niveau de bruit [dB(A)] période 22-7 hrs	Nature du type d'habitat
I	45	35	Hôpitaux, quartier de récréation
II	50	35	Milieu rural, habitat calme, circulation faible
III	55	40	Quartier urbain, majorité d'habitat, circulation faible
IV	60	45	Quartier urbain avec quelques usines ou entreprises, circulation moyenne
V	65	50	Centre ville (entreprises, commerces, bureaux, divertissements), circulation dense
VI	70	60	Prédominance industrie lourde

tableau 6-1 : niveaux de bruit à ne pas dépasser, à l'intérieur d'agglomérations¹¹, à la limite de la propriété la plus proche

6.1.7 Le règlement grand-ducal du 18 avril 2004 relatif au contrôle de fuites dans des équipements frigorifiques et climatiques

Ce règlement concernant les fuites d'installations de production de froid s'applique aux installations utilisant des CFC, HCFC ou des HFC et dont la charge de réfrigérant dépasse les 3 kg. Ces installations sont tenues d'être contrôlées quant à leur degré d'étanchéité, le taux de fuite ne pouvant dépasser les 5% de la charge totale (reprise dans l'autorisation d'exploitation).

La réception concerne les installations neuves ainsi qu'existantes subissant des transformations importantes et doit être réalisée soit par le Service de Contrôle et de Réception du Bâtiment de la Chambre des Métiers, soit par un organisme agréé par le Ministère de l'Environnement. Dans le cas d'une réception négative, l'installation peut être réparée (délai d'un mois pour une simple opération, délai de 6 mois pour une transformation importante). Une seconde réception négative entraîne l'interdiction de l'utilisation de l'installation.

La révision, qui doit être réalisée chaque année, est effectuée par une entreprise habilitée à la révision ou par les agents mêmes de la Chambre des Métiers. Si la révision s'avère négative, l'installation doit être adaptée de manière à correspondre au critère d'étanchéité. Pour les simples opérations d'entretien (effectuée au maximum un mois après la première révision), et dans le cas d'une seconde révision négative, une transformation importante (maximum 6 mois) doit être réalisée. Si cette seconde révision n'est pas faite, l'installation est considérée comme ne pouvant être maintenue en service. Une réception fait suite à la transformation importante du système.

La vidange du réfrigérant lors de la mise hors-service du système doit être réalisée par une personne agréée par le Ministère de l'Environnement.

¹¹ A l'extérieur d'une agglomération, la zone VI sert de référence pour la limitation du niveau de bruit.

6.2 La législation européenne

6.2.1 Le règlement (CE) n° 2037/2000 du parlement européen et du conseil du 29 juin 2000 relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone

En complément à l'interdiction des CFC selon la loi du 14 avril 1992 portant réglementation de la mise sur le marché de substances qui appauvrissent la couche d'ozone, la mise sur le marché et l'utilisation des HCFC sont couverts d'interdiction par le règlement européen 2037/2000. La mise sur marché, c.-à-d. la fourniture ou la mise à disposition de ces substances, est interdite à partir du 1^{er} janvier 2010. L'utilisation en tant qu'agent réfrigérant est interdite de manière suivante (sélection¹²) :

- dans les systèmes non clos d'évaporation directe ainsi que les réfrigérateurs et congélateurs ménagers construits à partir du 1^{er} janvier 1996,
- dans les dépôts et entrepôts frigorifiques du secteur public et de la distribution ainsi que les équipements ayant une puissance à l'arbre égale ou supérieure à 150 kilowatts produits après le 31 décembre 1999, interdit à partir du 1^{er} janvier 2000,
- dans tous les autres équipements de réfrigération et de conditionnement d'air fabriqués après le 31 décembre 2000, interdits à partir du 1^{er} janvier 2001 à l'exception :
 - des équipements de conditionnement d'air fixes ayant une capacité de réfrigération inférieure à 100 kW, ou l'interdiction prend lieu le 1^{er} juillet 2002 pour les systèmes construits après le 30 juin 2002 et
 - des systèmes réversibles de conditionnement d'air/pompes à chaleur, interdits après le 1^{er} janvier 2004 pour tous les équipements produits après le 31 décembre 2003;
- à partir du 1^{er} janvier 2010, l'utilisation de HCFC vierges est interdite dans la maintenance et l'entretien des équipements de réfrigération et de conditionnement d'air existant à cette date;
- l'ensemble des HCFC sont interdits à compter du 1^{er} janvier 2015.

