REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
Faculté des Mathématiques Et des Sciences de la Matière
Département de Physique

Thèse

Présenté pour l'obtention du diplôme de

Doctorat

Spécialité : Physique

Option : Energétique

Présenté par:

Guermit Tahar

Thème

Contribution à l'amélioration de la production du froid en Algérie à partir des différentes sources d'énergies et impact environnemental

Soutenu publiquement le : 02/10/2019

Devant le jury composé de :

Mr. BECHKI.Djamel	Professeur	Président	Univ. Ouargla
Mr.SETTOU.Noureddine	Professeur	Directeur de thèse	Univ. Ouargla
Mr.BENMOUSSA.Hocine	Professeur	Examinateur	Univ. Batna
Mr.KORICHI.Mourad	Professeur	Examinateur	Univ. Ouargla
Mr.KHERRIS.Sahraoui	Professeur	Examinateur	Univ. Tissemssilt
Mr.HAMDANI.Maamar	MRA	Examinateur	URAER. Ghardaia

Année universitaire : 2018/2019

Remerciements

Toute la Gratitude, tout d'abord à Allah qui m'a donné la force Pour terminer ce modeste travail.
Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance au directeur de thèse Professeur : N.SETTOU pour son suivi, sa patience, sa disponibilité, pour ses orientations et conseils.

Mes remerciements s'adressent aussi à tous les membres de jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter le jugement de ce travail.
Je tiens à exprimer ma gratitude au Doyen de la faculté Professeur : Bechki.djamel d'avoir bien voulu accepter de présider le jury.

Mes sincères remerciements et reconnaissances au Professeur : Bechki.Lazher, pour l'intérêt qu'il a toujours porté à l'égard de mon travail.

Je tiens à notifier un remerciement spécial pour ma femme qui a su être à mes côtés Et qui me motivait souvent pour L'aboutissement de ce travail

A tous ceux qui ont contribués à l'élaboration de ce travail, trouvent ici l'expression de mes profondes gratitudes et respects.

Dédicaces

J'ai le grand honneur de dédier ce travail à l'âme de mon père à ma très chère mère, et à toute ma famille
Qui n'ont jamais cessés de m'encourager
A tous ceux que j'aime, et en particulier
A celle qui sème le bonheur sur mon chemin.

Sommaire

Remerciement I
Dédicaces II
Sommaire I
Liste des tableaux VII
Liste des figures VIII
Nomenclature XI
Introduction 1

Chapitre 1 : Synthèse et évaluation de l'industrie frigorifique

Introduction 5
1.2. Contexte énergétique 5
1.2.1. Programme national des énergies renouvelables 7
1.3. Impact des fluides frigorigènes sur l'environnement 8
1.3.1. Composition de l'atmosphère 8
1.3.1 .1. Structure de l'atmosphère 8
1.3.2. Destruction de la couche d'ozone stratosphérique 10
1.3.2.1. Historique 10
1.3.2.2. Effet des fluides frigorigènes sur la couche d'ozone 11
1.3.3. Contribution de certains fluides frigorigènes au réchauffement de la planète 12
1.3.3.1. Principaux Gaz à effet de serre et leurs sources 13
1.3.3.2. Potentiel d'Action sur l'Effet de Serre 15
1.4. Conséquences 17
1.4.1 Changement climatique 17
1.4.2. Contribution de L'ozone troposphérique au réchauffement climatique 17
1.5. Réglementations 18
1.5.1. Organisations 18
1.5.2. Actes juridiques 19
1.5.2.1. Convention cadre de Vienne 19
1.5.2.2. Protocole de Montréal 20
1.5.2.3. Amendement de Londres 23
1.5.2.4. Amendements de Copenhague 23
1.5.2.5. Amendements de Montréal 24
1.5.2.6. Protocole de Kyoto 24

1.5.2.7. Amendements de Pékin 25
1.6. Calendrier d'élimination graduelle des CFC et HCFC 26
1.7. Application de la réglementation cas des pays en développement 28
1.7.1. Calendrier cas des pays en développement 28
1.7.2. Partenaires clé pour l'Afrique 29
1.7. 3. Elimination des Substances Appauvrissant l'Ozone cas de l'Algérie 30
1.7. 4.Réglementations Algérienne concernant la suppression des CFC 31
1. 7.5. Elimination et remplacement des CFC en Algérie 32

Chapitre 2 : Techniques de production du froid

2.1. Introduction 36
2.2. Différents procédés de production du froid 36
2.2.1. Mélanges réfrigérants 36
2.2.2. Détente d'un gaz comprimé 36
2.2.3. Evaporation d'un liquide pur 37
2.3. Cycle de Carnot 37
2.4. Différents types d'installations frigorifiques 38
2.4.1. Installation frigorifique à compression mécanique simple 38
2.4.1.1. Description d'une Installation frigorifique à compression mécanique simple 38
2.4.1.2. Principaux éléments d'une installation frigorifique à compression mécanique . 40
2.4.1.2. Principe de fonctionnement d'une IFCMS 42
2.4.1.3. Calcul Thermodynamique d'une IFCMS : 42
2.4.2. Installation frigorifique à compression mécanique bi-étagée 46
2.4.2.1. Installation frigorifique a compression mécanique biétagée à injection Totale .. 47
2.4.2.2. Principe de fonctionnement d'une installation frigorifique à compression mécanique bi-étagée à injection totale avec sous refroidisseur 48
2.4.2.3. Principe de fonctionnement d'une installation frigorifique à compression mécanique bi-étagée avec sous refroidisseur à injection partielle 49
2.4.3 .Installation frigorifique à compression mécanique à cascades 50
2.4.3.1. Principe de fonctionnement d'une installation frigorifique à cascades 51
2.5. Fluides frigorigènes 52
2.5. 1.Historique 52
2.5.2. Définition 53
2.5.3. Différents types de fluides frigorigènes 53

2.5.3.1. Fluides frigorigènes primaires 53
2.5.3.2. Fluides frigorigènes secondaires 54
2.5.4. Classification des fluides frigorigènes 55
2.5.4.1. Les éléments simples 55
2.5.4.2. Les composés purs inorganiques ou organiques 55
2.5.4.3. Mélanges zéotropes et azéotropes : 58
2.5.5. Critères de choix de fluide frigorigène 59
2.5.5.1. Critères thermodynamiques 59
2.5.5.2.Critères de sécurité 60
2.5.5.3. Critères économiques 60
2.5.5.4. Critères environnementale 61
2.5.6. Principaux fluides frigorigènes utilisés: 62
2.5.6.1. Domaines d'utilisation : 68
2.5.6.2. Evolution des HFC 69
2.5.6.3. Evolution des fluides hydrocarbures : 71
2.5.6.4. Evolution des fluides inorganiques 71

Chapitre 3 : Synthèse des solutions alternatives

3.1. Introduction 74
3.2. Evaluation thermodynamique des HFC 75
3.2.1. Introduction 75
3.2.2. Calcul des propriétés thermodynamiques pour les corps purs 75
Equation d'état de Peng-Robinson 75
3.2.3. Calcul des propriétés thermodynamiques d'un mélange de corps purs 77
3.2.3.1. Règle de KAY 78
3.2.3.2. Calcul des propriétés du liquide saturé 79
3.3. Machine frigorifique à absorption: 80
3.3.1. Le processus d'absorption : 80
3.3.2 .Principe de fonctionnement d'une machine frigorifique à absorption 81
3.3.3. Avantages d'une machine frigorifique à absorption 83
3.3.4. Caractéristiques du couple binaire: 83
3.3.5. Principaux couples fluide frigorigène/absorbant utilisés 83
3.3.6. Système à absorption à simple effet: 85
3.3.7. Système à absorption à plusieurs effets: 86

3.3.8. Calcul Thermodynamique d'une machine frigorifique à absorption: 87
3.4. Réfrigération magnétique 89
3.4.1. Introduction 89
3.4.2. Définition.....90
3.4.3. Principaux matériaux magnétocaloriques.....91
3.4.4. Système de réfrigération magnétique 91
3.4.5.1. Régénérateur magnétique actif 93
3.4.5.2. Dispositif du G2Elab 95
3.4.5.3. Système magnétique de Zimm 95
3.4.6. Conclusion.....96
3.5. Installation frigorifique à éjecto-compression.....96
3.5.1. Introduction.....96
3.5.2. Description de l'installation frigorifique à éjecto-compression 97
3.5.2.1. Différents éléments de la machine : 97
3.5.3. Principe de fonctionnement de la machine à éjecto- compresseur : 99
3.6. Confinement de charge par utilisation des micro-canaux 100
3.6.1. Introduction 100
3.6.3. Classification des Micro-échangeur 101
3.6.3.1. Matière de fabrication.....101
3.6.3.2. Forme de micro-canal 102
3.6.3.3. Diamètre de micro-canal 103
3.6.4. Avantages et Inconvénients des micro-échangeurs 103
3.7. Stockage de froid.....103
3.7.1 Introduction 103
3.7.2. Différents types de stockage de froid 104
3.7.2.1 Stockage à eau glacée 105
3.7.2.2 Stockage à glace 107
3.7.3. Réservoir de stockage d'eau glacée 110

Chapitre 4 : Contribution à l'application des solutions alternatives

4.1. Etude thermodynamique des mélanges réfrigérants HFC,Cas du R407c et R507 113
4.1.1. Introduction 113
4.1.2 Résultats et Discussion:.....114
4.1.2.1 Cas du R407C.....114

4.1.2.2. Cas du R507: 115
4.1.3. Application 117
4.1.4. Conclusion 118
4.2. Confinement de la charge par utilisation des micro-canaux 118
4.2.1. Introduction 118
4.2.2. Dispositif expérimental 120
4.2.3. Résultats expérimentaux et discussions 121
4.2.3. 1 Présentation et description des différents régimes d'écoulement 121
4.2.3. 2 Vitesse de déplacement des bulles 125
4.2.4. Conclusion 126
4.3. Machine frigorifique à absorption 127
4.3.1 Introduction 127
4.3.2 Machine frigorifique à absorption solaire 127
4.3.3. Fonctionnement d'une machine frigorifique à absorption solaire 127
4.3.4. Utilisation L'énergie solaire pour la production du froid 129
4.3.4.1. Capteur solaire plan: 129
4.3.4.2. Principe de fonctionnement du capteur solaire plan 130
4.4. Gaz naturel dans l'industrie frigorifique 131
4.4.1. Usages du gaz naturel: 131
4.4.2. Système à absorption fonctionnant au gaz naturel 132
4.4.2.1. Fonctionnement d'une machine à absorption au gaz naturel 133
4.4.3. Interprétation des résultats : 134
4.5. Stockage du froid en aval de l'évaporateur 136
4.5.1 Principe de fonctionnement : 137
4.5.2. Groupe frigorifique: 137
4.5.3 Résultats et discussion 138
4.5.4. Conclusion 142

Chapitre 5 : Optimisation de la consommation énergétique en climatisation

5.1. Introduction 144
5.2. Orientation 145
5.3. L'isolation thermique du bâtiment 145
5.3.1. Les isolants utilisés en Algérie 146

5.4. Les solutions bioclimatiques 147
5.4.1. Cheminée solaire 147
5.4.2. Echangeur air-sol 147
5.4.3. Végétalisation des bâtiments 148
5.5. Données géographiques 148
5.5.1 Données météorologiques 149
5.6. Application 149
5.6.1.Matériaux de constructions utilisés 149
5.7. Bilan thermique du local 151
5.7.1.Organigramme de calcul des apports calorifiques du local: 152
5.8. Résultats et discussion 156
Conclusion 160
Références bibliographiques 163

Liste des tableaux

CHAPITRE 1

Tableau 1. 1: Composition de l'atmosphère près de la surface.....9
Tableau 1. 2: Potentiel d'action sur l'ozone de divers fluides frigorigènes 12
Tableau 1. 3: Potentiel d'action sur l'effet de serre de divers frigorigènes.....16
Tableau 1. 4: Calendrier d'interdiction d'utilisation des CFC 26
Tableau 1. 5: Calendrier concernant la production et la mise sur le marché de CFC et HCFC27
Tableau 1. 6: Calendrier d'élimination graduelle des CFC et HCFC.....29
Tableau 1.7: Liste des unités Algériennes ayant bénéficié d'un programme de reconversion. 33

CHAPITRE 2

Tableau 2. 1: Dates d'introduction des principaux fluides frigorigènes.....53
Tableau 2. 2: Propriétés de fluides frigorigènes 66
Tableau 2. 3: Fluides frigorigènes dont l'utilisation est interdite et leur substituants.....69

CHAPITRE 3

Tableau 3. 1: Couples utilisés pour les systèmes à absorption.....84
Tableau 3. 2: Classement des diamètres des micro-canaux 103

CHAPITRE 4

Tableau 4. 1: Caractéristiques du propane 132
Tableau 4. 2 : Résultats 138

CHAPITRE 5

Tableau 5. 1: Apports par transmission des parois opaques (local 1) 153
Tableau 5. 2 Apports par transmission des parois opaques (local 2) 153
Tableau 5. 3: Besoins énergétiques des deux locaux 153
Tableau 5. 4: Besoins énergétiques par mois 154
Tableau 5. 5: Consommation énergétique sans et avec les solutions bioclimatique 154
Tableau 5. 6: Consommation énergétique pendant la période estivale(ville de Ouargla).....155
Tableau 5.7:Coût de la consommation Energétique en utilisant la machine frigorifique Mécanique / absorption pour différents valeurs du COP 156

Liste des figures

CHAPITRE 1

Figure 1.1: Evolution de la consommation énergétique par forme d'énergie en Algérie 6
Figure 1.2:Consommation d'énergie en Algérie par secteur. 6
Figure 1.3: Structure de l'atmosphère. 9

CHAPITRE 2

Figure 2.1: Cycle de Carnot en réfrigération 38
Figure 2.2: Schéma d'une installation frigorifique à compression mécanique simple 39
Figure 2.3: Cycle frigorifique à compression mécanique simple 39
Figure 2.4: Schéma d'une installation frigorifique à compression mécanique simple avec échangeur de chaleur 44
Figure 2.5: Cycle d'une installation frigorifique à compression mécanique simple avec échangeur de chaleur 44
Figure 2.6: Schéma d'une installation frigorifique à compression mécanique simple avec séparateur de liquide et sous refroidisseur 45
Figure 2.7: Cycle d'une installation frigorifique à compression mécanique simple avec séparateur de liquide et sous refroidisseur 46
Figure 2.8: Schéma d'une installation frigorifique à compression mécanique bi-étagée à injection totale avec sous refroidisseur. 47
Figure 2.9: Cycle d'une installation frigorifique à compression mécanique bi étagée avec sous refroidisseur à injection totale. 47
Figure 2. 10: Cycle d'une installation frigorifique à compression mécanique bi-étagée à injection partielle avec sous refroidisseur 48
Figure 2.11: Schéma d'une installation frigorifique à compression mécanique biétagée à injection partielle avec sous refroidisseur 49
Figure 2.12: Schéma d'une installation frigorifique à cascades avec sous refroidisseur 50
Figure 2.13: Cycle d'une installation frigorifique à cascades avec sous refroidisseur 51

CHAPITRE 3

Figure 3.1: Schéma de principe d'une machine Frigorifique à absorption 81
Figure 3.2: Schéma du bouilleur 82
Figure 3.3: Schéma de L'absorbeur 82

Figure 3.4: Schéma d'une machine à absorption avec une solution de H2O/BrLi 84
Figure 3.5: Schéma d'une machine à absorption avec une solution de NH3/H2O 85
Figure 3.6: Cycle frigorifique à absorption à simple effet 86
Figure 3.7: Cycle à absorption à double effet.....87
Figure 3.8: Cycle thermodynamique d'une machine frigorifique à absorption 88
Figure 3.9: Cycle d'AMRR (Brayton).....90
Figure 3.10: Schéma de fonctionnement d'un Régénérateur Magnétique Actif.....93
Figure 3.11: Dispositif du G2Elab.....95
Figure 3.12: Dispositif ACM 96
Figure 3.13: Schéma d'une machine frigorifique à éjecto- compresseur.....97
Figure 3.14: Schéma d'un éjecteur.....98
Figure 3.15:Micro évaporateur en cuivre 101
Figure 3. 16 : Micro évaporateur en silice.....101
Figure 3. 17: Différentes formes géométriques des micro-canaux.....102
Figure 3.18: Différents types de stockage de froid.....104
Figure 3.19 : Schéma de stockage en amont de l'évaporateur.....105
Figure 3.20: Schéma de stockage en aval de l'évaporateur 106
Figure 3.21: Schéma de Stockage en position intermédiaire.....107
Figure 3.22: Schéma de Construction de la glace 108
Figure 3.23: Phase de fonte de la glace 109
Figure 3.24: Déstockage de la glace.....109
Figure 3.25: Nodule, Phase de stockage.....110
Figure 3.26: Réservoir de stockage 110

CHAPITRE 4

Figure 4. 1: Représentation de la courbe de saturation du R407C sur diag (P-H) 114
Figure 4. 2: Représentation de la courbe de saturation du R407C sur diag (T-S).....115
Figure 4. 3: Représentation de la courbe de saturation du R507 sur diag (P-H).....116
Figure 4.4: Représentation de la courbe de saturation du R507sur diag (T-S) 116
Figure 4.5: Evolution du COP en fonction de la température d'évaporation Cas du R407C 117
Figure 4.6: Evolution du COP en fonction de la température d'évaporation Cas du R507 118
Figure 4.7: Dispositif expérimental 121
Figure 4.8: Mesures de la température et pression de la vapeur 122
Figure 4.9: Photos des différents régimes d'écoulements observés 123

Figure 4.10: Ecoulement oscillatoire en microcanal 124
Figure 4.11 : Vitesse de déplacement de bulle 126
Figure 4.12: Schéma d'une machine Frigorifique à absorption solaire..... 128
Figure 4.13: Principaux composants du capteur solaire plan. 130
Figure 4.14 : Machine frigorifique à absorption au gaz naturel 133
Figure 4.15: Variation de COP en fonction de la température du condenseur..... 135
Figure 4.16: Variation du COP en fonction de la température de l'évaporateur..... 135
Figure 4.17: Variation de COP en fonction de la température de l'absorbeur 136
Figure 4.18: Schéma de stockage du froid en aval de l'évaporateur..... 136
Figure 4.19: Schéma du groupe frigorifique 137
Figure 4.20: Variation des apports calorifiques 138
Figure 4.21: Influence de la puissance du compresseur sur le COP 139
Figure 4.22: Variation de la puissance de compresseur pendant la période estivale..... 139
Figure 4.23: Variation de la puissance consommée par le compresseur en fonction de la puissance frigorifique 140
Figure 4.24: Influence du cop sur la puissance consommée par le compresseur 140
Figure 4.25: Variation du coût de la consommation énergétique en fonction de la puissance consommée par la compresseur 141
Figure 4.26: Comparaison du coût de la consommation énergétique sans et avec stockage 141

CHAPITRE 5

Figure 5.1: Situation géographique de la ville de Ouargla 148
Figure 5.2: Variation de la température dans la région de Ouargla 149
Figure 5.3: Plan du local..... 150
Figure5.4:Consommation énergétique de la climatisation Pendant la période estivale 157
Figure 5.5:Puissance consommée en fonction des besoins énergétiques 157
Figure 5.6: Coût de la consommation en fonction des besoins énergétiques 158

Nomenclature

A	:la quantité de CO2	[kg]
Cp	:chaleur spécifique du fluide	[kJ/kg K]
D	:diamètre	[µm]
di	:diamètre intérieur	[m]
de	:diamètre extérieur	[m]
e_i	:épaisseur de chaque couche de paroi	[m]
H	:Enthalpie	[kJ/kg]
h_m	:Coefficient de transfert thermique	[W m^{-1} k^{-1}]
h_X	:Coefficient de transfert thermique local	[W m^{-1} k^{-1}]
K	:Coefficient global de transmission	[Kcal/hm²°C]
K_L	:Conductivité thermique liquide	[W m^{-1} k^{-1}]
K_v	:Conductivité thermique vapeur	[W m^{-1} k^{-1}]
M	:la masse du fluide	[kg]
m	:débit massique	[kg/s]
P	:Pression	[bar]
P_C	:Pression de condensation	[kpa]
P_E	:Pression d'évaporation	[kpa]
BP	:Base pression	[kpa]
HP	:Haute pression	[kpa]
Q_C	:Quantité de chaleur chaud	[kw]
Q_m	:Débit massique	[kg/s]
Q_{msr}	:Débit massique de la solution riche	[kg/s]
Q_{msp}	:Débit massique de la solution pauvre	[kg/s]
q_{0m}	:La capacité de réfrigération massique	[kJ/kg]
$\boldsymbol{Q_F}$	:Quantité de chaleur frigorifique	[kw]
Q_m	:le débit massique du fluide frigorigène	[kg/s]
Q_c	:la charge calorifique du local	[kcal/h]
Q_{pe}	:apport de chaleur externe	[kcal/h]
Q_I	:apport de chaleur interne	[kcal/h]
Q_T	:apports par transmission	[kcal/h]
Q_{tv}	:apports par transmission des parois vitrées	[kcal/h]

Q_t	:apportes par transmission des parois opaques	[kcal/h]
Q_0	:perte de chaleur pour l'élément considéré	[kcal/h]
Q_{st}	:apports par ensoleillement	[kcal/h]
$Q_{écl}$	:apports du à l'éclairage	[kcal/h]
Q_{oc}	:apport de chaleur dû aux occupants	[kcal/h]
Q_L	:apport de chaleur dû à la chaleur pénétrant à travers les joints	[kcal/h]
R :	:constante de gaz parfait	[$JK^{-1}mol^{-1}$]
S	:entropie massique	[kJ/kg.K]
S_m	:Surface de paroi vitrée	[m²]
s	:Surface du capteur	[m²]
T	:Température	[°C]
Te	:température d'évaporation	[^{0}C]
Tc	:température de condensation	[^{0}C]
U_K	:Vitesse	[m/s]
U_V	:Vitesse vapeur	[m/s]
U_L	:Vitesse liquide	[m/s]
$(U_V)_x$	:Vitesse moyenne de la vapeur à une distance x	[m/s]
V	:Débit volumétrique	[m^3/h]
v	:Vitesse	[m/s]
W_0	:vitesse du condensat	[m/s]
w_m:	:Travail mécanique	[kJ/kg]
Wm	:travail massique de compression	[kJ/kg]
x	:fraction de fluide récupéré en fin de vie d'équipement	
y	:fraction molaire	
z	:facteur de compressibilité	

Notation grecque

μ	:viscosité dynamique	[Pa s]
μp	:viscosité dynamique de paroi	[Pa s]
ν	:la viscosité cinématique du fluide	[m^2/s]
μ_V	:viscosité dynamique vapeur	[Pa s]
μ_L	:viscosité dynamique liquide	[Pa s]
μ_V	:viscosité dynamique vapeur	[Pa s]

μ_L :viscosité dynamique liquide [Pa s]

Abréviations

AMR	:Active Magnetic Regenerator
AMRR	:Active Magnétique Régénérative Réfrigération
CFC	:Chlorofluorocarbures
COP	:Coefficient de performance
EMC	:Effet magnéto-calorifique
FF	:Fluide frigorigène
FR	:Taux de circulation
HCFC	:Hydrochlorofluorocarbures
GN	**:G**az **N**aturel
GWP	:Global Warning Potential
GES	:Gaz à effet de serre
HCFC	:Hydrochlorofluorocarbures
IFCMS	**:I**nstallation **F**rigorifique à **C**ompression **M**écanique **S**imple
ODP	:Ozone Depletion Potential
OPEC	:Organization of the Petroleum Exporting Countries
PR	:Peng- Robinson
PAOS	Potentiel d'Action sur l'Ozone Stratosphérique
Tep	:Tonne équivalent pétrole
TEWI	:Total Equivalent warning impact

Indices

f	:frigorigène, froid
g	:générateur
e	:évaporateur
a	:absorbeur
c	:condenseur, Carnot
l, v	:liquide, vapeur
0	:référence
a	:absorbeur
c	:condenseur
l	:Liquide
p	:pauvre
r	:riche
v	:vapeur
c	:critique ou condensation
ci	:critique de l'élément
cm	:critique de mélange
i	:élément
j	:Elément
k	:élément
m	:mélange
o	:de référence
p	:pression constante
r	:Réduite
v	:volume constante

Résumé

La consommation de l'électricité en Algérie a été en forte progression, notamment dans le secteur résidentiel, à cause de la croissance démographique élevée, l'amélioration du niveau de vie, et le phénomène de l'urbanisation qui est de plus en plus important, donc la recherche de meilleures conditions de vie et de confort a conduit l'homme à une intensification de consommation de l'énergie sous ses différentes formes. Cette tendance a engendré des effets néfastes pour la planète tels que la pollution de l'atmosphère, l'effet de serre, la désertification, la destruction de la couche d'ozone. Dans ce contexte, la réduction des coûts des investissements énergétiques, notamment en climatisation.

Les préoccupations environnementales se renforcent de plus en plus en appuyant sur la nécessité de limiter des rejets de gaz à effet de serre, la réduction et l'élimination progressive des fluides frigorigènes nocifs employés dans les machines frigorifiques à compression mécanique, le compresseur mécanique reste alors un consommateur mal adapté aux sources renouvelables et la puissance électrique consommée par ces appareils est considérée comme importante et coûteuse.

L'objectif de ce travail est de contribuer à la réduction de la consommation énergétique dans le domaine frigorifique, et améliorer la production du froid en utilisant différentes formes d'énergies.

Abstract

Electricity consumption in Algeria has increased sharply, particularly in the residential sector, due to the high population growth, the improvement of the standard of living, and the phenomenon of urbanization, which is becoming increasingly important. So the search for better living conditions and comfort has led man to intensify energy consumption in its different forms. This trend has led to adverse effects for the planet such as air pollution, the greenhouse effect, desertification, the destruction of the ozone layer. In this context, the reduction of energy investment costs, especially in air conditioning.

Environmental concerns are increasingly reinforced by the need to limit greenhouse gas emissions, the reduction and phasing out of harmful refrigerants used in mechanical compression refrigeration machines, and the mechanical compressor remains in place. a poorly adapted consumer to renewable sources and the electrical power consumed by these devices is considered important and expensive.

The aim of this work is to contribute to the reduction of energy consumption in the refrigeration field, and to improve the production of cold using different forms of energy.

ملـــخص :

زاد استهلاك الكهرباء في الجزائر زيادة حادة ، لا سيما في القطاع السكني ، بسبب النمو السكاني المرتفع، وتحسين مستوى المعيشة ، وظاهرة التحضر ، التي أصبحت ذات أهمية متزايدة. لذا فإن البحث عن ظروف معيشية أفضل وراحة قد دفع الإنسان إلى تكثيف استهلاك الطاقة بأشكاله المختلفة. وقد أدى هذا الاتجاه إلى آثار سلبية على كوكب الأرض مثل تلوث الهواء ، وتأثير الاحتباس الحراري ، والتصحر ، وتدمير طبقة الأوزون. في هذا السياق ، والحد من تكاليف الاستثمار في الطاقة ، وخاصة في تكييف الهواء.

تتزايد المخاوف البيئية بشكل متزايد من خلال الحاجة إلى الحد من انبعاث غازات الدفيئة ، وخفض المبردات الضارة ا المستخدمة في آلات التبريد الميكانيكية الانضغاطية والتخلص التدريجي منها ، ويظل الضاغط الميكانيكي في مكانه. يعتبر المستهلك ضعيف التكيف مع المصادر المتجددة والطاقة الكهربائية التي تستهلكها هذه الأجهزة مهمة ومكلفة.

الهدف من هذا العمل هو المساهمة في الحد من استهلاك الطاقة في مجال التبريد ، وتحسين إنتاج البرد باستخدام أشكال مختلفة من الطاقة.

Introduction

Introduction

La recherche de meilleures conditions de vie et de confort a conduit l'homme à une intensification de consommation de l'énergie sous ses différentes formes (pétrole, gaz, charbon, électricité). Cette tendance a engendré des effets néfastes pour la planète tels que la pollution de l'atmosphère, l'effet de serre, la désertification, la destruction de la couche d'ozone. Dans ce contexte, la revalorisation des chaleurs résiduaires générées par de nombreux procédés industriels, telles que les machines de refroidissement, est une mesure attractive aux niveaux énergétique et économique

Les techniques de refroidissement à compression mécanique ont déjà fait leur preuve en ce qui concerne le rendement et la performance énergétique, ces techniques sont utilisées dans nos réfrigérateurs et dans nos climatiseurs, malgré la performance des machines frigorifiques à compression mécanique. Le compresseur mécanique reste alors un consommateur mal adapté aux sources renouvelables comme le solaire, la puissance électrique consommée par ces appareils est considérée comme importante, surtout quand il s'agit du rafraîchissement des espaces habitables et en conséquence des pics de consommation électrique peuvent toujours avoir lieu pendant les périodes estivales. Les préoccupations environnementales se renforcent de plus en plus en appuyant sur la nécessité de limiter des rejets de gaz à effet de serre, la réduction et l'élimination progressive des fluides frigorigènes nocifs employés dans les machines frigorifiques à compression mécanique et notamment les chlorofluorocarbures (CFC), les CFC sont responsables pour une bonne partie de la destruction de la couche d'ozone, la réglementation associée au Protocole de Montréal s'est traduite par un calendrier rapide d'arrêt de la production des CFC et des HCFC.

Durant ces dernières années, la consommation de l'électricité en Algérie a été en forte progression, notamment dans le secteur résidentiel, à cause de la croissance démographique élevée, l'amélioration du niveau de vie, et le phénomène de l'urbanisation qui est de plus en plus important. Cette tendance est appelée à se poursuivre pour les années à venir, ce qui conduira à de fortes contraintes technico économiques, en terme d'infrastructures de production et de développement de réseaux de distribution électrique, d'où la nécessité d'une réglementation de maîtrise de l'énergie s'impose en faisant valoir les arguments suivants: La réduction des coûts des investissements énergétiques, notamment en matière de chauffage et de climatisation ; La réduction de l'impact des énergies fossiles sur l'environnement, les

énergies renouvelables se placent au cœur des politiques énergétiques et économiques menées par l'Algérie, d'ici 2030 environ 40 % de la production d'électricité destinée à la consommation nationale sera d'origine renouvelable.

L'objectif de ce travail est de contribuer à la réduction de la consommation énergétique dans le domaine frigorifique, et améliorer la production du froid en utilisant différentes formes d'énergies telles que l'énergie solaire et le gaz naturel. Pour remplacer l'énergie électrique qui est très couteuse surtout en climatisation, dans la région sud de l'Algérie, ou la période estivale s'étend du mois d'avril jusqu'au mois d'octobre, sachant que notre pays est producteur du gaz naturel, et possède un rayonnement solaire important dans la région sud du pays. Beaucoup de pertes de chaleur sont rencontrées et qui peuvent être récupérées en développant certains machines frigorifiques, la machine frigorifique à absorption est rustique demandant très peu de maintenance et l'absence de machines tournantes de forte puissance fait des machines frigorifiques à absorption silencieuses à l'opposé de la machine à compression mécanique.

La réduction de la quantité du fluide frigorigène peut être réalisé par l'utilisation des micro-canaux dans les échangeurs de chaleurs de l'installation frigorifique, donc réduire la taille de l'installation qui devient moins encombrant et économique, il est possible par la décentralisation relative des systèmes de production de froid, de limiter la charge et d'améliorer l'efficacité énergétique.

La réfrigération magnétique constitue une alternative à la technologie classique de production du froid, elle est prometteuse et devrait permettre de réaliser des systèmes compacts et à haute efficacité énergétique tout en préservant l'environnement, elle répond de ce fait aux préoccupations actuelles relatives à la maîtrise et l'économie de l'énergie et à la réduction des gaz à effet de serre, dans notre étude, on montre aussi l'influence du stockage du froid pour optimiser le coût de la consommation pour produire du froid.

Cette thèse est composée d'une introduction et cinq chapitres et se termine par une conclusion :

- **Le premier chapitre** présente le contexte énergétique en Algérie, et impact des fluides frigorigènes sur l'environnement et leurs règlementations.

- **Le second chapitre** est consacré à l'analyse des différents procédés permettant la production du froid et une évaluation des fluides frigorigènes utilisés dans l'industrie frigorifiques.
- **Le troisième chapitre p**résente des solutions alternatives pour remplacer les installations frigorifiques à compression mécanique qui utilisent des fluides frigorigènes nocifs pour l'environnement

- **le quatrième chapitre est consacré** à l'application des solutions alternatives, à savoir : les machines frigorifiques à absorption, la source d'énergie peut être l'énergie solaire ou le gaz naturel. l'utilisation des micro-canaux dans les échangeurs de chaleurs de l'installation frigorifique, donc réduire la taille de l'installation, et étude de l'influence du stockage de froid, pour réduire le coût de la consommation énergétique.
- **le cinquième chapitre** montre l'influence de l'intégration des solutions bioclimatiques en utilisant une bonne isolation pour augmenter le confort thermique en permettant de faire des économies importantes en énergie, en diminuant la puissance des installations de chauffage et de climatisation, pour l'optimisation du coût de la climatisation. Nous avons ensuite fait une comparaison entre une installation frigorifique à compression mécanique et une installation à absorption sans et avec solutions bioclimatiques dans la région de Ouargla sud-est de l'Algérie.

Finalement une conclusion générale.

Chapitre 1

Synthèse et évaluation de l'industrie frigorifique

Introduction

Les prévisions énergétiques établies à l'horizon 2020 montrent que la production d'énergie primaire suffirait à peine à couvrir la demande nationale et les engagements en matière d'exportation, En effet durant la saison estivale 2013, l'économie nationale et la collectivité ont subi de sérieuses perturbations en alimentation en énergie. Ces perturbations ont amené le gouvernement à prendre des mesures pour réduire la demande en énergie (APRUE, 2012).

Dans les pays en développement, l'énergie est l'un des facteurs déterminants pour la survie des populations : elle est nécessaire à toute activité humaine et indispensable à la satisfaction des besoins quotidiens mais également pour assurer un minimum de développement économique et social.. Une exigence de confort d'été plus stricte peut impliquer le recours à la climatisation, et donc induire une augmentation de la consommation d'énergie et des impacts qui en découlent.

1.2. Contexte énergétique

L'Algérie, possède d'importants gisements en pétrole et en gaz, Le gaz naturel qui constitue 60% de ses réserves en énergie fossile, alimente à hauteur de 30% de ses revenues en devises, d'où la nécessité d'une réglementation de maîtrise de l'énergie s'impose en faisant valoir les arguments suivants: La réduction des coûts des investissements énergétiques, notamment en matière de chauffage et de climatisation ; La réduction de l'impact des énergies fossiles sur l'environnement. La demande énergétique mondiale a connu une croissance soutenue sur les 40 dernières années, passant de près de 5000 Mtep en 1970 à 12 000 Mtep en 2010. Elle a été multipliée par plus de 2,4 en 40 ans, ce qui correspond à un rythme de croissance annuelle moyen de l'ordre de 2,24 %. Cette tendance, si elle devait se prolonger sur les 40 prochaines années, conduirait à plus que doubler la demande énergétique mondiale à l'horizon 2050 par rapport au niveau de 2010 (Percebois, 2012).

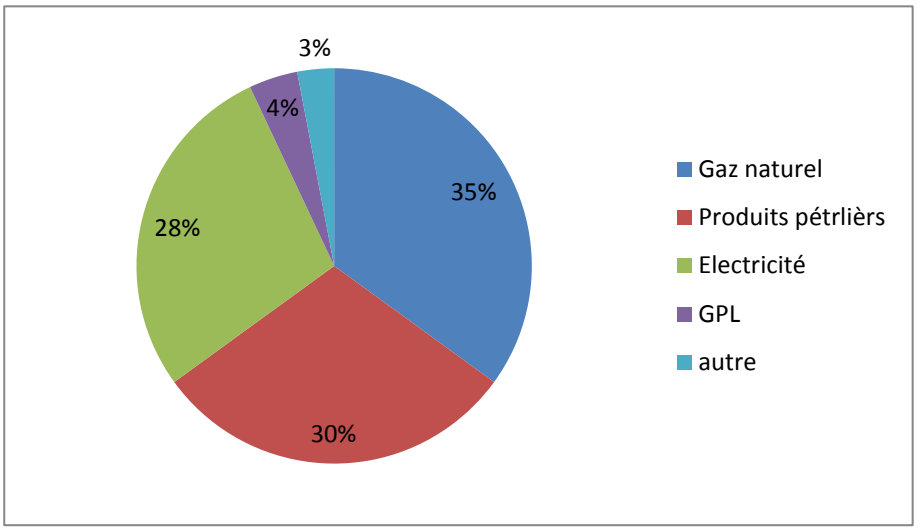


Figure 1. 1: Evolution de la consommation énergétique par forme d'énergie en Algérie

D'après l'Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'énergie (APRUE 2012), dans son rapport sur la consommation énergétique finale de l'Algérie, le secteur le plus consommateur d'énergie est le secteur ménager de 45%, ensuite l'industrie avec 28% et enfin le transport avec 27%.

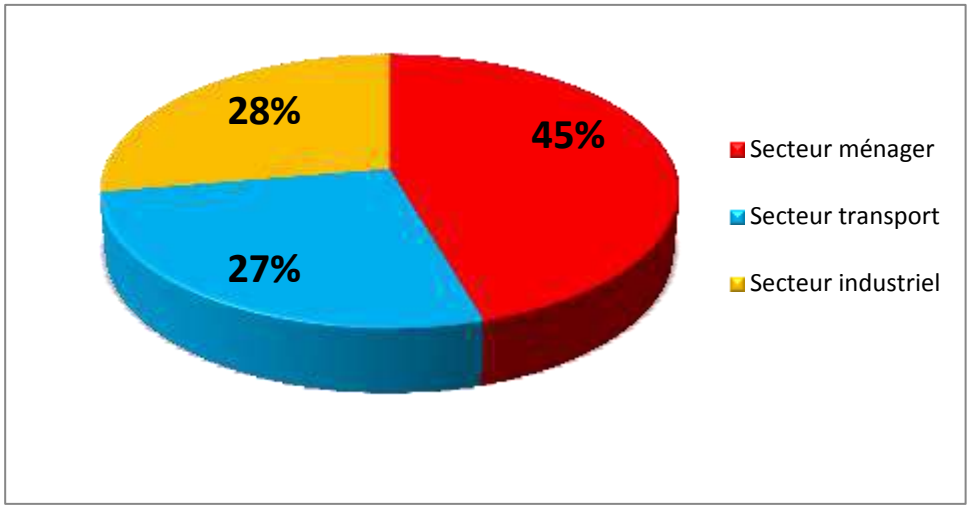


Figure 1. 2:Consommation d'énergie en Algérie par secteur.

Durant ces dernières années, la consommation de l'électricité en Algérie a été en forte progression, notamment dans le secteur résidentiel, à cause de la croissance démographique élevée, l'amélioration du niveau de vie, et le phénomène de l'urbanisation qui est de plus en plus important. Cette tendance est appelée à se poursuivre pour les années à venir, ce qui conduira à de fortes contraintes technico économiques, en terme d'infrastructures de production et de développement de réseaux de distribution électrique.. L'électricité, le gaz

naturel, fuel, charbon, bois et même piles électriques sont les vecteurs d'énergie du secteur domestique. Les différents types d'énergie nous servent globalement à quatre différents usages Le chauffage qui représente la plus forte dépense environ 60% de l'énergie domestique; L'éclairage, l'électroménager, l'audio visuel et la climatisation représentent près de 20% de l'énergie. L'eau chaude sanitaire nécessaire, représente près de 15%. La cuisson représente près de 5%. (Ait-Mekideche M, 2013).

1.2.1. Programme national des énergies renouvelables

L'Algérie amorce une dynamique d'énergie verte en lançant un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables (ENR) et d'efficacité énergétique. Cette vision du gouvernement algérien s'appuie sur une stratégie axée sur la mise en valeur des ressources inépuisables comme le solaire et leur utilisation pour diversifier les sources d'énergie et préparer l'Algérie de demain, l'Algérie s'engage dans une nouvelle ère énergétique durable (MEM 2012).

Le programme consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de près de 22000 MW entre 2011 et 2030 dont 12000 MW seront dédiés à couvrir la demande nationale en électricité et 10000 MW à l'exportation. A la faveur de ce programme, les énergies renouvelables se placent au cœur des politiques énergétiques et économiques menées par l'Algérie. D'ici 2030, environ 40 % de la production d'électricité destinée à la consommation nationale sera d'origine renouvelable.