6.2.2 La proposition de règlement du parlement européen et du conseil relatif à certains gaz à effet de serre fluorés 2003/0189 (COD)

Une proposition de règlement du parlement européen et du conseil relatif à certains gaz à effet de serre fluorés a été déposée en août 2003. Ce règlement concerne le confinement, l'utilisation et la mise sur le marché de hydrofluorocarbures, de perfluorocarbures et de l'hexafluorure de soufre, en l'occurrence des fluides tels que le R134a et le R143a.

Une partie de ce règlement couvre le sujet du confinement et des mesures du taux de fuites d'installations de réfrigération, déjà mentionné dans le projet de règlement grand-ducal relatif au

¹² les systèmes de climatisation de transports ne sont pas repris ici

contrôle de fuites dans des équipements frigorifiques et climatiques. L'autre point important pour les installations frigorifiques concerne l'interdiction de la mise sur marché de gaz fluorés pour des systèmes à évaporation directe non confinés, et ce à partir de l'entrée en vigueur du règlement (parution dans le journal officiel).

Aspect sécurité :

En ce qui concerne l'aspect « sécurité », le texte législatif le plus important est la loi modifiée du 17 juin 1994 concernant la sécurité et la santé des travailleurs au travail, qui est complétée par différents règlements grand-ducaux.

7 Annexes

7.1 Glossaire

Numéro CAS (Chemical Abstracts Service)

Le numéro CAS sert à l'identification de molécules. Il est spécifique pour chaque substance répertoriée et est essentiellement utilisé dans le domaine de la chimie. Ce système n'attribue pas de numéro aux mélanges de réfrigérant tels le R404A ou le R507A.

Masse molaire

La masse molaire représente la masse de $6,02 \times 10^{23}$ de molécules de la substance considérée. Certaines propriétés thermodynamiques des réfrigérants sont dépendantes de cette grandeur, comme p.ex. la viscosité, le coefficient de transfert de chaleur, etc.

Température et pression critique

Un fluide frigorigène atteint son point critique quand il a atteint sa température respectivement sa pression critique. Ce point critique est la limite supérieure où le fluide frigorigène est soit un liquide, un gaz ou un mélange des deux. Au-delà de cette limite, la condensation requise dans une grande majorité de cycles frigorifiques ne peut être réalisée, car l'état du fluide est alors indissociable. Certains fluides, tels le CO_2 peuvent être utilisés dans des applications dépassant ce point (l'on parlera alors de travail « transcritique »). De manière générale, la température de condensation du système doit être très inférieure à la température critique du réfrigérant pour permettre un cycle frigorifique performant.

Température d'ébullition

La température d'ébullition est la température à laquelle, pour une pression donnée, le fluide passe de l'état liquide à l'état gazeux. Cette température permet de déterminer la limite inférieure de la plage d'application du réfrigérant.

Plage d'application de température

Limite de température de système dans lequel le réfrigérant peut être appliqué.

Densité de vapeur

La densité de vapeur est la masse par unité de volume d'une substance à l'état de gaz pur ou de vapeur. Plus cette valeur est élevée, plus le débit volumétrique sera réduit (réduisant ainsi la taille de l'installation) et plus la production de froid sera importante.

Le COP (Coefficient Of Power)

Le COP, défini selon [1] comme étant le ratio entre le froid produit par l'énergie consommée, est une caractéristique du système ainsi que du réfrigérant. Il représente une forme de « rendement » d'une installation frigorifique. Plus celui-ci a une valeur élevée, plus le système a une bonne efficacité énergétique. La valeur COP d'une installation varie entre 1 et 6, 3 étant la valeur générale-

ment atteinte pour une installation classique (les installations nécessitant des températures très basses ont des taux COP de l'ordre de 1 à 3).

Compatibilité des éléments du circuit

La réactivité entre le réfrigérant et les éléments du circuit frigorifique (métaux, huiles, etc.) doit être tenue en compte lors de l'élaboration d'un système de production de froid. Certains fluides (p. ex. de la classe des CFC) sont peu réactifs. D'autres, tels l'ammoniac, sont corrosifs et peuvent s'attaquer aux métaux. Ce problème de compatibilité peut mener à de sérieuses détériorations du système si les mesures adéquates ne sont pas réalisées.