Ce choix stratégique est motivé par l'immense potentiel en énergie solaire. Cette énergie constitue l'axe majeur du programme qui consacre au solaire thermique et au solaire photovoltaïque une part essentielle. Le solaire devrait atteindre d'ici 2030 plus de 37% de la production nationale d'électricité, malgré un potentiel assez faible, le programme n'exclut pas l'éolien qui constitue le second axe de développement et dont la part devrait avoisiner les 3% de la production d'électricité en 2030..Les techniques de refroidissement à compression mécanique ont déjà fait leur preuve en ce qui concerne le rendement et la performance énergétique ; ces techniques sont bien connues depuis des années et aujourd'hui encore, elles sont toujours utilisées dans nos réfrigérateurs et dans nos climatiseurs. Malgré la performance des machines frigorifiques à compression, le compresseur mécanique reste alors un consommateur mal adapté aux sources renouvelables comme le solaire. La puissance électrique consommée par ces appareils est considérée comme importante, surtout quand il

s'agit du rafraîchissement des espaces habitables et en conséquence des pics de consommation électrique peuvent toujours avoir lieu pendant les périodes estivales. En même temps, les préoccupations environnementales se renforcent de plus en plus en appuyant sur la nécessité de limiter des rejets de gaz à effet de serre, la réduction et l'élimination progressive des fluides frigorigènes nocifs employés dans les machines frigorifiques à compression mécanique et notamment les chlorofluorocarbures (CFC). Les CFC sont responsables pour une bonne partie de la destruction de la couche d'ozone; La réglementation associée au Protocole de Montréal (*CE N° 2037/2000)* s'est traduite par un calendrier rapide d'arrêt de production des CFC et des HCFC, autant il semble peu probable qu'à l'échelle mondiale les HFC puissent disparaître rapidement

1.3. Impact des fluides frigorigènes sur l'environnement

1.3.1. Composition de l'atmosphère

L'atmosphère entoure la terre est une enveloppe est assez mince; de l'ordre d'un millier de kilomètres constituée de plusieurs couches distinctes qui différent surtout par leur composition et leur températures. Lorsqu'on s'élève verticalement, la courbe des températures varie et s'infléchit par trois. L'altitude de ces variations nous indique les limites des couches de l'atmosphère plus on s'éloigne de la terre, plus la concentration en gaz diminue. L'atmosphère est constituée de quatre zones qui sont: la troposphère, la stratosphère, l'écosphère et l'exosphère.

1.3.1 .1. Structure de l'atmosphère

La structure de l'atmosphère influe de façon non négligeable sur le rayonnement reçu. On peut grossièrement diviser l'atmosphère en 5 couche ayant des propriétés tout à fait différentes et distinctement séparées.

a- la troposphère qui s'étend jusqu'à 15 km d'altitude ou la température décroitre de 6.5°C par km pour atteindre (-70°C) à la base de la couche suivante.

b-la stratosphère de 15 à 55 km, où la température croit de -70°C à 10°C

c- la mésosphère de 55 à 80 km ou la température décroitre de niveau de +10°C à -80°C.

d- la thermosphère ou la température décroitre régulièrement pour atteindre 1500°C à l'altitude de 300 km.

e- l'exosphère au-delà de 700 Km qui s'ouvre sans frontière sur l'espace intersidérale.

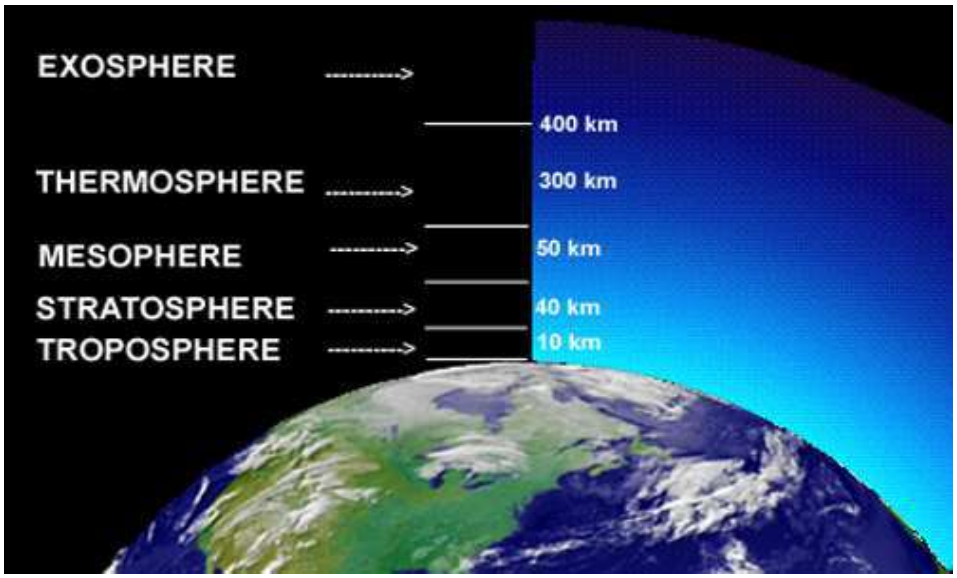


Figure 1. 3 : Structure de l'atmosphère.

Les caractéristique absorbantes de l'atmosphère sont déterminées par la présence de :

- CO2 (0.03%) ;
- Vapeur d'eau en quantité variable caractérisée par l'épaisseur d'eau condensable qui est l'épaisseur d'eau que l'on obtiendrait en condensant toute la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère ;
- Ozone O_3 située entre 10 et 30 km d'altitude ;
- Aérosols : grains de sable, poussières, fumées.

Tableau 1. 1: Composition de l'atmosphère près de la surface

Nom du gaz	Désignation	% en volume
Azote	N_2	78
Oxygène	O_2	21
Argon	Ar	0,93
Vapeur d'eau	H_2O	0 – 4
Gaz carbonique	CO_2	0.033
Néon	Ne	0.0018
Krypton	Kr	0.000114
Hydrogène	H	0.00005
Oxyde d'azote	N_2O	0.00005
Xénon	Xe	0.0000087
Ozone	O_3	0 – 0.000001

1.3.2. Destruction de la couche d'ozone stratosphérique

1.3.2.1. Historique

Lorsqu'ils apparurent vers les années 1930, les fluides frigorigènes de la catégorie des chlorofluorocarbones, furent considérés comme substances ne présentant que des avantages, C'est au début des années 70 que le problème de la dégradation de la couche d'ozone a commencé à faire l'objet de discussions. En 1974, deux scientifiques américains, Mario Molina et Sherry Rowland, ont publié un article dans la revue Nature émettant l'idée que les gaz très stables contenant du chlore pouvaient atteindre la stratosphère, se décompose et par une réaction chimique complexe, se mélanger à l'ozone et endommage la couche protectrice. A la fin des années 70, il fût démontré que les CFC et les halons étaient bien la cause de la détérioration de la couche d'ozone. Rapidement hissé au rang des problèmes mondiaux, la protection de la couche d'ozone fit l'objet d'une mobilisation internationale, menée par le PNUE, afin de trouver des solutions. En 1978, le PNUE convoque à Munich les Etats intéressés : élaboration d'un plan d'action mondial pour la préservation de la couche d'ozone. En Avril 1991, la NASA annonça que ses satellites de surveillance atmosphérique, avaient détecté un appauvrissement important de la couche d'ozone au dessus des régions nordiques, et que le trou dans la couche d'ozone qui apparaît tous les ans au dessus de l'antarctique est plus grand que ce qui avait été calculé au départ (environ 28,3 million km^2), et un trou semblable et en cours de formation au dessus de l'arctique (OAP, 1999).

On a maintenant la preuve que les niveaux d'ozone diminuent de plusieurs pour cent au printemps et en été dans les deux hémisphères à hautes et moyennes latitudes, ils diminuent également pendant l'hiver à ces latitudes dans l'hémisphère sud**.**

En 1995 : le néerlandais Paul Cruutzen, le mexicain Mario Molina et l'américain Frank Rowland obtiennent le prix Nobel de chimie pour avoir montré l'influence des CFC d'origine humaine sur la couche stratosphérique.

en 1996 : le trou dans la couche d'ozone au dessus de l'Antarctique s'est étendu sur 20 millions de km^2 pendant plus de 40 jours et l'on a observé une diminution sans précédent de 45% de la couche d'ozone au-dessus de la Scandinavie, du Groenland et de la Sibérie.

les industriels ont joué un rôle important en anticipant les décisions réglementaires qu'ils jugeaient inévitables pour se lancer dans la recherche de produits de substitution (HCFC puis HFC), tout en prenant en compte d'autres facteurs tels que l'efficacité énergétique, la sécurité des travailleurs, la

sécurité des consommateurs, 17 entreprises de chimie se sont réunies pour créer l'AFEAS (Alternative Fluorocarbons Environnemental Acceptability Study) et le PAFT (Programme for Alternative Fluorocarbons Toxicity Testing). En combinant leurs ressources et en coopérant avec les programmes gouvernementaux, l'AFEAS et le PAFT ont contribué à l'élimination des CFC.

1.3.2.2. Effet des fluides frigorigènes sur la couche d'ozone

Les rayonnements solaires décomposent un grand nombre des gaz présents dans la stratosphère et contenant de chlore et de brome.

Des radiaux de chlore et de brome déclenchent ensuite une réaction en chaîne destructrice qui décompose d'autres gaz stratosphériques dont l'ozone, les molécules d'ozone sont décomposées en oxygène et monoxyde de chlore, molécule éphémère qui sera a son tour cassée. Lorsqu'un atome d'oxygène libre capturera son atome d'oxygène pour réformer de l'oxygène moléculaire.

Comme substituts aux CFC les chimistes ont proposés les HFC et les HCFC qui appartiennent à la même famille que le CFC. La différence importante étant que les molécules des HCFC contiennent au moins un hydrogène et que les molécules de HFC ne contiennent pas de chlore. Ces deux points sont essentiels, l'appauvrissement de la couche d'ozone est un phénomène complexe dont l'origine réside dans la présence de chlore dans la molécule des composés halogénés. Les HFC qui ne contiennent pas de chlore n'ont aucun effet sur la couche d'ozone, les HCFC qui contiennent de chlore ont un effet sur la couche d'ozone. L'avantage des HFC et qu'ils sont inoffensifs pour la couche d'ozone. Néanmoins, ils ne sont pas pour autant bénins pour l'environnement. En effet, ils contribuent à l'échauffement de la planète en renforçant l'effet de serre. Des potentiels ont été introduits pour quantifier l'impact des fluides frigorigènes au regard de l'environnement (Lemmon Eric W, 2006).

Le premier potentiel, l'ODP (Ozone Depletion Potential) qui se traduit par PAOS (Potentiel d'Action sur l'Ozone Stratosphérique) rend compte de l'impact de l'émission d'un kg de fluide frigorigène comparé à l'impact de l'émission d'un kg de R11. Les CFC ont un ODP proche de 1 ce qui correspond à un très fort impact sur la couche d'ozone. Les HCFC ont un ODP beaucoup plus faible.

Tableau 1. 2: Potentiel d'action sur l'ozone de divers fluides frigorigènes

(Art. R. 521-56, 2011)

Fluide Frigorigène	ODP	Fluide Frigorigène	ODP
R11	1	R123	0.02
R12	0.9à1	R124	0.022
R22	0.055	R125	0
R23	0	R134a	0
R32	0	R141b	0.11
R113	0.8	R142b	0.065
R114	1	R143a	0
R115	0.6	R152a	0
R13B1	7.8à13.2	R500	0.74
NH3(R717)	0	R502	0.33
CO_2	0	R290(propane)	0
R-404A	0		
R-407A	0		
R-407B	0		
R-410A	0		
R-507A	0		

1.3.3. Contribution de certains fluides frigorigènes au réchauffement de la planète (Coulomb D, 2004)

Les termes réchauffement de la planète ou effet de serre sont traditionnellement utilisés pour décrire l'augmentation de la température moyenne à la surface de la planète, Il est estimé que la Terre s'est réchauffée entre 0,6 et 0,9 degrés Celsius au cours du siècle dernier. Les scientifiques ont conclu que la majeure partie de l'augmentation observée des températures, ramenée à une moyenne mondiale, depuis le milieu du 20ème siècle est très probablement due à l'accroissement de la concentration des gaz à effet de serre.

L'effet de serre résulte du piégeage par certains gaz de l'atmosphère du rayonnement infrarouge émis par le sol, ce phénomène permettant de maintenir à la surface de la terre une température autorisant la vie. Si l'effet de serre n'existait pas, la température moyenne à la surface de la terre serait inférieure d'environ 20 K à ce qu'elle est actuellement; autant dire que notre planète serait invivable. Le piégeage du rayonnement infrarouge s'effectue naturellement grâce à la vapeur d'eau contenue dans l'air et grâce aux nuages. Or d'autres gaz que l'activité humaine produit participent à ce piégeage, en particulier l'anhydride carbonique (CO_2) et les fluides frigorigènes de la catégorie des (CFC). Le rayonnement terrestre infrarouge étant surpiégé par le CO_2 et le CFC entre autres, la température moyenne à la surface de la terre va donc s'élever anormalement produisant un effet de serre artificiel se surajoutant à l'effet de serre naturel (Barret M, 1991).

La concentration en CFC dans l'atmosphère soit bien plus faible que celle de CO_2, leur efficacité relative est plusieurs milliers de fois supérieure à celle du CO_2 du fait de leur durée de vie très élevées (58 ans pour R11, 100 ans pour R_{12} et 250 ans pour R_{115}). Les gaz à effet de serre emprisonnent donc la chaleur dans le système surface-troposphère,. Plus l'atmosphère comporte de gaz à effet de serre d'origine anthropique, plus la quantité de radiation infrarouge réfléchie à la surface de la Terre est importante. Il en résulte les fameux gaz à effet de serre anthropogéniques provoquant un réchauffement planétaire (Bolaji B.O et al, 2013).

Les principaux gaz à effet de serre d'origine anthropique sont ceux relevant du protocole de Kyoto : le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4), le protoxyde d'azote (N_2O) et les gaz à effet de serre fluorés d'origine anthropique. Les substances appauvrissant la couche d'ozone, réglementées dans le cadre du Protocole de Montréal, telles que les chlorofluorocarbones (CFC), les (HCFC) ainsi que les halons, sont elles aussi d'importants gaz à effet de serre.

1.3.3.1. Principaux Gaz à effet de serre et leurs sources

• **La vapeur d'eau (H_20) :** Elle représente 70 % des émissions des GES. En plus elle a une faible durée de vie dans l'atmosphère qui ne dépasse pas une dizaine de jours, ce qui lui confère des effets locaux de courte durée (formation de brouillards ou de nuages bas). La quasi totalité de ses émissions vient du cycle de l'eau (d'origine naturelle). Et donc si l'on se limite à l'effet de serre d'origine humaine, que l'on appelle parfois effet de serre "additionnel" ou anthropique, influence de la vapeur d'eau sur le climat est négligeable.

• **Le dioxyde de carbone ou gaz carbonique (CO_2) :** Il y a bien sûr des émissions naturelles : la respiration des plantes ou des animaux, la putréfaction, les incendies naturels, mais le CO_2 est responsable d'environ 55% de l'effet de serre anthropique. Le CO_2 venant des activités humaines provient pour l'essentiel de la combustion des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz), de certaines industries (production de ciment...), et pour une part non négligeable de la déforestation, notamment en zone tropicale. Actuellement, le développement de l'habitat et des transports contribue de plus en plus aux émissions de CO_2.

• **Le méthane (CH_4) :** Engendre environ 15% de l'effet de serre anthropique. Une partie des émissions et d'origine naturelles (zone humide naturelle, fermentation entérique). Mais plus de la moitié des émissions sont liées à l'activité humaine : l'agriculture (rizières inondées), l'extraction du gaz naturel ou les prairies.

• **Le protoxyde d'azote ou oxyde nitreux (N_20) :** Provoque environ 5% de l'effet de serre anthropique. Les principales sources humaines d'émission sont : l'agriculture (engrais azotés), la combustion de biomasse, les activités industrielles. Il faut signaler aussi que les marges d'erreur dans la quantification des émissions de N_2O sont élevées car de nombreux phénomènes restent inexpliqués. (influence du climat ou de l'acidité des sols sur l'oxydation de l'azote) (Fukuda S et al. 2014).

• **Les hydrocarbures, et autres gaz artificiels fluorés (HFC, PFC, SF6) :** Ils sont en quasi totalité issus des activités humaines, car ils sont synthétiques et n'existent pas à l'état naturel. On les retrouve dans les systèmes de réfrigération et de climatisation (ils sont émis dans l'atmosphère par fuites ou mise en décharge des appareils), dans les aérosols (les célèbres CFC aujourd'hui réglementés), la fabrication de mousses isolantes, ou dans les applications électriques (transformateurs, ordinateurs, téléphones portables...). Ils participent à 15 % de l'effet de serre additionnel, malgré le fait qu'ils représentent moins de 0,000 001% de tous les GES, cela est du au fait qu'ils peuvent résider jusqu'à 50000 ans dans l'atmosphère.

• **L'ozone (O_3) troposphérique :** Il engendre environ 10% de l'effet de serre anthropique, naturellement présent dans l'atmosphère. Selon l'endroit où il se trouve, l'ozone dans la stratosphère : il arrête les ultraviolets (Mohanraj M et al, 2009).

1.3.3.2. Potentiel d'Action sur l'Effet de Serre (PAES)

Le second potentiel à prendre en considération est le Potentiel d'Action sur l'Effet de Serre (PAES) ou (Global Warning Potentiel GWP). Le GWP_{100} donne la quantité de CO_2 qui aurait un effet équivalent, sur l'effet de serre, à l'émission d'un kg de fluide à un horizon de 100 ans. En effet la durée de vie d'un fluide halogéné est très longue et il faut intégrer son effet sur une durée longue dans l'évaluation de l'impact sur l'environnement des fluides frigorigènes, Le tableau (1-4) donne les valeurs du GWP de divers fluides frigorigènes.

En effet, celui-ci ne représente que l'effet direct sur l'effet de serre lié à la consommation énergétique. Pour quantifier l'impact total sur l'effet de serre, un indicateur a été introduit. Il s'agit du Total Equivalent Warning Impact (TEWI). (Wu X.et al,2013).

exprimé par la relation suivante

$$TEWI = GWP_{100}\left[M(1-x) + M \cdot f \cdot N\right] + E \cdot A \cdot N \qquad \textbf{(1-1)}$$

Effet direct effet indirect

Où :

GWP_{100} : représente la valeur de GWP_{100} pour le fluide considéré

M : est la masse de fluide frigorigène en kg

x : est la fraction de fluide récupéré en fin de vie de l'équipement

f : est le taux de fuite annuel de l'équipement

N : est le temps d'utilisation en années

E : est la consommation annuelle d'énergie de l'équipement en kWh

A : est la quantité, en kg, de CO_2 émise pour produire 1 kWh de l'énergie utilisé. Le TEWI est donné en kg de CO_2 pour la durée de vie de l'équipement. Le coefficient A dépend de l'énergie utilisée ainsi que du pays. C'est ainsi que pour l'énergie électrique, A=0.015 kg en France mais A ≈ 0.9 en Allemagne. Pour une machine à absorption fonctionnant à gaz naturel, il faut prendre A= 0.184. (Calabrese D; 2012)

A noter que la consommation annuelle d'énergie est directement liée au COP pour une production frigorifique donnée puisque COP = $\frac{Qf}{E}$ où Qf est la production frigorifique annuel du matériel considéré Pour réduire l'effet direct, trois possibilités:

1. utiliser un fluide ayant un GWP faible.
2. réduire la charge en fluide frigorigène.
3. réduire le taux de fuite.

Pour réduire l'effet indirect, il faut améliorer l'efficacité énergétique **(**Clodic D et al, 2002).

Tableau 1. 3: Potentiel d'action sur l'effet de serre de divers frigorigènes (Mota-Babiloni A, 2014).

Fluides Frigorigènes	GWP rapporté au CO_2 sur une période de :		
	20 ans	100 ans	500 ans
R11	5000	4000	1400
R12	7900	8500	4200
R22	4300	1700	520
R113	5000	5000	2300
R114	6900	9300	8300
R115	6200	9300	13000
R13B1	6200	5600	2800
NH_3(717)	0	0	0
CO_2	1	1	1
R123	300	93	29
R124	1500	480	150
R125	4600	2800	900
R134a	3400	1300	420
R141b	1800	630	200
R142b	4200	2000	630
R143a	5000	3800	1400
R152a	460	140	42
R500	5950	6310	3110
R502	5270	5590	6910
R290(propane)	31	11	…

1.4. Conséquences

1.4.1 Changement climatique

Les phénomènes chimiques et photochimiques intervenant dans l'atmosphère sont nombreux, complexes et souvent dépendants les un des autres. Les changements climatique induisent un réchauffement de la troposphère, quand la température en basse atmosphère s'élève (à cause d'une hausse de la concentration des gaz à effet de serre qui "emprisonnent" la chaleur), la température en haute atmosphère baisse, ce qui a pour effet de réduire la régénérescence de l'ozone stratosphérique.

Le refroidissement stratosphérique favorise la formation de nuages stratosphériques polaires, cause principale du développement des trous d'ozone polaires. Ainsi, alors que les rejets des substances qui abîment la couche d'ozone ont considérablement diminué, les records de taille et d'importance des trous dans la couche d'ozone continuent de tomber.

Le dernier record date du printemps austral dernier, plus de 28 millions de Km^2 soit 50 fois la surface de la France qui a amené les gouvernements d'Argentine et du Chili a diffuser largement des messages d'alertes demandant aux populations de ne pas s'exposer au soleil à la mi-journée.

1.4.2. Contribution de L'ozone troposphérique au réchauffement climatique

L'ozone est un gaz à effet de serre naturel qui dans ses proportions naturelles contribue à l'équilibre climatique au même titre que le CO_2 (dans des proportions naturelles). l'ozone troposphérique artificiel contribue à hauteur de 13 % au réchauffement climatique, Ce qui est loin d'être négligeable. Hélas, l'ozone qui diminue au niveau de la stratosphère n'est pas remplacé par celui qui est crée indirectement par nos voitures dans la troposphère (Bolaji B.O et al, 2013)..Donc le réchauffement dû à l'effet de serre et l'amincissement de la couche d'ozone stratosphérique sont le résultat des activités humaines qui ont changé la composition de l'atmosphère depuis la révolution industrielle.

1.5. Réglementations

1.5.1. Organisations

Le problème de la couche d'ozone n'a pas de frontière d'où la nécessité d'une coopération internationale en vue d'instaurer des mesures de protection. Divers organismes travaillent en collaboration afin d'être plus efficace quant aux actions à entreprendre.

PNUE est à l'origine de la plupart des actions menées en faveur de la couche d'ozone et encourage les Etats à préserver l'environnement, par l'information et des aides adaptées. Il a créé le Comité de Coordination de la Couche d'Ozone (CCCO).

PNUD aide les pays à mettre en place les programmes nationaux d'élimination des substances dangereuses pour la couche d'ozone en veillant au transfert de technologie, à la formation technique.

OMS travaille depuis 1998 avec la division Industrie et Environnement du PNUE, sur un programme d'immunisation dans le secteur de la réfrigération. La mission de l'OMS étant de lutter contre les maladies et les épidémies, des vaccins sont souvent indispensables. Pour garantir leur efficacité, ils doivent être transportés et stockés dans des lieux réfrigérés. Or la plupart des équipements de réfrigération contiennent des CFC. Une aide technique et financière s'avérait nécessaire pour les remplacer.

OMM stimule la recherche atmosphérique et l'élaboration de techniques. Un programme appelé Système Mondial d'Observation de l'Ozone (SMOO3) est en place.

FAO encourage l'élimination du bromure de méthyle et l'utilisation de substituts plus respectueux de l'environnement dans le secteur de l'agriculture.

AEE rassemble des informations au niveau européen, évalue les mesures mises en place par les Etats, et tient le public informé des problèmes environnementaux.

OCDE, AIEA et **IPCC** ont ensemble élaboré un programme faisant l'inventaire des gaz présents dans l'atmosphère et tiennent ces informations à disposition des différentes conférences des parties.

ONG jouent aussi un rôle essentiel dans la mobilisation du soutien du public, aide à la mise au point et à la diffusion de l'information (WWF, Greenpeace, Ozone Action…).

EPA et son département pour la protection de la stratosphère, est responsable de plusieurs programmes en conformité avec la loi *Clean Air Act (titre VI),* en vigueur depuis 1963 et contrôlant les émissions de 189 polluants.

Mentionnons aussi le rôle de certains pays (quelques uns à forte tradition écologique) qui, en coopération avec le PNUE, n'hésitent pas à mettre en place des fonds afin d'aider financièrement et techniquement les pays en développement et les pays d'Europe centrale et orientale (PECO). La Suède agit en faveur de l'Asie du Sud-est et du Pacifique depuis 1991.

1.5.2. Actes juridiques

Les inquiétudes des scientifiques relatives aux effets des chlorofluorocarbures sur l'environnement ont conduit les pouvoirs publics de nombreux pays à prendre des mesures restrictives concernant les fluides frigorigènes polluants, l'adoption de la convention de Vienne pour la protection de la couche d'ozone, En 1985, qui a été suivie par l'adoption du protocole de Montréal relatif à des substances qui appauvrissement la couche d'ozone, En 1987 a été le point de départ de la coopération mondiale visant à protéger la couche d'ozone stratosphérique.

Les cinq réunions tenues par les parties la convection de Vienne, En 1989, 1991, 1993, 1996 et 1999, ainsi que les onze réunions des parties au protocole de Montréal, qui ont eu lieu chaque année de 1989 à 1999, ont abouti à d'importantes décisions visant à réaliser les objectifs de la convention et du protocole.

A leurs deuxième, quatrième, neuvième et onzième réunions, les parties au protocole de Montréal ont adopté, conformément à la procédure énoncée au paragraphe 4 de l'article 9 de la convention de Vienne, quatre amendements au protocole, à savoir l'amendement de Londres (1990), L'amendement de Copenhague (1992), l'amendement de Montréal (1997) et l'amendement de Beijing (1999); En plus le protocole de Kyoto qui adopté en 1997 et entré en vigueur le 16 Février 2005.

1.5.2.1. Convention cadre de Vienne (1985)

C'est le premier accord mondial destiné à protéger l'atmosphère, singé par 21 pays et la communauté européenne en Mars 1985, Cette convention demande aux parties de s'engager à protéger la santé des hommes et l'environnement les effets de l'appauvrissement de l'ozone, On cite quelque article:

Article 1:

1. Par "couche d'ozone"entend la couche d'ozone atmosphérique présente au –dessus de la couche limite de la planète

2. Par "effets néfastes " on entend les modifications apportées à l'environnement physique y compris les changements climatiques, qui exercent des effets nocifs significatifs sur la santé humaine ou sur la composition, la résistance et la productivité des écosystèmes naturels ou aménagés, ou sur les matériaux utiles à l'humanité.

3. Par technologie ou matériel de remplacement" on entend une technologie ou un matériel dont l'utilisation permet de déduire ou d'exclure pratiquement les émissions de substances ayant ou susceptibles d'avoir des effets néfastes sur la couche d'ozone.

4. Par substances de remplacement on entend des substances qui réduisent, éliminent ou évitent les effets néfastes sur la couche d'ozone.

5. Par parties on entend les parties à la présente convention, à moins que le texte n'impose une autre interprétation.

6. Par "organisation régionale d'intégration économique" on entend une organisation constituée par des états souverains d'une région donnée qui a compétence dans des domaines régis par la convention ou ses protocoles et a été dûment autorisée, selon ses procédures internes, à signer, à ratifier, à accepter, à approuver la convention ou ses protocoles ou à y adhérer.

1.5.2.2. Protocole de Montréal (1987)

Ce protocole élaboré sous la direction du programme des Nation Unies Pour l'environnement (PNUE) en Octobre 1987, est entré en vigueur le premier Janvier 1989. Il compte plus 80 parties, dont prés de 40 pays en développement, a pour objectif premier de diminuer à 50%, puis éliminer complètement la consommation des produits règlementés qui détruisent la couche d'ozone, à l'origine cinq CFC et trois halons. Voici quelques articles touchants les des pays en voie de développement:

Article 5: Situation particulière des pays en voie développement.

1-Tout partie qui est un pays en développement et dont le niveau calculé annuel de consommation des substances réglementées, est inférieure à 0,3 kg par habitant à la date d'entrée en vigueur du protocole à son égard ou à tout moment par la suite jusqu'au 1er Janvier 1999 est autorisée, pour satisfaire ses besoins intérieures fondamentaux, à surseoir pendent dix ans à l'observation mesures de réglementation indiquées aux articles 2A à 2E.

2-Lorsqu'elle applique une mesure de réglementation énoncée 2A à 2E, tout partie visée au paragraphe I du présent article est autorisée à utiliser:

a) S'il s'agit de substances réglementées, soit la moyenne de son niveau calculé de consommation annuelle pour la période allant de 1995 à 1997 inclus, soit le niveau calculé de consommation de 0,3 kg par habitant, le chiffre le plus bas étant retenu, pour déterminer si elle observe les mesures de réglementation.

b) S'il s'agit de substances réglementées, soit la moyenne de son niveau calculé de consommation annuelle pour la période allant de 1998 à 2000 inclus, soit le niveau de calculé de consommation de 0.2kg par habitant, le chiffre le plus bas étant retenus, pour déterminer si elle observe les mesures de réglementation.

Article 10 Mécanisme de financement.

1-Les parties établissent un mécanisme de financement pour assurer aux parties visées au paragraphe 1 de l'article 5 du présent protocole une coopération financière et technique, notamment pour le transfert de techniques, afin de leur permettre de respecter les mesures de réglementation prévues aux articles 2A à 2 E du protocole.

Ce mécanisme de financement, qui sera alimenté par des contributions qui viendront s'ajouter aux autres apports financiers dont bénéficieront ces parties et couvrira tous les surcoûts convenus pour les dites parties afin qu'elles puissent observer les mesures de réglementations prévues par le protocole. Une liste indicative des catégories de surcoût sera arrêtée par la réunion des parties.

2-le mécanisme crée en vertu du paragraphe1 du présent article comprend un fonds multilatéral. Il peut aussi comprendre d'autres moyens de financement multilatéral, régional et de coopération bilatérale.

3-Le fonds multilatéral

a)- Couvre, gracieusement ou au moyen de prêts à des conditions de faveur, selon le cas en fonction de critères qui seront fixés par les parties, les surcoûts convenus;

b)- Finances le centre d'échange et, à ce titre:

i) Aide les parties visées au paragraphe 1 de l'article 5 à définir leurs besoins en matière de coopération, grâce à des études portant sur les pays et d'autres formes de coopération, technique;

ii) Facilite la coopération technique pour satisfaire les besoins identifiés;

iii) Diffuse, en application de l'article 9, des informations et de la documentation pertinente, organise des ateliers, stages de formation et autres activités apparentées à l'intention des parties qui sont des pays en développement;

iv) Facilite et suit les autres éléments de coopération bilatérale, régionale et multilatérale à la disposition des parties qui sont des pays en développement.

c) Finance les services de secrétariat du fonds multilatéral et les dépenses d'appui connexes.

4. Le fonds multilatéral est placé sous l'autorité des parties qui en déterminent la politique générale.

Article 10A: transfert de technologie

Chaque partie prend toutes les mesures possibles, compatibles avec les programmes financés par le mécanisme de financement, pour que :

a) Les meilleurs produits de remplacement et techniques connexes sans danger pour l'environnement soient transférés au plus vite aux parties visées au paragraphe 1 de l'article 5;

b) Les transferts mentionnés à l'alinéa a), soient effectués dans les conditions équitables et plus favorables

1.5.2.3. Amendement de Londres (1990)

En Juin 1990, les parties du protocole se sont réunies à Londres pour étudier les implications de nouvelles preuves scientifiques mettant en lumière une dégradation de la couche d'ozone encore plus rapide qui prévue. Les participants à la réunion de Londres se sont engagés à arrêter la consommation et production des CFC et halons d'ici l'an 2000 et à réglementer l'utilisation de certains autres produits chimiques. Les amendements de Londres ont réglementé dix autres CFC, le tétrachlorure de carbone et le méthyle chloroforme et fixé des échéances pour l'élimination des produits réglementés. Les HCFC (et leurs isomères) ont été classés comme produit de transition

Les amendements de Londres ont reconnu la nécessité d'une aide financière et technique pour les pays en voie de développement et ont crée le Fonds multilatéral provisoire dont l'objectif est de fournir cette aide. Responsable de certains aspects précis de la gestion de ce fonds, le PNUE a établi le programme action ozone dans le cadre du centre d'Activité de programme Industrie et environnement, qui assurera un échange de renseignements et une formation et servira de centre d'information

1.5.2.4. Amendements de Copenhague (1992)

D'autres révisions signées à Copenhague en Novembre 1992 ont adopté des réglementations supplémentaires, donc les décisions de cet amendement qui sont les suivants :

- Accélération de l'arrêt de la production de CFC dés 1996 et cette des halons dés 1994.
- Arrêt par paliers de la production de HCFC selon un calendrier précis.
- Délai de grâce pour les pays en voie de développement (10 ans supplémentaire).

Pour ce qui est des HCFC, il est prévu de diminuer régulièrement la production jusqu'au 1ere Janvier 2030 qui marque l'arrêt définitif de la fabrication. Il est en outre stipulé que l'emploi des HCFC doit être limité aux utilisations pour lesquelles il n'existe aucun autre produit ou technique mieux adapté pour l'environnement.

En fin, lorsqu'on choisira un HCFC, on s'efforcera d'utiliser ceux d'entre eux dont l'impact sur l'environnement est le plus faible

1.5.2.5. Amendements de Montréal (1997)

L'amendement de Montréal adopté 1997 au cours de la neuvième réunion des parties, ajoute au dispositif trois dispositions principales relatives au bromure de méthyle, au dispositif de sanction et au contrôle des mouvements de substances réglementées.

- l'interdiction des importations et exportations d'un pesticide, bromure de méthyle, en provenance et destination de tout Etat non partie au protocole de Montréal;
- l'interdiction des exportations (sauf pour destruction) de substance réglementées, utilisées, recyclées et régénérées par des parties continuant à produire ces substances en ne se respectant pas les mesures de contrôle prévues par le protocole;
- Un système d'autorisation des importations et des exportations des substances réglementées, qu'elles soient vierges, utilisées, recyclées ou régénérée. Comme c'est le cas de chaque réunion des parties au protocole de Montréal, des ajustements sont adoptés qui lient les parties sauf ce qu'elles se retirent du protocole, seuls les amendements sont soumis à une ratification nécessaire à la poursuite du processus.

1.5.2.6. Protocole de Kyoto (1997)

Adopté en 1997, le protocole de Kyoto est entré en vigueur le 16 Février 2005, il aura donc fallu attendre huit ans après l'adoption du texte et 13 ans après la signature de la convention internationale sur le changement climatique lors du sommet de la terre à Rio de Janeiro (1992) pour que 55 pays signataires de cette convention finissent par ratifier le fameux protocole. L'endossement surpris de celui-ci par la Russie, fin 2004, est à l'origine de ce dénouement. Signalons que le gouvernement canadien et l'Assemblée nationale du Québec (une première en matière de traités internationaux) avaient ratifié ce protocole 2002.

Les mécanismes du protocole de Kyoto; Fixant à 5,2% la réduction moyenne des émissions de gaz à effet de serre sur la période 2008- 2012, prévoit trois mécanismes de portée internationale pour atteindre cet objectif :

la délivrance de permis d'émission disposition autorisant la vente ou l'achat de droits à émettre entre pays industrialisés,

- la mise en œuvre conjointe qui permet à un pays développé d'investir dans la réduction des émissions de gaz à l'effet de serre dans un autre pays développé et de bénéficier en retour de crédits d'émission,

le mécanisme de développement propre proche du dispositif précédent à la différence que les investissements sont effectuées par un pays développé dans un pays en développement.

Ces mécanismes dits flexibilité sont complémentaires des mesures que chaque état signataire à l'obligation de mettre en œuvre au plan national or c'est a ce niveau que les pays rencontrent aujourd'hui le plus de difficultés les outils traditionnels des états pour encadrer des restrictions au sein de leur société semblant en effet pour plusieurs, inadéquats ou disproportionnés par rapport à la nature ou à l'ampleur de la tâche.

1.5.2.7. Amendements de Pékin (1999)

Adopté le 3 Décembre 1999 par la onzième réunion des parties, cet amendements concerne essentiellement trois types de substances: Les HCFC, le bromochlorométhane et le bromure de méthyle

Les HCFC constituaient la seule substance appauvrissant la couche d'ozone figurent dans protocole de Montréal dont la production échappait encore toute réglementation et dont le commerce avec les non parties était autorisé.

Une stabilisation de la production est imposée aux pays développés sur la base de niveau 1989, une production limite pour satisfaire les besoins intérieurs fondamentaux des pays en développement est autorisée, une stabilisation tant prévue en 2016 sur la base du niveau de 2015. Les importations et les exportations vers les Etats non parties sont interdites

Au niveau européen il existe un règlement, de la commission de la communauté européenne qui précise:

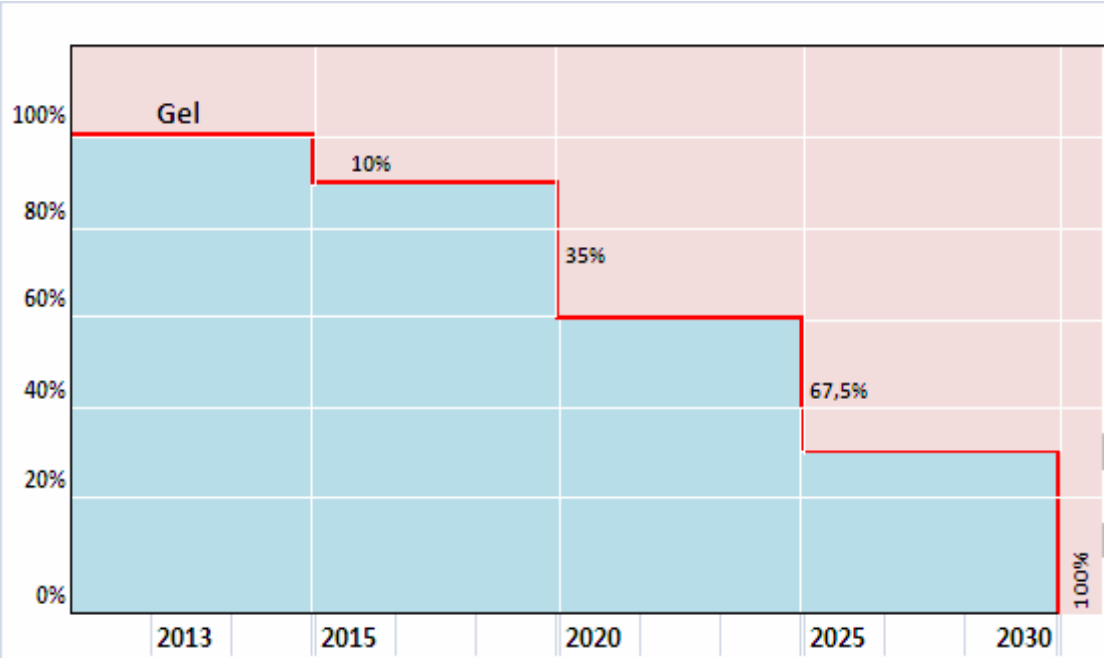
- toute opération de dégazage dans l'atmosphère est interdite (sauf nécessité pour la sécurité des hommes ou la sûreté du fonctionnement des équipements), le décret ne s'applique pas cependant aux appareils de froid domestique ni aux appareils et installations individuelles de climatisation y compris les pompes à chaleur, lorsque la charge en fluide frigorigène est inférieure ou égale à 2 kg.

- lorsqu'il est nécessaire, lors de leur installation ou à l'occasion de leur entretien, de leur réparation ou de leur mise au rebut, de vidanger les appareils mentionnés ci-dessus. La récupération des fluides qu'ils contiennent est obligatoire et doit être en autre intégrale. Les fluides qui peuvent être ni réintroduits dans les mêmes appareils après avoir été, ni réutiliser sont détruits**.**

1.6. Calendrier d'élimination graduelle des CFC et HCFC

Tableau 1. 4: Calendrier d'interdiction d'utilisation des CFC

Echéance	Dispositions
01/10/2000	- Récupération et destruction obligatoire des CFC contenus dans : tout équipement de réfrigération, climatisation et pompes à chaleur (sauf réfrigérateurs et congélateurs ménagers), -- Interdiction d'exportation de CFC, à l'exception de CFC vierges produits pour les besoins intérieurs fondamentaux des pays en développement. - Interdiction d'importation et de mise sur le marché des équipements contenant des HCFC et dont la production est interdite dans l'Union européenne. Exportation possible de ces équipements jusqu'au 01/01/2010. - Interdiction d'utilisation des HCFC dans les équipements suivants fabriqués après le 01/01/2000 :. - Récupération obligatoire des HCFC contenus dans tous les équipements de réfrigération et conditionnement d'air.
01/01/2001	- Interdiction d'utilisation de CFC aux fins de maintenance et d'entretien des équipements de réfrigération et conditionnement d'air - Interdiction d'utilisation de HCFC pour la production de tout équipement neuf de froid ou de conditionnement d'air, sauf : * les systèmes fixes de conditionnement d'air ayant une capacité de refroidissement < 100 kW ; * les systèmes réversibles conditionnement d'air / pompe à chaleur.
1/07/2002	- Récupération et destruction obligatoire des CFC contenus dans les réfrigérateurs et congélateurs ménagers. - Interdiction d'utilisation des HCFC pour la production de tous les systèmes fixes de conditionnement d'air.
01/01/2004	- Interdiction d'utilisation de HCFC pour la production de tout équipement de froid ou de conditionnement d'air.
01/01/2009	- *Fin de l'exception pour applications militaires visée ci-dessus.
01/01/2010	- Interdiction d'utilisation de HCFC vierges pour la maintenance et l'entretien de tout équipement.
01/01/2015	- Interdiction d'utilisation de HCFC pour la maintenance et l'entretien



- Plafond de consommation établi au niveau de référence de la moyenne de Consommation en 2009 et 2010

- Gel consommation le1er janvier 2013

- Réduction de la consommation à 10 % du plafond en 2015, à 35 % en 2020, 67.5% en 2025

- Elimination totale le **1er janvier 2030**., Flexibilité 2.5% à 2040

Tableau 1. 5: Calendrier concernant la production et la mise sur le marché de CFC et HCFC

Echéancier	Disposition	
	Production	**Mise sur le marché**
01/10/ 2000	- Interdiction de production et d'importation de CFC (sauf dérogations).	- Interdiction de mise sur le marché et de CFC sauf utilisation aux fins de maintenance et d'entretien des équipements de réfrigération et de conditionnement d'air. (+ dérogation possible défense nationale jusqu'au 01/01/2009).
1/1/2001		Réduction sur la base de 1989 (2 % CFC + HCFC).
1/1/2002		Réduction de 15 %

1/1/2003		Réduction de 55 %
1/1/2004		Réduction de 70 %
1/1/2008	Baisse de 65%	Réduction de 75 %
1/1/2010		Interdiction mise sur le marché de HCFC vierge.
1/1/2014	Baisse de 80%	
1/1/2020	Baisse de 85%	
1/1/2026	Arrêt de la production de HCFC	

1.7. Application de la réglementation cas des pays en développement

1.7.1. Calendrier cas des pays en développement

D'après le protocole de Montréal la prise en compte des pays en développement. Certaines dérogations sont prévues, notamment à l'égard des pays du tiers monde même adhérents, qui ont obtenu un délai de grâce de 10 ans. (l augmentation des substances incriminées est même admise : plus de 10% pour les CFC et halons), si ce délai est indispensable pour répondre à leurs besoins intérieurs fondamentaux (l'hygiène alimentaire rend par exemple nécessaire l'utilisation de réfrigérateurs).

Conférence de Londres 1990 : en vigueur le 10 Août 1992 : mesures renforcées en faveur des pays en développement .Les pays industrialisés devront accorder des aides techniques et financières à fin de permettre aux pats en développement d'utiliser les technologies les plus récentes (coûts induits par le passage aux produits de substitution) et appliquer ainsi à terme la réglementation. Donc les mesures du protocole de Montréal ont été plus souples à l'égard des pays en développement. Les parties ont, d'une part, tenu compte de la nécessité pour ces pays de poursuivre le développement lié dans une certaines mesure à la consommation de produits ozonocides.

D'autre part, un calendrier d'élimination ne pouvait être envisagé qu'avec le soutien financier et technique des pays industrialisés, c'est pourquoi, le fonds multilatéral à été mis en place en 1993 à fin d'aider les pays en développement à se conformer aux mesures du protocole et en assurer ainsi le plein succès.

Les pays en développement sont tenus de se conformer aux dispositions de la convention de vienne depuis 1995 et celle du protocole de Montréal depuis le 1 juillet 1999.

Tableau 1. 6: Calendrier d'élimination graduelle des CFC et HCFC

Cas des pays en développement

Echéancier	Dispositions
01/07/1999	Gel de la production des CFC
01/01/2002	Gel de la production de halons Gel de la production du bromure de méthyle
01/01/2003	Réduction de la consommation de certains CFC de 20% par rapport au niveau atteint en 1998-2000
01/01/2005	Réduction des CFC et des halons de 50% du niveau moyen atteint entre 1995-1997 Réduction de 85% du tétrachlorure de carbone et de 30% pour le chloroforme par rapport au niveau moyen atteint entre 1998-2000
01/01/2007	- Réduction de 85% pour les CFC ar rapport au niveau atteint entre 1995-1997 et pour les CFC par rapport à 1998-2000
01/01/2010	- Elimination complète de tous les CFC, halons et tétachlorure de carbone
01/01/2015	Elimination complète du chloroforme, arrêt total du bromure de méthyle
01/01/2016	Gel des HCFC par rapport à l'année 2015
01/01/2040	Arrêt total des HCFC

1.7.2. Partenaires clé pour l'Afrique

Les organisations internationales qui ont pour but d'appliquer le protocole de Montréal grâce au fonds multilatéral sont des partenaires essentiels du renforcement de la capacité en Afrique, il s'agit du programme des nations unies pour l'environnement (PNUE), programme des nations unies pour le développement (PNUD),de l'organisation des nations unies pour le développement industriel (ONUDI) et la banque mondiale.

Pour atteindre des objectifs fixés par le protocole , il a fallu instaurer à l'échelle nationale toute une série de lois , politiques et plans ainsi que les institutions permettant de les établir et de les appliquer , les bases solides reposant sur les programmes de pays , les plans de gestion de frigorigènes et les bureaux nationaux, ozone opérationnels dans la région ,sont à présent bien intégrées et actives à l'échelle nationale.

Le programme action ozone du PNUE a aidé 36 des 53 pays d'Afrique a élaborer puis mettre en œuvre leurs stratégies et projets en préparant des programmes de pays.

Action ozone a également joué un rôle essentiel en aidant 34 pays à établir des projets de renforcement institutionnel destinés à surveiller et supprimer l'utilisation de SAO.

La réussite africaine débute avec l'engagement rapide de ceux qui sont joints officiellement de la compagne mondiale de protection de la couche d'ozone

, en signant et en ratifiant le protocole de Montréal et ses amendements.

L'engagement de ce continent à débuté le 16/09/1987 la date de création du protocole de Montréal, à cette date, les premiers pays africains signataires étaient l'Égypte, le Ghana, le Sénégal et le Togo .

L a première ratification d'un pays africain a eu lieu en 1988 avec l'Egypte, en novembre 2000, 46 pays africains sut 53 ont ratifié le protocole de Montréal.

Les pays africains représentaient 45 des 97 pays du monde ayant ratifié l'amendement de Londres de 1999, soit 46% pour l'amendement de Copenhague de 1992 ,les pays africains représentaient 41% du total.

Par ailleurs, environ 70% des pays africains parties au protocole ont pleinement respecté leurs obligations de communication de données entre 1986 et 1998.

1.7. 3. Elimination des Substances Appauvrissant l'Ozone (SAO) cas de l'Algérie

L'élimination des substances qui appauvrissant la couche d'ozone devient une mission obligatoire et urgente pour tous les pays du monde. (Art. R. 521-56,2011)

Aussi l'Algérie, à travers l'action du secrétariat d'état chargé de l'environnement, s'est attelée résolument, durant ces dernières années, à mettre en œuvres une stratégie participative aux plans régional et international sous-tendue par deux objectifs fondamentaux en l'occurrences:

- Une présence effective au sein des instances internationales,
- Une participation active dans l'action internationale de protection de l'environnement.

A ce titre, nous citerons:

a) Pays arabes

Après une longue absence au sein des organes spécialisée de la ligue arabe, l'Algérie a participé le 10 et 11Novembre 1997 au Caire, à la session du conseil des Ministre Arabes de l'environnement.

A cette occasion, notre pays, a annoncé officiellement sa ferme volonté de reprendre sa place au sein du comité exécutif et postuler, à son tour, au siége de représentant des pays de la région du Maghreb.

b) Pays africains

L'Algérie à participer à la consultation africaine, tenue à Nairobi (Kenya) du 19 au 23 Octobre 1998, en prévision de la 4^{éme} conférence des parties de la convention cadre sur les changements climatiques organisée du 02 au 13 Novembre 1998 à Buenos Aires (Argentine), qui abouti à un accord sur une position commune des pays africains.

c) Pays Euro-méditerranéens

L'Algérie a participé à la 1^{ére} conférence des Ministres Euro-méditerranéens chargés de l'environnement, qui s'est tenue à Helsinki, le 28 Novembre 1998.

d) Au plan International

L'Algérie a ratifié la convention de vienne sur la protection de la couche d'ozone ;

1.7. 4.Réglementations Algérienne concernant la suppression des CFC

Décret exécutif n° 2000-73 du 26 Dhou El Hidja 1420 correspondant au 1^{ér} Avril 2000 complétant le décret exécutif n° 93-165 du 10 Juillet 1993 réglementant les émissions atmosphériques de fumées. Gaz, Poussières, Odeur et particules solides des installations fixes.

"Chapitre 1:

Des substances appauvrissement la couche d'ozone, des installations qui en fabriquent et des produits qui en contiennent.

Art.8.1 les dispositions du présent chapitre s'appliquent aux substances appauvrissant la couche d'ozone, à leurs mélanges et aux installations qui en fabriquent et aux produits qui en contiennent

Art.8.2-sont interdites. La production, l'importation et l'exportation des substances ainsi que leurs mélanges, énumérés à l'annexe A du présent décret.

Toutefois, à titre transitoire et pendant les délais prévus par les dispositions du protocole de Montréal susvisé, l'importation de ces substances est subordonnée à l'obtention d'une licence préalable d'importation délivré par le ministre chargé de l'environnement sur la base d'une demande .

Art.8.3.-L'importation et l'exportation des substances usagées ou régénérées énumérées à l'annexe A du présent décret sont interdites.

Art.8.4.- Sous peine des sanctions prévues aux articles 55 et 56 de la loi n°83-03 du 5 Février 1983, susvisée, est interdite l'utilisation des substances énumérées à l'annexe A du présent décret pour la fabrication des produits énumérées à l'annexe B du présent décret au-delà des délais prévus par le protocole de Montréal, susvisé.

Art.8.5.- La construction d'installations destinées à la production des substances énumérées à l'annexe A du présent décret est interdite.

Art.8.6.- La production, l'importation et l'exportation des produits énumérées à l'annexe B du présent décret et fonctionnant à base de substances énumérées à l'annexe A du présent décret sont interdites.

Art.8.7.- Sont interdites l'importation et l'exportation des équipements industriels destinés à la fabrication des substances énumérées à l'annexe A du présent décret et des produits qui en contiennent.

Art.3.- Le présent décret sera publié au journal officiel de la république algérienne démocratique et populaire

1. 7.5. Elimination et remplacement des CFC en Algérie

L'Algérie consomme 6000 tonnes de CFC pour sa consommation annuelle, la plus part des systèmes de réfrigération domestique (réfrigérateurs et congélateurs ménagers ….),

commerciales (conteneurs frigorifiques, fontaines réfrigérantes, pondeuses à glaçon) et climatisation automobile fonctionnant au R_{12}. R_{22} est utilisé pour la climatisation individuelle ou centralisée, les chambres froides et les fabriques de glace en mouleux. Ces deux frigorigènes (R12, R_{22}) sont les plus utilisés.

On trouve cependant du R_{502}, R_{500} pour certaines chambres froides négatives et du NH_3 pour certaines installations industrielles. Le R_{11} rarement utilisé à cause de son prix élevé, n'est pas souvent disponible sur le marché.

Quant aux équipements frigorifiques à absorption, il est essentiellement utilisé dans les réfrigérateurs domestiques (à pétrole ou à gaz) en zones rurales. Leur nombre est cependant très réduit comparativement aux réfrigérateurs à compression mécanique utilisant les frigorigènes halogènes, vu que leurs prix sont environ deux à trois fois plus chère que les réfrigérateurs à compression mécanique et leur maintenance plutôt difficile.

Tableau 1. 7: Liste des unités industrielles Algériennes ayant bénéficié d'un programme de reconversion. (Décret exécutif n° 2000-73)

Projets	Date d'approbation des projets	Technologies de substitutions	Quantités et nature des CFC éliminées tonne Métrique
1-Projet ENIEM Refrigeration domestique	12-1994 Montréal	Cyclopentane pour le CFC-11 HCFC-134A pour le CFC 12	425 (CFC-11, CFC12)
2-Projet ENAPAT Refrigeration Commerciale	07-1998 Montréal	HFC-134a	9.2 (CFC-12)
3-Projet ENAPEM Refrigeration domestique	11-1998 Caire	Chlorure de méthylène	28.0

Les équipements sans CFC dans les pays en développement ont besoin afin de faire fonctionner les services à un niveau international sont très chers, surtout à cause de la diversité des législations en vigueur dans les différents pays. Lors de l'achat d'un nouvel équipement sans CFC, il est plus économique, à long terme, d'acheter l'équipement qui est conforme aux standards du pays exigeant que d'acheter l'équipement le moins cher. Pour des raisons techniques et financières, il pourrait être difficile pour les pays en développement de s'adapter rapidement à la réduction de l'approvisionnement en CFC, au passage aux équipements sans CFC et à une utilisation sûre pour un tel équipement. Comme la production de CFC est réduite, les transports réfrigérés d'occasion, bon marché, à base de CFC, vendus aux pays en développement part les pays développés vont se faire de plus en plus rares.

Les pays en développement qui importent des substituts de CFC vont probablement être les premiers à souffrir des variations en approvisionnement des fluides frigorigènes.

Chapitre 2

Techniques de production du froid

2.1. Introduction

La production de froid est équivalente à une absorption de chaleur, car refroidir un corps ne consiste pas à lui donner une quantité de froid, mais à lui enlever une quantité de chaleur.

La production de froid peut être obtenue par différents moyens fondés sur des techniques de refroidissement bien maîtrisées**.**

L'homme s'est rapidement rendu compte que les denrées périssables pouvaient être mieux conservées en hiver qu'en été, d'où l'idée d'utiliser du froid par le baais de la production de la glace, de manière naturelle sans l'usage de machines. Cette glace était généralement ramenée de régions froides ou à forte gelée en hiver et conservée dans des glacières dont les parois sont thermiquement isolantes. Le fait de constater que le mélange de certains sels avec l'eau abaisse notablement la température, a aussi permis d'entrevoir des possibilités de production de froid.

Toutes ces idées simples et naturelles, accompagnées de l'approfondissement des connaissances en thermodynamique pour la production du froid ont encouragé la mise au point des premières machines frigorifiques.

2.2. Différents procédés de production du froid

Les systèmes de production du froid sont actuellement nombreux et variés mais le principe reste toujours le même, il s'agit d'extraire une quantité de chaleur d'une source dite source utile à un niveau de température à un autre niveau de température inférieure, l'apport d'une énergie est obligatoire. Suivant la nature de cette énergie mise en jeu chaleur et travail, Il existe plusieurs moyens principaux de production du froid. (Rapin J.P, 2003).

2.2.1. Mélanges réfrigérants

La dissolution de certains solides ou liquides dans un solvant absorbe une quantité de chaleur équivalente à sa chaleur latente de fusion. Par exemple le mélange de calcium avec la neige diminue la température de congélation de la solution obtenue de 0°C à -5°C**.**

2.2.2. Détente d'un gaz comprimé

Dans ce cas, le froid est produit par l'abaissement de température d'un gaz soumis à une détente après compression avec ou sans production de travail extérieur.

- Détente avec production du travail extérieur.
- Détente sans production de travail extérieur.

2.2.3. Evaporation d'un liquide pur

C'est le procédé le plus utilisé pour la production du froid, il consiste à utiliser un gaz liquéfié qui s'évapore en absorbant la chaleur de la substance à refroidir.

Cette substance lui cède une certaine quantité de chaleur correspondante à la chaleur latente d'évaporation du liquide.

Le procédé de production du froid le plus fréquemment utilisé et basé sur le principe où le fluide employé n'entre pas en contact direct avec la substance à refroidir et dans lequel le gaz est totalement recyclé.

Ce procédé donne lieu à deux types de machines frigorifiques:

- Machines à compression mécanique.
- Machines à compression thermique.

L'application de ce phénomène donne lieu à quatre types de machines frigorifiques :

- Machines à compression mécanique de vapeur.
- Machines à éjection.
- Machines à adsorption.
- Machines à absorption.

2.3. Cycle de Carnot

Le cycle de Carnot est un cycle théorique constituer de transformations réversible tel que la performance de ce cycle est toujours supérieure à la performance au cycle de réfrigération pratique ou réel, le cycle de Carnot est un cycle idéal il sert d'un cycle standard de comparaison (Rapin J.P, 2014).

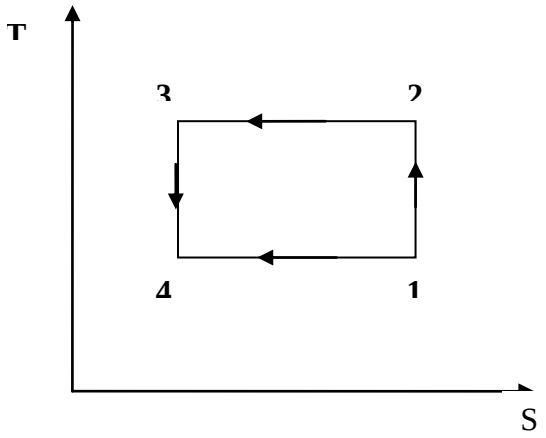


Figure 2. 1: Cycle de Carnot en réfrigération

Les différentes transformations dans le cycle sont:

1-2: Compression isentropique (S= Cte).

2-3: Refroidissement isotherme (T= Cte).

3-4: Expansion (détente) isentropique.

4-1: Echauffement isotherme.

Le cœfficient de performance (cop) de cycle de Carnot est:

$$\text{Cop} = \frac{\text{refrigération utile}}{\text{travail net}}$$

2.4. Différents types d'installations frigorifiques

2.4.1. Installation frigorifique à compression mécanique simple

2.4.1.1. Description d'une Installation frigorifique à compression mécanique simple

Il s'agit du cycle fondamental d'une installation frigorifique à un étage de compression d'un fluide frigorigène pur, l'extraction, le transfert et le rejet de la chaleur (énergie) se font grâce a fluide frigorigène enfermé dans une machine frigorifique: c'est en effet le phénomène de la vaporisation d'un liquide, la condensation d'une vapeur, que s'appuient les principaux type de machines frigorifiques (Vrinat G, 2009).Le fluide frigorigène effectue le transfert thermique dans les différentes parties dans le système frigorifique. La machine frigorifique à un étage de

compression comprend des éléments suivants: Evaporateur, compresseur, condenseur, détendeur. **(** Duminil M ,2012).

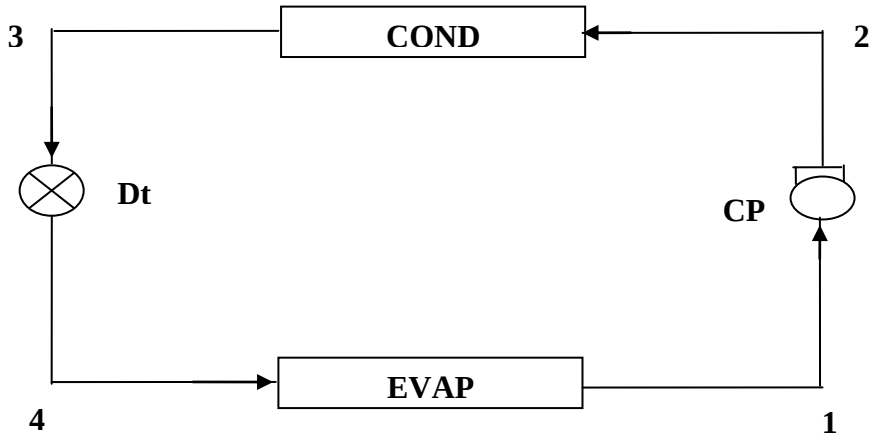


Figure 2. 2: Schéma d'une installation frigorifique à compression mécanique simple

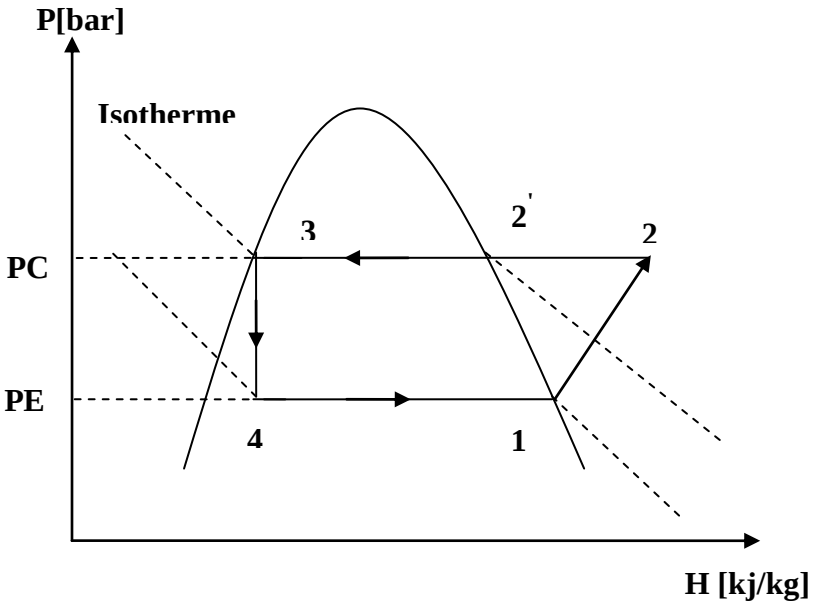


Figure 2. 3: Cycle frigorifique à compression mécanique simple

1-2: Compression isentropique.

2-2': Désurchauffe isobare.

2'-3: condensation isobare et isotherme.

3-4:Détente isenthalpique.

4-1: Evaporation isobare et isotherme.

2.4.1.2. Principaux éléments d'une installation frigorifique à compression mécanique

Le compresseur

Il y a deux familles distinctes de compresseurs, les compresseurs volumétriques et les compresseurs dynamiques chacune de ces catégories comprenant elle même plusieurs types

A - volumétrique:

- Alternatifs
- Rotatifs
- Spiraloides

B - Dynamiques:

- rotatifs (turbocompresseurs)
- à éjecteur:

Rôle du compresseur

Le compresseur est l'organe mécanique le plus important de l'installation, son rôle est d'aspirer les vapeurs du fluide frigorigène produits dans l'évaporateur a la pression d'évaporation et de les refouler a une pression au condenseur afin de permettre leur condensation **(**Rapin JP, 2014).

2. le condenseur

Il existe différents types de condenseur :

- Les condenseurs refroidis directement par circulation naturelle ou forcée d'air.
- Les condenseurs refroidis directement ou indirectement par circulation d'eau.
- Les condenseurs refroidis directement par circulation d'air et pulvérisation d'eau.

Rôle du condenseur

Le condenseur a pour rôle est de condenser les vapeurs venant du compresseur à la haute pression, et d'évacuer à l'extérieur la chaleur absorbée par l'évaporateur et l'équivalent calorifique du travail de compresseur.

L'évaporateur

Il existe différentes possibilités de classification des évaporateurs dont les trois principales sont les suivantes:

- D'après le milieu à refroidir
  - fluide liquide (eau).
  - fluide gazeux (air).
  - cas particulier (exemple: production de glace).
- D'après le mode de fonctionnement à savoir
  - évaporateurs à détente sèche.
  - évaporateurs en régime noyé.
- D'après le type d'appareil à savoir
  - évaporateurs multitubulaires.
  - évaporateurs type serpentin.
  - évaporateurs à double tube.

Rôle de l'évaporateur

L'évaporateur est la source de production du froid, but finale et principale de l'installation frigorifique, les évaporateurs sont des échangeurs thermiques, au même titre que les condenseurs. Il assure le passage calorifique du milieu à refroidir au fluide frigorigène, à flux calorifique ayant pour effet de vaporiser le fluide frigorigène liquide qui est contenu à l'intérieur des tubes. **(**Maake W et al,1993).

L'organe de détente

Pour des évaporateurs fonctionnant en détente sèche; il y a trois types d'organes de détente:

- Tubes capillaires.
- Détendeurs automatique presso statiques.
- Détendeurs thermostatiques.

Rôle du détenteur

Son rôle est de régler la quantité du fluide frigorigène liquide injecté dans l'évaporateur en fonction de la surchauffe des vapeurs de fluide frigorigène à la sortie de l'évaporateur. La

quantité du fluide frigorigène injectée doit exactement correspondre aux besoins de l'installation de façon à ce que le liquide injecté puisse se vaporiser totalement avant d'atteindre la sortie de l'évaporateur, le dernier tronçon de l'évaporateur servant à la surchauffe des vapeurs, et c'est précisément cette surchauffe qui sert de grandeur de réglage finale pour le détendeur, ce dernier s'ouvrant lorsque la surchauffe augmente et se fermant lorsqu'elle diminue.

2.4.1.2. Principe de fonctionnement d'une IFCMS

Le compresseur aspire les vapeurs saturées du fluide frigorigène, il augmente la pression des vapeur de la pression d'évaporation PE à la pression de condensation PC, le fluide frigorigène sort du compresseur à l'état 2 (vapeur surchauffée) puis entre dans le condenseur ou il y a échange de chaleur entre le fluide frigorigène a haute pression et le fluide de refroidissement (rejet le chaleur), point 3, le fluide frigorigène à l'état liquide saturée toujours à la pression de condensation, après le fluide frigorigène entre dans le détendeur ou il y'a diminution de la pression jusqu'à la basse pression d'évaporation PE pour sorti à l'état 4 liquide avec un titre de vapeur faible. La transformation 4 -1 se fait dans l'évaporateur ou il y'a vaporisation du fluide frigorigène par absorption de chaleur du milieu à refroidir (c'est au niveau de l'évaporateur ou il y a de production de froid).

On distingue deux types d'une installation frigorifique à compression mécanique simple qui est la plus utilisée pour la production du froid:

2.4.1.3. Calcul Thermodynamique d'une IFCMS :

Données :

ϕ_o : la puissance frigorifique (KW).

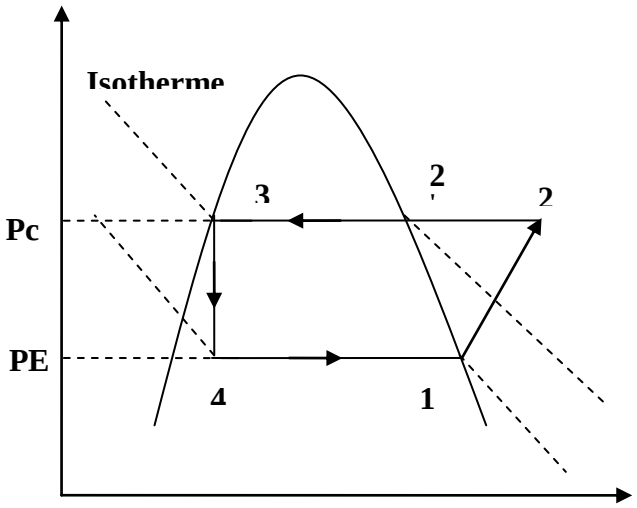
Te : température d'évaporateur (K).

Tc : température de condensateur (K).

Paramètres à calculer:

$T_e \longrightarrow P_e$

$T_C \longrightarrow P_C$



Taux de compression

$$\tau = \frac{P_C}{P_E}$$

Le travail massique (w_m)

$$w_m = h_2 - h_1 \qquad (k_j/k_g) \qquad \text{(I.1)}$$

Capacité de réfrigération massique (q_{0m})

$$q_{0m} = h_1 - h_4 \ (k_j/k_g) \qquad \text{(I.2)}$$

Le débit massique (Q_m)

$$Q_m = \frac{\phi_0}{q_{0m}} \qquad (k_g/s) \qquad \text{(I.3)}$$

ϕ :la puissance frigorifique (k_W)

La puissance thermique conservée par le compresseur (p_t)

$$p_t = Q_m . w_m = Q_m . (h_2 - h_1) \qquad (k_W) \qquad \text{(I.4)}$$

La puissance calorifique du condenseur (ϕ_c)

$$\phi_c = Q_m . (h_2 - h_3) \qquad (k_W) \qquad \text{(I.5)}$$

Le coefficient de performance (Cop)

$$\text{Cop} = \frac{q_{0m}}{w_m} \qquad \text{(1.6)}$$

A- **Installation frigorifique à compression mécanique simple avec Échangeur de chaleur**

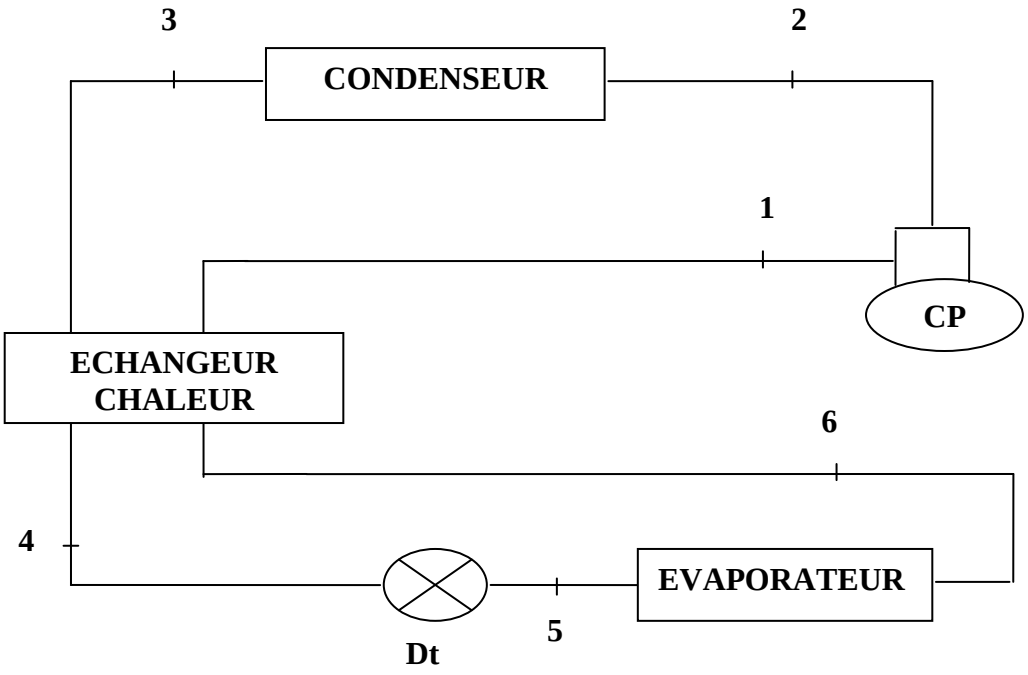


Figure 2. 4: Schéma d'une installation frigorifique à compression mécanique simple avec échangeur de chaleur

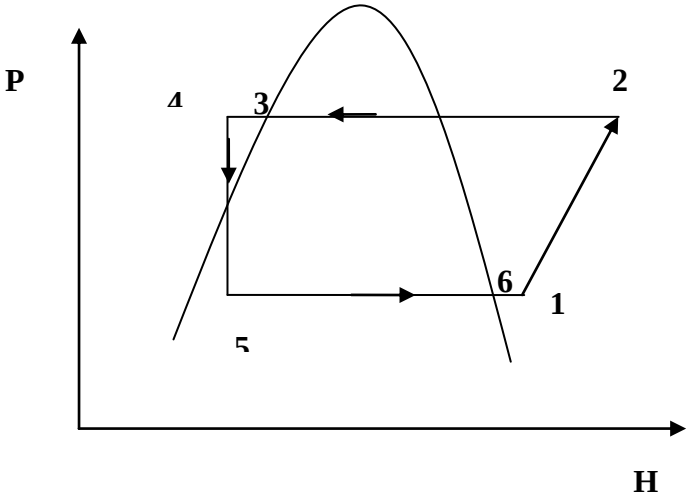


Figure 2. 5: Cycle d'une installation frigorifique à compression mécanique simple avec échangeur de chaleur

1-2: Compression isentropique.

2-3: Désurchauffe et condensation.

3-4: Sous refroidissement.

4-5: Détente.

5-6: Evaporation.

6-1: Surchauffé.

L'utilisation de l'échangeur de chaleur dans l'installation frigorifique à compression mécanique simple est très justifié si on veut protéger le compresseur pour qu'il n'aspire pas le fluide frigorigène liquide si non le coup de liquide pourra détériorer rapidement le compresseur, une deuxième raison pour éviter que la vapeur du fluide frigorigène n'arrive au détendeur , on doit refroidir le liquide.

B- Installation frigorifique à compression mécanique simple avec séparateur de liquide

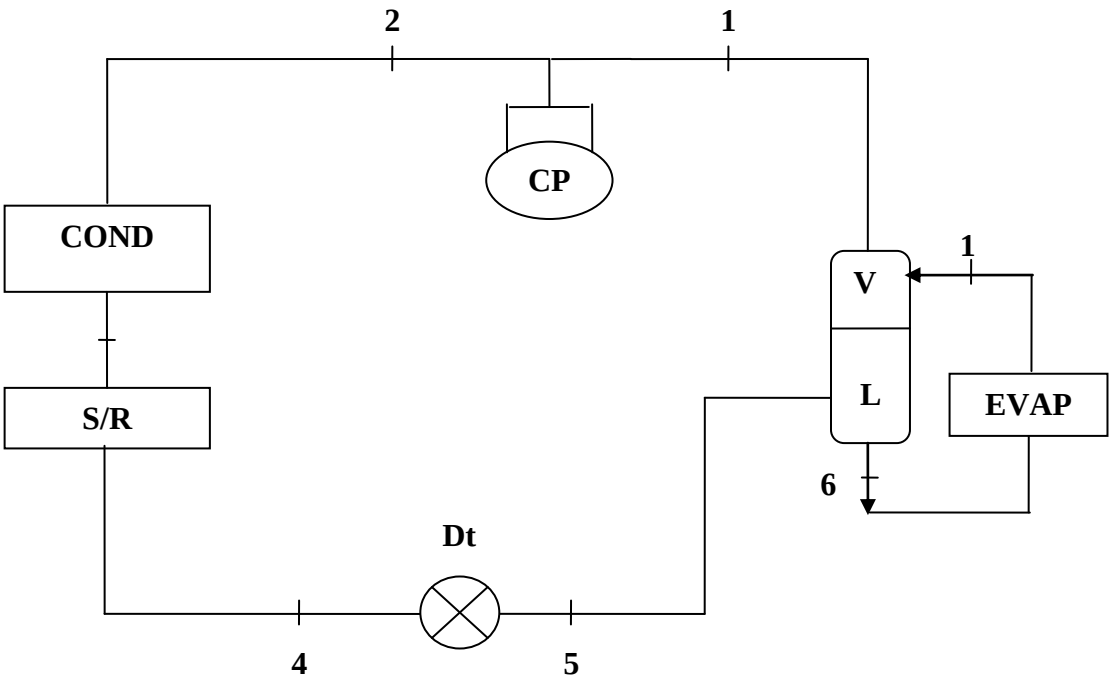


Figure 2. 6: Schéma d'une installation frigorifique à compression mécanique simple avec séparateur de liquide et sous refroidisseur (S/R).

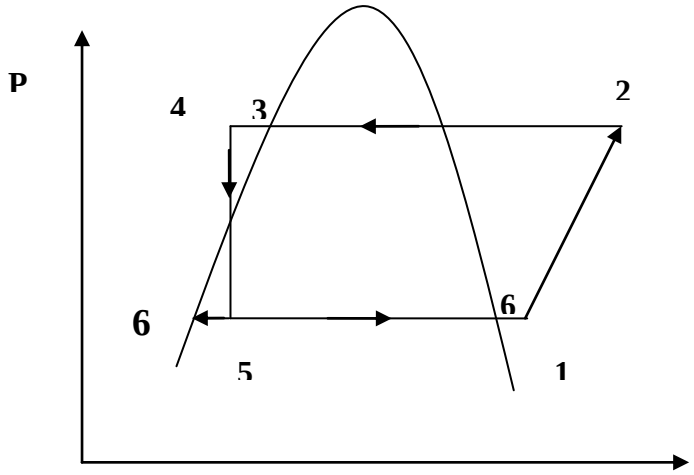


Figure 2. 7: Cycle d'une installation frigorifique à compression mécanique simple avec séparateur de liquide et sous refroidisseur (S/R).

1-2: Compression isentropique.

2-3: Condensation isobare.

3-4: Sous refroidissement.

4-5: Détente isenthalpique.

5-6: Séparation de liquide.

6-1: Evaporation.

2.4.2. Installation frigorifique à compression mécanique bi-étagée

Pour obtenir efficacement des températures d'évaporation plus basse, l'emploi des installations à compression mécanique biétagée à injection totale ou injection partielle.

2.4.2.1. Installation frigorifique a compression mécanique biétagée à injection Totale

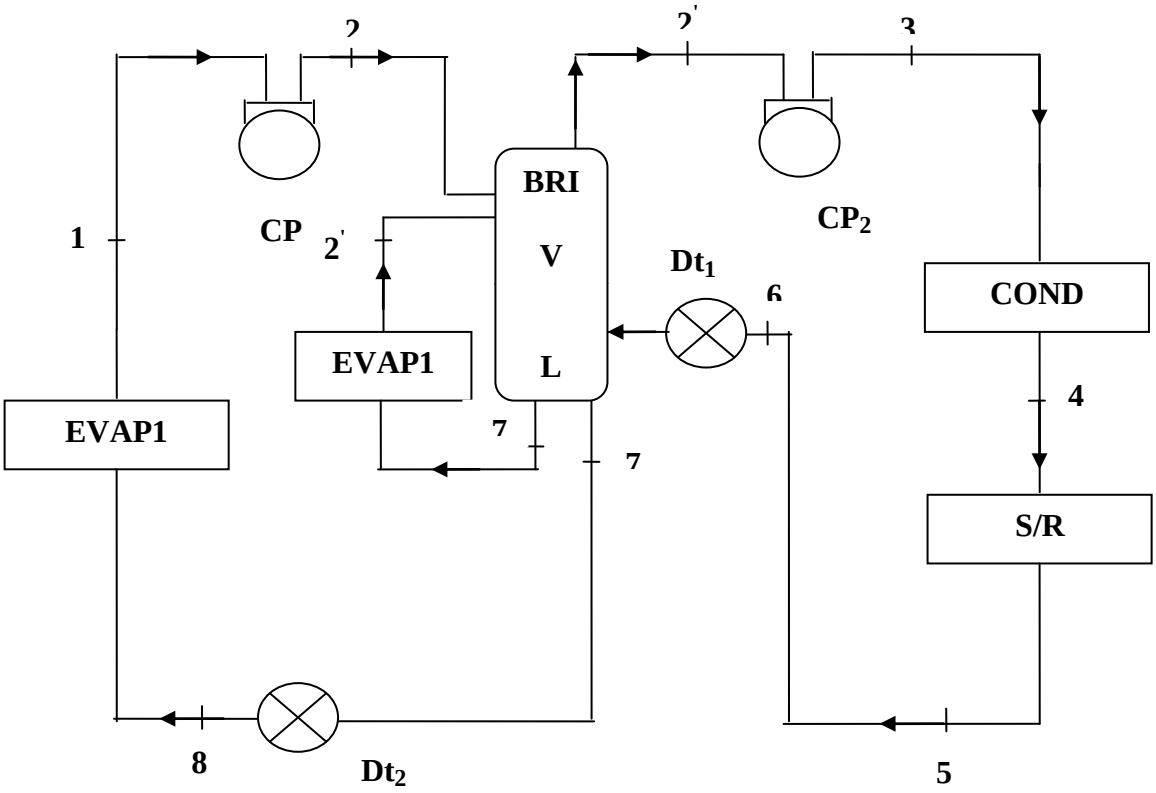


Figure 2. 8: Schéma d'une installation frigorifique à compression mécanique bi-étagée à injection totale avec sous refroidisseur.

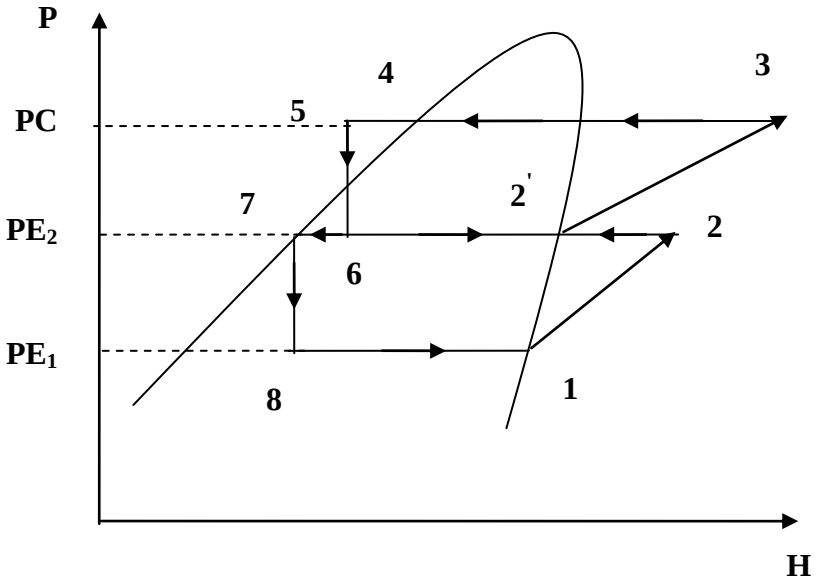


Figure 2. 9: Cycle d'une installation frigorifique à compression mécanique bi étagée avec sous refroidisseur à injection totale.