Classification des fluides selon le type de danger pour l'homme et l'environnement

L'étiquetage des substances dangereuses est visé par la directive européenne 2001/59/CE du 6 août 2001. Des phrases de risques (phrases R), indiquant les risques pour l'homme et pour son environnement, ainsi que des phrases de prudence (phrases S), indiquant les précautions d'emploi recommandées, sont attribuées aux produits mentionnés dans la liste de cette directive. Les phrases importantes dans le domaine du froid, ainsi que leur définition selon l'annexe III, respectivement IV, sont reprises ci-dessous :

Phrases	Définition
R10	Inflammable
R12	Extrêmement inflammable
R23	Toxique par inhalation
R34	Provoque des brûlures
R50	Très toxique pour les organismes aquatiques
R59	Dangereux pour la couche d'ozone
S9	Conserver le récipient dans un endroit bien ventilé
S16	Conserver à l'écart de toute flamme ou source d'étincelles - Ne pas fumer
S26	En cas de contact avec les yeux, laver immédiatement et abondamment avec de l'eau et consulter un spécialiste
S36	Porter un vêtement de protection approprié
S37	Porter des gants appropriés
S39	Porter un appareil de protection des yeux/du visage
S45	En cas d'accident ou de malaise, consulter immédiatement un médecin (si possible, lui montrer l'étiquette)
S59	Consulter le fabricant/fournisseur pour des informations relatives à la récupération/au recyclage
S61	Eviter le rejet dans l'environnement. Consulter les instructions spéciales/la fiche de données de sécurité

tableau 7-1 : définition des phrases R et S selon annexes III et IV de la directive européenne 2001/59/CE

ODP (Ozone Depletion Potential)

Le potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone d'un réfrigérant est représenté par sa valeur ODP. Cette valeur est définie par rapport à l'impact du R11, qui sert, par convention, de fluide de référence ($ODP_{R11} = 1$). Plus la valeur d'un fluide est réduite, moins son potentiel d'appauvrissement est grand. Cette valeur est dépendante de certains facteurs, comme la durée de vie atmosphérique et le nombre de chlore ou de brome dans la molécule, et est constamment adaptée en fonction des nouvelles observations réalisées.

GWP (Global Warming Impact)

Le GWP décrit l'impact du réfrigérant sur l'effet de serre. Conventionnellement, la valeur GWP d'une substance est définie par rapport à l'impact du CO_2 ($GWP_{CO_2} = 1$) et ce, généralement, sur une période de 100 ans.

Acidification

Le niveau d'acidification est le taux maximum d'acide que le réfrigérant risque de libérer dans l'atmosphère suite à sa décomposition. Le taux d'acidification est exprimé en SO_x .

POCP (Photochemical Ozone Creation Potential)

La valeur POCP exprime la quantité de substances de référence (dans ce cas l'éthylène) qui, une fois émise dans les mêmes conditions, mène à une quantité équivalente d'ozone troposphérique. Parmi les réfrigérants, seul les hydrocarbures peuvent y contribuer.

MAK (Maximale Arbeitsplatz-Konzentration)

La valeur MAK est la concentration maximale autorisée de gaz, de vapeurs et/ou de poussières dans un local de travail, calculée pour une exposition de 8 heures/jour. [6] Cette valeur dépassée, des effets néfastes pour l'homme se font sentir. La valeur MAK est spécifique pour chaque substance et ne s'applique qu'à des expositions prolongées. Elle ne reflète pas les désagréments (odeurs, etc.) occasionnés par des expositions de courte durée.

Groupe de sécurité

L'inflammabilité ainsi que la toxicité d'un réfrigérant sont définies selon [2] par le tableau suivant :

	Faiblement toxique	Fortement toxique
Non inflammable	A1	B1
Faiblement inflammable	A2	B2
Hautement inflammable	A3	B3

tableau 7-2 : groupe de sécurité selon la norme EN 378 [2]

Mélange zéotropique

Un mélange zéotropique est un mélange de réfrigérant qui ne se comporte pas comme un fluide homogène lors de la condensation respectivement l'évaporation : les différentes composantes peu-

vent changer d'état de manière indépendante, changeant les propriétés thermodynamiques du mélange. Ceci peut causer le dysfonctionnement de l'installation ainsi que des problèmes de remplissage en cas de fuite.

Mélange azéotropique

Se dit d'un mélange de réfrigérant qui se comporte comme un fluide homogène lors de la condensation respectivement l'évaporation.