2.4.2.2. Principe de fonctionnement d'une installation frigorifique à compression mécanique bi-étagée à injection totale avec sous refroidisseur

Dans cette installation tout le fluide frigorigène liquide est comprimé de l'état (1-2), pression d'évaporateur 1 (PE_1) jusqu'à la pression d'évaporateur 2 (PE_2) dans le compresseur 1, puis désurchauffé jusqu'à l'état 2' dans la bouteille de refroidissement Intermédiaire (BRI), avant être admis le compresseur 2 pour être comprimer à l'état 3 correspondant la pression de condensation (PC), en suite il est condensé à l'état 4 puis sous refroidissement toujours à la même pression (PC) à l'état 5, puis détendu en totalité à l'état 6, et injecté dans la (BRI), la vapeur formé se mélange à la vapeur de (CP_1) passe à la (CP_2), le fluide frigorigène liquide à l'état 7 ou une partie du débit massique de fluide frigorigène est acheminée vers l'évaporateur (PE_2) l'autre partie de fluide frigorigène à l'état 7 envoie vers le détendeur (Dt_2) pour alimenté l'évaporateur (PE_1) a basse pression par injection directe, la vapeur produite retour ensuite à la compresseur (CP_1) à l'état 1 (Rappin jp,1988), **(**Duminil M,2012).

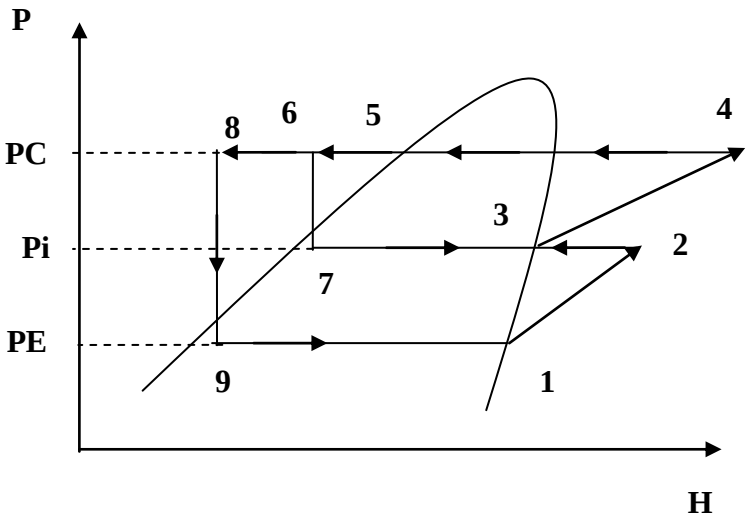


Figure 2. 10: Cycle d'une installation frigorifique à compression mécanique bi-étagée à injection partielle avec sous refroidisseur

2.4.2.3. Principe de fonctionnement d'une installation frigorifique à compression mécanique bi-étagée avec sous refroidisseur à injection partielle

III.2.2- Installation frigorifique à compression mécanique bi-étagée à injection partielle

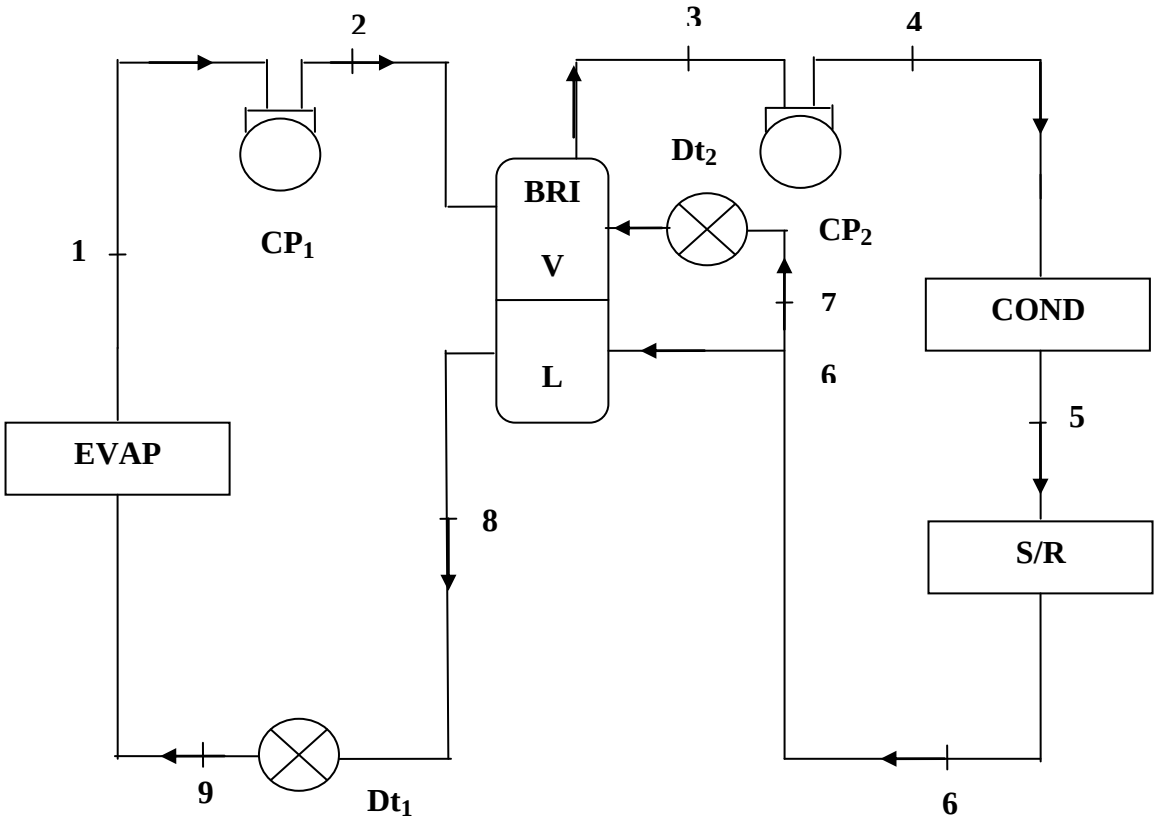


Figure 2. 11 : Schéma d'une installation frigorifique à compression mécanique biétagée à injection partielle avec sous refroidisseur

Le fluide frigorigène vapeur saturée à l'état 1 à la pression d'évaporateur (PE) entré dans le compresseur (CP1) et comprimé jusqu'à la pression intermédiaire (PI), puis désurchauffé jusqu'à l'état 3 dans la bouteille de refroidissement intermédiaire (BRI), cette désurchauffé du fluide frigorigène vapeur est obtenu par injection partielle du fluide frigorigène liquide, et en suite aspiré par le compresseur (CP2) et sort à l'état 4 de vapeur surchauffé à la pression (PC), pour en suite dans le condenseur ou il est désurchauffé pour sorti à l'état 5 liquide saturée et passe à la sous refroidisseur à l'état 6.

Une partie du fluide frigorigène liquide venant sous refroidir par le serpentin qui se trouve au (BRI) jusqu'à l'état 8 et passe en suite dans le détendeur ou il y a chute de pression (PE) à l'état 9, puis introduit dans l'évaporateur ou il y a une production de vapeur l'état 1.

2.4.3 .Installation frigorifique à compression mécanique à cascades

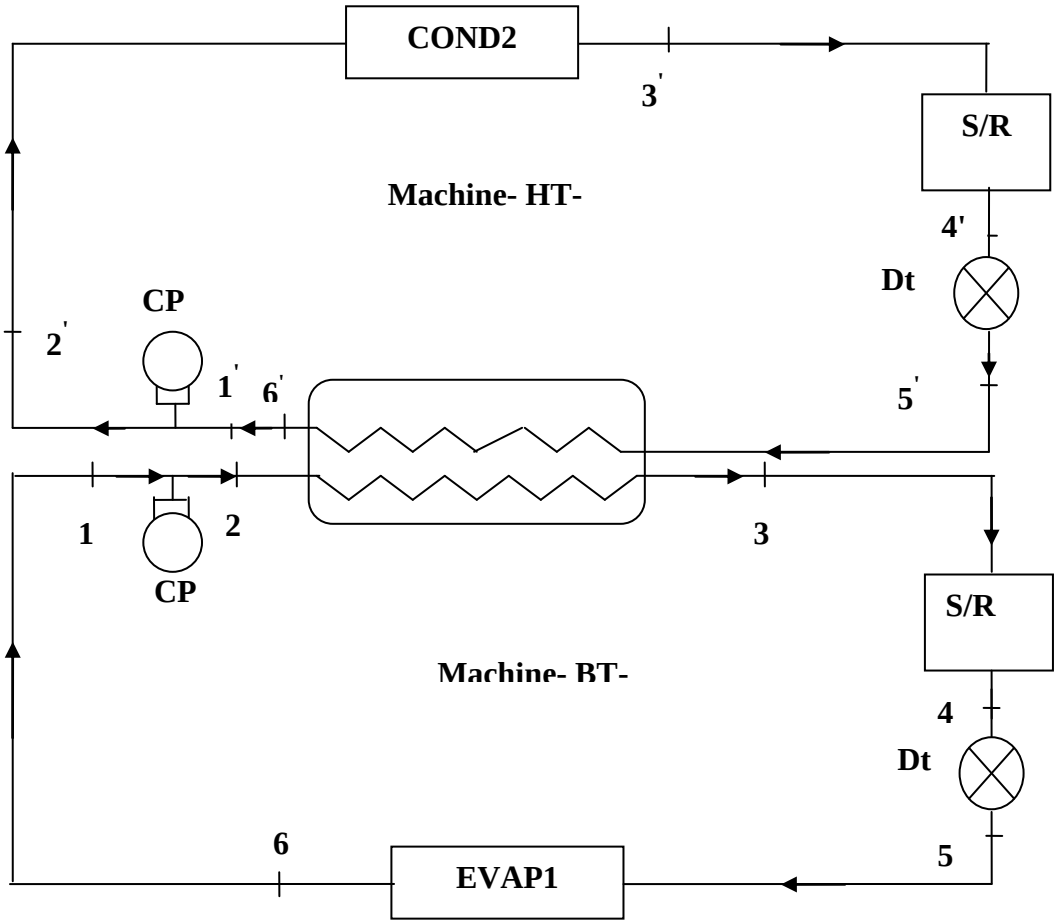


Figure 2. 12: Schéma d'une installation frigorifique à compression mécanique à cascades avec sous refroidisseur

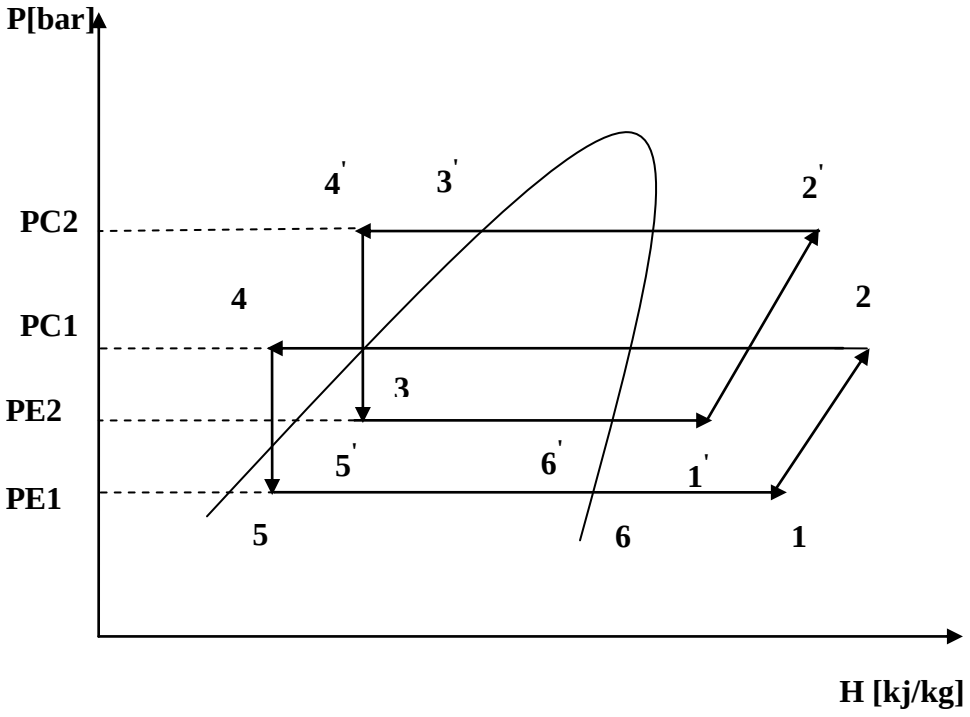


Figure 2. 13: Cycle d'une installation frigorifique à cascades avec sous refroidisseur

2.4.3.1. Principe de fonctionnement d'une installation frigorifique à compression mécanique à cascades

Elles permettent d'obtenir des températures encore plus basse -60 C°, -70 C°. L'installation la plus simple qui soit, deux machines à un étage de compression mécanique disposée en cascade .Chacune de ces machines élémentaires utilise un frigorigène différent dont les caractéristiques sont adaptées au domaine de température que couvre cette machine.

Dans le cas présent, la machine BT utilise le frigorigène F1 à basse température d'ébullition normale donc, généralement à bas point critique, la machine HT emploi le frigorigène F2 à point critique élevé. La charge thermique à base température est absorbé par l'évaporateur E1 ou' le frigorigène F1 se vaporise à la température TE1 < TC1. Le condenseur C1 de la machine << Basse température >>, ou le frigorigène F1 se liquéfie à la température TC1, est refroidi par l'évaporateur E2 de la machine haute température ou le frigorigène F2 se vaporise à la température TE2 absorbe la chaleur dégagée par cette liquéfaction .On doit évidement TC1>TE2 pour que le transfert thermique soit possible. Le fluide F2 se liquéfie dans le condenseur C2 à la température TC2 >To (Rapin JP ,2006)

2.5. Fluides frigorigènes

2.5. 1.Historique

Le premier fluide frigorigène utilisé fut l'eau puisqu'elle servait dés 1755 à fabriquer des frigorie dans un montage de laboratoire fut réalisé par William Cullen .puis, en 1834 l'américain Jacob Perkins réalisa une machine à compression de vapeur fonctionnant à l'éther sulfurique et en 1844 toujours un américain, John Gorrie réalisa une machine à compression et détente d'air, en1859 Ferdinand Carré réalisa une machine frigorifique à absorption fonctionnant à l'ammoniac tandis que 4 ans plus tard Charles Tellier met au point un compresseur fonctionnant à l'éther méthylique. Jusqu'à la fin du XIXe siècle, deux nouveau fluides frigorigènes sont utilisés : l'anhydride carbonique (CO_2) et le dioxyde de souffre (SO_2) mais l'un des fluides déjà nommés, à savoir l'ammoniac, fesa une percée non plus avec des machines à absorption mais à présent à compression (Linde). Ces trois derniers fluides frigorigènes donc l'ammoniac (R717) et le dioxyde de souffre (R764) vont rester jusqu'à vers 1930 les substances les plus employées.

Mais à part l'ammoniac, tous les fluides frigorigènes précédemment mentionnés disparurent totalement à partir de 1939, suite à la mise aux points aux états unis d'une nouvelle catégorie des fluides frigorigènes les chlorofluorocarbures bien connus sous le sigle de CFC. Et puis, à partir de 1980, les scientifiques commencent à tirer la sonnette d'alarme attirant la tension sur les méfaits de CFC sur l'environnement. Ces pourquoi les fabricants ont entrepris la mise au point de substituts moins nocifs pour l'avenir de la planète dont certains sont déjà sur le marché. Les substituts appartiennent pour la plupart à deux catégories de substances chimiques les hydrofluorocarbures ou HFC. Bien que le nombre de fluide frigorigène utilisé à grande échelle soit très réduit. Il n'en reste pas moins que le nombre de fluide frigorigène utilisable est très élevé (Clodic D et al , 2002).

Tableau 2. 1: Dates d'introduction des principaux fluides frigorigènes (Clodic D et al , 2002).

Fluide Frigorigène	Date d'introduction
Eau	Antiquité
Anhydride sulfureux (Pictet)	1874
Ammoniac (Linde)	1876
Anhydride carbonique (Linde).	1878
R12-R114	1930
R11-R113	1932
R22	1935
R502	1963

2.5.2. Définition

Un fluide frigorigène est une substance qui évolue dans le circuit d'une machine frigorifique et qui grâce à un phénomène endothermique consistant en un changement d'état faisant passer la substance de l'état liquide à l'état gazeux dans un évaporateur, permet de produire du froid par retrait de chaleur, celle-ci étant évacué hors de la machine par un phénomène exothermique consistant à un changement d'état inverse du précédant, faisant passer la substance de l'état gazeux à l'état liquide. (McGraw-Hill,1993).

2.5.3. Différents types de fluides frigorigènes

2.5.3.1. Fluides frigorigènes primaires

Puisque l'on désire avec ces substances produire des températures généralement basses, leurs points triples doivent être à température plus basse encore, leurs pressions de vapeurs doivent être assez élevées ou si l'on préfère, leurs températures d'ébullition doivent être basses, ce qui implique que leurs molécules doivent être simples. On utilise ainsi:

- Des éléments simples.
- Des composés purs inorganiques ou organiques.
- Des mélanges azéotropes et zéotropes (Duminil M, 2001).

2.5.3.2. Fluides frigorigènes secondaires

Un fluide secondaire ou un frigoporteur est un fluide intermédiaire utilisé pour refroidir une substance elle même refroidi par l'évaporateur.

On utilise les fluides frigoporteurs, pour des raisons pratiques par exemples dans le cas, ou on veut séparer le fluide frigorigène de la substance à refroidir, car une fuite éventuelle des fluides frigorigènes peut endommager la substance à refroidir, où peut présenter un risque pour le personnel.

Les fluides frigoporteurs sont des solutions (ou saumure) avec une température de solidification au-dessous de zéro degré Celsius, le point de congélation s'abaisse jusqu' à une température limite caractéristique de la solution.

Les fluides frigoporteurs sont des solutions:

- Chlorure de calcium dans l'eau.
- Chlorure de sodium dans l'eau.
- Ethylène de glycol dans l'eau.
- Propylène de glycol dans l'eau.

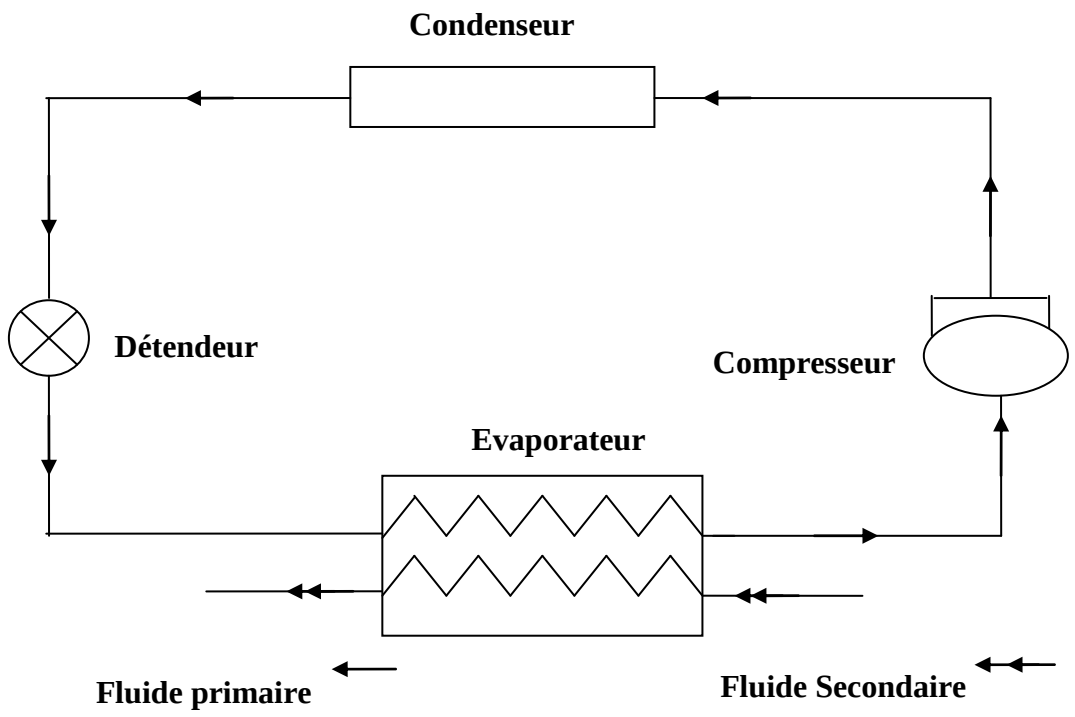


Figure 2.14: Schéma de principe d'une installation frigorifique avec fluide secondaire

2.5.4. Classification des fluides frigorigènes (Mancin, S et al;2014)

2.5.4.1. Les éléments simples

l'oxygène (O_2) , l'hydrogène (H_2) ,ou l'hélium (He) permettent d'atteindre des températures extrêmement basses .

2.5.4.2. Les composés purs inorganiques ou organiques

Parmi les composés inorganiques purs, deux fluides se détachent :

- l'eau (H_2O) ou **R718 :** ne permet évidemment pas d'atteindre des températures inférieures à 0°C. On l'emploie pour la production de froid par absorption dans le domaine de la climatisation et pour les pompes à chaleur très hautes températures (150 °C et plus).

- L'ammoniac (NH_3) ou **R 717** : est un frigorigène d'importance majeure.

D'autres composés inorganiques, comme le dioxyde de soufre (SO_2) et le dioxyde de carbone (CO_2), qui ont joué dans le passé un grand rôle dans la technique frigorifique, ne sont plus utilisés aujourd'hui en raison de leurs inconvénients. Certains aimeraient pourtant redonner un certain essor au dioxyde de carbone.

Les composés organiques, tout au moins ceux aux molécules les plus simples, constituent les ensembles de frigorigènes les plus riches et les plus diversifiés et qui comprennent quatre catégories de fluides frigorigènes :

1. les hydrocarbures légers sont également de très bons réfrigérants. L'inconvénient majeur est qu'ils sont très inflammable potentiellement explosifs et donc dangereux. Leur utilisations sont limitées voir interdits dans les bâtiments publics et immeuble de grand hauteur. Leur emploie se résume comme fluide frigorigène de cycle de compression en pétrochimie.

2. les chlorofluorocarbures CFC qui ont une certaine action négative sur l'environnement

3. les hydro-chlorofluorocarbures HCFC qui ont une action moyennement nocive à l'environnement

4. les hydrofluorocarbures HFC que ne nuisent pas à l'environnement et constituent donc les principaux fluides frigorigènes du futur (Clodic D et al , 2002).

A)- Les composés inorganiques:

La plus part des fluides frigorigènes qui ont été utilisé dans le passé sont des fluides inorganiques dont les plus courants sont l'eau (H_2O), le dioxyde de soufre (SO_2), le dioxyde de carbone (CO_2) et l'ammoniac (NH_3), ce dernier est encore en service aujourd'hui.

- Désignation Numérique des composés inorganiques:

Ils sont désignés par la lettre **R** suivie par la série 700 leur est attribuée et pour obtenir le numéro d'identification des fluides frigorigènes, on ajoute 700 à sa masse moléculaire, pour l'ammoniac, par exemple de formule NH_3 ,On a:

$$14(N) + 3\times\ 1\ (3H) +700 = 717 \text{ d'ou } R_{717}\ \textbf{R 717}$$

Composés inorganiques	Formule	Désignation	Propriétés
Ammoniac	NH_3	R717	Toxicité, Inflammabilité
Eau	H_2O	R718	
Dioxyde de carbone	CO_2	R744	Toxicité

B) - Les composés organiques:(Corps purs halogènes)

- Les principales familles des fluides utilisables sont les CFC, HCFC et HFC.
- les CFC (chlorofluorocarbures comme le R11, R12 appelé encore fréon) ils sont dits fortement halogénés car ils contiennent du Cl et F.
- les HCFC (hydro-chlorofluorocarbures, comme le R22 ou R409) ils sont dits partiellement halogénés et contiennent moins de Cl et de F que les CFC.
- les HFC (hydro- fluorocarbures, comme le R134a, le R404) ils ne contiennent pas de Cl.
- Les corps halogénés sont utilisés à l'état pur ou en mélange zéotropique, azéotropique ou encore pseudo azéotropique. Ils assurent tous les niveaux de température des machines frigorifiques et des pompes de chaleur.

B-1/désignation numérique:

Il serait peut être utile de rappeler les règles qui sont utilisées pour déterminer la nomenclature R_{XYZ} des réfrigérants et qui sont comme suit :

X : nombre d'atomes de carbones - 1 (X = (nC-1), si x=0 (nC=1)- non indiqué).

Y : nombre d'atomes d'hydrogène + 1 (Y = (nH + 1)).

Z : nombre d'atomes de fluor (Z = (nF)).

Le nombre d'atomes de chlore (nCl) = (2*nC+2)-(nH+nF).

RCXYZ désigne les hydrocarbures cycliques halogénés (les perfluorocarbures).

R1XYZ désigne les alcènes.

Les indices a, b, c, d, e, f différencient les isomères de positions des dérivés du propane.

La première lettre caractérise les groupements d'atomes sur le carbone central.

a pour $–CCl_2$-, b pour –CClF-, c pour $–CF_2$-, d pour –CClH-, e pour –CFH- et f pour –

CH_2- .

La seconde lettre caractérise la symétrie du composé. Elle est caractérisée par la somme des masses des atomes attachés au premier carbone et la somme des atomes attachés au dernier carbone. Si la différence est très faible voir nulle, on a un composé symétrique et nous lui attribuons la lettre a. Aux composés de dissymétrie croissante on attribue les lettres b, c.

CFC	Formule	Désignation
Dichlorodifluorométhane	**CCl_2F_2**	**R12**
Trichlorofluorométhane	**CCl_3F**	**R11**
HCFC		
Chlorodifluorométhane	**$CHClF_2$**	**R22**
R22 + R125+ R290	/	**R402A**

- **Les fluides hydrocarbures**:

Ces fluides sont surtout utilisés dans la pétrochimie tel que le méthane, l'éthane et le propane.

- La désignation numérique se fait de la même manière que les hydrocarbures halogènes.

La série 600 est attribuée aux composés organiques divers (Exemple : R600 : butane)

Hydrocarbures	Formule	Désignation	Propriétés
Butane	C_4H_{10}	R600	Inflammabilité élevée
Isobutane	i-C_4H_{10}	R600a	Inflammabilité élevée
Propylène	C_3H_6	R270	Inflammabilité élevée
Propane	C_3H_8	R290	Inflammabilité élevée

2.5.4.3. Mélanges zéotropes et azéotropes :

A- Mélanges zéotropes :

Un mélange zéotrope est un mélange dont la composition en phase vapeur et en phase liquide diffèrent lorsque les deux phases coexistent.

Une autre propriété importante de ces mélanges est l'existence d'un (glissement) à savoir qu'à une pression donnée la température varie suivant le titre en vapeur du mélange diphasique.

On caractérise un mélange zéotrope (binaire, ternaire ou plus) par la valeur de glissement à une pression d'utilisation (celle d'évaporation ou de condensation), ces mélanges se voient attribuer un numéro au fur et à mesure de leur découverte.

- Désignation Numérique des mélanges non azéotropiques:

Ils sont désignés par la lettre **R** suivie par la série 400 leur est attribuée, les numéros d'identification étant arbitraires.

En effet les numérotations sont chronologiques dans l'ordre d'enregistrement.

Par exemple : R407, R408, R409. Pour les mélanges de corps purs identiques, mais dans des proportions différentes, On associe une lettre majuscule (A, B, C) en fin de numérotation dans l'ordre chronologique d'appariation.

Par exemple :

R407A : R32/R125/R134a avec 20%,40% et 40% en composition massique.

R407B : R32/R125/R134a avec 10%,70% et 20% en composition massique.

R407C : R32/R125/R134a avec 23%,25% et 52% en composition massique.

B- Mélanges azéotropes :

Un mélange azéotrope est un mélange de fluides pur, pour lesquels la composition des phases liquide ou vapeur en équilibre thermodynamique est identique ce qui fait que la température ne varie pas au cours des changements d'état (vaporisation ou condensation) à pression constante.

- Désignation Numérique des mélanges azéotropiques:

Ils sont désignés par la lettre **R** suivre par la série 500, les numéros d'identification étant la aussi arbitraires. Exemples: R_{502} est un azéotrope courant composer de 48,8% de R_{22} et de 51,2% de R_{115}.

HFC	Formule	Désignation	Propriétés
Difluorométhane	CH_2F_2	R32	Inflammabilité
1,1,1-Trifluoroéthane	CH_3-CF_3	R143a	Inflammabilité
R32 + R125+ R134a	/	R407C	
R32 + R125	/	R410A	
R125 + R143a	/	R507	

2.5.5. Critères de choix de fluide frigorigène (C. Coquelet 2003)

Pour bien choisir un frigorigène en vue d'une application déterminée, on doit considérer les critères suivants:

2.5.5.1. Critères thermodynamiques

1. La température d'évaporation doit être supérieure autant que possible à la température d'ébullition.
2. La température de condensation doit toujours être très inférieure à la température critique de fluide frigorigène.

3. La pression de condensation ne doit pas dépasser 20 à 25 bars.
4. La pression d'évaporation ne doit pas très basse.
5. Le taux de compression doit rester limité pour une bonne efficacité du compresseur.
6. L'échauffement des vapeurs au cours de la compression dépend de taux de compression τ et l'indice adiabatique γ.
7. Quantité de froid produite doit être le plus élevée possible, elle dépend de la pression d'aspiration.

2.5.5.2. Critères de sécurité

1. Toxicité : classement USA ; classe1 : extrêmement toxique, classe 6 : non toxique
2. Ininflammabilité : le fluide frigorigène doit être ininflammable.

Les fluides sont finalement regroupés, au regard de la sécurité, dans le tableau suivant :

- Groupe de sécurité pour les fluides frigorigènes (Clodic D et al , 2002).

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

3. Action sur les denrées : elle devrait être nulle ou très faible.
4. Sans effet sur la santé du personnel.
5. Sans odeur ou n'ayant qu'une faible odeur désagréable.
6. Fuites faciles à détecter et à localiser par méthode visuelle.

C/ critères techniques :

1. Action sur les métaux doit être faible ou nulle.
2. Action sur les matières plastiques et élastomère doit être faible.
3. Stabilité thermique.

2.5.5.3. Critères économiques

1. Le prix peu élevé.
2. Incidence du choix du fluide frigorifique sur le prix de l'installation.
3. Disponibilité du frigorigène.

2.5.5.4. Critères environnementale

1. Pas d'affinité pour les constituants de l'atmosphère.
2. Pas d'action sur la couche d'ozone : ODP = 0.
3. Pas d'action le réchauffement terrestre : GWP = 0.

D'une manière générale, le fluide frigorigène parfait devrait présenter les qualités suivantes :

1. Chaleur latente de vaporisation très élevée.
2. Point d'ébullition, sous la pression atmosphérique, suffisamment bas compte tenu des conditions de fonctionnement désirées (température d'évaporation).
3. Faible rapport de compression, entre les pressions de refoulement et d'aspiration.
4. Faible volume massique de la vapeur saturée, rendant possible l'utilisation d'un compresseur et de tuyauteries de dimensions réduites.
5. Température critique très élevée.
6. Pas d'action sur le lubrifiant employé conjointement avec le fluide.
7. Composition chimique stable dans les conditions de fonctionnement de la machine frigorifique.
8. Pas d'action sur les métaux composant le circuit. Pas d'action sur les joints.
9. Non inflammable et non explosif en mélange avec l'air.
10. Sans effet sur la santé du personnel.
11. Sans action sur les denrées à conserver.
12. Sans odeur, ou n'ayant qu'une faible odeur non désagréable.
13. Fuites faciles à détecter et à localiser par méthode visuelle.
14. Pas d'affinité pour les constituants de l'atmosphère.
15. Etre d'un coût peu élevé et d'un approvisionnement facile.
16. Sans effet néfaste sur l'environnement.

2.5.6. Principaux fluides frigorigènes utilisés:

1 / R12 (CFC) :

C'est le fluide frigorigène le plus répandu de la catégorie des fluorochlorocarbures.

Il est incolore et est pratiquement inodore. Sa température normale d'ébullition est de -29.8°C. Il est assez stable et n'attaque ni les lubrifiants, ni les matières plastiques employées comme joints. Il est aussi miscible en toutes proportions avec les huiles minérales ou de synthèse et peut se décomposer, dans un circuit frigorifique à une température avoisinant 120°C. Ses vapeurs, plus lourdes que l'air, peuvent avoir un effet d'extinction du type à action chimique, sur le feu même. Des vapeurs de R12 avec une concentration de 20% en volume, peuvent être supportées pendant plusieurs heures, sans causer de dommages à part quelques légers symptômes désagréables temporaires. D'ailleurs ce gaz étant environ quatre fois plus lourd que l'air, reste prés du sol.

La détection des fuites est facile avec une lampe haloïde. (Presque tous les fluides frigorigènes halogénés sont incolores et pratiquement non toxiques. Ils sont inodores dans l'air de l'atmosphère pour autant que leur concentration en volume n'atteint pas 20%. En outre, ils sont inflammables et n'engendrent aucune explosion, pour la détection des fuites au moyen de la lampe haloïde, car en réagissant sur du cuivre chauffé au rouge par la flamme, les produits de décomposition provoquent la coloration de la flamme qui prend une teinte vert-bleu. Pas d'action sur les métaux constituant les systèmes frigorifiques.

Ce fluide n'est ni toxique, ni inflammable. Cependant, si des mélanges à fortes concentrations en R12 sont exposés à une flamme vive, il en résulte une décomposition avec production d'un gaz dangereux : le phosgène. (La production de R12 a été stoppée à partir de 1995 par l'union européenne.

2 / R22 (HCFC) :

C'est un liquide incolore, à odeur très légèrement éthérée, inodore en mélange avec l'air, il est ininflammable et inexplosif. Il est très stable aux températures usuelles d'utilisation, non toxique et non corrosif. Il ne peut provoquer de troubles graves qu'après un séjour de deux

heures en atmosphère polluée pour une concentration de 10% en volume. Il est inerte vis-à-vis des métaux couramment utilisés dans l'industrie frigorifique.

A température égale et à l'état liquide le R22 dissout 10 à 12 fois plus d'eau que le R12. Les risques de formation de bouchons de glace aux pointeaux des organes de détente sont rares.

La température des vapeurs refoulées est, pour des conditions de fonctionnement identiques, supérieure à celle du R12. Vis-à-vis des huiles minérales, il présente la particularité d'être totalement ou partiellement soluble à haute et basse température,

La température de séparation des deux liquides dépend de la concentration et des caractéristiques des huiles du mélange. La miscibilité du R22 est plus élevée dans les huiles de synthèse. Il peut se décomposer à des températures de 150°C. Les fuites peuvent être détectées à la lampe haloïde.

3 / R502 (HCFC) :

Le réfrigérant 502 est un fluide frigorigène constitué par un mélange azéotrope de réfrigérant R22 et de réfrigérant R115, dans la proportion en masse de 48.8% de R22 et de51.2% en R115.

Il est ininflammable, non explosif et très stable à la chaleur, tout comme le R22.

Il est neutre vis-à-vis de tous les métaux usuels utilisés pour la réalisation des installations frigorifiques ainsi que les matières de joints, mais a cependant une très légère action sur le néoprène.il est moins miscible que le R22 avec les huiles de graissage. A des températures dépendant de la concentration en huile du mélange il y a séparation en deux couches des deux liquides.

Il permet d'obtenir une production frigorifique supérieure à celle du R22 et complète la gamme des fluides chlorofluorés. Il peut se décomposer à des températures voisines de150°C.

La détection des fuites se fait avec la lampe haloïde.

4 / R134a (HFC) : (Mancin Setal;2014)

Liquide incolore, ininflammable et inexplosif, très stable aux températures d'utilisation.

Toxicologie : produit chimiquement inerte, non toxique ; limite d'exposition 1000 ppm VME

(Valeur moyenne d'exposition recommandée, exprimée en ppm volume/volume) ; à des concentrations importantes : possibilité de troubles respiratoires et cardiaques liés à l'insuffisance d'oxygène dans l'air. En revanche, combiné avec un gaz inflammable, il peut donner des mélanges qui, enflammés, conduisent à sa décomposition en libérant des produits toxiques. Les effets sont identiques avec une flamme vive ou par contact avec des surfaces métalliques très chaudes.

Détection : ne se détecte pas à la lampe haloïde. Utiliser soit :

- Les détecteurs électroniques adaptés à la détection du fluor
- L'injection d'un traceur dans le circuit et qui sera révélé par rayon ultra-violet.

Miscibilité : avec H2O supérieure au R12 ; Non miscible avec les huiles minérales.

5 / R404A :

Le R404A est une composition de R143a, R125 et de R134a. Il fait partie des fluides zéotropes, qui ne se comportent pas comme des fluides homogènes lors de la condensation respectivement l'évaporation, les différentes composantes peuvent changer d'état de manière indépendante. 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.

6 / R408A :

Mélange ternaire, liquide incolore à odeur très légèrement éthérée, ininflammable et non explosif, très stable aux températures d'utilisation, peut se décomposer dans un circuit frigorifique pour des conditions anormale d'utilisation.

Toxicologie : produit chimiquement inerte, non toxique. En revanche, combiné avec un gaz inflammable, il peut donner des mélanges qui, enflammés, conduisent à sa décomposition en libérant des produits toxiques (acide fluorhydrique, acide chlorhydrique, phosgène COCl2).

Les effets sont identiques avec une flamme vive ou par contact avec des surfaces métalliques très chaudes.

Détection :

- à la lampe haloïde
- Aux détecteurs électroniques
- Par injection d'un traceur dans le circuit révélé par rayon ultra-violet (procédé spectroline).

Miscibilité : avec H_2O supérieure au R12

Utilisation d'une huile : minérale ou alkylbenzène ou semi-synthétique ou polyol-ester suivant le type d'installation.

7 / R507(HFC) :

Mélange azéotrope binaire (R125 :50%, R134a :50%) incolore d'odore légèrement éthérée très stable.

Toxicologie : produit pratiquement non nocif par inhalation. Il se décompose thermiquement à haute température en produits toxiques et corrosifs. Des gelures sont possibles par projection du gaz liquéfié.

Précautions individuelles : éviter le contact avec la peau (gants), les yeux (linettes) ; éviter l'inhalation des vapeurs ; ne pas fumer.

Manipulations et stockage : éviter le contact avec les flammes les surfaces chaudes ; tenir à l'écarte de la chaleur ; stocker dans un endroit frais et ventilé.

Information réglementaires : substance classée non dangereuse ; fluide non inflammable et non toxique.

Groupe de sécurité : A1 (A : faiblement toxique ,1 : pas de propagation de flamme à 18^0C et 101300Pa).

Détection des fuites : mousse à savant ; détecteur électronique adapté.

8/ R717 (ammoniac) :

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), 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.

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 (par exemple. système indirect) et matérielles (composants spéciaux), qui, dans la pratique, limitent l'impact positif de ces propriétés thermodynamiques (augmentation de la consommation énergétique pour les pompes supplémentaires (Lazzu´ s J.A., 2009).

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 (Coquelet C, 2003).