7.2 Le calcul de la valeur TEWI

La valeur TEWI (Total Equivalent Warming Impact)

La valeur TEWI est définie comme étant une méthode permettant de déterminer l'impact d'effet de serre direct (réfrigérant) et indirect (consommation énergétique) d'une installation de production de froid. Cette méthode ne s'applique qu'à des systèmes bien définis (puissance et charge de fluide connues) et permet la comparaison des impacts sur l'effet de serre de différentes installations. L'analyse du TEWI d'une installation existante permet également de déterminer les sources principales d'émissions de gaz à effet de serre et d'entreprendre ainsi les mesures adéquates pour réduire celles-ci.

Le TEWI est définie selon [2] par l'équation (1) :

$$TEWI = (GWP_{100} \times L \times n) + (GWP \times m \times (1 - \alpha_{\text{Recovery}})) + (n \times E_a \times \beta) \quad (1)$$

où:

TEWI [kg CO ₂]	Contribution totale à l'effet de serre
GWP ₁₀₀ [kg équiv. CO ₂]	Potentiel d'effet de serre du réfrigérant en équivalence au dioxyde de carbone sur une période de 100 ans
L [kg/a]	Quantité de fuite annuelle
n [a]	Durée de vie de l'installation
m [kg]	Quantité de réfrigérant
α _{Recovery} [%]	Taux de récupération du réfrigérant lors de l'élimination de l'installation
E _a [kWh/a]	Consommation énergétique annuelle
β [kg/kWh]	Emissions de CO ₂ par kWh d'énergie

tableau 7-3 : facteurs de définition de la valeur TEWI

L'équation (1a) :

$$(GWP_{100} \times L \times n) \quad (1a)$$

représente l'impact des émissions dues aux fuites (effet direct).

L'équation (1b) :

$$(GWP_{100} \times m \times (1 - \alpha_{\text{Recovery}})) \quad (1b)$$

indique l'impact des émissions dues à la récupération du fluide lors de la vidange en fin de vie de l'installation (effet direct).

L'équation (1c) :

$$(n \times E_a \times \beta) \quad (1c)$$

détermine l'impact des émissions dues à la consommation énergétique (effet indirect).

Les facteurs de calcul de la valeur TEWI

Les facteurs repris ci-dessous sont des valeurs théoriques pour des installations dont le mode d'utilisation et de maintenance sont mal ou peu connus. Ces valeurs doivent être adaptées en fonction de la consommation énergétique et les taux de fuite réels de l'installation.

La valeur GWP_{100}

La valeur GWP est définie selon [18] comme étant un index se basant sur les propriétés radiatives pouvant être utilisé pour estimer l'impact potentiel futur des émissions de différents gaz sur le climat. Cette valeur prend en compte, entre autres, l'effet de radiation et la durée de vie atmosphérique de la substance considérée. La valeur GWP est généralement calculée pour des périodes de 20, 100 ou 500 ans, la période de 100 ans étant la plus couramment utilisée. Les tableaux suivants reprennent les valeurs GWP des principaux fluides actuellement sur le marché. Les valeurs d'autres substances peuvent être trouvées dans [18] aux pages 388 à 390.

Fluide	$GWP_{100 \text{ ans}} [t_{\text{equiv. CO}_2}]$
R23	12 000
R32	550
R41	97
R125	3 400
R134	1 100
R134a	1 300
R143	330
R143a	4 300
R152	43
R152a	120
R161	12
R227ea	3 500
R236cb	1 300
R236EA	1 200
R236fa	9 400
R245ca	640
R245fa	950
R365mfc	890
R43-10mee	1 500
R744	1

tableau 7-4 : valeurs GWP de réfrigérants du type HFC [18]

Fluide	GWP _{100 ans} [t _{equiv.} CO ₂]
R290	< 1
R717	< 1
R718	non déterminé ¹³
R744	1
R600a	< 1
R1150	< 1

tableau 7-5 : valeurs GWP de réfrigérants naturels [23]

Notons que les valeurs des mélanges de réfrigérants se déterminent proportionnellement en fonction de la **masse** des différents fluides qui les composent. [23] Par exemple, la valeur GWP du fluide R404A se calcule comme suit :

Fluides	Composition	GWP	Part du GWP
R125	44%	3 400	1 496
R143a	52%	4 300	2 236
R134a	4%	1 300	52
Valeur GWP du R404A :			3 784

tableau 7-6 : calcul de la valeur GWP du R404A

La charge de fuite annuelle L

La charge de fuite annuelle L se calcule en fonction de la charge frigorifique nominale de l'installation et du taux de fuite exprimé en %. L'étanchéité d'une installation frigorifique est dépendante de nombreux facteurs et peut varier entre des émissions minimales à une perte totale du réfrigérant. Une valeur unique de référence de taux de fuite s'avère être peu réaliste.

Pour les besoins de calcul de l'impact de l'effet de serre des installations frigorifiques, une possibilité, parmi d'autres, est de faire la différenciation entre installations neuves et existantes. L'étanchéité des systèmes neufs étant optimisée, le taux de fuite annuel peut être assumé comme avoisinant les 5% les premières années pour les installations fonctionnant aux HFC, et 2% pour les installations à ammoniac [7]. Pour les installations existantes, il est nécessaire de prendre en compte certains facteurs permettant de cibler de manière plus précise le taux de fuite théorique, ces installations pouvant être moins étanches que les neuves. Une méthode intéressante, développée par le Centre d'Énergétique de l'École des Mines de Paris dans le cadre des inventaires des fluides frigorigènes français, tient compte du type de secteur et des mesures d'améliorations. Celles-ci sont subdivisées ici selon deux types :

- l'amélioration de l'étanchéité du système et

¹³ Selon [23], l'impact des émissions d'eau dues à l'homme est négligeable par rapport aux quantités naturelles se trouvant dans l'atmosphère

- la formation de l'équipe de maintenance et l'utilisation de matériel adapté.

Notons que cette méthode ne doit servir qu'en première approximation et qu'il est préférable d'utiliser les quantités réelles de recharge des installations sur base des relevés de factures.

Mesures	Taux de fuite - secteur industriel [%]	Taux de fuite - secteur tertiaire [%]	Taux de fuite - secteur agro-alimentaire [%]
Emissions de base	15	15	25
Etanchéité améliorée	10	12	20
Formation du personnel	7	7	13

tableau 7-7 : taux de fuite annuel en % de la charge théorique de l'installation [21]

La durée de vie théorique de l'installation n

La durée de vie théorique d'une installation technique tient compte de la périodicité de rénovation. Lors du changement ou du rajout de composants principaux, il peut s'avérer nécessaire de réadapter la durée de vie.

Secteur industriel	Secteur tertiaire (climatisation)	Secteur agro-alimentaire (chaînes de meubles frigorifiques)
15	15	7

tableau 7-8 : durée de vie théorique n tenant compte de transformations importantes [21]

La quantité de réfrigérant m

La quantité de réfrigérant m correspond à la charge en fluide frigorigène du système lors de sa mise en marche. Cette valeur est utilisée pour déterminer la quantité de perte annuelle L ainsi que la quantité de perte lors de la vidange de l'installation.

Le taux de récupération α_{Recovery}

Le taux de récupération α_{Recovery} est la quantité de fluide frigorigène récupérée lors de la vidange. Cette quantité est généralement calculée en fonction de la charge nominale, et non pas en fonction de la charge réelle du système vidé (l'impact de cette simplification sur la détermination de la valeur TEWI est négligeable). Comme pour les données concernant le taux de fuite, le taux de récupération α_{Recovery} peut être déterminé en fonction du secteur et des mesures d'améliorations réalisées. La récupération au Luxembourg étant poussée, celle-ci devrait généralement atteindre 90%.

Mesures	Taux de récupération - secteur industriel [%]	Taux de récupération - secteur tertiaire [%]	Taux de récupération - secteur agro-alimentaire [%]
Récupération de base	50	50	50
Récupération améliorée	80	70	70
Récupération fortement améliorée	90	90	90

tableau 7-9 : taux de récupération α_{Recovery} en % de la charge théorique de l'installation [21]

La consommation énergétique annuelle E

La consommation énergétique annuelle se détermine en fonction de la puissance électrique et du temps de fonctionnement annuel du système:

$$E_a = P_{\text{él}} \times h \quad (2)$$

La puissance électrique du système est celle nécessaire à la totalité de la production de froid. Lors d'une comparaison entre des installations de types différents (p.ex direct / indirect), le calcul des valeurs TEWI doit tenir compte de la totalité des éléments spécifiques de ces installations (p.ex. pompes, ventilateurs, etc.), en fonction de leur temps de fonctionnement respectifs. Cette méthode ne s'applique pas aux systèmes où la variation de puissance est importante.