Tableau 2. 2: Propriétés de fluides frigorigènes (Wilson D.P et al , 1988)

HFC et HCFC :

Réfrigérant	Formule	Masse molaire g/mol	T_b (k)	T_c (k)	P_c (MPa)	ODP	GWP100 ans
HFC-32	CH2F2	52.024	221.50	351.26	5.777	0	650
HFC-125	CHF2CF3	120.022	224.66	339.17	3.618	0	2800
HFC-134a	CH2FCF3	102.031	274.07	374.27	4.065	0	1300
HFC-143a	CH2FCHF2	84.041	225.92	345.97	3.769	0	3800
HFC-152a	CH3CHF2	66.051	249.10	386.41	4.512	0	140

HCFC-123	CHCL2CF3	152.931	300.84	456.82	3.666	0.014	90
HCFC-124	CHCLFCF3	136.476	263.00	395.35	3.615	0.03	470

Mélanges de HFC :

réfrigérant	Formule	Masse molaire g/mol	T_b (C°)	T_c (C°)	P_c (MPa)	ODP	GWP100 ans
R-404A	R-125/143a/134a (44/52/4)	97.6	-46.6	72.1	3.74	0	3260
R-407A	R-32/125/134a (20/40/40)	90.11	-45.2	81.9	4.49	0	1770
R-407B	R-32/125/134a (10/70/20)	102.94	-46.8.	74.4	4.08	0	2290
R-407C	R-32/125/134a (23/25/52)	86.20	-43.8	87.3	4.63	0	1530
R-407D	R-32/125/134a (5/15/80)	90.96	-39.4	91.6	4.48	0	1360
R-407E	R-32/125/134a (25/15/60)	83.78	-42.8	88.8	4.73	0	1360
R-410A	R-32/125 (50/50)	72.58	-51.6	72.5	4.95	0	1730
R-507A	R-125/143a (50/50)	98.86	-47.1	70.9	3.79	0	3300

Hydrocarbures :

R-270	$CH_2CH_2CH_2$	42.08	-33.5	125.2	5.58	0	------
R-290	$CH_3CH_2CH_3$	44.10	-42.1	96.7	4.25	0	20
R-600	$CH_3CH_2CH_2CH_3$	58.12	-0.5	152	3.80	0	20
R-600a	$CH\ (CH_3)2CH_3$	58.12	-11.6	134.7	3.64	0	20
R-170	CH_3CH_3	30.07	-88.6	32.2	4.87	0	20
R-1270	CH_3CHCH_2	42.08	-47.7	92.4	4.57	0	------

Fluides inorganiques :

R-718	H_2O	18.02	100	374.2	22.1	0	<1
R-744	CO_2	44.01	-78.4	31.1	7.38	0	1
R-717	NH_3	17.03	-13.3	132.3	11.3	0	<1

2.5.6.1. Domaines d'utilisation :

-R134a:

Ce fluide est utilisé dans les domaines de la réfrigération domestique, commerciale et industrielle à température positive ainsi que dans le domaine conditionnement d'air petite, moyenne et grosse puissance (climatisation automobile, refroidissement de liquide, etc.),

-R404A:

Ce fluide est utilisé dans les domaines de la réfrigération commerciales et industrielle à températures négatives et positives (cambres froides commerciales, centrales frigorifiques, installations de surgélations, etc.).

-R410A :

L'application principale est le conditionnement de l'air de petite et moyenne puissance et de pompe à chaleur dans une plage de capacité inférieure

-R507:

Le principal domaine d'application est la réfrigération industrielle avec des évaporateurs aimantés en régime noyé (exemple : patinoires, etc.).

-R502 :

dans le domaine de température [-60,-20 ^{0}C] ce fluide utilise pour compression monoétagée dans installations frigorifiques à refroidissement à air pour congélateurs et installations frigorifiques pour supermarchés et l'industrie et pour stockage du sang à -18 ^{0}C.

-R717 : Ce fluide est de plus en plus employé dans le group d'eau glacée compact, les entrepôts frigorifique, congélateur les brasseries, les abattoirs et pour surgélateur industriel appareils de conditionnement d'air, installation frigorifique pour produits animaux, applications industriels, patinoire **(**Rappin J P, 2003).

2. Evaluation de fluides frigorigènes utilisés (Mohanraj M,2013)

2.5.6.2. Evolution des HFC

Les HFC constituent l'option majeure de remplacement des CFC et les HCFC.

* légère HCFC : échange du CFC par un mélange HCFC : R410A/b ou R409A pour le R12 .

R402A et R408A pour le R502 cette solution ne convient pas pour les installations qui ne seront pas renouvelées et pour lesquelles on souhaite prolonger leur durée de vie .

- légère HFC : échange du CFC ou HCFC par un mélange HFC : R413A/R422D/R427.
- Lourde : échange du CFC ou HCFC par un HFC : nécessitant le lavage de l'installation , soit le R134a pour le R12 , R404 ou le R507 pour le R502

R407 pour le R22 , avec probable ou éventuel échange du compresseur, de l'évaporateur ou le condenseur.

Les différentes solutions doivent s'accompagner de toutes actionw complémentaires suivantes :

- confinement : rendre le circuit frigorifique étanche (zéro fuites).
- Optimisation : mesures destinés à abaisser le coût d'exploitation.
- Economies d'énergie : utilisation de nouvelles innovations techniques et technologiques.

Pour les installations neuves : construites avec les HFC ; on utilise pour :

- les installations positives : R134a, R404A, R407c, R507A.
- les installations négatives : R404A, R410A, R507A.

Tableau 2. 3: Fluides frigorigènes dont l'utilisation est interdite ou limitée et leur substituants.

	ODP (/R-11)	GWP (kg éq. de CO2)		ODP (/R-11)	GWP (kg éq. de CO2)
CFC (interdits)			**Mélanges de HFC**		
R-11	1	4 000	R-404A	0	3 260
R-12	0,8	8 500	R-407C	0	1 530
R-502	0,2	5 490	R-410A	0	1 730

HCFC (toléré)			**Mélanges a base R-22**		
R-22	0,04	1 700	**R-408A**	0,7	2 650
HFC (corps purs)					
R-134a	0	1 300	**Propane / Butane**	0	20
R-125	0	2 800	**Ammoniac**	0	<1
R-143a	0	3 800	**CO2**	0	1

Exemple 1 **– Cas du R-123 pour les groupes centrifuges**

Pour les groupes centrifuges de grande puissance, il est intéressant d'utiliser les fluides à basse pression qui permettent d'éviter la réglementation des appareils à pression et autorisent des épaisseurs beaucoup plus faibles pour les échangeurs. L'inconvénient associé à ce fonctionnement basse pression, à savoir la faible masse volumique du fluide frigorigène à l'aspiration du compresseur, est surmonté par l'utilisation de compresseurs centrifuges tournant à très grande vitesse (15 000 à 20 000 tr/mn), ce qui permet de garder une taille réduite du compresseur et donc des coûts initiaux réduits. Aux Etats-Unis le choix du R-123, pour les groupes refroidisseurs d'eau, a permis un développement très rapide de ce fluide frigorigène.

Exemple 2 **– Cas du R-134a**

Ce fluide a remplacé le R-12 dans deux applications : le froid domestique et la climatisation automobile. Au niveau mondial, le rapport du comité des options techniques « TOC » [PNU98] établit que plus de 92 % des équipements neufs en froid domestique sont chargés avec du R-134a, et donc 8 % correspondent à la production des équipements fonctionnant à l'isobutane. Depuis 1994, 100 % des équipements de climatisation automobile neufs fonctionnent au R-134a. La plupart des nouveaux conteneurs frigorifiques aussi. Ceux qui ne fonctionnent pas avec des HFC continuent à fonctionner soit avec du R-22, soit avec des mélanges à base de R-22. Dans un certain nombre de petits équipements de froid commercial, le R-134a a aussi essentiellement remplacé le R-12 (Mancin et al ,2014).

Exemple 3 - **Cas du R-410A** pour les systèmes de climatisation de faible puissance

Ce fluide est au contraire un frigorigène qualifié haute pression. A l'aspiration, la pression est de 8 bar pour une température de saturation de 2 °C et de 31 bar au refoulement du

compresseur pour une température de saturation de 50 °C. Avec ce fluide, les constructeurs peuvent utiliser des compresseurs de petite taille compatibles avec les matériels extrêmement compacts que sont les systèmes de climatisation individuels dits Split system.

Les propriétés thermodynamiques définissent donc un certain nombre de contraintes impliquant des impacts directs en terme de coût. Selon la nature de l'application, l'analyse multi critères des constructeurs de matériels intègre les propriétés thermodynamiques dans une conception globale de l'équipement.

En froid commercial, le remplacement du R-502 s'est fait de manière préférentielle par du R 404A dans les équipements neufs. Dans de nombreuses applications où il est encore possible d'utiliser le R-22, les choix ne sont pas encore définitifs, selon les niveaux de température, le R-22 pourra être remplacé soit par du R-404A, soit par du R-407C, soit par du R-410A, voire dans certains cas par du R-134a. A l'heure actuelle, la plupart des sociétés japonaises et aussi des sociétés européennes proposent des matériels de conditionnement d'air (air /air) de petites et moyennes puissances fonctionnant soit au R-410A, soit au R-407C.(Mohanraj M,2013).

2.5.6.3. Evolution des fluides hydrocarbures :

Le rapport sur l'utilisation des hydrocarbures en réfrigération se résume ci après : les statistiques montre que seulement 3 % des équipements chargés généralement de l'isobutane et de propane sont proposés à l'industrie frigorifique.

En froid commercial une dizaine d'installations pilotes ont été mises en place dans des aires de ventes de produits frais en Allemagne et quelques stations de services en grandes Bretagne. Pour une analyse comparative complète de différents solutions techniques, par exemple la comparaison d'un système fonctionnant avec un HFC par rapport avec un système fonctionnant avec un fluide hydrocarbure, la seule analyse du GWP des deux fluides est insuffisante, une analyse complète sur le cycle de vie de l'équipement doit être réalisé.

2.5.6.4. Evolution des fluides inorganiques

- **L'ammoniac**

L'ammoniac a toujours été utilisé dans les procédés agroalimentaires et dans l'entreposage, les installations contenant de grandes quantités d'ammoniac demandant une amélioration des règles de sécurités. la situation actuelle permet plusieurs constat :

Les surcoûts de ces systèmes utilisant l'ammoniac ne sont pas négligeable (entre 20% et 15%) les compresseurs sont obligatoirement des compresseurs ouverts, ce qui défavorable au confinement du fluide, le rapport de 1994 et en étudiant la balance avantages /inconvénient a abouti au choix des mélanges HFC (Moghadassi A et al,2008).

- **Le dioxyde de carbone**

L'intérêt le plus important porte sur la possibilité d'utiliser le CO2 dans les systèmes de climatisation automobile. Plusieurs laboratoires Européens et aussi Américains et surtout laboratoire norvégien (SINTEF) ont développé un grand nombre d'études techniques et de prototypes pour l'utilisation du CO2 dans les pompes à chaleur résidentielles et les systèmes de réfrigérations Commerciaux.(Lemmon E W,2006).

Chapitre 3

Synthèse des solutions alternatives

3.1. Introduction

Afin de répondre aux besoins croissants en froid industriel et climatisation la recherche s'oriente aujourd'hui vers des technologies de réfrigérations alternatives. En effet, les exigences environnementales limitent les technologies classiques, notamment es systèmes de réfrigération classiques sont basés sur la compression de vapeur qui existe depuis plus de 100 ans, bien qu'il s'agisse d'une technologie fiable et à faible coût, elle a comme principal inconvénient l'utilisation de fluides frigorigènes nocifs pour l'environnement, de plus ces systèmes de réfrigération à compression atteignent leur limite d'efficacité.

Solutions alternatives :

1- Fluides frigorigènes de substitution : qu'il s'agisse de corps purs ou de mélanges. Beaucoup de recherches sont orientées vers les mélanges à base de HFC, il s'agit le plus souvent des mélanges non azéotropiques en raison de l'immense champ expérimental qu'offre la combinaison, en proportions variable corps purs.

Autres que les HFC Les produits dits naturels tel que les hydrocarbures ou HC comme le propane, l'isobutane et l'ammoniac.

2. Confinement de charge:

Des solutions alternatives visant la diminution des quantités des réfrigérants contenus dans les installations frigorifiques ; la réduction de la quantité du fluide frigorigène peut être réalisé par l'utilisation des micro-canaux dans les échangeurs de chaleurs de l'installation frigorifique (condenseurs et évaporateurs), donc réduire la taille de l'installation qui devient moins encombrant et économique.

3. Utilisation d'autres systèmes de production de froid :

Beaucoup de travaux se sont orientés vers les cycles autres que la compression mécanique à cause de l'incident des fluides frigorigènes sur l'environnement, comme solutions alternatives :

- La machine frigorifique à absorption.
- La machine frigorifique à éjecto-compresseur.
- La réfrigération magnétique.

4. Stockage de froid Le stockage de froid, sous forme de glace ou d'eau glacée, dans les réseaux de climatisation urbaine, deviennent populaires du fait des nombreux avantages qu'ils possèdent. Le stockage présente un avantage certain; puisqu'il apporte en été une puissance supplémentaire ajoutée sur le réseau.

3.2. Evaluation thermodynamique des HFC

3.2.1. Introduction

Les CFC, HCFC contribuent à la fois à l'effet de serre et à la destruction de la couche d'ozone lorsqu'ils sont libérés dans l'atmosphère, le chlore et le fluor contenu dans les molécules réagissent chimiquement et détruisent des molécules d'ozone, une accumulation de ces gaz frigorigènes dans l'atmosphère contribue aussi au réchauffement de la planète qui provoque des changements climatiques (D. Clodic et al 2002), seuls les HFC sont habilités, se sont les substituts des CFC et HCFC,

Les relations calculant les propriétés thermodynamiques des fluides frigorigènes HFC (Sozen et al 2007) (Jesus.E et al 2014) sont développée.

Notre intérêt s'étant porté particulièrement sur les fluides frigorigène HFC : R407c et R507, La mise en place de ces moyens mathématiques et numériques, pour calculer les propriétés d'état thermodynamiques de ces fluides frigorigènes.

3.2.2. Calcul des propriétés thermodynamiques pour les corps purs

Equation d'état de Peng-Robinson (Twu .C et al ,1995)

Peng et Robinson ont proposé en 1976 une modification comme suit :

$$P = \frac{R.T}{(V-b)} - \frac{a(T)}{V(V+b)+b(V-b)} \tag{3-1}$$

Peng et Robinson modifié :

$$P = \frac{RT}{(V-b)} - \frac{a(T)}{[V+(1+\sqrt{2})b][V+(1-\sqrt{2})b]} \tag{3-2}$$

$$a\,(T) = ac\ \delta(T/T_C) \tag{3-3}$$

$$ac = 0.457235\ (R\ T_C)^2 / P_C \quad (3\text{-}4)$$

$$[\delta(T/T_C)]^{1/2} = 1 + m[1-(T/T_C)^{1/2}] \quad (3\text{-}5)$$

On calcule m à partir du facteur acentrique.

$$m = 0.37646 + 1.54226\ \omega - 0.26992\ \omega^2 \quad (3\text{-}6)$$

$$b = 0.077796\ R\ T_C / P_C \quad (3\text{-}7)$$

- **Enthalpie :**

l'expression de h et l'équation d'état de Peng-Robinson on obtient :

$$h = \frac{\frac{da}{dT}T - a}{2\sqrt{2b}} \ln\left(\frac{V + 2.414b}{V - 0.414b}\right) + PVh_0 \quad (3-8)$$

$$\frac{h_0}{R}(a_0 - 1)(T - T_0) + a_1\frac{(T^2 - T_0^2)}{2} + a_2\frac{(T^3 - T_0^3)}{3} + a_3\frac{(T^4 - T_0^4)}{4} + C_f \quad (3-9)$$

$$\frac{da}{dt} = 0.45724\frac{(RT_r)^2 d\alpha}{P_c} \quad (3-10)$$

$$d\alpha = -\sqrt{\alpha}\frac{m}{T_c\sqrt{T_r}} \quad (3-11)$$

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad (3-12)$$

- **.Entropie :**

L'expression de S et l'équation d'état de

Peng-Robinson on obtient :

$$S = R\ln(V - b) + \frac{\frac{da}{dT}}{2\sqrt{2b}} \ln\left(\frac{V + 2.414b}{V - 0.414b}\right) S_0 \quad (3-13)$$

Avec :

$$S_0 = (a_0 - 1)\ln\frac{T}{T_0} + a_1(T - T_0) + a_2\frac{(T^2 - T_0^2)}{2} + a_3\frac{(T^3 - T_0^3)}{3}C_s \qquad (3-14)$$

- **Chaleurs spécifiques à pression constante :**

De même l'expression de la chaleur spécifique à pression constante est donnée par :

$$C_P = \frac{\frac{d^2a}{dT^2}}{2\sqrt{2b}}\ln\left(\frac{V + 2.414b}{V - 0.414b}\right) - T\frac{\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V^2}{\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T} - RC_P^0 \qquad (3-15)$$

$$\frac{d^2a}{dT^2} = 0.45724\frac{(RT_c)^2}{P_c}\frac{d^2\alpha}{dT^2} \qquad (3-16)$$

$$\frac{d^2\alpha}{dT^2} = \frac{m}{2T_c\sqrt{T_r}}\left(\frac{\sqrt{\alpha}}{T_cT_r} - \frac{1}{\sqrt{\alpha}}\frac{d\alpha}{dt}\right) \qquad (3-17)$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v = \frac{R}{V - b} - \frac{\frac{da}{dT}}{V(V + b) + b(V - b)} \qquad (3-18)$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T = \frac{RT}{(V - b)^2} + \frac{2a(V + b)}{\{V(V + b) + b(V - b)\}^2} \qquad (3-19)$$

- **Chaleur spécifique à volume constant :**

De même pour la chaleur spécifique à volume constant :

$$C_v = \frac{\frac{d^2a}{dT^2}T}{2\sqrt{2b}}\ln\left(\frac{V + 2.414b}{V - 0.414b}\right)C_v^0 \qquad (3-20)$$

3.2.3. Calcul des propriétés thermodynamiques d'un mélange de corps purs

3.2.3.1. Règle de KAY (Barret M et al ,1989)

Les propriétés pseudo - critiques des mélanges sont obtenues généralement à partir de la règle de KAY.

$$T_{PC} = \sum Y_i \times T_{ci} \qquad (3-21)$$

$$P_{PC} = \sum Y_i \times P_{ci} \qquad (3-22)$$

$$Z_{Cm} = \sum Y_i \times Z_{ci} \qquad (3-23)$$

$$\omega_m = \sum Y_i \times \omega_i \qquad (3-24)$$

- **Entropie :**

Pour la détermination d'entropie d'un mélange, on applique la même méthode pour le cas D'un fluide pur, seulement, la valeur initiale (de référence) de l'entropie dans ce cas est celle d'un mélange idéal de gaz parfait. Egalement l'expression de ai et bi sont remplacées par celle de a et b. Donc, on peut écrire :

$$S_m = R\ln(V-b) + \frac{\frac{da}{dT}}{2\sqrt{2b}} \ln\left(\frac{V+2.414b}{V-0.414b}\right) S_{0m} \qquad (3-25)$$

$$a = \sum_i \sum_j x_i x_j a_{ij} \qquad (3-26)$$

$$\text{Avec } a_{ij} = \left(a_i a_j\right)^{0.5} \qquad (3-27)$$

$$b = \sum_i \sum_j x_i x_j \left(\frac{b_i+b_j}{2}\right) \qquad (3-28)$$

$$S_{0m} = \sum_j x_i S0_i \qquad (3-29)$$

$$\frac{da}{dT} = \sum_i \sum_j \frac{x_i x_j \left(1-k_{ij}\right)}{2} \left(\frac{a_{ci} a_{cj}}{\alpha_i \alpha_j}\right)^{0.5} \left(\alpha_i \frac{d\alpha_i}{dT} \alpha_j \frac{d\alpha_i}{dT}\right) \qquad (3-30)$$

.**Enthalpie :**

L'expression d'enthalpie du mélange est donnée comme suite :

$$h_m = \frac{\frac{da}{dT}T - a}{2\sqrt{2b}} \ln\left(\frac{V + 2.414b}{V - 0.414b}\right) + PVh_{0m} \qquad (3-31)$$

$$h_{0m} = \sum_j x_i h0_i \qquad (3-32)$$

3.2.3.2. Calcul des propriétés du liquide saturé (Javad.Hekayati et al 2015)

Pour le calcul des propriétés thermodynamiques du liquide saturé on suit les étapes suivantes :

a) On calcul les propriétés du fluide frigorigène à l'état vapeur saturée a une température et une pression donnée.

b) On utilisant la relation générale de Clapeyron nous obtenons la valeur de l'enthalpie et de l'entropie à l'état du liquide saturé. (A. Cengel,2001)

$$h^{L.S} = h^{V.S} - \left(\frac{dP^S}{T}\right) T(V^{V.S}V^{V.S}) \qquad (3-33)$$

$$S^{L.S} = S^{V.S} - \frac{(h^{V.S} - h^{L.S})}{T} \qquad (3-34)$$

Pour les propriétés du liquide sous pression on ajoute aux propriétés du liquide saturé les variations des mêmes propriétés par rapport à la pression (Armas et al,2011)

$$h^L = h^{L.S} + \int_{P_S}^{P} \left[V - T\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P\right] dP \qquad (3-35)$$

$$S^L = S^{L.S} + \int_{P_S}^{P} \left[\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P\right] dP \qquad (3-36)$$

Pour le calcul des intégrales on utilise le modèle de Aalto et Keskinen qui exprime le volume sous pression en fonction de la pression et de la température.

$$V^L = V^S \frac{A + C^{(D-T)B}(P_r - P_r^S)^E}{A + C\left(P_r - P_r^S\right)^E} \qquad (3-37)$$

Avec :

$$A = a_0 + a_1 T_r + a_2 T_r^3 + a_3 \frac{a_4}{T_r} \qquad (3-38)$$

$$B = b_0 + \frac{b_1}{b_2 + \omega} \qquad (3-39)$$

$$C = c_1(1 - T_r)^{c_2} + [1 - (1 - T_r)^{c_2}]\exp[c_3 + c_4(P_r - P_r^S)] \qquad (3-40)$$

3.3. Machine frigorifique à absorption:

L'année1970 marque le début de la production et de la commercialisation des groupes à absorption Kawasaki machine utilisant le couple binaire (H_2O/LiBr), cycle à double effet avec un brûleur à gaz (G.C. Vliet, 1982).

Parmi les technologies qui ont suscité le plus d'intérêt de ces technologies alternatives, les plus utilisés les systèmes à absorption, et ses riches applications en particuliers pour les groupes de refroidisseurs d'eau.

3.3.1. Le processus d'absorption :

Le processus d'absorption est une autre technique industrielle pour la production du froid. Les refroidisseurs à absorption utilisent directement la chaleur comme source première d'énergie pour produire le froid, au lieu d'énergie mécanique, comme c'est le cas des refroidisseurs à compression (G. Vrinat, 2009).

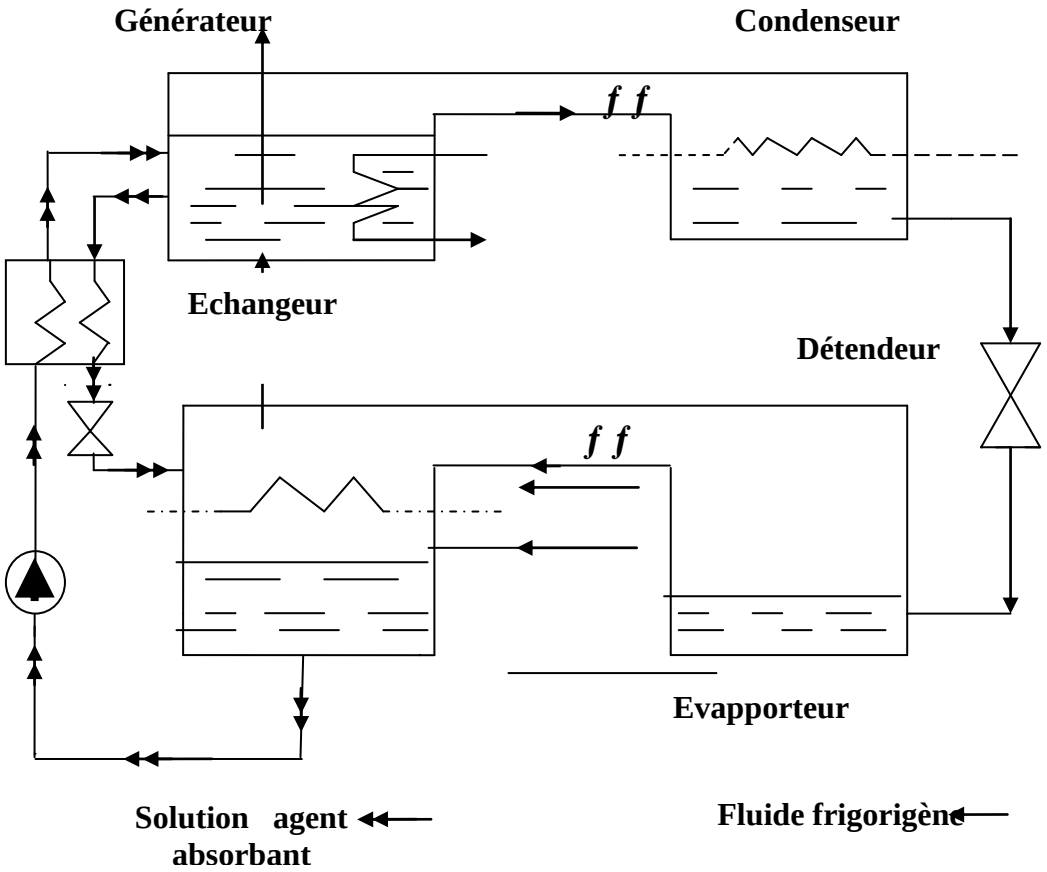


Figure 3. 1: Schéma de principe d'une machine Frigorifique à absorption

3.3.2 .Principe de fonctionnement d'une machine frigorifique à absorption

De même que le cycle à compression de vapeur, le cycle à absorption utilise l'effet de refroidissement par l'évaporation d'un fluide frigorigène à basse température et à basse pression, mais la vapeur au lieu d'être comprimée mécaniquement elle est comprimée thermiquement.la solution formée d'un fluide frigorigène et d'un agent absorbant est chauffée dans le bouilleur grâce à des apports extérieurs de chaleur (vapeur, eau chaude circulant dans un serpentin ou aussi par des gaz brûlés par combustion).

La solution chauffée laisse échapper la vapeur du fluide frigorigène qui passe alors dan le condenseur, la solution est alors appauvrie en fluide frigorigène ou enrichie en agent absorbant et passe dans le deuxième détendeur et ensuite dans l'absorbeur.

La vapeur du fluide frigorigène se condense dans le condenseur et passe à travers le premier détendeur pour s'écouler vers l'évaporateur.

Le fluide frigorigène liquide s'évapore dans l'évaporateur en produisant du froid et la vapeur formée vas vers l'absorbeur ou elle rencontre la solution venant du bouilleur pour former à nouveau une solution riche en fluide frigorigène ou pauvre en agent absorbant cette solution retourne au bouilleur, le passage du flux thermique du fluide frigorigène au milieu extérieur est d'ailleurs régi par les mêmes lois physiques Le fluide frigorigène s'évapore à l'intérieur des tubes alors que le fluide caloporteur circule à l'extérieur de ces derniers. La surface totale d'échange offerte à l'évaporation à l'intérieur des tubes. **(**M. Duminil M, 2001)

Bouilleur :

Le liquide, riche en frigorigène, entre dans le bouilleur, où il est partiellement vaporisé grâce à l'énergie apportée par le circuit d'eau chaude; les deux phases résultants sont : une vapeur de réfrigérant et une solution concentrée de l'absorbant.

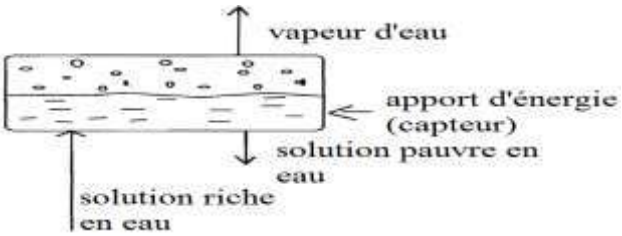


Figure 3. 2: Schéma du bouilleur

Absorbeur :

La solution pauvre en réfrigérant provenant du bouilleur absorbe lors de sa chute la vapeur de réfrigérant provenant de l'évaporateur. Cette vapeur se liquéfie en cédant sa chaleur au circuit de refroidissement. Le mélange obtenu à basse pression est retourne au bouilleur.

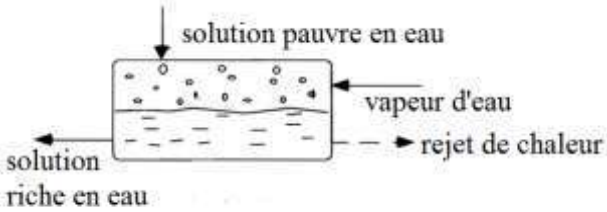


Figure 3. 3: Schéma de L'absorbeur

3.3.3. Avantages d'une machine frigorifique à absorption :

- ✓ Consomme essentiellement de l'énergie calorifique qui peur être récupère d'un autre système.
- ✓ Ne nécessite que peu de machines tournantes donc pas de vibration et bruits
- ✓ Les refroidisseurs à absorption peuvent être alimentés séparer de multiples sources de chaleur (gaz méthane/combustible directe).
- ✓ Haute fiabilité du système, très peu de pannes.
- ✓ Un large choix d'appareils et en petite profondeur.
- ✓ Peu de maintenance et grande longévité du matériel.

3.3.4. Caractéristiques du couple binaire:

Les deux substances fluide frigorigène- agent absorbant qui doivent former le couple binaire ou solution dans les cycles frigorifiques à absorption doivent remplir un certains nombres de critères. (JP. Rapin et al, 2004).

Les caractéristiques désirées dans les systèmes à absorption sont les suivantes :

1- La solubilité du réfrigérant dans l'absorbent doit être anormalement élevée à température de l'absorbeur et à la pression correspondant à la température l'évaporateur.

2- La distillation doit permettre de récupérer une proportion importante de la teneur en réfrigérant dans la solution riche, afin de diminuer le débit de solution nécessaire.

3- L'absorbant doit être beaucoup moins volatil que le réfrigérant, afin de minimiser son entrainement dans le condenseur.

4- La viscosité de la solution doit être faible afin de faciliter l'absorption rapide et de diminuer la puissance de pompage.

5- Le rapport de la chaleur latente de vaporisation du réfrigérant a la chaleur nécessaire pour séparer le réfrigérant de l'absorbant doit être voisin de 1.

3.3.5. Principaux couples fluide frigorigène/absorbant utilisés

On donne quelques exemples de couples utilisés (Tableau 3.1), l'exemple le plus courant est le couple H_2O-LiBr et le plus ancien est le couple NH_3 -H_2O. Ces couples sont les mieux.connus et les plus étudiés. (Rapin, 2014)

Tableau 3. 1: Couples utilisés pour les systèmes à absorption

Fluide Frigorigène	Agent Absorbant
Ammoniac NH_3	Eau
Eau	LiBr (Bromure de Lithium)
R_{22}	Diméthyléther du tétraéthylène glycol
Méthyl amine	Eau
Méthanol	LiBr

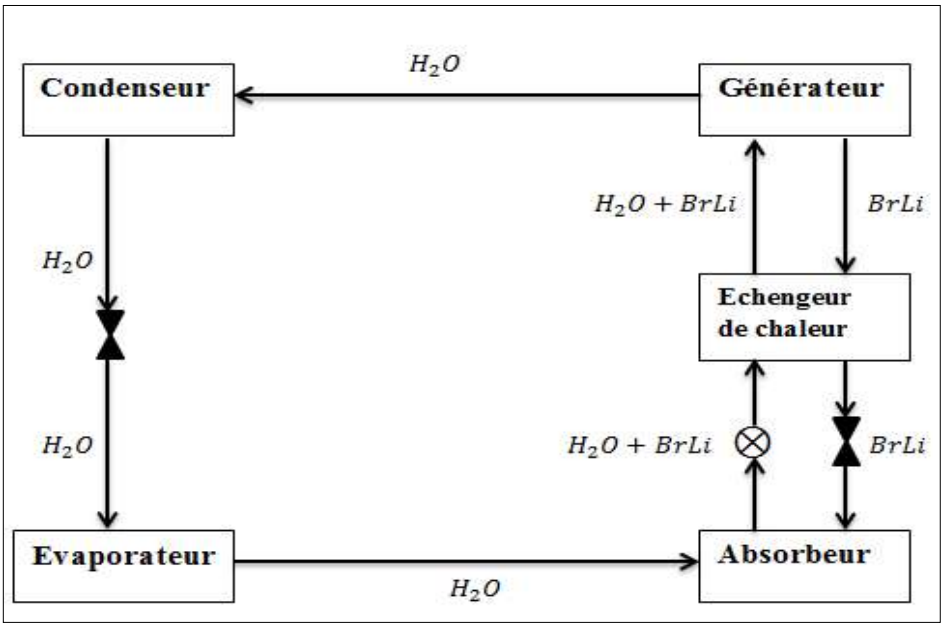


Figure 3. 4: Schéma d'une machine à absorption avec une solution de H2O/BrLi

L'eau est le fluide frigorifique alors que l'agent absorbant est le bromure de Lithium (BrLi) pur est un sel solide mais quand il est mélangé avec suffisamment d'eau, on obtient une solution liquide homogène (Chougui2010).

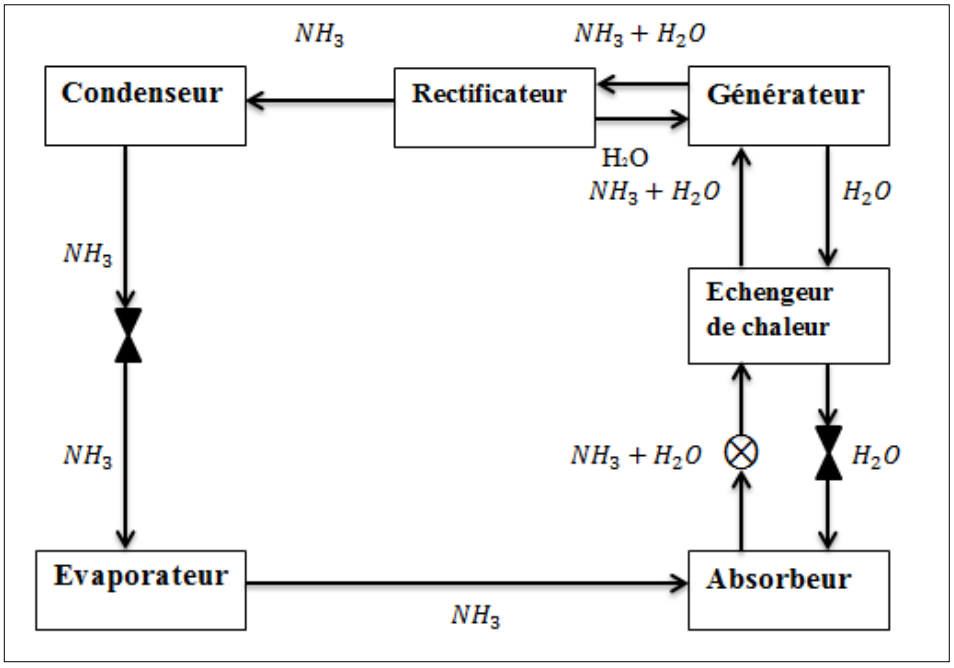


Figure 3. 5: Schéma d'une machine à absorption avec une solution de NH3/H2O

Dans le cas d'une installation à absorption, on utilise de l'ammoniaque (NH3) comme agent réfrigérant. Comme dans une installation frigorifique à compression, l'ammoniaque liquide s'évapore dans un évaporateur, se chargeant de chaleur. Dans un absorbeur, l'ammoniaque en forme de vapeur est ensuite dissoute dans de l'eau. La solution ammoniaque est chauffée, de telle sorte que se dégage de l'ammoniaque sous forme de vapeur. Dans un condenseur, la vapeur ammoniaque est de nouveau condensée pour en faire de l'ammoniaque liquide.

Afin de pouvoir établir une différence de température entre l'évaporation et la condensation, il faut créer une différence de pression. L'arrivée de l'énergie d'entraînement s'effectue via le bouilleur et elle est uniquement thermique. Le réchauffement du bouilleur peut s'effectuer avec du gaz (Kherris S, et al, 2013).

3.3.6. Système à absorption à simple effet:

Les machines frigorifiques à absorption permettent de remplacer la compression en phase vapeur du réfrigérant par une compression en phase liquide d'une solution binaire.

Cette solution est composée du réfrigérant et d'un absorbant. La quantité d'énergie électrique consommée par la pompe est presque négligeable. Il faut néanmoins disposer d'une source de chaleur pour pouvoir dissocier le réfrigérant de l'absorbant et pour pouvoir fonctionner ainsi en cycle fermé. (Khalid.A et al 2001)

Le schéma de principe de ce type de machines est représenté à la figure I.5.

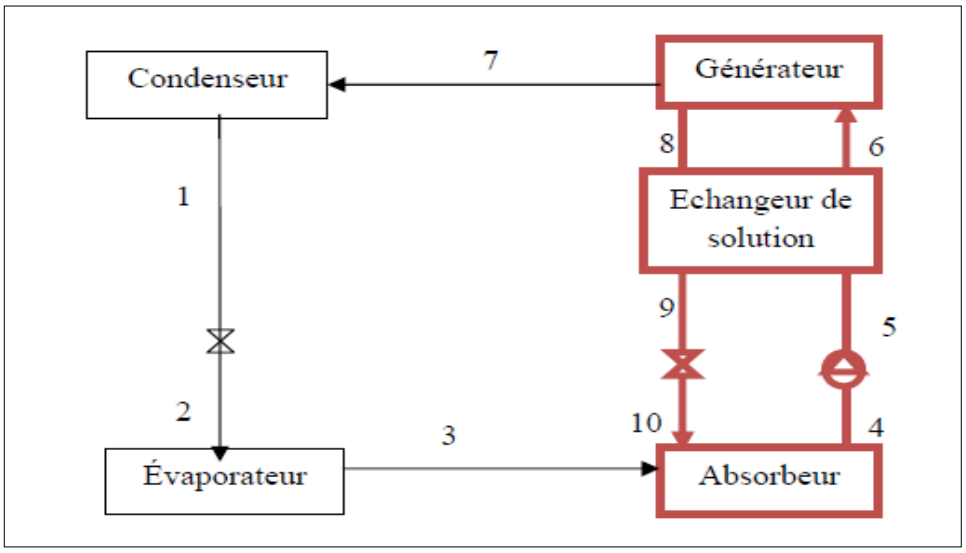


Figure 3. 6: Cycle frigorifique à absorption à simple effet

3.3.7. Système à absorption à plusieurs effets:

L'objectif du cycle frigorifique à plusieurs effets est d'augmenter la performance du système à absorption, ou accroître leur domaine d'utilisation possible, en faisant usage de systèmes à étages, ou effets multiples. Les variantes possibles sont nombreuses surtouts si l'intérêt porte sur la production simultanée de froid et de la chaleur (thermo frigo pompes).. La Figure 3.7 montre un tel cycle utilisant le système LiBr/eau, où la vapeur du réfrigérant générée par le générateur à premier effet est condensée à haute pression dans le générateur à second effet. Cependant la chaleur rejetée est utilisée pour produire une vapeur supplémentaire du réfrigérant à partir de la solution provenant du générateur à premier effet. (La chaleur issue de la condensation de la vapeur du réfrigérant est utilisée dans le générateur II)

Si toute la vapeur du réfrigérant provenant du premier générateur se condense dans le second générateur, le *COP* du système devrait être deux fois celui du système à simple effet correspondant (Benaoudia, 2001)

Pour des sources de chaleur à hautes température, les cycles d'absorption multi-étagés et à plusieurs effet donnent la possibilité d'atteindre des performances supérieures à celles du cycle conventionnel à simple effet. Donc l'objectif principal de ces cycles est d'obtenir des COP plus élevés. Ils peuvent être considérés comme une combinaison de plusieurs cycles à simple effet. La structure de ces machines permet de faire utiliser la chaleur introduite à la

source chaude plusieurs fois, d'où le terme plusieurs effet. Plusieurs structures sont développées actuellement. Cycle frigorifique à absorption à triple effet opérant à quatre niveaux de pression.

Des études théoriques du système à absorption à double effet ont été menées pour différents fluides, aussi plusieurs types de cycle à absorption à multi effets ont été analysés tel que le cycle à absorption à triple effet, et le cycle à absorption à quadruple effets. Cependant il faut noter que l'amélioration du *COP* n'est pas directement liée à la différence de nombre d'effets, car lorsque ces derniers augmentent le *COP* de chaque effet ne sera pas assez grand par rapport à un système à simple effet. En outre, un grand nombre d'effets conduit à un cycle avec design complexe, par conséquent seul le cycle à double effet a été commercialisé (.A. Yattara et al, 2003)

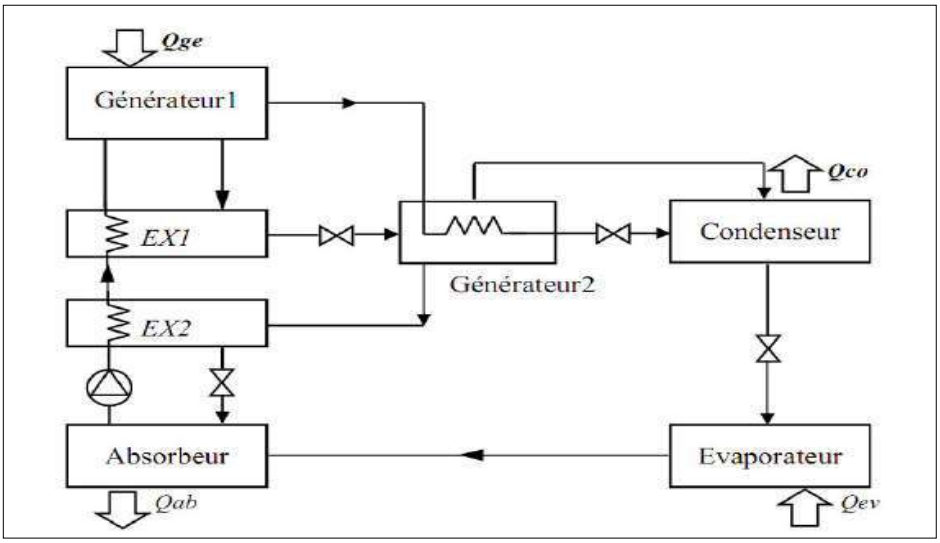


Figure 3. 7: Cycle à absorption à double effet

3.3.8. Calcul Thermodynamique d'une machine frigorifique à absorption:

Pour le calcul thermodynamique on utilise :

- **Diagramme de Meckel**

L'utilisation de ce diagramme permet la détermination des enthalpies échangées dans le système.

❖ **Diagramme d'Oldham**

L'utilisation de ce diagramme permet d'évaluer les pressions de fonctionnement de machine ainsi que les concentrations du fluide a partir des pressions-températures-concentrations.

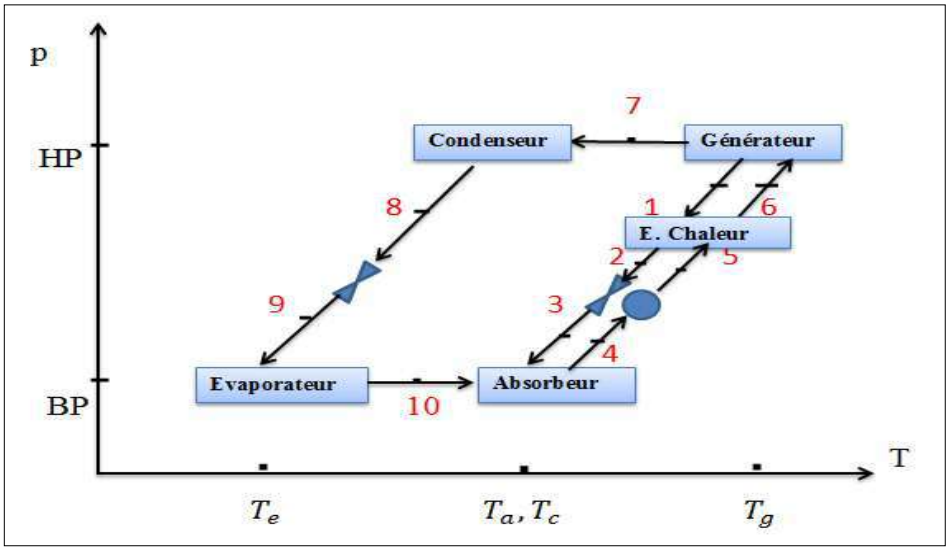


Figure 3. 8: Cycle thermodynamique d'une machine frigorifique à absorption

Le condenseur:

La puissance calorifique du condenseur (ϕ_c)

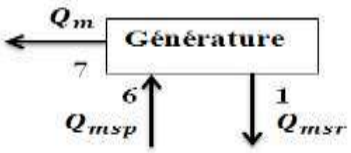
$$\phi_c = Q_m(h_7 - h_8) \tag{3.41}$$

L'évaporateur:

La puissance frigorifique du évaporateur (ϕ_e)

$$\phi_e = Q_m(h_{10} - h_9) \tag{3.42}$$

Le générateur:



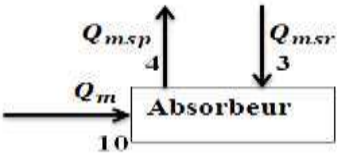
La puissance du générateur (ϕ_g)

$$\phi_g = Q_m h_7 + Q_{msr} h_1 - Q_{msp} h_6 \quad (3.43)$$

L'absorbeur :

La puissance de l'absorbeur (ϕ_a)

$$\phi_a = Q_m h_{10} + Q_{msr} h_3 - Q_{msp} h_4 \quad (3.45)$$



La pompe :

La puissance thermique conservée par le compresseur (ϕ_p)

$$\phi_p = Q_{msp}(h_5 - h_4) \quad (3.46)$$

On néglige la pompe ($h_5 \approx h_4$)

Le coefficient de performance (Cop)

$$\text{Cop} = \frac{\phi_e}{\phi_g} = \frac{Q_m(h_{10} - h_9)}{Q_m h_7 + Q_{msr} h_1 - Q_{msp} h_6} \quad (3.47)$$

3.4. Réfrigération magnétique

3.4.1. Introduction

La réfrigération magnétique est une technologie propre pour l'environnement qui semble prometteuse (K. Gschneider et al,2005), En effet, cette technologie exploite l'effet magnétocalorique (K.G.V. Brown,1976), qui se traduit par une variation instantanée et réversible de la température et de l'entropie des matériaux magnétiques sous l'effet d'une variation de champ magnétique.

En 1976 Barclay et al. ont construit un réfrigérateur magnétique tournant à régénération, celui-ci opère entre 4 °K et 15 °K et produit 0.9 W [Yu 2003].

Dans la même année Brown fut le premier à appliquer la réfrigération magnétique, autour de la température ambiante au ''Lewis Research Centre of American National Aeronautics and Space Administration'' [Yu 2003]. En utilisant le gadolinium (Gd) comme matériau de

fonctionnement, il a atteint 47° K avec un champ magnétique de 7 T. En 1989, le laboratoire de ‘‘Los Almos DOE’’ dépose le brevet de la réfrigération magnétique active [Shanov 2004].

Des études théoriques et expérimentales menées principalement aux USA par Gschneidner, Zimm et Pecharsky. ont démontré la validité et l’efficacité du procédé dans la fabrication du froid et, en 1996, Zimm et son groupe de recherche ont développé un réfrigérateur basé sur la réfrigération magnétique active produisant entre 500 et 600 W de puissance froide sous un champ de 5T [Zimm 98].

3.4.2. Définition

L’effet magnétocalorique (EMC) est une propriété intrinsèque des matériaux magnétiques qui consiste à absorber ou à émettre de la chaleur sous l’action d’un champ magnétique [Tishin 1999]. Cela se traduit par le réchauffement ou le refroidissement (tous deux réversibles) du matériau.

Dans les matériaux à effet magnétocalorique, un changement significatif de l’entropie peut être effectué par l’application ou la suppression d’un champ d'induction magnétique B .L’EMC ne dépend que de la température initiale du matériau T et du champ d'induction magnétique B. et peut être interprété comme étant le changement isotherme de l’entropie ou le changement adiabatique de la température

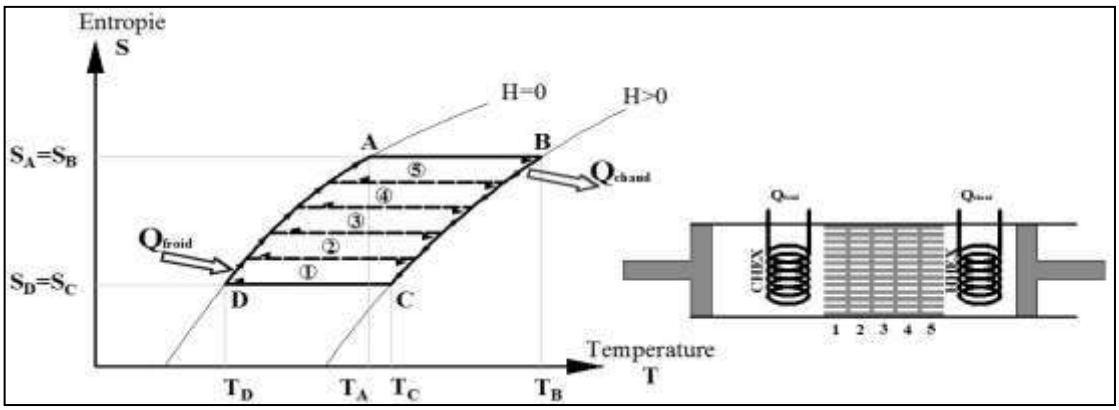


Figure 3. 9*:* Cycle d’AMRR (Brayton).

L’entropie spécifique S est fonction de la température T et de l’induction B dans un matériau magnétocalorique, est une combinaison de l’entropie magnétique m S , de l’entropie du réseau r et de l’entropie des électrons de conduction S (supposée négligeable).

3.4.3. Principaux matériaux magnétocaloriques

Il existe un très grand nombre de matériaux magnétocaloriques qui ont été étudiés depuis la découverte de l'EMC géant. La revue écrite par Gschneidner Jr. et Pecharsky recense près de 200 matériaux [Gschneidner Jr. *et al.*, 2005].

On distingue six grandes familles de matériaux magnétocaloriques [Tishin et Spichkin, 2003]:

- Les métaux 3d et leurs alliages : Fe, Ni, Co, MnAs, MnP, MnFePAs, FeRh, MnCu,
- Les oxydes : MnFeCrO, GdFeO, GdGaO, HoAlO, LaCaMnO,
- Les composés intermétalliques : DyAl, GdRh, TmCu, ErNi, LaFeSi, HoCo.
- Les composés terres rares-métalloïdes : GdSb, PrCoSi, GdGeSi.
- Les terres rares et leurs alliages : Gd, Dy, TbY, ErPr, TbDy.
- Les amorphes : GdFe, GdNi, DyFe, FeZr.

Pour chaque famille de matériaux, il peut y avoir plusieurs substitutions sont possibles. Ces modifications chimiques ont comme intérêt l'augmentation ou la diminution de la température de transition pour l'approcher de l'ambiante et l'augmentation de l'effet magnétocalorique (Pecharsky et Gschneidner Jr., 2006).

un matériau magnétocalorique doit présenter des propriétés caractéristiques:

- une température de Curie proche de la température ambiante.
- une grande variation d'entropie massique et de température pour des variations de champ modestes.

3.4.4. Système de réfrigération magnétique

Suite au premier système de réfrigération magnétique construit par Brown en 1976, de nombreux chercheurs ont commencé à attacher de l'importance à la réfrigération magnétique autour de la température ambiante et ont développé consécutivement quelques systèmes intéressants.

- **Système magnétique de Brown**

Le système de Brown est un système tournant et emploie un cycle d'Ericsson [YU 2003].

- **Système magnétique de Steyert**

Un système alternatif avec un réfrigérant tournant, mettant en oeuvre un cycle de Brayton a été conçu par Steyert [YU 1998].

- **Système magnétique de Kirol**

Ce système a été conçu par Kirol [Yu 2003] sur le principe d'une machine tournante et d'un cycle d'Ericsson.

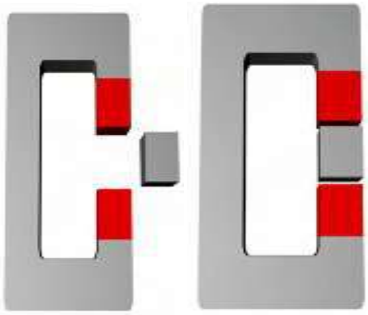
3.4.5. Application de l'effet magnétocalorique à la production du froid

La réponse d'un matériau magnétocalorique à un champ magnétique (aimantation /

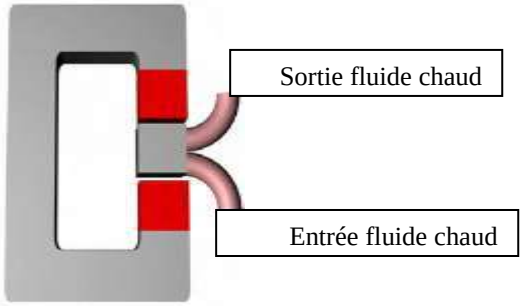
désaimantation) est similaire à la réponse d'un gaz à une compression ou une détention. Dans la réfrigération à compression, le gaz réfrigérant est comprimé et sa température augmente. La chaleur induite est alors évacuée vers la source chaude. Lors de sa détente le gaz réfrigérant se refroidit permettant ainsi d'absorber la chaleur de la source froide ou de l'espace à refroidir.

C'est le cycle de fonctionnement de la réfrigération conventionnelle à compression. Ce cycle se reproduit n fois pendant la durée de fonctionnement. On peut reproduire ce cycle en remplaçant le gaz par le matériau magnétocalorique et les phases compression / détente par les phases aimantation / désaimantation. Ainsi, la répétition du cycle d'aimantation et de désaimantation jointe aux échanges thermiques avec les sources chaudes et froides appropriées remplace le fonctionnement du compresseur rencontré dans les systèmes conventionnels.

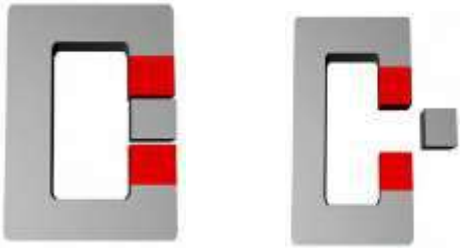
Réfrigération Magnétique



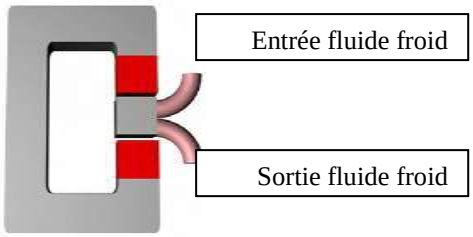
Etape 1 : L'aimantation du matériau entraîne une Echange avec la source chaude



Etap2 : augmentation de sa température



Etape 3 :Désaimantation du matériau entraînant son refroidissement



Etape 4 : Echange avec la source froide

3.4.5.1. Régénérateur magnétique actif

Le dispositif permettant d'exploiter l'effet magnétocalorique, présenté sur la figure 1, est appelé régénérateur magnétique actif (AMR : Active Magnetic Regenerator), dont il existe différentes configurations (C. Vasile, C. Muller,2006) et (J.A. Barclay, S. Sarangi,1984) .

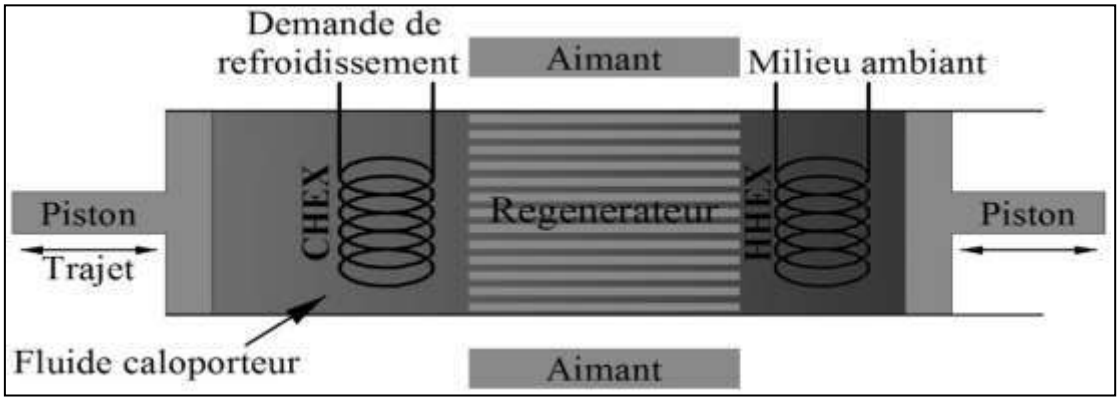


Figure 3. 10: Schéma de fonctionnement d'un Régénérateur Magnétique Actif

Le régénérateur est un lit poreux de matériau magnétocalorique (Gadolinium), qui est utilisé pour transférer la chaleur vers et à partir du fluide en mouvement, dans un procédé cyclique, afin d'obtenir des différences plus importantes de température entre l'échangeur de chaleur froid (CHEX) et l'échangeur de chaleur chaud (HHEX). Les prototypes construits ont obtenu de différences température autour de 30°K, avec un COP compris entre 3 et 15, avec une efficacité pouvant atteindre les 60% du cycle de Carnot (K. Gschneider Jr, V.K. Pecharsky.2006).

Le principe de fonctionnement est basé sur le lit poreux de matériau magnétocalorique

et c'est le fluide caloporteur qui va transférer la chaleur. Le déplacement du fluide est réalisé par deux pistons situes de part et d'autre de l'AMR, côté froid et côté chaud. A la première étape, l'AMR est magnétisé par l'aimant sans circulation du fluide caloporteur. A la deuxième étape le fluide circule dans l'AMR encore magnétisé du côté froid vers le côté chaud. En se réchauffant lors de son déplacement, il transporte une partie de la chaleur rendue disponible par la magnétisation vers le côté chaud. Cette chaleur est alors évacuée vers le milieu ambiant au travers de l'échangeur de chaleur chaud (HHEX). A la troisième étape l'AMR est démagnétisé sans circulation du fluide et se refroidit. A la quatrième étape le fluide circule dans l'AMR démagnétisé du cote chaud vers le coté froid. Il est alors refroidi et va absorber de la chaleur par l'intermédiaire de l'échangeur froid (CHEX). Ainsi, à chaque aller-retour

du fluide dans l'AMR, une certaine quantité de chaleur sera transportée de la source froide à la source chaude. Le cycle magnéto-thermodynamique le plus efficace pour un réfrigérateur magnétique opérant à température ambiante est le cycle AMRR (Active Magnétique Régénérative Réfrigération), similaire à un cycle de Brayton. Il se compose d'une magnétisation et d'une démagnétisation isentropiques et d'un refroidissement et un chauffage isochamps. Ce cycle est basé sur le fait que l'AMR s'assemble à une multitude de petites machines thermodynamiques en série opérant chacune à un niveau de température différent. Alors chaque tranche de MMC est réchauffée par le fluide provenant des tranches adjacentes à un niveau de température supérieur. Ainsi la circulation du fluide caloporteur, de façon synchrone avec la variation du champ magnétique, va créer un gradient thermique dans l'AMR. Il est toutefois important que le déplacement du fluide dans l'AMR ne soit pas trop important. Dans le cas contraire, le fluide détruirait le gradient thermique

3.4.5.2. Dispositif du G2Elab

Le dispositif réalisé au G2Elab (Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble) est de type alternatif, comme le montre la figure 3.11. Le régénérateur est constitué de plaques parallèles de gadolinium de 1 mm d'épaisseur et de 50 mm de longueur.

Le champ magnétique est produit par un aimant permanent (cylindre d'Halbach) créant un champ magnétique de 0.8 T. Le fluide utilisé est l'eau. Sa circulation est assurée par une pompe péristaltique fonctionnant dans les deux sens. Le vérin pneumatique produit le mouvement du bloc réfrigérant et assure les phases aimantation / désaimantation. L'automate programmé permet de gérer le vérin et la circulation du fluide pour effectuer les 4 phases de ce cycle. Le système est fermé et il n'y a pas d'échange avec l'extérieur. Il a été conçu pour étudier le cycle AMRR et l'exploiter réellement en utilisant différents matériaux.

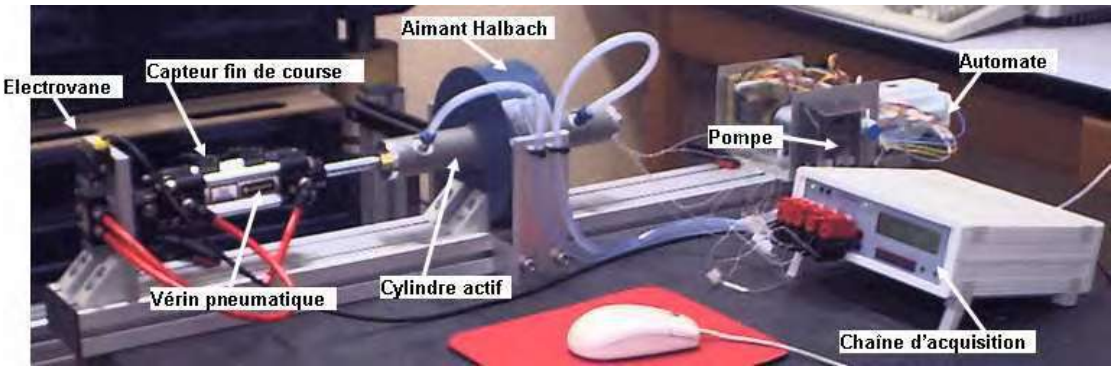


Figure 3. 11: Dispositif du G2Elab

3.4.5.3. Système magnétique de Zimm

L'ACM (Astronautics Corporation in Madison) a conduit de nombreux travaux de recherche sur la réfrigération magnétique et déposé plusieurs brevets dans ce domaine [Engelbrecht 2005]. Dans cette corporation, un système d'AMRR a été conçu, celui-ci est composé d'une roue avec 6 lits régénérateurs, eux-mêmes composés de gadolinium en poudre [Zimm 2002]. Cette roue est en rotation à travers une zone de fort champ magnétique de 1.5 T. Les lits régénérateurs échangent avec le fluide dont la circulation est correctement réglée en fonction de la position relative de chaque lit par rapport au champ magnétique.

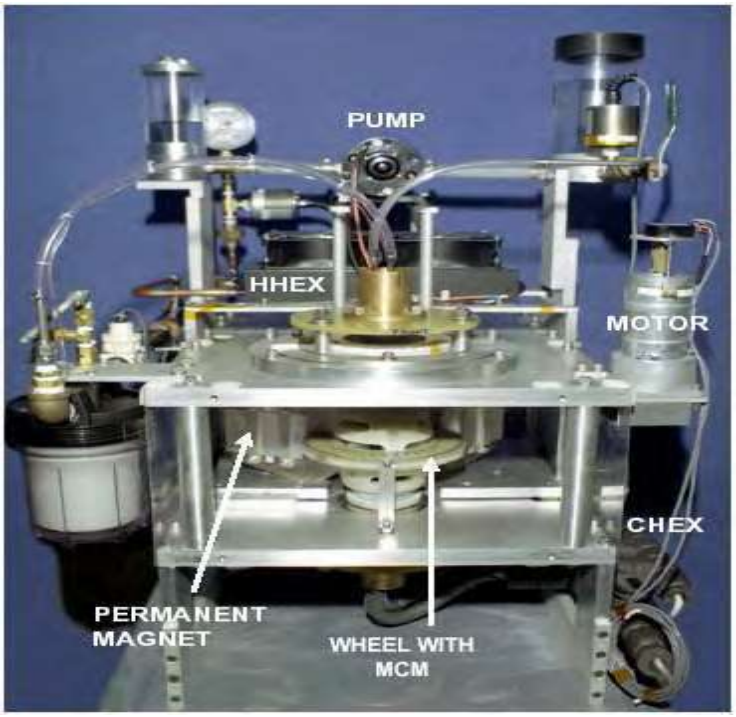


Figure 3. 12: Dispositif ACM (USA 2002)

3.4.6. Conclusion

La réfrigération magnétique constitue une alternative à la technologie classique de production du froid. Elle est prometteuse et devrait permettre de réaliser des systèmes compacts et à haute efficacité énergétique tout en préservant l'environnement. Elle répond de ce fait aux préoccupations actuelles relatives à la maîtrise et l'économie de l'énergie et à la réduction des gaz à effet de serre.

3.5. Installation frigorifique à éjecto-compression

3.5.1. Introduction

Les études sur les fluides dits naturels sont nombreuses, en particulier celles qui sont relatives à l'emploi des hydrocarbures et du CO_2. L'ammoniac, les hydrocarbures et le R717 commencent a être utilisés dans le domaine du froid mais nécessitent de nombreuses améliorations pour être compétitifs vis-à-vis des réfrigérants HCFC ou HFC: au niveau du développement du matériel lié à la production de froid , mais aussi au niveau des connaissances des propriétés physiques des gaz. La nécessité de la minimisation des charges en fluide dans les machines a conduit à développer des études sur le comportement des systèmes trithèrme. (Selvaraju.A, Mani. A.2003)

3.5.2. Description de l'installation frigorifique à éjecto-compression

3.5.2.1. Différents éléments de la machine :

La machine frigorifique à éjecto-compresseur comporte cinq éléments principaux (bouilleur, éjecteur, condenseur, évaporateur, et colonne de distillation). Une machine à éjecto-compresseur en circuit fermé se compose de deux boucles : l'une motrice, l'autre frigorifique. Précisons tout d'abord qu'une telle machine utilise un compresseur statique, dénommé éjecteur, qui utilise comme énergie motrice de la vapeur du fluide primaire.

Cette machine utilise comme fluide un mélange binaire dont l'un des composants est beaucoup plus volatile que l'autre, et qui constituera le fluide frigorigène ou fluide secondaire, tandis que l'autre constituant sera appelé fluide moteur ou fluide primaire (Dorantes. R,1992)..

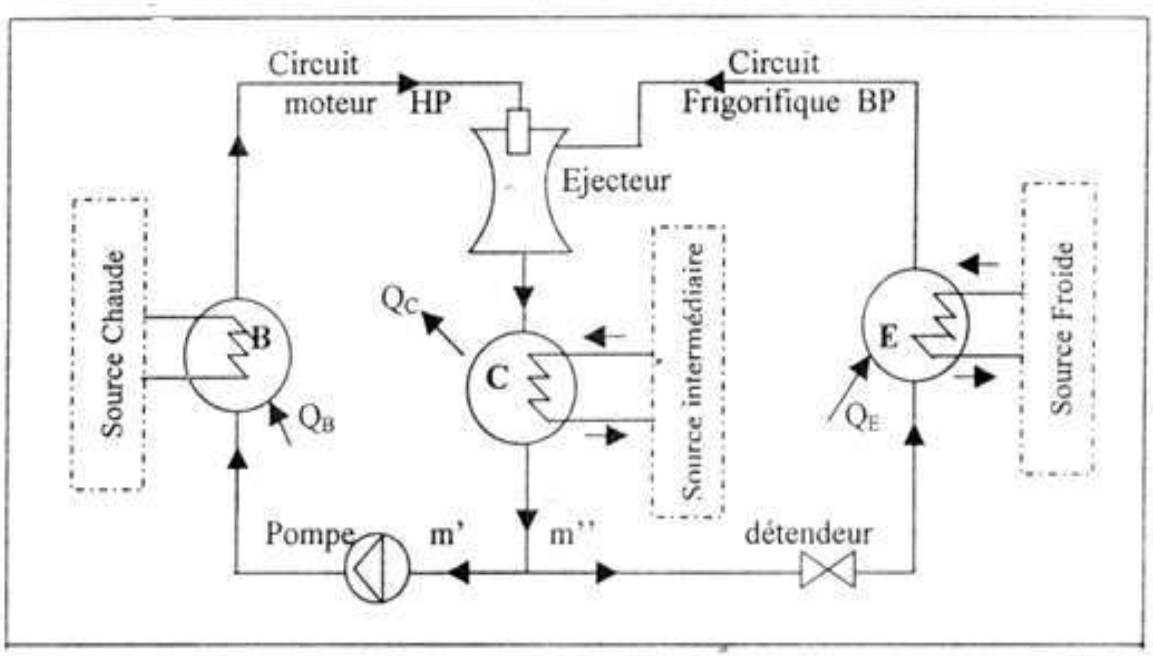


Figure 3. 13*:* Schéma d'une machine frigorifique à éjecto- compresseur

L'éjecteur:

L'éjecteur est l'élément essentiel du système tritherme à éjecto-compresseur. Il est composé d'une tuyère motrice et d'une tuyère secondaire en trois parties, partie convergente, chambre de mélange, partie divergente du diffuseur. L'éjecteur est l'élément où s'effectue le mélange des deux fluides (primaire et secondaire). C'est aussi un compresseur statique qui sert à

augmenter la pression, donc, c'est un élément moteur de la machine dans laquelle le fluide moteur aspire le fluide de la boucle frigorifique. La partie active de l'éjecteur consiste en un système de deux tuyères coaxiales liées par un collecteur d'aspiration.

Le fluide moteur sous pression est admis à l'entrée de la tuyère primaire, arrivé dans le collecteur, il entraîne le fluide secondaire issu de l'évaporateur. Les deux courants fluides pénètrent ensuite dans la seconde tuyère où après mélange, ils sont comprimés dans le diffuseur jusqu'à la pression du condenseur.

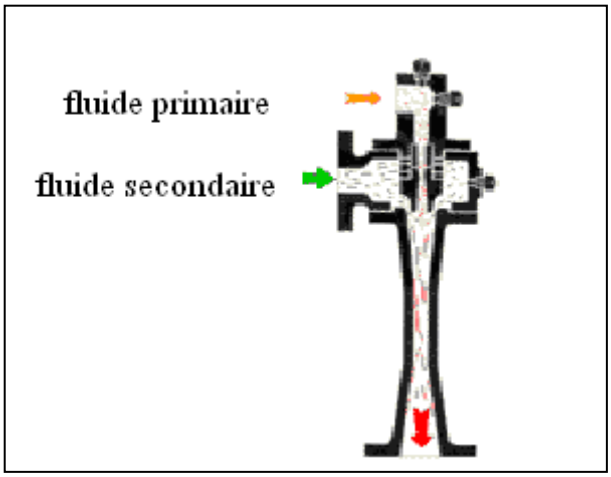


Figure 3. 14: Schéma d'un éjecteur

L'abaissement de température de l'eau, qui se vaporise sous basse pression est obtenue en aspirant la vapeur formée au moyen d'un éjecteur, ou trompe, alimenté par un jet de vapeur vive provenant d'une chaudière. L'éjecteur est une tuyère d'abord convergente, l'accroissement de la vitesse du jet diminue la pression ce qui permet l'aspiration voulue, puis lentement divergente, l'augmentation progressive de la section offerte à la vapeur ralentit sa vitesse et la pression remonte. Ce système qui a des créneaux d'utilisation bien spécifique est peu répandu.

L'éjecteur est l'élément essentiel de l'installation frigorifique à éjecto-compression il comporte trois éléments principaux :(Nahdi. E**,**1989**)**

a. Le tuyère primaire : permet de fluide moteur de la conversion de son enthalpie en énergie cinétique pour entraîner le fluide secondaire.

b. Tuyère secondaire : porte du vapeur qui vienne de l'évaporateur pour être entraîné et aspiré par le fluide moteur (fluide primaire).

c. Chambre de mélange : après la décompression du fluide moteur dans la tuyère motrice et l'aspiration du fluide secondaire par le fluide primaire, les deux fluides se mélangent dans la chambre de mélange (dans le convergent) et ensuite ce dernier se comprime à travers le diffuseur.

La figure (3.14) montre la présence de deux tuyères, une motrice et l'autre secondaire, cette dernière se compose de trois parties : une partie convergente, une partie de section constante cylindrique ou rectangulaire (chambre de mélange ou mélangeur) et une partie divergente (le diffuseur subsonique) (Dutton. J. c. Carroll. B. F,1986).

3.5.3. Principe de fonctionnement de la machine à éjecto- compresseur :

La vapeur motrice provenant d'une buse d'alimentation pénètre dans la tuyère de détente d'un éjecteur et aspire la vapeur en provenance de l'évaporateur. La première partie de l'éjecteur étant de forme convergente, la vitesse de la vapeur s'accroît tandis que simultanément sa pression diminue (Berkoune. A. ,2002).

La vapeur de fluide frigorigène se trouve donc aspirée par la vapeur du fluide primaire, le mélange pénétrant ensuite dans la partie divergente de l'éjecteur, la vitesse du mélange diminue tandis que la pression augmente jusqu'à atteindre la pression de condensation. Dans cette installation, le moto-compresseur est remplacé par l'éjecteur qui va réaliser le processus de compression en utilisant l'énergie cinétique du fluide moteur pour aspirer, entraîner et comprimer le fluide secondaire.

La partie liquide du fluide qui, comprimé par une pompe, est envoyé au bouilleur ou il prendra la chaleur pour être vaporisé. Cette vapeur se détend à haute pression et température, dans la tuyère primaire, avant d'aspirer et entraîner la vapeur issue de l'évaporateur **(**Alexis. G. k**.,** 2005), Le mélange des fluides comprimés sera envoyé au condenseur, pour la liquéfaction, avec le dégagement de chaleur pour former le cycle moteur. L'autre partie commence par la détente dans le détendeur puis traverse l'évaporateur pour s'évaporer en créant l'effet frigorifique. Ce fluide sera aspiré par le fluide primaire pour être entraîné vers le condenseur, pour clôturer le cycle secondaire ou frigorifique.

Coefficient de performance réel (pratique) :

II représente le rapport de production frigorifique au niveau de l'évaporateur à la puissance calorifique du bouilleur. Pour le cycle à éjecto-compression, l'efficacité frigorifique est donnée comme suit :

$$\varepsilon_f = \frac{Q_E}{Q_B + W_P}$$

Où, Q_E et Q_B sont les quantités de chaleur fournie à l'évaporateur et utile pour le bouilleur, respectivement. W_F est la puissance de la pompe

En négligeant le travail de la pompe on peut écrire:

$$COP = \frac{Q_E}{Q_B}$$

3.6. Confinement de charge par utilisation des micro-canaux

3.6.1. Introduction

Des solutions alternatives visant la diminution des quantités des réfrigérants contenus dans les installations frigorifiques. Les progrès les plus spectaculaires et les plus immédiats peuvent être accomplis par la réduction drastique des charges de HFC et dans l'obtention d'un très haut niveau de confinement afin de limiter leur impact sur l'effet de serre additionnel. Selon les applications, il est possible de limiter la charge jusqu'à plus de 80 %. De nouvelles voies s'ouvrent pour le développement des systèmes de condensation à eau qui permettent à la fois une réduction de la charge de fluide frigorigène et un très faible accroissement de la consommation d'énergie, voire même une amélioration de l'efficacité énergétique lorsque les tours de refroidissement sont utilisables. il est possible, par la décentralisation relative des systèmes de production de froid, de limiter la charge et d'améliorer l'efficacité énergétique. L'évolution des quantités annuelles de HFC constituera la vérification que la réduction des charges, le confinement et la récupération constituent une politique d'utilisation acceptable des fluides à GWP élevé. Le micro échangeur est un appareil qui permet le transfert de chaleur d'un fluide chaud a un fluide froid constitué par des micro-canaux., micro-évaporateur, micro-condenseur.

3.6.2. Domaines d'utilisation des micro- échangeurs

- le conditionnement d'air dans l'automobile.
- Les pile a combustible
- Le refroidissement des composants électroniques
- Les microsystèmes de réfrigération

3.6.3. Classification des Micro-échangeur:

La classification des micro-échangeurs est repartie selon la méthode de fabrication :

3.6.3.1. Matière de fabrication:

- **Le cuivre :**

Ils y a beaucoup de matière pour la fabrication des échangeurs thermique ou les Micro-échangeurs et ces matières sont dépend de son conductivité thermique comme le Cuivre qui transfert la chaleur avec la conductivité thermique $\lambda = 390$ [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$] .

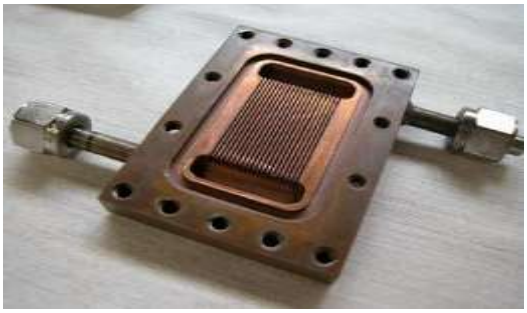


Figure 3.15 .: Micro évaporateur en cuivre

Le Silicium: il transfert la chaleur avec la conductivité thermique $\lambda = 149$ [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]. (Louhailia et V.Pertini,2009)

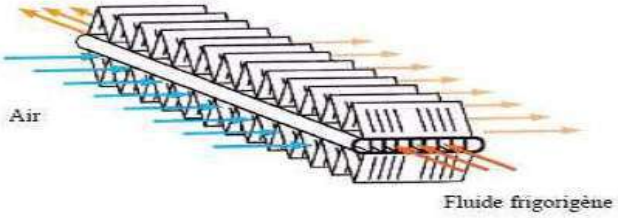


Figure 3. 15 : Micro évaporateur en silice

3.6.3.2. Forme de micro-canal :

Différentes techniques possibles d'usinage de l'acier et de cuivre sont disponibles pour faire les géométries suivantes :

Les différentes formes existant pour l'étude d'un canal, utilisé pour la conception d'un micro-échangeur de chaleur dans les machines frigorifiques à micro canaux, Il y a trois dimensions de la configuration des géométries des dimensions ou des diamètres hydrauliques de 247.2 µm et 400 µm et 229.2 µm respectivement de la section circulaire trapézoïdale triangulaire et on prend le long de le micro-canal est 1 mm, la figure ci-dessus montre les structures.

ci-dessous, quelques exemples de micro-échangeur de chaleur. Prise au microscope électronique pour montrer la diversité qui existe. Cela illustre assez bien la difficulté d'étudier et de concevoir ces petits systèmes. (Ahmad Odaymet, 2010)

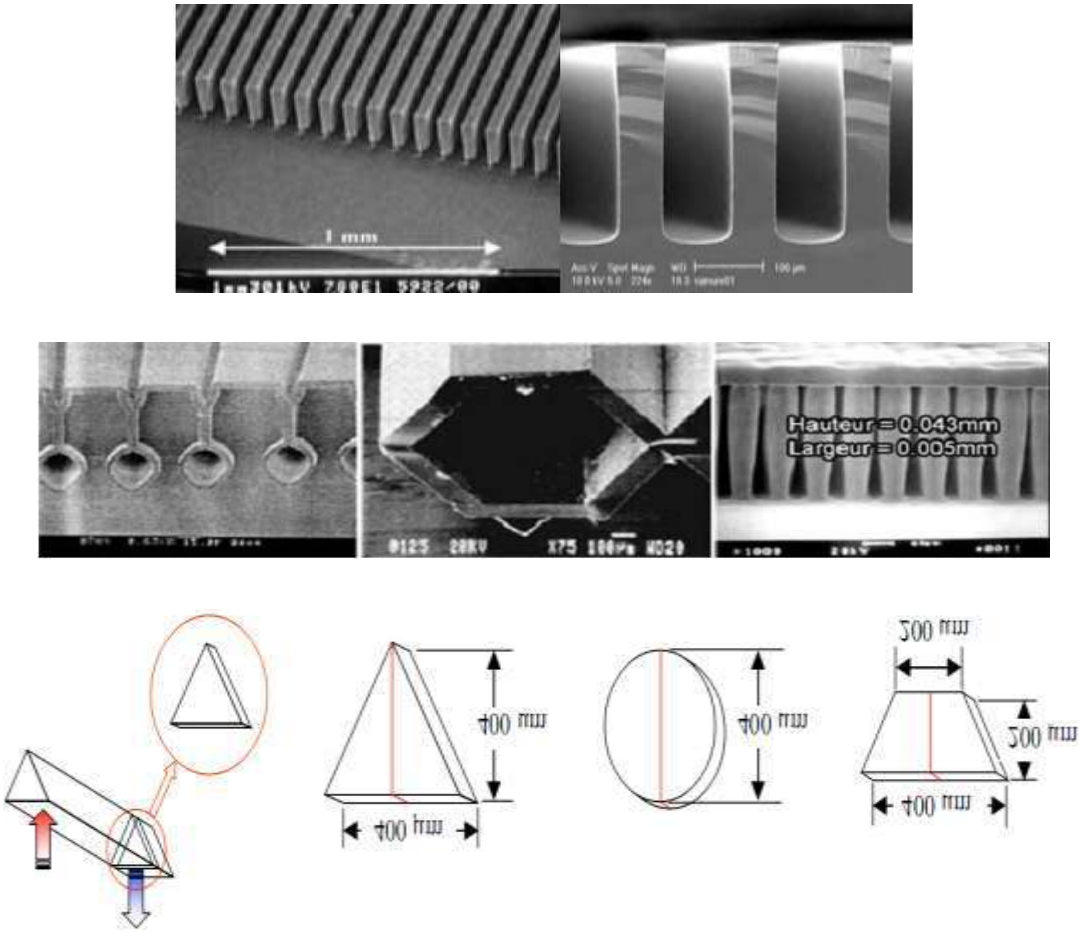


Figure 3. 16: Différentes formes géométriques des micro-canaux

3.6.3.3. Diamètre de micro-canal :

Le diamètre des canaux c'est l'un des autres facteurs qui on prendre en compte a la fabrication des micro-échangeurs, Leur conception réduire la taille des échangeurs à de très petites échelles en ayant le même niveau de performances, est bien supérieur que les systèmes classiques. Les différents micro-échangeurs sont classés par ordre de grandeur du diamètre des canaux.

Le tableau suivant montre d'une façon claire les différents diamètres appliqués pour l'étude d'un micro-échangeur.

Tableau 3. 2*:* Classement des diamètres des micro-canaux

Canaux Conventionnels	D > 3 mm
Mini-canaux	3 mm > = D >0.2 mm
Micro-canaux	0.2 mm > = D > 0.01 mm
Canaux transitionnels	0.01 mm > = D >0.0001 mm
Nano-canaux Moléculaires	0.0001 mm > = D

3.6.4. Avantages et Inconvénients des micro-échangeurs :

- **Avantages:**
  - Volume et masse du composant réduits (transport, Froid).
  - Faible quantité de fluide (fluide cher, Rare, Toxique, Explosif.).
  - Application aux : Biotechnologies, Pharmacie, Climatisation.
  - Temps de réponse thermique faible : Chimie, Biotechnologies.
- **Inconvénients :**
  - Pertes de pression élevées.
  - Nécessité des fluides très propres, Filtres de protection.