Le temps de fonctionnement d'une installation dépend fortement de son domaine d'utilisation. En première approximation, le temps d'utilisation du compresseur d'une installation de climatisation peut être estimé selon le tableau 7-10, en fonction d'une utilisation normale ou optimisée.

Type de bâtiment	Temps de fonctionnement normal [hrs]	Temps de fonctionnement optimisé [hrs]
Bureau (2.750 hrs/a d'utilisation)	550	400
Ecole (2.000 hrs/a d'utilisation)	400	250
Commerce (3.600 hrs/a d'utilisation)	650	400

tableau 7-10 : temps de fonctionnement d'installation de climatisation, (charges internes de chaleur: 30 W/m²) [24]

Les facteurs β d'émissions de CO₂ par kWh_{élec.}

Le facteur β indique la quantité d'émissions d'équivalent CO₂ pour la production d'un kWh_{élec.}. Ce facteur est dépendant du réseau électrique. Le fournisseur le plus important dans ce domaine est la CEGEDEL, qui approvisionne aussi bien les ménages que les industries ainsi que certains fournisseurs indépendants (villes). L'énergie de ce réseau provient en grande partie du réseau allemand de la RWE. Le second fournisseur en énergie électrique est la SOTEL, dont la clientèle se compose uniquement d'industries. Son énergie est produite en grande majorité en Belgique ainsi qu'à la centrale Turbine-Gaz-Vapeur située à Esch/Alzette.

Réseau électrique 2001	Facteur d'émission de CO ₂ β [kg/kWh]
CEGEDEL	0,64
SOTEL	0,43

tableau 7-11 : facteurs β des principaux réseaux luxembourgeois en 2001 [22]

8 Bibliographie

- [1] Clodic D., Duminil M. et Ducros R., *Le froid efficace dans l'industrie*, ADEME - Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, 1999
- [2] *EN 378 1-4 : Systèmes de réfrigération et pompes à chaleurs – Exigences de sécurité et d'environnement*, CEN - Comité Européen de Normalisation, 2000
- [3] Buchwald H., Hellmann J., König H. et Meurer C., *Solkane® – pocket manual: refrigeration and air-conditioning technology*, Solvay Fluor und Derivate GmbH, 1998
- [4] Clodic D., Chang Y. S. et Pougin A. M., *Evaluation de fluides frigorigènes à faible GWP pour le froid domestique, le froid commercial, les transports frigorifiques, la climatisation automobile*, Centre d'Énergétique, Ecole des mines de Paris, 1999
- [5] Baird C., *Environmental chemistry*, Freemann, 1999
- [6] Recknagel H., Sprenger E. et Schramek E.R., *Taschenbuch für Heizung- und Klimatechnik 2000*, Oldenburg - Verlag, 1999
- [7] Frischknecht R., *Umweltrelevanz natürlicher Kältemittel – Ökobilanzen von Wärmepumpen und Kälteanlagen*, BFE - Bundesamt für Energie, 1999
- [8] R22, Datenbank: CIVS - Chemikalieninformationssystem zu verbraucherrelevanten Stoffen, DIMDI - Deutsches Institut für Medizinische Dokumentation und Information, 2003
- [9] R134a, Datenbank: CIVS - Chemikalieninformationssystem zu verbraucherrelevanten Stoffen, DIMDI - Deutsches Institut für Medizinische Dokumentation und Information, 2003
- [10] Ammoniak, Datenbank: CIVS - Chemikalieninformationssystem zu verbraucherrelevanten Stoffen, DIMDI - Deutsches Institut für Medizinische Dokumentation und Information, 2003
- [11] *Technische Information: Einsatz von Ammoniak (NH₃) als Alternativ-Kältemittel KT-640-2*, Bitzer Kühlmaschinenbau GmbH,
- [12] *Propan*, Datenbank: CIVS - Chemikalieninformationssystem zu verbraucherrelevanten Stoffen, DIMDI - Deutsches Institut für Medizinische Dokumentation und Information, 2003
- [13] *Technische Information: Einsatz von Propan (R290) mit halbhermetischen Hubkolbenverdichtern KT-660-2*, Bitzer Kühlmaschinenbau GmbH
- [14] *Kohlendioxyde*, Datenbank: CIVS - Chemikalieninformationssystem zu verbraucherrelevanten Stoffen, DIMDI - Deutsches Institut für Medizinische Dokumentation und Information, 2003
- [15] Albring P., Apley R. et Burandt B., *Turbo-Kaltwassersatz mit Wasser als Kältemittel (Fortschrittsbericht)*, ILK - Institut für Luft-und Kältetechnik Dresden, 1998
- [16] Montzka S.A. et Fraser P.J., *Scientific assessment of ozone depletion: 2002 - global ozone research and monitoring project (report No. 47)*, WMO – World Meteorological Organization / UNEP – United Nations Environment Programme, 2002
- [17] Fahey D.W., *Twenty questions and answers about the ozone layer*, WMO – World Meteorological Organization / UNEP – United Nations Environment Programme, 2002