3.7. Stockage de froid

3.7.1 Introduction

Le stockage de froid, sous forme de glace ou d'eau glacée, dans les réseaux de climatisation urbaine, deviennent populaires du fait des nombreux avantages qu'ils possèdent. Le stockage présente un avantage certain; puisqu'il apporte en été une puissance supplémentaire ajoutée sur le réseau. Cette puissance ajoutée, par stockage la nuit de l'énergie excédentaire par rapport au besoin pour une restitution sur les heures maximales de pointe, est souvent

économique, si l'on rapporte le coût du stockage à la puissance qu'il permet de produire. (IIF, 2015).

3.7.2. Différents types de stockage de froid :

Soit de l'eau glacée , soit de la glace, sont utilisés pour accumuler du froid. Cependant alors que l'eau froide peut permettre de stocker 10 kWh par m^3 de réservoir, l'utilisation de la glace est plus efficace et permet de stocker 50 kWh par m^3 de stockage.

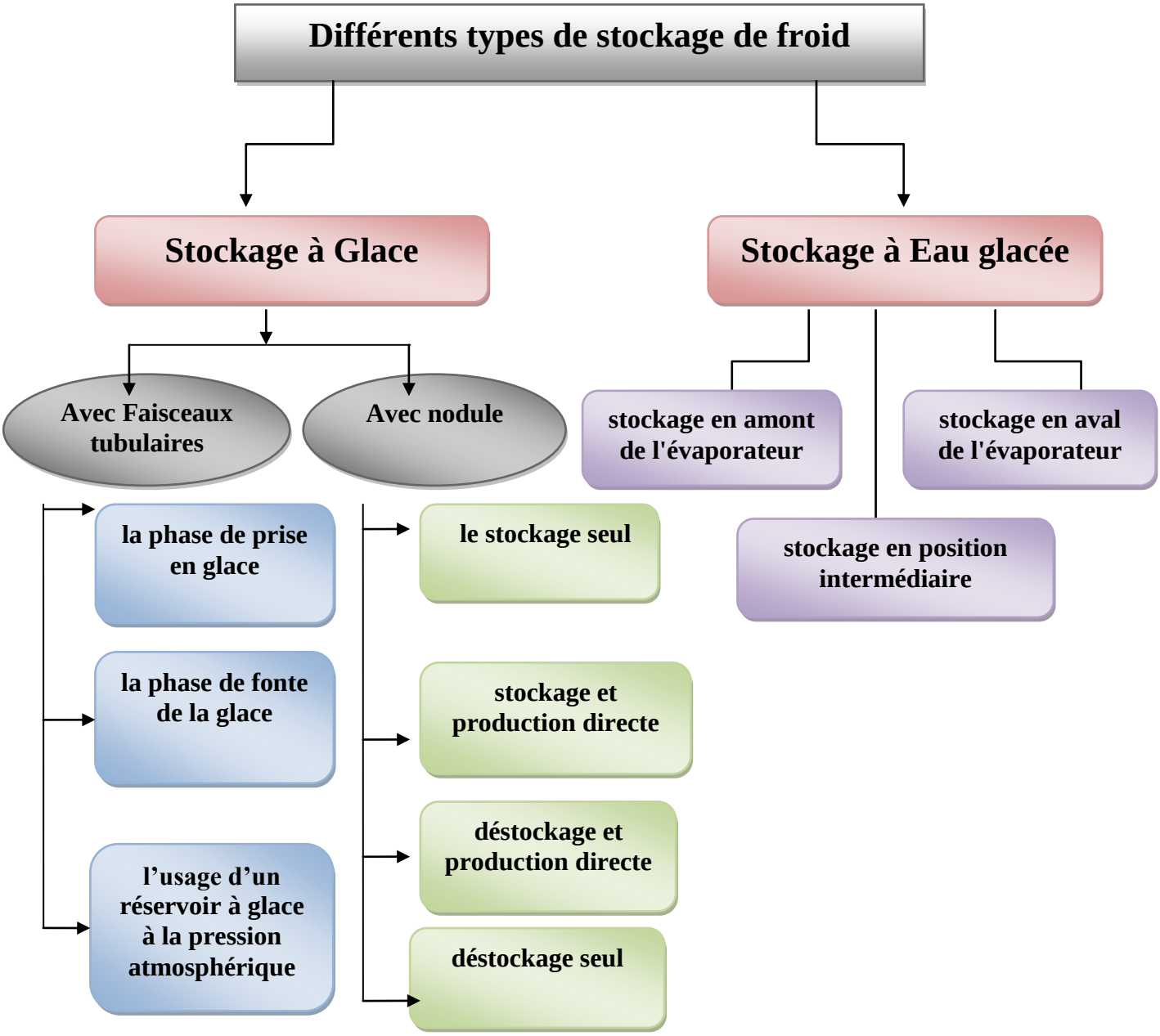


Figure 3. 17: Différents types de stockage de froid

3.7.2.1 Stockage à eau glacée :

❖ **Principe :**

Il s'agit d'un réservoir d'eau glacée, disposé sur le circuit d'eau glacée des installations de climatisation. Il permet d'accumuler du froid, particulièrement durant la nuit.

On l'appelle encore "ballon d'eau glacée" ou "bâche d'eau glacée, Il se dissocie de son "concurrent", le stockage par bac à glace, par le fait que la réserve de froid ne se fait que sur la chaleur sensible de l'eau, entre 12° et 5°C.

La machine frigorifique conserve ses caractéristiques traditionnelles de température de travail, et donc son rendement.

- L'installation est simple et sa régulation aussi.

On distingue trois types schémas d'installations (J. PATRY et al, 2015)

- Stockage en amont de l'évaporateur.
- Stockage en aval de l'évaporateur.
- Stockage en position intermédiaire.

1 .Stockage en amont de l'évaporateur :

Le ballon de stockage est placé en série, sur le retour d'eau glacée des batteries froides

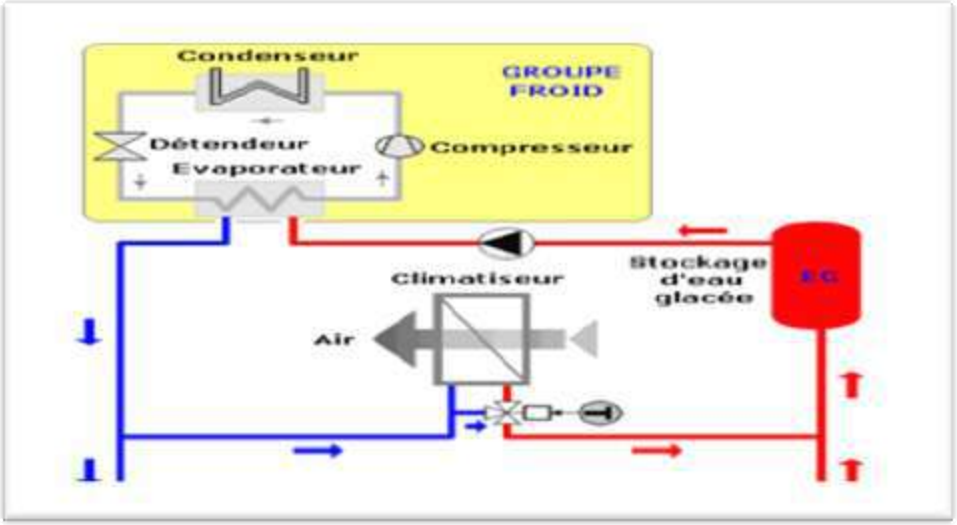


Figure 3. 18 : Schéma de stockage en amont de l'évaporateur

- le fonctionnement du groupe frigorifique est stable**.** Le réservoir est placé avant l'évaporateur de l'installation frigorifique.

2. Stockage en aval de l'évaporateur:

Le ballon de stockage est placé en série, sur le départ de l'eau glacée vers les batteries froides.

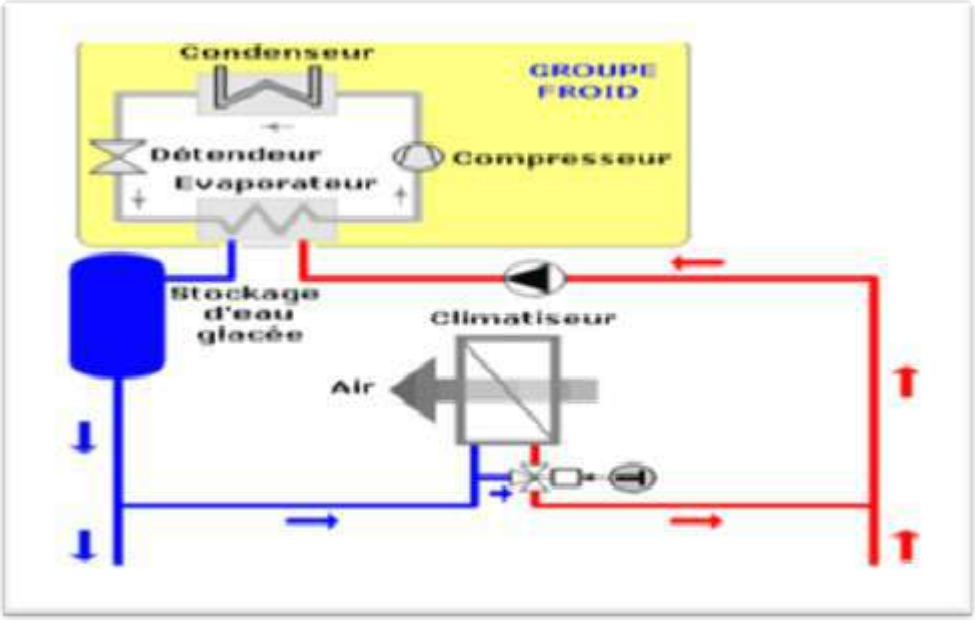


Figure 3. 19: Schéma de stockage en aval de l'évaporateur

la température de l'eau d'alimentation des batteries froides est stable, Le réservoir est placé après l'évaporateur de l'installation frigorifique.

3. Stockage en position intermédiaire :

Le ballon de stockage est un élément tampon intermédiaire, séparant le circuit de production de l'eau glacée du circuit de l'utilisation.

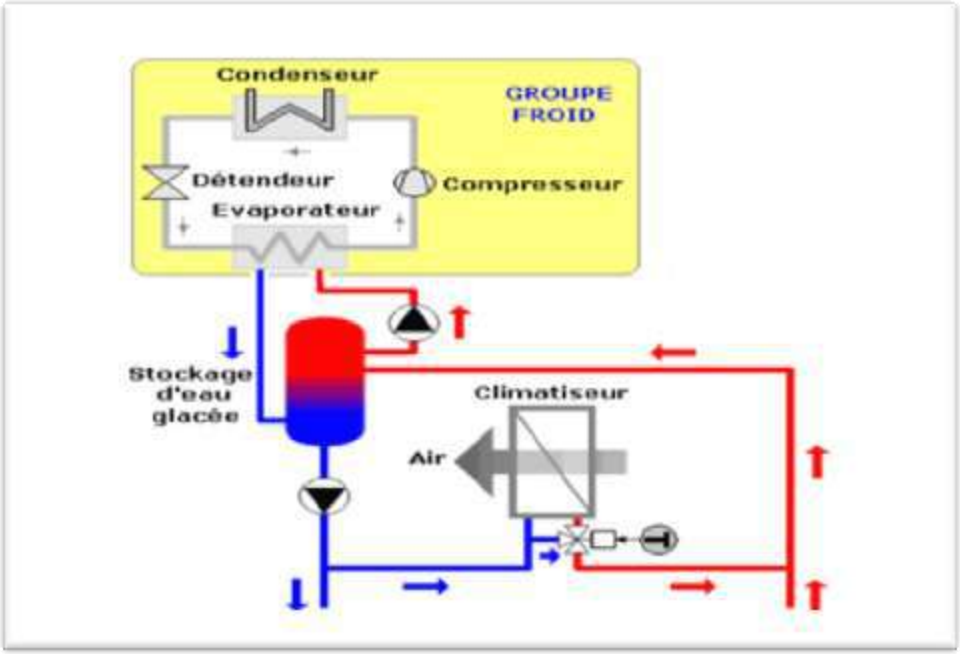


Figure 3. 20: Schéma de Stockage en position intermédiaire

Les deux circuits sont découplés hydrauliquement, chacun disposant de sa propre pompe, Le ballon se comporte comme une bouteille de découplage hydraulique (casse pression).

3.7.2.2 Stockage à glace:

- **Principe** (NT– GLACEO.2011 **) :**

Il s'agit d'un réservoir de glace, disposé en parallèle ou en série avec le circuit d'eau glacée des installations de climatisation. Il permet d'accumuler du froid, particulièrement durant la nuit.

la réserve de froid profite de la chaleur latente de l'eau ou d'un sel :

- Au moment du refroidissement (phase de stockage), il y a cristallisation ou solidification, en plus du refroidissement de l’eau et de la glace.
- Au moment du réchauffement (phase de déstockage du froid), il y aura fusion en plus du réchauffement de l’eau et de la glace.

1 .Stockage de glace dans les bacs à faisceaux tubulaires

Au moment du stockage, un fluide réfrigérant (fluide frigorigène ou eau glycolée) circule dans les tuyauteries. La température du fluide avoisine les -5°C. L'eau glacée, en contact direct avec ces tubes, va former un enrobage de glace.

- **Construction de la glace**

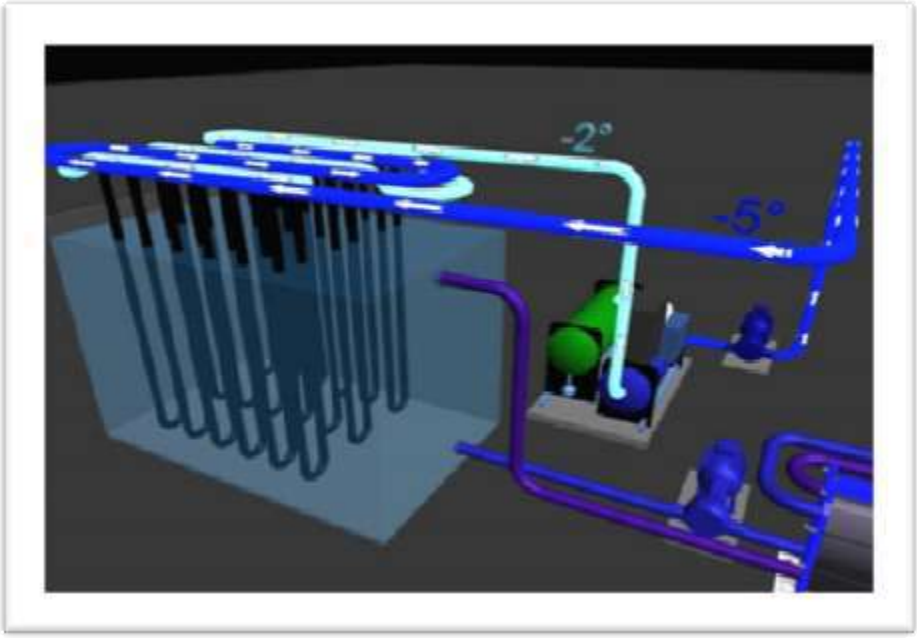


Figure 3. 21: Schéma de Construction de la glace

2. la phase de fonte de la glace.

Un tel circuit permet à la fois le déstockage du réservoir et la production frigorifique instantanée. L'échangeur intermédiaire permet de séparer le circuit de distribution rempli d'eau, du circuit de production rempli d'eau glycolée, ce qui diminue l'importance du volume de glycol à mettre en jeu. On pourra également s'inspirer du schéma du stockage de glace dans les bacs à nodules qui permet plus de variantes dans la régulation.

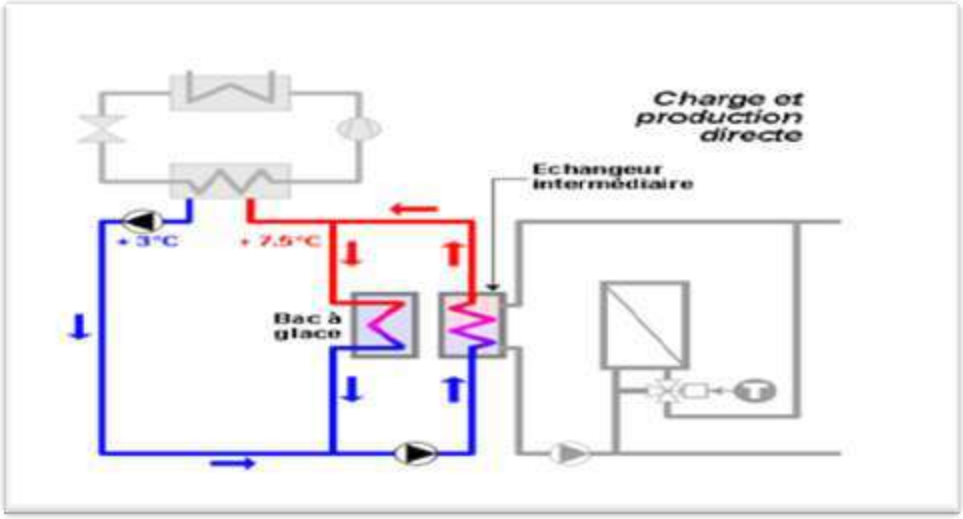


Figure 3. 22: **Phase de fonte de la glace**

- **Déstockage de la glace**

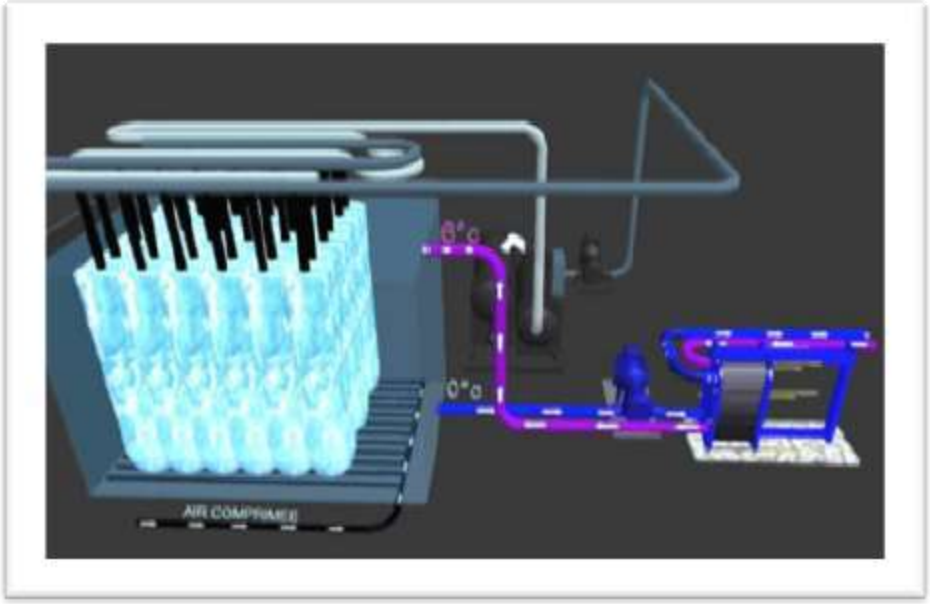


Figure 3. 23: Déstockage de la glace

3.L Stockage de glace dans les bacs à nodules :

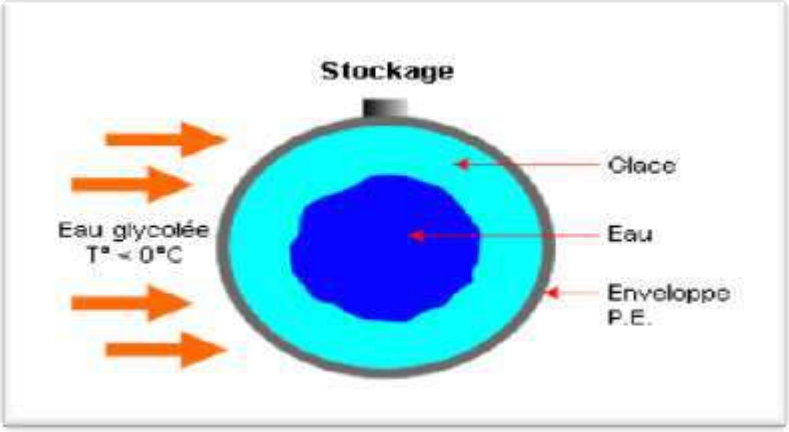


Figure 3. 24: Nodule, Phase de stockage

Phase de stockage : la température de l'eau est inférieure à la température de changement de phase des sels contenus dans les nodules, ceux-ci cristallisent

Phase de déstockage : la température de l'eau est supérieure, les sels des nodules fondent.

Le transfert thermique a donc toujours lieu par l'extérieur.

3.7.3. Réservoir de stockage d'eau glacée

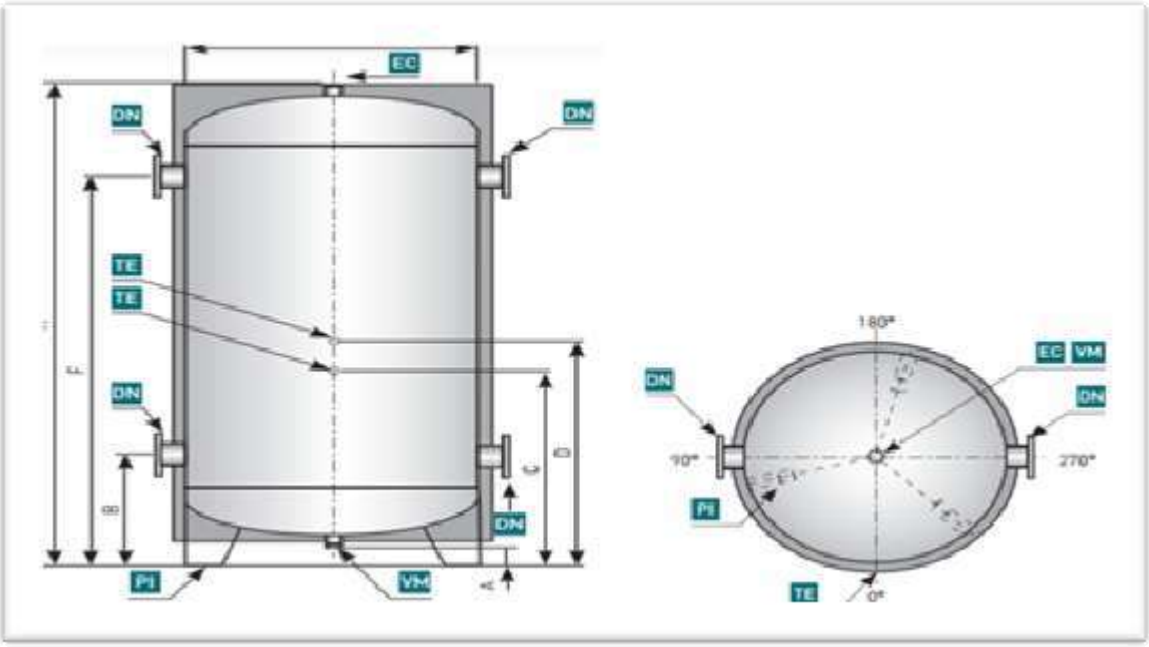


Figure 3. 25: **Réservoir de stockage**

réservoirs de stockage à froid en général rectangulaire ou cylindrique, doivent être utilisés dans des applications de stockage à froid forts clips pour surmonter les forces La pression hydrostatique de l'eau ou un mélange de glace et d'eau, et doit être bien court réservoirs Pour éviter les fuites et être résistant aux facteurs atmosphériques et à la corrosion, en ajoutant de préférence de l'isolant de l'humidité extérieure à côté de l'isolation thermique de la vapeur d'eau pour éviter d'atteindre le réservoir métallique.

Exemple les réservoirs modèle GLACÉO

Caractéristiques :

Cuve :

* Capacité de 200 à 3 000 litres.

* Pression de service maxi = 7 bar.

Tôle de finition aluminium, avec film protecteur. L'ensemble du réservoir est isolé par la mousse de polyuréthane (épaisseur standard 40 mm)., à cellules fermées, et permet le stockage d'eau glacée jusqu'à une température minimale de –8°C en standard (NT.GLACEO) sont destinés au stockage ou à la récupération d'énergie sur les circuits primaires, Leur usage permet de disposer d'une réserve d'eau froide, qui offre la possibilité :

- d'absorber les pointes de consommation.

- de limiter la puissance de groupe froid installé.

Chapitre 4

Contribution à l'application des solutions alternatives

4.1. Etude thermodynamique des mélanges réfrigérants HFC, Cas du R407c et R507

4.1.1. Introduction

les CFC, utilisés depuis très longtemps pour certaines de leurs propriétés souvent très particulières et intéressantes, il faut trouver des substituts aux propriétés similaires. Comme substituts aux CFC les chimistes ont proposés les HFC et les HCFC seuls les HFC sont habilités : se sont les substituts des CFC et HCFC., les HCFC à partir de Janvier 2015 et dont la production est actuellement limitée (Coquelet, 2003)

Autant la réglementation associée au Protocole de Montréal s'est traduite par un calendrier rapide d'arrêt de production des CFC et des HCFC.

Les propriétés thermodynamiques du certains fluides parmi les plus utilisés, actuellement dans le domaine du froid. Il s'agit des mélanges réfrigérants: R407C et R507.en utilisant la représentation par une équation cubique en volume et à deux paramètres qui est représentée par l'équation de Peng – Robinson Un code de calcul est proposé afin de faciliter l'application de cette équation et on comparant ses résultats à celles données par le logiciel Cool Pack.

L'application de l'équation de Peng-Robinson, dans le cas des fluides (R407C, R507) donne des résultats satisfaisants, pour la détermination des caractéristiques thermodynamiques, Les relations calculant les propriétés thermodynamiques des fluides frigorigènes HFC (Sozen et al 2007) (Jesus.E et al 2014) seront développée, Notre intérêt s'étant porté particulièrement sur les fluides frigorigène HFC :R407c et R507.

Le logiciel CoolPack est une collection de programme de simulation, qui peut être utilisée pour choisir, dimensionner, analyser et optimiser les systèmes de réfrigération. Il permet aussi d'avoir une base de données, les propriétés de transport et les propriétés thermodynamiques correspondantes à chaque fluide frigorigène.

Le logiciel Coolpack utilise les références suivantes :

· Dupont (SUVA 123) : R123
· D.Wilson et R.S.Basu, ASHRAE transactions1988,vol 94 : R134a
· W.C.Reynolds Thermodynamic properties in 81 : R600a
· Dupont (SUVAAc9000): R407C

Le logiciel Coolpack est l'un des logiciels les plus performants dans le domaine du froid. C'est pourquoi, nous avons choisi comme élément de référence dans notre travail.

4.1.2 Résultats et Discussion:

4.1.2.1 Cas du R407C

Le R-407C est un mélange azéotropique de trois fluides frigorigènes, (R32/R125/R134a) (23%/25%/52%) Il est reconnu comme un fluide de remplacement de R22 à long terme pour certaines applications sa capacité volumétrique correspond à celle du R22 pour le conditionnement d'air.

La figure 4.1: montre que les valeurs obtenues par l'utilisation de l'équation de PR permet d'aboutir à des valeurs semblables à celles données par le logiciel Cool Pack sur tous l'intervalle de pression pour le liquide saturé et présente une légère différence pour la vapeur saturée.

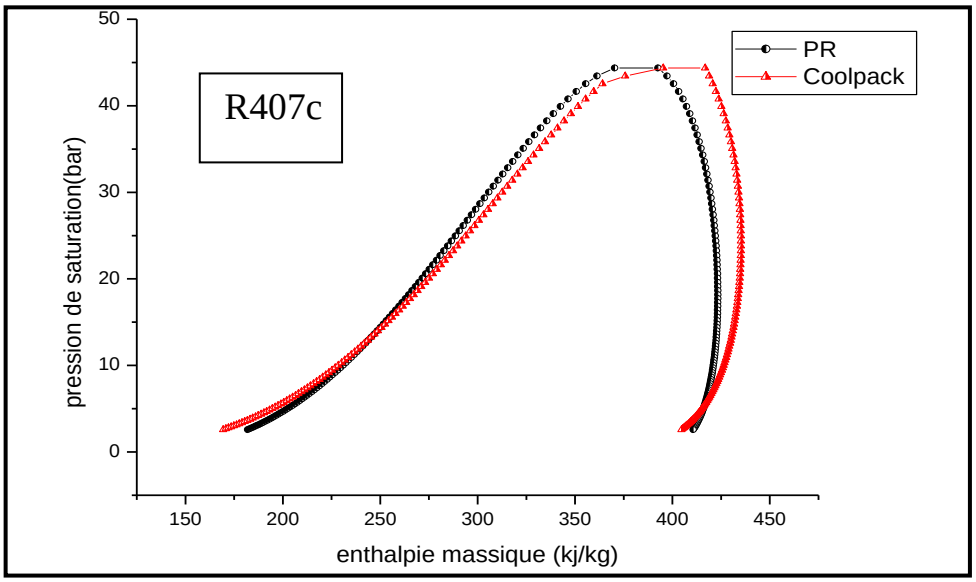


Figure 4. 1: Représentation de la courbe de saturation du R407C sur diag (P-H)

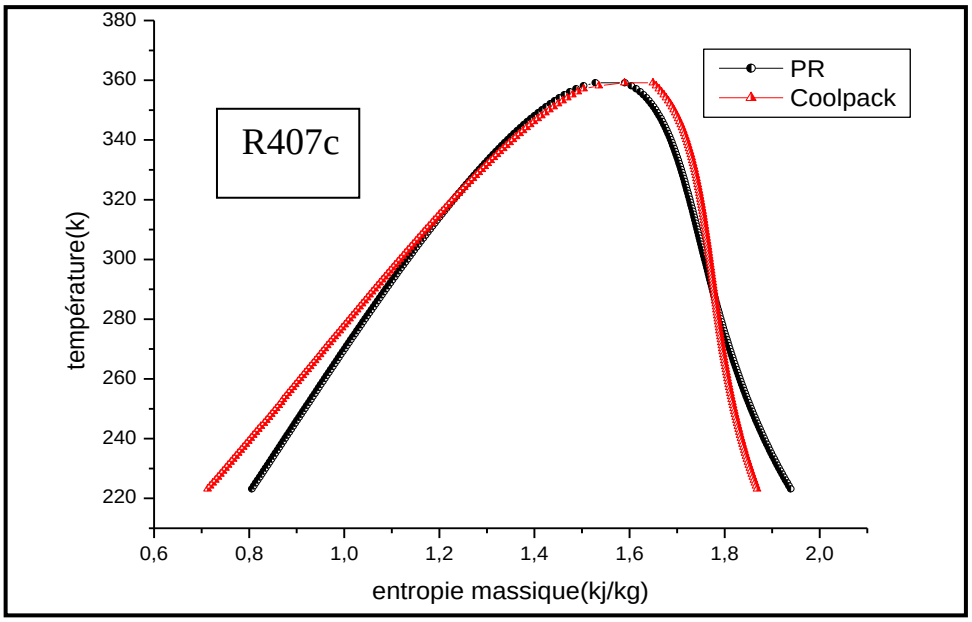


Figure 4. 2: Représentation de la courbe de saturation du R407C sur diag (T-S)

La figure 4.2 : montre que l'écart entre les courbes du liquide saturé obtenues à l'aide de la méthode de PR et celle tracée à partir du logiciel CoolPack sur l'intervalle de température [-53,-13°C]. est presque négligeable, Pour les valeurs de le liquide saturé la courbe de saturation montre l'équation de PR converge vers les valeurs du logiciel Cool Pack, pour les valeurs de pression supérieurs à 10 bar coté de la vapeur saturée les valeurs de PR sont très proche des valeurs données par le logiciel Cool Pack.

4.1.2.2. Cas du R507:

Le R507 est un mélange azéotropique composé de (R125/R143a) (50%/50%). Il est un alternatif à long terme du R502 et du R22 et il correspond bien dans ses propriétés opérationnelles au R502. Le R507 peut aussi être utilisé comme un mélange réfrigérant de remplacement de R134a dans le domaine de la réfrigération. Ses principales applications sont : les armoires frigorifiques, les machines à glace, le transport frigorifique.

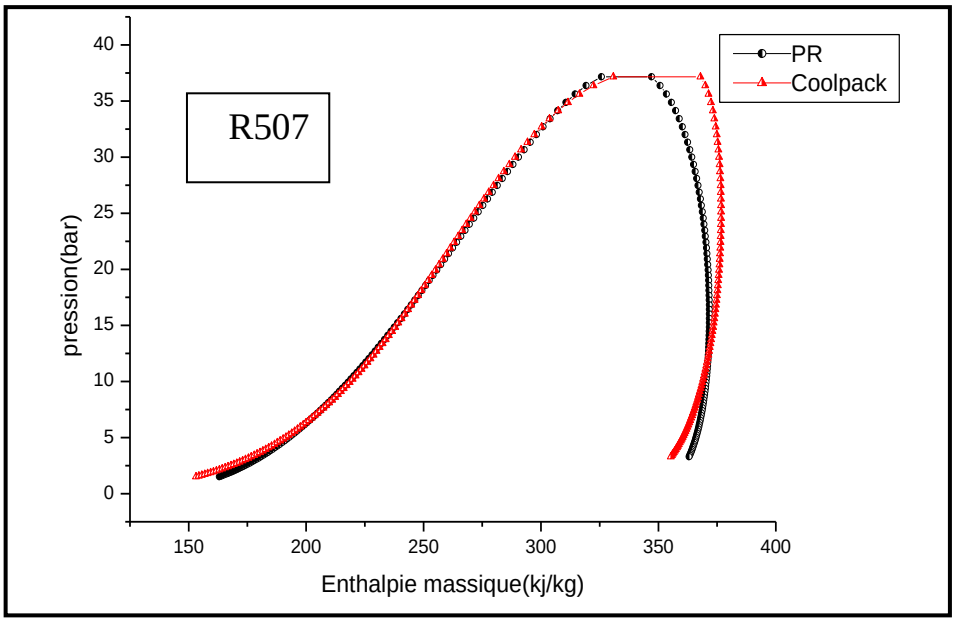


Figure 4. 3: Représentation de la courbe de saturation du R507 sur diag (P-H)

Pour les résultats obtenus du coté du liquide saturé, nous pouvons remarquer un écart négligeable par rapport au logiciel CoolPack vers le point critique, coté vapeur saturé, on constante la fiabilité de l'équation de Peng-Robinson à reproduire le comportement volumétrique de la vapeur saturé.

.

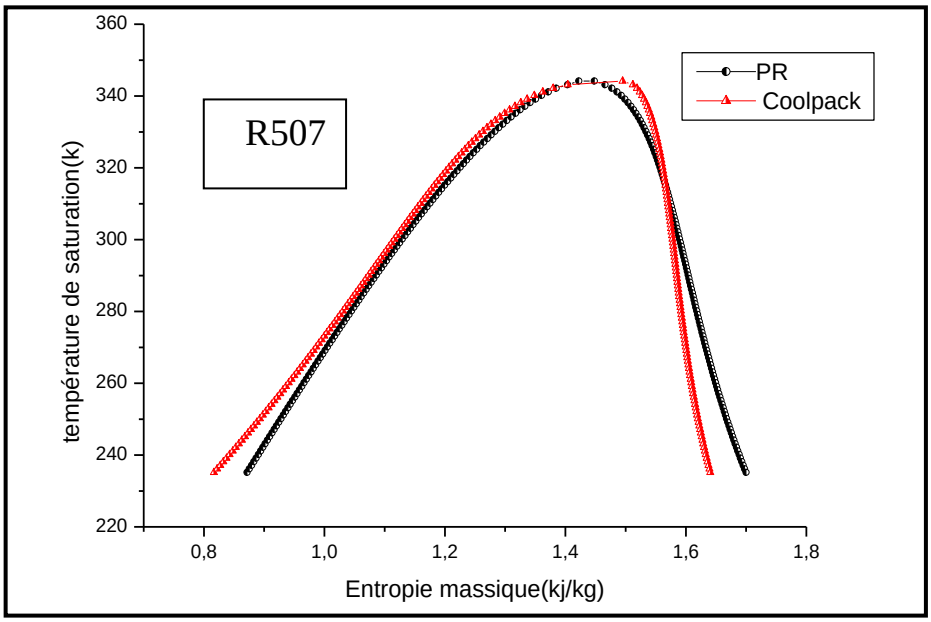


Figure 4. 4: Représentation de la courbe de saturation du R507sur diag (T-S)

La figure **(4.4) :** représente la variation de l'entropie du fluide saturé avec la température. Pour les températures allant de -23°C jusqu'au -13°C, les courbe du liquide saturé obtenues par le calcul à l'aide de l'équation de PR, il ya un écart faible de celle tracée à partir du logiciel CoolPack et pour les températures supérieur à -13°C l'écart entre le calcul à l'aide de l'équation de PR et le logiciel CoolPack est presque négligeable.

4.1.3. Application

Une machine frigorifique à compression mécanique simple fonctionnant dans les conditions suivantes :

Une température d'évaporation Te=5°C, une température de condensation Tc=40°C et la puissance frigorifique ϕo=50kw .les propriétés thermodynamiques des fluides frigorigènes sont calculées par le programme proposé, ainsi que le calcul thermodynamique

.

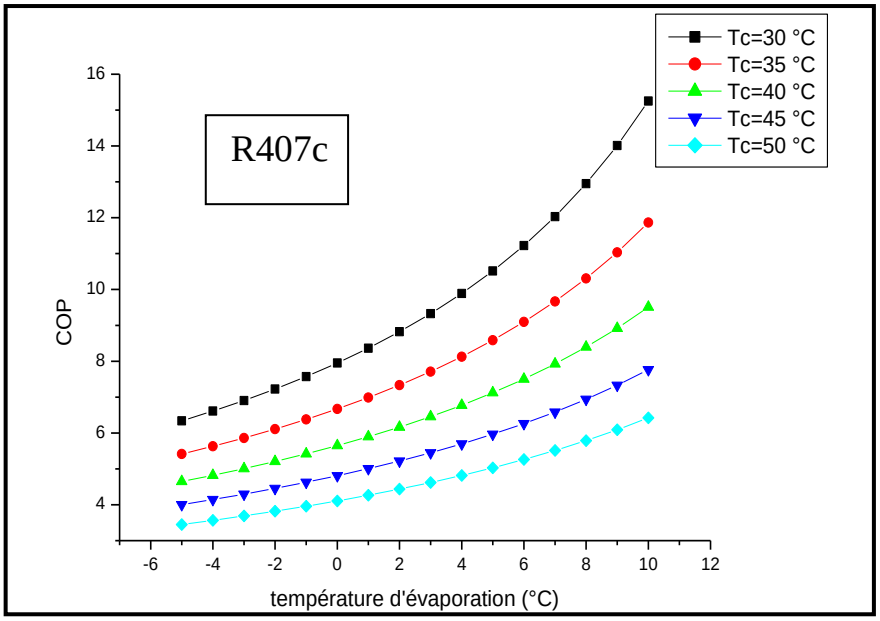


Figure 4. 5: Evolution du COP en fonction de la température d'évaporation Cas du R407C

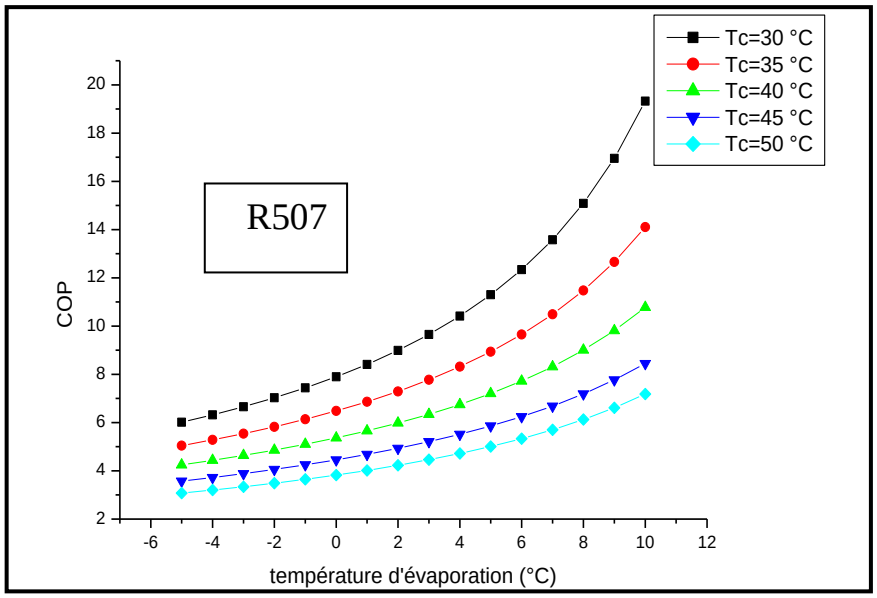


Figure 4. 6: Evolution du COP en fonction de la température d'évaporation Cas du R507

Les deux figures Fig. 4.5 et Fig. 4.6 représentent la variation de COP en fonction des températures d'évaporation en variant les températures de condensations [30,50 °C] pour les deux mélanges réfrigérants (R407C, R507).