- [18] Ramaswamy V., *Climate Change 2001: The Scientific Basis, Chapter 6 – Radiative Forcing of Climate Change*, IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change / Cambridge University Press, 2001
- [19] *Ministère de l'Environnement - Rapport d'activité 2002*, Service Central des Imprimés de l'Etat, 2003
- [20] EAA - European Environmental Agency Data service, EAA, 2003
- [21] Palandre L., Barrault S., Clodic D., *Inventaire et prévisions des fluides frigorigènes et de leurs émissions – année 2001*, Centre d'Energétique, Ecole des mines de Paris, 2003
- [22] Communication, Scheuren J.J., Département d'électrotechnique, IST - Institut Supérieur de Technologie, 2003,
- [23] Communication, Shine K., Department of meteorology, University of Reading, 2003,
- [24] Hennings D., *Leitfaden elektrische Energie im Hochbau*, IWU – Institut Wohnen und Umwelt Darmstadt, 2000
- [25] Clodic D., *Zéro fuite*, PYC éditions, 1997
- [26] *Dichtheit von Kälteanlagen - Bericht zum AIF-Forschungsvorhaben Nr. 11340*, ILK - Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden, Forschungsrat Kältetechnik e.V., 1999
- [27] *Reference document on the application of best available techniques to industrial cooling systems*, EC - European Commission / EIPPC – European Integrated Pollution Prevention Control, 2001
- [28] Documentation technique, BAC - Baltimore Aircoil Company, 2003
- [29] Elsner C., *Ersatz des Kältemittels R22 in bestehenden Kälte- und Klimanalage*, Umweltbundesamt, 1998
- [30] Schwaab K., *Ersatz des Kältemittels R22 in bestehenden Kälte- und Klimanalage – aktueller Stand*, Umweltbundesamt, 2001
- [31] Spindler K., *Thermodynamische, wärmetechnische und ökologische Betrachtungen für Kältemittel beim Einsatz in Wärmepumpen und Kältemaschinen*, DKV - Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein e.V., 2003
- [32] *Kältemittel report 11. Auflage A-500-11*, Bitzer Kühlmaschinenbau GmbH,
- [33] ISCEON®59 (R417A) product brochure, Rhodia, 2004,
- [34] *Réfrigérants Suva® – Manuel de service*, Hoek Loos N.V., 1997
- [35] Krähling H. et Meurer C., *Kältemittel in der Kühlkette – ganzheitliche Perspektiven*, KK – die Kälte- und Klimatechnik, 2002
- [36] Helmke T., *Multicompressor ammonia refrigerant system with low-capacity screw compressors*, Linde, 2002
- [37] Wendelborn H., *Regeltechnik für den kompletten Supermarkt*, KI - Luft- und Klimatechnik, 2003

- [38] Benamer A., *Calorimétrie des compresseurs frigorifiques à vitesse variable (mémoire)*, CNAM – Conservatoire National des Arts et Métiers Paris, 1998
- [39] Benamer A., Cauret O. et Clodic D., *La compression à vitesse variable: enjeux et conditions de mise en oeuvre*, Journée technique „Nouveaux fluides frigorigènes: le froid doit-il coûter plus cher ?“, 1999
- [40] Benamer A. et Clodic D., *Gains énergétiques et vitesse variables des compresseurs frigorifiques*, Colloque „Variation électronique de vitesse“, 1998
- [41] Documentation technique, NALCO, 2004
- [42] *Le bruit des tours de refroidissement*, BAC – Baltimore Aircoil Company,
- [43] Daniels K., *Gebäudetechnik*, Oldenbourg Industrieverlag / Hochschulverlag ETHZ, 1999
- [44] Dupont MSDS Central, DuPont, 2004
- [45] Jours et degré-jours de chauffe - Période de 09/94 à 09/03, Chambre des Métiers, 2004
- [46] Communication, Goodyear, 2004
- [47] Communication, Hayman G., Netcen, AEA Technology Environment, 2003,

9 Liste des adresses utiles

A

Administration de l'Environnement

Internet : <http://www.emwelt.lu/>

Division des établissements classés

16, rue Eugène Ruppert

L-2453 Luxembourg

Tél: 40 56 56 600

Fax: 40 56 56 696

Contact :

M. Claude Geimer (responsable de la division)

e-mail : commodo@aev.etat.lu

Agence de l'Energie SA

4-6, rue Fort Bourbon

L-1249 Luxembourg

BP 37

Tél. : 40 65 64

Fax : 40 87 68

Contact :

M. Jean Offermann (directeur)

e-mail : ael@pt.lu

C

Chambre de Commerce

7, rue Alcide de Gasperi

L-2981 Luxembourg

Tél. 42 39 39 1

Fax. 43 83 26

Internet : <http://www.cc.lu/>

Contact :

M. Tom Theves

e-mail : tom.theves@cc.lu

Chambre des Métiers

2, Circuit de la Foire Internationale

B.P. 1604

L-1016 Luxembourg

Tél. : 42 67 67 1

Fax : 42 67 87

Internet : <http://www.chambre-des-metiers.lu>

Contacts :

M. Nico Kaufmann

e-mails :

nico.kaufmann@cdm.lu

Centre de Ressources des Technologies pour l'Environnement (CRTE)

CRP Henri Tudor

66, rue de Luxembourg

L-4009 Esch-sur-Alzette

Tél : 54 55 80 600

Fax : 54 55 80 601

Internet : <http://www.crte.lu>

Contacts :

M. André Weidenhaupt

M. Alex Bertrand

Mme Bianca Schmitt

Mme Joëlle Welfring

Mme Lucinda Eccli

e-mails :

andre.weidenhaupt@tudor.lu (directeur)

alexandre.bertrand@tudor.lu

bianca.schmitt@tudor.lu

joelle.welfring@tudor.lu

lucinda.eccli@tudor.lu

F

Fédération des Artisans - Fédération des Installateurs en Equipements Sanitaires et Climatiques

2, Circuit de la Foire Internationale

L- 1016 Luxembourg

Tél. : 42 45 11 – 1

Fax : 42 45 25

Internet : <http://www.federation-des-artisans.lu>

Fédération des Industriels Luxembourgeois (FEDIL)

7, rue Alcide de Gasperi

B.P. 1304

L-1013 Luxembourg

Tél. 43 53 66 1

Fax. 43 23 28

Internet : <http://www.fedil.lu>

Contact :

M. René Winkin

e-mail : rene.winkin@fedil.lu



Inspection du Travail et des Mines (ITM)

B.p. 27

L-2010 Luxembourg

Tel: 478-6155

Fax: 49 14 47

Internet: <http://www.itm.etat.lu>

Contact :

M. Pierre Heuschling (chef de division)

email: pierre.heuschling@itm.etat.lu



SuperDrecksKëscht® fir Betriber

18, rue Stumper

L-2557 Luxembourg

Tél. : 48 82 16-1

Fax : 48 82 16-442

Internet : <http://www.superdreckskescht.lu>

Contact :

Marc Simon

e-mail : info@superdreckskescht.lu

ont contribué à ce projet:

Rainer Apley, Jean-Claude Backendorf, Yves Baden, Philippe Bernard, Raymond Bildgen, Guy Caspar, André Eschbour, Heike Fass, Bruno Fery, Marcel Flammang, Marco Fuchs, Frédéric Garbar, Catherine Gerardy, Nicole Gitzinger, Garry Hayman, Robert Huberty, Marc Jacobs, Nico Kaufmann, Mil Kieffer, Max Leesch, Corinne Lefebvre, Fernand Müller, René Peters, Marc Picard, Pascal Pixius, Fabrice Pompignoli, Michel Reckinger, Jean-Jacques Scheuren, Keith Shine, Marc Simon, Tom Theves, Roger Theylaert, Philip Uzoma Nnganyadi, Victor Wenner, Charles Werner, René Winkin et toute l'équipe du CRTE.