On remarque le COP augmente pour l'augmentation de la température d'évaporation et l'inverse pour l'augmentation de la température de condensation

En comparant les deus fluides frigorigènes R407C, R507, pour les mêmes conditions de fonctionnement, on remarque que le R507 présente un meilleur coefficient de performance.

4.1.4. Conclusion

Le coefficient de performance dépend essentiellement des enthalpies et par conséquent de la nature de Fluide. Le COP d'une machine frigorifique à compression mécanique augmente avec l'augmentation de la température d'évaporation et l'inverse pour l'augmentation de la température de condensation.

En comparant les deux fluides frigorigènes R407C, R507, pour les mêmes conditions de fonctionnement, on remarque que le R507 présente un meilleur coefficient de performance.

4.2. Confinement de la charge par utilisation des micro-canaux

4.2.1. Introduction

De nouvelles voies s'ouvrent pour le développement des systèmes de condensation qui permettent à la fois une réduction de la charge de fluide frigorigène et un très faible accroissement de la consommation d'énergie, voire même une amélioration de l'efficacité énergétique lorsque les tours de refroidissement sont utilisables.

Il est possible, par la décentralisation relative des systèmes de production de froid, de limiter la charge et d'améliorer l'efficacité énergétique. L'évolution des quantités annuelles de HFC constituera la vérification que la réduction des charges, le confinement et la récupération constituent une politique d'utilisation acceptable des fluides à GWP élevé

La réduction de la quantité du fluide frigorigène peut être réalisée par l'utilisation des micro-canaux dans les échangeurs de chaleurs de l'installation frigorifique (condenseurs et évaporateurs), donc réduire la taille de l'installation qui devient moins encombrant et économique. L'utilisation des micro-carnaux a l'avantage de contribuer à une augmentation significative de la compacité des échangeurs de chaleur et à une amélioration non négligeable des performances énergétiques des systèmes (kanddlikar et Grande, 2002) Dans la littérature, un des problèmes majeurs rencontrés sur les régimes d'écoulements réside dans les différentes terminologies employées pour la description de ces régimes. (Coleman et Garimella ,1999).] ont choisi de regrouper ces différentes structures en quatre principaux régimes : régime stratifié, régime intermittent, régime annulaire et le régime dispersé. Ces quatre principaux régimes d'écoulement sont ensuite divisés en différents sous-groupes, tout d'abord, le régime stratifié est décomposé en écoulement stratifié lisse et écoulement stratifié à vagues. Puis, le régime intermittent englobe les écoulements à poches de liquide ou de vapeur; le régime annulaire est décomposé en écoulement lisse et à vagues. Le régime d'écoulement dispersé comprend les différents écoulements à bulles. Cette classification descriptive présente l'avantage de prendre en compte toutes les structures d'écoulement rencontrées en condensation convective ((H.Gualous, M. Asbik,2007).

Plusieurs études ont été effectuées dans le domaine de la micro fluidique mais surtout dans le cas de l'ébullition (Coleman et Garimella ,1999), (H.Gualous et B.Mecheri 2007) ont étudié les écoulements identifiés pendant la condensation de la vapeur d'eau dans un canal de 800µm de diamètre.

Dans le cadre de ce travail, on s'intéresse à l'étude de la condensation de la vapeur d'eau dans un seul microcanal transparent de section circulaire de diamètre 280µm, on' a choisi un

diamètre du tube inférieure à celui qui existe dans la littérature dans le cas des études expérimentales à écoulement diphasique. L'objectif est la visualisation ainsi que l'analyse des structures des écoulements identifiés.

4.2.2. Dispositif expérimental

La figure **4.7** : présente une photo du banc d'essais expérimental qui est composé d'une chaudière permettant la production de la vapeur d'eau à débit et à pression réglables. La pression et la température de la vapeur générée par la chaudière sont mesurées et contrôlées avec un pressostat et une vanne pointeau. La vapeur sortant de la chaudière traverse la section d'essais (Figure 1b) avant d'être dirigée vers le condenseur secondaire pour condenser la vapeur d'eau restante. Le débit massique total dans le circuit est mesuré après condensation total de la vapeur. Des vannes de réglage de débit de vapeur sont placées dans le circuit. Une balance de précision 0,1 g est utilisée pour mesurer le débit massique condensé. Deux capteurs de pression à déformation de membranes HBM de 0.8 % de précision sont installés à l'entrée et à la sortie de la section d'essais. Cette dernière est constituée d'un capillaire transparent de diamètre 280 µm et de longueur 66 mm. Ce capillaire présente à l'entrée un convergent de diamètre 3 mm et de longueur 9 mm (Figure 1c). Il est inséré dans un tube transparent de diamètre 10 mm dans lequel circule de l'eau de refroidissement en contre courant par rapport à l'écoulement de la vapeur d'eau dans le capillaire. Les températures d'entrée et de sortie du fluide de refroidissement sont mesurées par des micro- thermocouples de type K de 0.1 de précision. Le débit d'eau de refroidissement est mesuré à l'aide d'un débitmètre à flotteur. La puissance de refroidissent est déduite à partir du débit et des températures d'eau mesurés. Un système d'acquisition de données (SAM 70) relié à un ordinateur est utilisé pour enregistrer toutes les mesures temporelles de températures et des pressions dans le circuit.

La visualisation des régimes d'écoulement est faite à l'aide d'une caméra rapide (GIGAVIEW) d'une cadence de 10000 images par seconde. L'éclairage est effectué par une source de lumière froide. Les expériences sont conduites en circuit ouvert et à une pression de sortie du condensat égale à la pression atmosphérique, les images sont traitées par le logiciel MATROX 8.

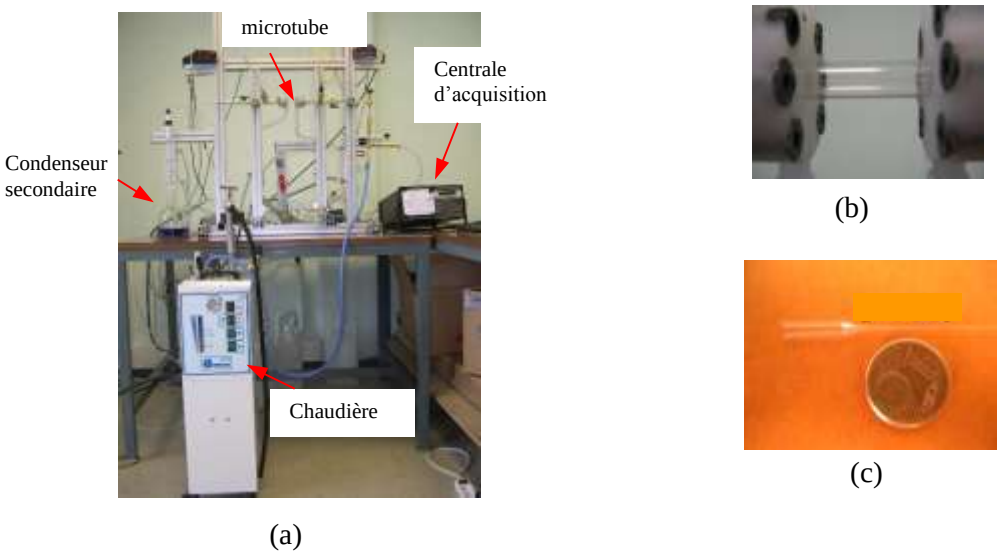


Figure 4. 7: Dispositif expérimental : (a) banc d'essais, (b) section d'essais, (c) microtube.

4.2.3. Résultats expérimentaux et discussions

4.2.3. 1 Présentation et description des différents régimes d'écoulement

Les expériences sont menées en suivant une procédure expérimentale bien définie. En effet, avant chaque essai, on met la chaudière en marche jusqu'à ce que la vapeur atteigne la pression désirée. Ensuite, on procède par une purge afin d'évacuer la quantité d'air emprisonnée dans la chaudière. A l'aide d'une vanne pointeau placée en amont du micro-condenseur, on effectue un réglage du débit de la vapeur d'eau dans le capillaire. Le débit d'eau de refroidissement est contrôlé au moyen d'une vanne placée à l'entrée de la section d'essais. Un réglage de la vitesse de la caméra et du système d'éclairage doit être effectué pour avoir une meilleure visualisation des différents régimes d'écoulements diphasiques se produisant dans le canal. Une procédure est ensuite mise au point pour effectuer un traitement d'images des écoulements en utilisant le logiciel Matrox 8. Pour chaque essai, les conditions de fonctionnement sont maintenues constantes, afin d'assurer la meilleure reproductibilité des résultats.

Durant chaque essai, on mesure les températures ainsi que les pressions à l'entrée et à la sortie du capillaire. La figure 2a : montre l'évolution de la température d'entrée et sortie de la vapeur dans le capillaire. A l'entrée du canal la température de la vapeur générée par la chaudière est de l'ordre de 100°C. A la sortie du capillaire, la température du condensat présente des fluctuations temporaires dues à la structure de l'écoulement diphasique. La température de sortie est comprise entre 40°C et 60°C. La figure 2b présente les pressions

d'entrée et de sortie du capillaire. On constate que seule la pression d'entrée est influencée par la structure de l'écoulement diphasique. La pression de sortie demeure constante et égale à la pression atmosphérique.la pression est supérieur à la pression d'entrée et cela est dû a la pression capillaire comme le montre : la figure 4.8 (b)

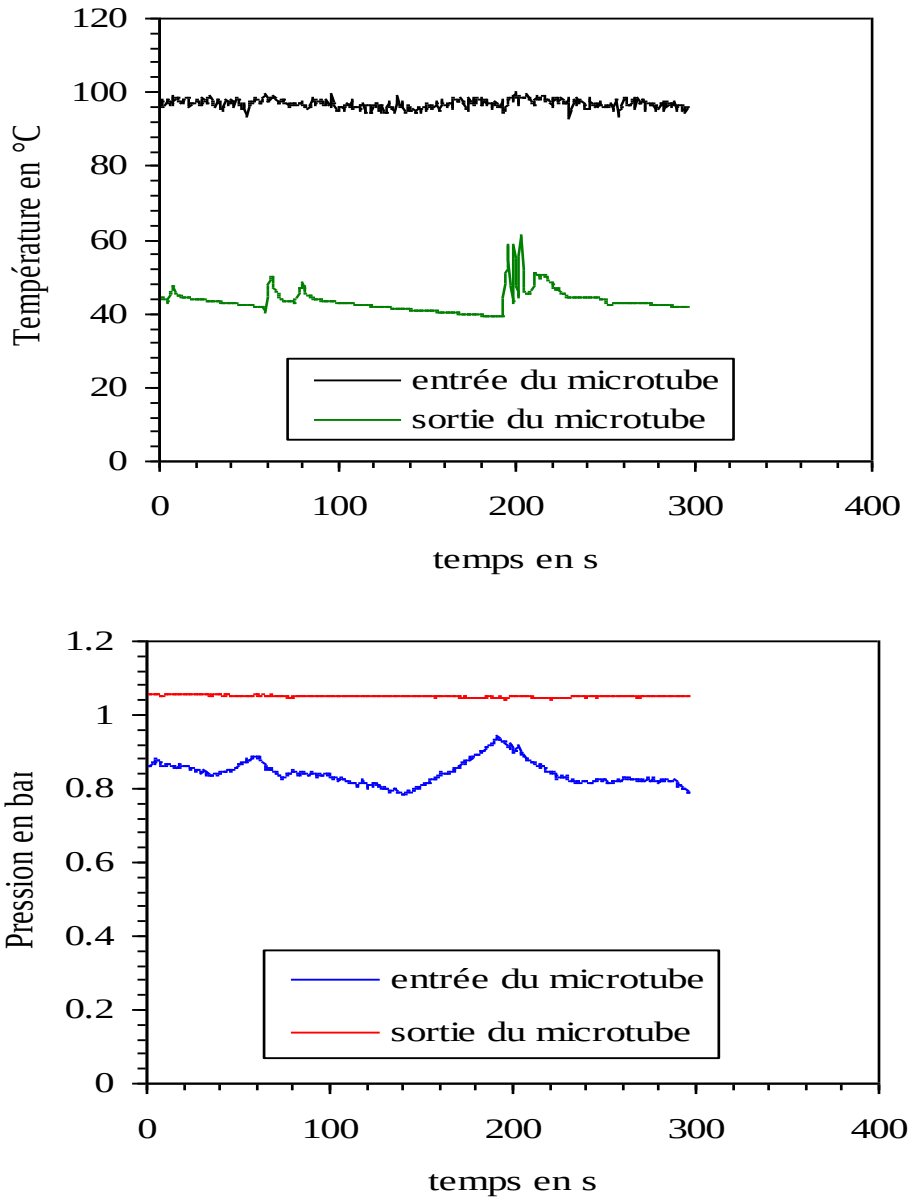


Figure 4. 8: Mesures : (a) température de la vapeur, (b) pression de la vapeur.

Les expériences que nous avons menées sur la condensation dans le capillaire ont montré la présence de différents régimes d'écoulement diphasique. La figure 4.9 présente des photos de différentes structures des phases liquide et vapeur présentes dans le capillaire, la zone observé est 46 mm.

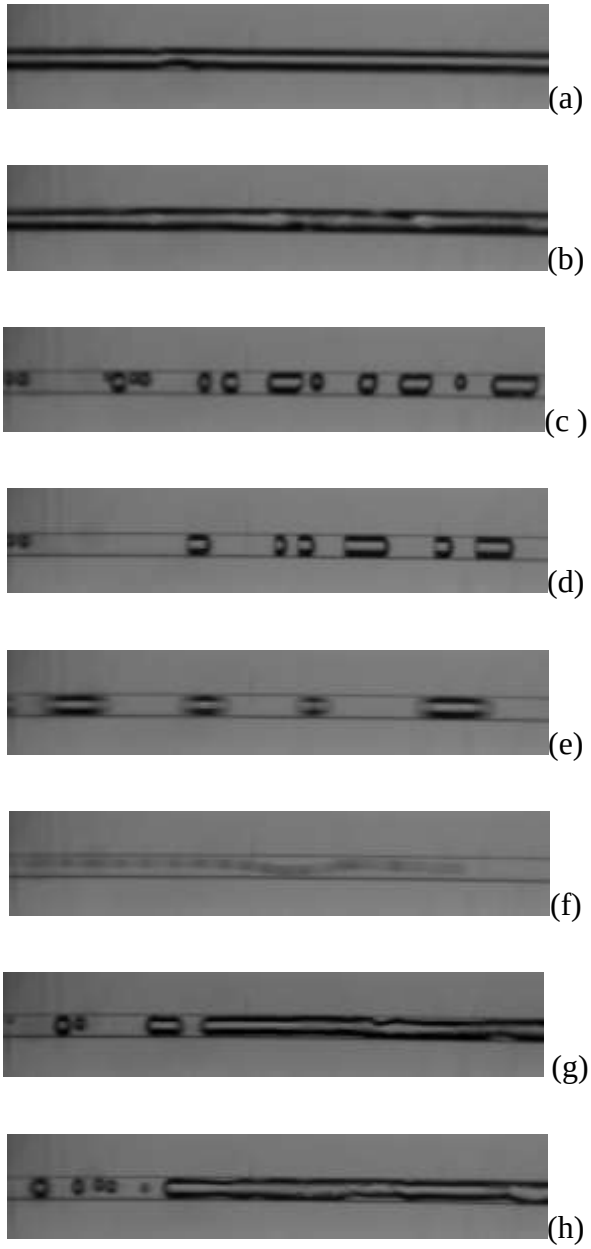
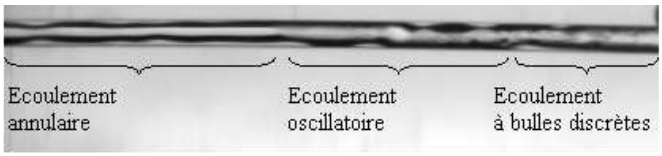


Figure 4. 9: Photos des différents régimes d'écoulements observés

A partir des essais, nous avons observé le régime d'écoulement annulaire caractérisé par une surface de film liquide lisse et continue ainsi qu'une séparation complète des deux phases liquide et vapeur. La phase liquide se trouve en contact avec la paroi sous forme d'un micro film liquide. La phase vapeur est sous une forme cylindrique occupant la partie centrale du tube (Figure 3a). Le liquide mouille la surface interne du capillaire sous l'effet des forces de frottement interfaciales engendrées par la vitesse de la vapeur. Dans certaines configurations

d'écoulement annulaire (B.Mederic, 2004), on a formation de vagues interfaciales déformant ainsi l'interface liquide-vapeur. En augmentant davantage la vitesse de la vapeur, l'interface devient ondulée en raison de la différence de vitesse entre les deux phases ; c'est l'instabilité de Kelvin Helmholtz (Gualous et Mecheri 2007).

Au cours des expériences, nous avons identifié un régime d'écoulement diphasique dans lequel la phase vapeur s'écoule en suivant un mouvement oscillatoire (Figure 3b). On a remarqué que cet écoulement se situe généralement entre un écoulement annulaire à l'aval et un écoulement à bulles discrètes dispersées dans le liquide situé en amont et qui rempli le capillaire (Figure 4.10). En effet, la coalescence de ces bulles augmente la fraction de liquide contenue dans l'écoulement et accélère l'écoulement des deux phases. Par conséquent, dans la zone centrale, la vapeur à très grande vitesse entraîne le microfilm liquide. L'écoulement diphasique suit un sens oscillatoire suivant la longueur du capillaire qui tend vers une concentration totale de la vapeur au centre du canal sous une forme cylindrique : c'est l'écoulement annulaire (Figure 4.10).



sortie entrée

Figure 4. 10: Ecoulement oscillatoire en microcanal

Les figures 4.9 (c) et 4.9 (d) présentent des photos des régimes d'écoulement à bulles allongées séparées par des poches de liquide. Cet écoulement est caractérisé par une discontinuité des tailles des bulles qui sont en mouvement tout au long du capillaire. Certaines poches de liquide contiennent des microbulles de vapeur discrètes, de forme sphérique et qui peuvent disparaître en se coalescent avec des bulles allongées. Ceci contribue à la formation de bulles de vapeur de plus en plus longues qui apparaissent de temps à autre et qui possèdent quasiment la même vitesse que le liquide. Ces longues bulles ont un mouvement rectiligne suivant l'axe du capillaire et ne sont pas en contact uniquement avec la surface supérieure du tube. La forme demie sphérique du ménisque est due à la pression capillaire. Sur la figure 3c les bulles suivent le sens de l'écoulement de la vapeur et du liquide. La figure 3d présente une photo de l'écoulement des bulles qui reprend un sens inverse à celui de la vapeur débitante (de la droite vers la gauche). Cet écoulement est survenu suite à une phase où toute la

longueur du capillaire est occupée par des bulles de différentes tailles séparées par des poches de liquide à vitesse stagnante malgré que la vapeur soit débitée par la chaudière. Il est probable que durant cette phase, le capillaire présente un bouchon de liquide à la sortie qui bloque l'évacuation des bulles et augmente la pression de la vapeur. L'inversion de l'écoulement des bulles présentée en figure 3d (les bulles se dirigent vers l'entrée du capillaire) est survenue probablement au moment où la pression à la sortie du capillaire a dépassé la pression d'entrée. En conséquence, un effet de pompage est observé à la fin de cette phase. Cet effet entraîne une aspiration des bulles qui tend à équilibrer les pressions d'entrée et de sortie du capillaire. Après évacuation de certaines bulles vers l'entrée du capillaire, l'écoulement de la vapeur reprends son sens initial (de l'entrée du capillaire vers sa sortie). La figure 4 présente la forme du ménisque des bulles durant cette phase d'inversion du sens de l'écoulement. En effet, le ménisque présente une forme demie sphérique dans les deux extrémités de chaque bulle contrairement aux cas présentés par la figure 9c et 4d. Durant cette phase d'inversions de l'écoulement, les bulles, le liquide et la vapeur ont eu un mouvement oscillatoire. A la fin de cette phase, l'écoulement dans le capillaire a eu une structure présentée par la figure 3f dans laquelle des bulles sphériques de taille 100µm approximativement sont formées et sont entraînées par le liquide vers la sortie du canal.

Les figures 9g et 9h présentent des photos des écoulements capillaires avec une éjection continue de bulles de différentes tailles. La surface du film liquide présente une succession de vagues liquides formées en contact avec la paroi. La figure 3g obtenue pour une vitesse axiale de la vapeur de 0,47 m/s montre l'éjection des bulles allongées de diamètres horizontal et vertical égaux à 420µm et 210µm respectivement. Les bulles éjectées (figure 3h) sont sphériques et ont un diamètre environ égal à 120 µm ; ceci pour une vitesse axiale de la vapeur égale à 0,2 m/s. La production de chaque bulle résulte d'une disparition de vague interfaciale qui au cours du temps atteigne une amplitude critique par condensation de la vapeur. L'arrachement de chaque bulle est contrôlé par les forces de pression, de tension superficielle et de frottement interfacial.

4.2.3. 2 Vitesse de déplacement des bulles

Chaque bulle crée se déplace tout au long du canal. Si la bulle ne coalesce pas avec d'autres bulles voisines, sa taille diminue progressivement à cause de la condensation. La vitesse de déplacement des bulles et de l'écoulement annulaire dépend de la structure de l'écoulement en aval.

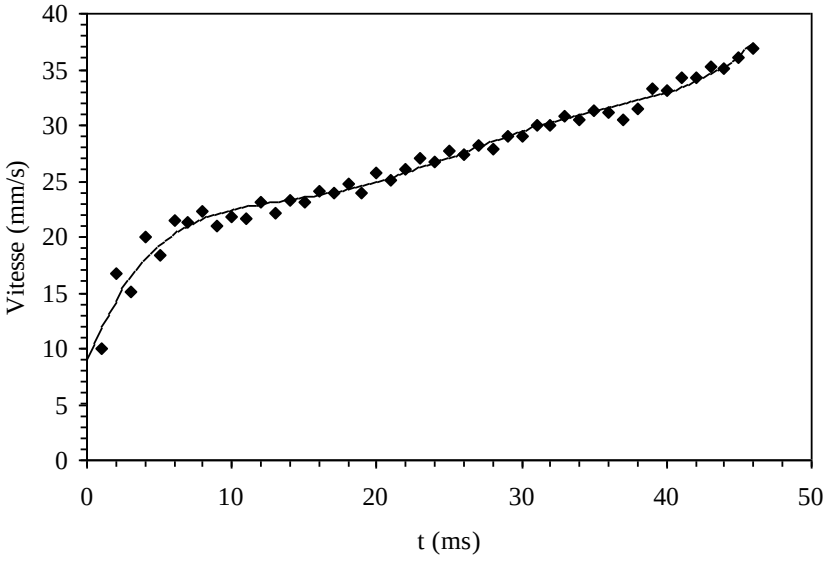


Figure 4. 11 : Vitesse de déplacement de bulle

Sur la figure 5, nous présentons la vitesse de déplacement d'une bulle allongée de taille 420µm et qui se déplace dans le capillaire en se dirigeant vers la sortie. La vitesse est déterminée à partir de la variation du déplacement de la bulle dans le capillaire. Ceci est défini par procédure de traitement d'images. La figure 4.11 montre une accélération du déplacement de la bulle dans le capillaire. Après éjection de la bulle (à t=0s), la vitesse de la bulle est de 10mm/s et augmente pour atteindre 35mm/s dans un parcours de 20mm.

Dans le cas d'un écoulement annulaire avec éjection de bulles, on a remarqué une décélération du déplacement des bulles à cause de la formation des instabilités sur la surface de l'écoulement vapeur. Ceci entraîne une concentration de bulles vers la sortie du capillaire qui sont freinées à leur tour par l'inertie du liquide en aval. Cette décélération favorise la formation de nouvelles vagues interfaciales. La vitesse d'avancement de l'interface diminue au cours du temps et peut devenir insuffisante pour maintenir l'avancement de l'écoulement annulaire ; ce qui cause les problèmes de bouchons.

4.2.4. Conclusion

L'étude de la condensation dans des micro-canaux est une préoccupation majeure de plusieurs chercheurs., on a présenté des exemples de résultats d'analyse d'écoulement de vapeur d'eau en condensation dans un capillaire de diamètre 280µm. A partir des résultats d'analyse, on montre la présence de différents régimes d'écoulement diphasique dans le capillaire. Les causes d'inversion du sens de l'écoulement diphasique sont mises en évidence. On a identifié

un écoulement oscillatoire qui se situe généralement entre un écoulement annulaire à l'aval et un écoulement à bulles discrètes dispersées dans le liquide situé en amont du capillaire

4.3. Machine frigorifique à absorption

4.3.1 Introduction

On peut utiliser des systèmes de climatisation relativement simples et économiques, d'ou la possibilité de développer les systèmes de climatisation couplés à un système solaire pouvant garantir les conditions de confort.

Dans notre pays beaucoup de pertes de chaleur sont rencontrées et qui peuvent être récupérées en développant ce genre de machine, la machine à absorption est rustique demandant très peu de maintenance et l'absence de machines tournantes de forte puissance fait des machines frigorifiques à absorption silencieuses à l'opposé de la machine à compression mécanique.

4.3.2 Machine frigorifique à absorption solaire

Les machine frigorifique à absorption fonctionnent grâce à la faculté de certains liquide d'absorber une vapeur et également le fait que la solubilité de cette vapeur dans liquide dépend de la température et de la pression, ces machines utilisent comme fluide un mélange binaire (réfrigérant-absorbant), dont l'un des composants est beaucoup plus volatil que l'autre, et constitue le fluide frigorigène .Deux couples sont principalement utilisés (N.E. Wijeysundera**.1997).**

- Eau+Bromure de Lithium (H_2O /LiBr), l'eau étant le fluide frigorigène.
- Ammoniac +Eau (NH_3-H_2O), l'ammoniac étant le fluide frigorigène.

4.3.3. Fonctionnement d'une machine frigorifique à absorption solaire

Le couple binaire (solvant-fluide frigorigène) est chauffé dans le bouilleur grâce à des apports extérieurs produit par de l'énergie solaire (capteur solaire) le fluide le plus volatil s'évapore, l'évaporation du fluide frigorigène se fait à une pression constante. La vapeur du fluide frigorigène dirige vers le condenseur, la quantité restante du mélange dans le bouilleur est appauvrie en fluide frigorigène passe par la vanne de détendeur à l'absorbeur, Le vapeur du fluide frigorigène se condense dans le condenseur elle sort à l' état liquide et se détend dans la vanne détendeur arrivant à l'évaporateur le fluide frigorigène s'évapore en produisant du froid et la vapeur produite se dirige vers l'absorbeur en formant avec le liquide pauvre venant du

bouilleur une solution riche en fluide frigorigène, cette solution retourne au bouilleur après avoir augmenté sa pression par la pompe et ainsi le cycle recommence.

La solution riche entrant un échangeur inter solution est circule dans les tubes intérieur et la solution pauvre circule dans l'espace annulaire.

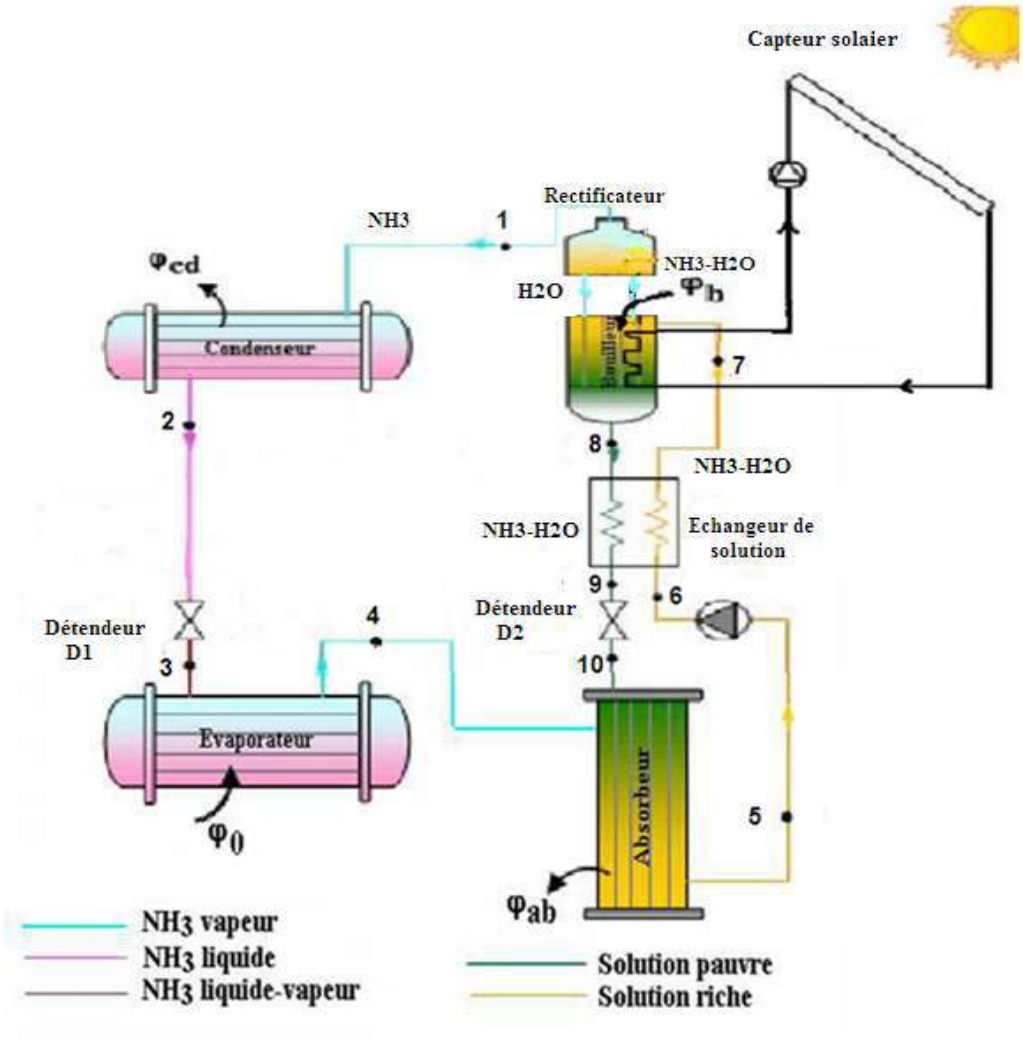


Figure 4. 12: Schéma d'une machine Frigorifique à absorption solaire

.En a aussi assuré un énergie d'appoint (ballon de stockage,.) pour le fonctionnement du système dans tout les cas : nuit, et temps couvert, le chauffage du couple binaire au niveau du bouilleur est assuré par bruleur à gaz naturel

L'ensemble du système thermique d'une machine frigorifique solaire à absorption doit être fermé pour assurer en bon rendement.

4.3.4. Utilisation L'énergie solaire pour la production du froid

L'intérêt du refroidissement solaire réside dans la simultanéité de la demande de froid et de l'ensoleillement. Lorsque la chaleur nécessaire au fonctionnement de la machine frigorifique est fournie par l'énergie solaire, le froid fourni est gratuit (pas de coût, pas de pollution).Lorsque l'ensoleillement n'est pas suffisant pour fournir de l'eau à température adéquate, une autre source de chaleur (d'appoint ou de substitution) doit permettre le fonctionnement du système. Des solutions de stockage peuvent résoudre le problème à certaines périodes, mais il reste toujours un certain nombre d'heures de fonctionnement où la chaleur doit être produite par du gaz ou du fuel. Pendant ces heures, le rendement du système est faible comparé au système classique de la machine frigorifique à compression. L'intérêt de la machine frigorifique à absorption couplée avec des capteurs solaires doit donc être évalué sur base d'une moyenne annuelle, en tenant compte des heures d'ensoleillement exploitables. Cette évaluation dépend de:

- rendement de la machine frigorifique à absorption,
- proportion de la demande de froid qu'on peut produire avec l'énergie solaire qui dépend du nombre d'heures d'ensoleillement exploitables.
- rendement moyen de la production électrique en centrale.

4.3.4.1. Capteur solaire plan:

Un capteur solaire est un dispositif destiné à transmettre la chaleur ainsi produite à un fluide caloporteur à une température inférieur à 100°C. Un capteur plan est un capteur sans concentration dans la lequel la surface de l'absorbeur est plane, la structure portante du capteur plan est constituée d'une caisse réalisée généralement de tôle en acier inoxydable et ouverte sur le coté exposé au rayonnement solaire. Un matériau isolant est placé à l'intérieur de la caisse sur le coté opposé à l'ouverture sur long des parois latérales (Saadi, s. 2010)

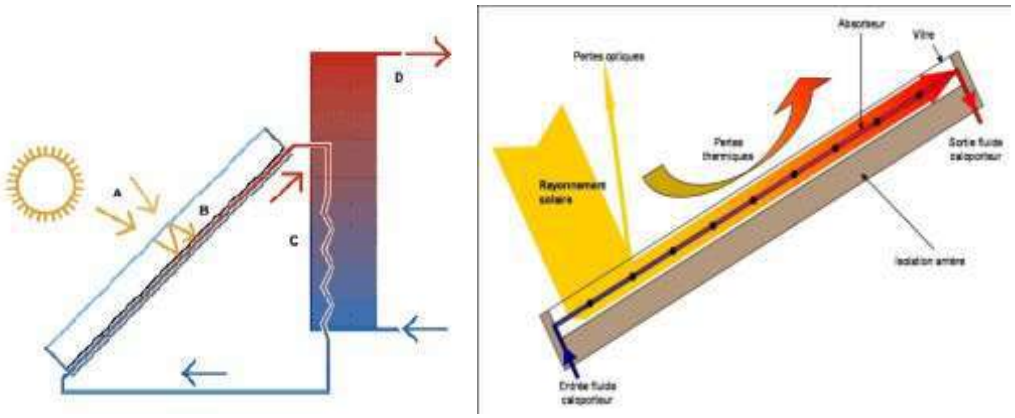


Figure 4. 13: Principaux composants du capteur solaire plan**.**

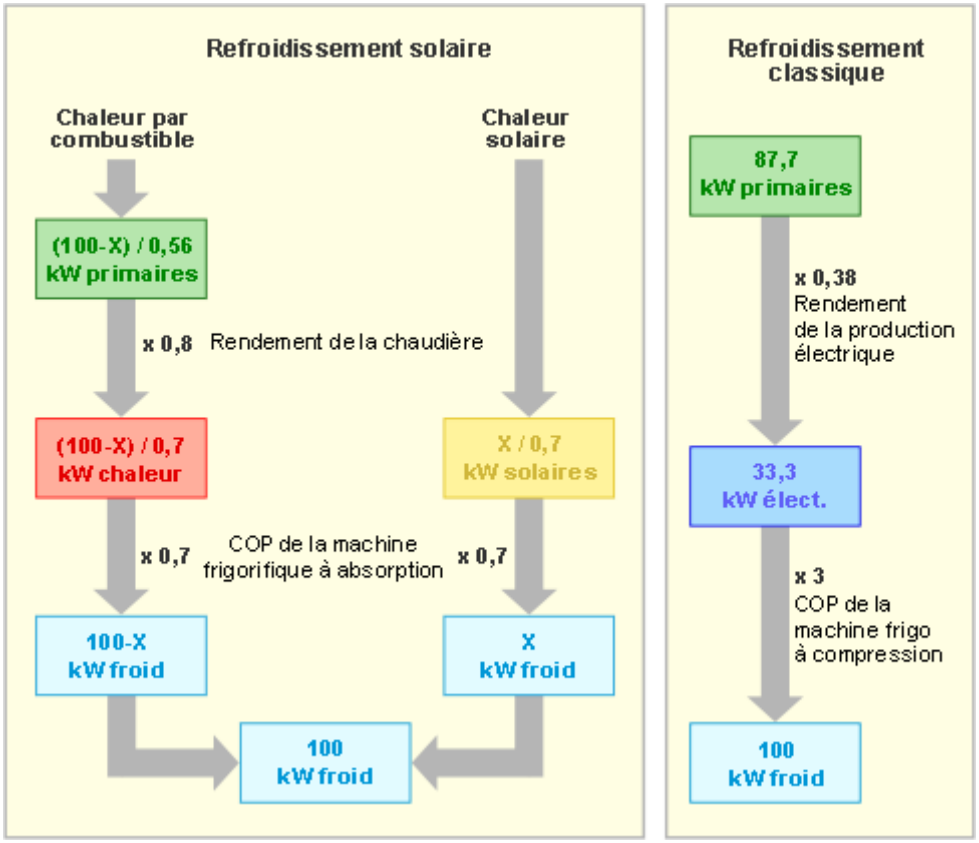
4.3.4.2. Principe de fonctionnement du capteur solaire plan:

La vitre d'un capteur plan est perméable à la plupart du rayonnement solaire. L'absorbeur absorbe ces rayonnements et les transforme en chaleur. Cette chaleur est transmise par conduction au fluide caloporteur en circulant sous l'absorbeur. **(**N. Ben Ezzine.2004**).** Le fluide caloporteur (circuit primaire) transporte l'énergie des capteurs exposés au soleil jusqu'au circuit secondaire (ballon stockage, système de frigération. Le système thermique de capteur solaire doit être isolé pour assurer en bon rendement.

L'absorbeur émet à son tour un rayonnement dont la plus grande partie est bloquée par la vitre. Un capteur solaire plan se comporte donc comme un piège à rayonnement, Le système de captage à pour base l'effet de serre: pour le rayonnement solaire visible (ainsi que le proche infrarouge), le verre est pratiquement transparent: il laisse passer la plus grande partie du rayonnement solaire indicent.

Pour le rayonnement infrarouge émis par l'absorbeur, le verre comporte comme un corps noir: il absorbe l'entier du rayonnement qui' il reçoit et réémet à raison de 50% vers l'extérieur et 50% vers l'intérieur.

On peut encore améliorer le rendement du capteur en utilise pour l'absorbeur une surface sélective, qui permet d'obtenir une fore absorption du rayonnement solaire une faible émission d'infrarouges, de même les verres isolant permettent de réduire les pertes thermiques.



Avec les hypothèses prises dans le schéma ci-dessus, le bilan au niveau de la consommation d'énergie primaire est favorable au système de refroidissement solaire si au moins 51 % de la demande de froid peut être satisfaite par l'énergie solaire. Pour évaluer la rentabilité économique du système, il faudrait tenir compte des prix de l'énergie et des coûts d'investissement.

Il pourrait par contre être envisagé pour un bâtiment dont la demande de froid est limitée aux mois d'été grâce à une conception adéquate (protections solaires, valorisation de l'inertie thermique, free cooling ou free chilling,...)

4.4. Gaz naturel dans l'industrie frigorifique

4.4.1. Usages du gaz naturel:

Le gaz naturel est une source d'énergie de plus en plus utilisée par l'industrie pour produire de la chaleur (chauffage, fours...) et de l'électricité, que ce soit en cogénération décentralisée ou en cogénération centralisée avec des centrales à cycles combinés (Combined Cycle Gas Turbines ou CCGT), l'usage du gaz naturel est en expansion, la plupart des pays favorisant son usage accru partout où il peut se substituer au pétrole. Le gaz naturel est utilisé dans

l'industrie chimique, notamment pour la pétrochimie et le raffinage, son utilisation dans les pays industrialisés est de 25%, la synthèse d'ammoniac à partir du gaz naturel permet de fabriquer des engrais pour l'agriculture et la synthèse du méthanol à partir du gaz naturel est utilisée en chimie de spécialités et comme base d'additif des essences.

le gaz naturel est maintenant utilisé dans des applications de plus haute technologie comme les piles à combustibles, la micro-cogénération et les pompes à chaleur à gaz. L'usage du gaz naturel dans ce secteur est favorisé par le fait qu'il ne nécessite pas de stockage.

Les moteurs au gaz naturel offrent par ailleurs un bon rendement énergétique combiné à un potentiel important de réduction d'émissions de CO_2, donc l'utilisation du gaz naturel est particulièrement intéressante car elle ne nécessite pas de transformation majeure du moteur (Yahiaoui, A. 2009).

Le R290 est R50 le propane et le méthane sont utilisé comme fluide frigorigène dans une installation frigorifique à compression mécanique.

Tableau 4. 1: Caractéristiques du propane :

		Unités	Valeurs
Formule chimique			CH_3-CH_2-CH_3
Masse molaire		g/mol	44,09
Température d'ébullition	sous 1,013 bar	°C	-42,1
Masse volumique du liquide Masse volumique de la vapeur	à 20°C à 20°C	kg/dm³ kg/dm³	0,500 0,018
Pression absolue	à 20°C	bar	8,5
Température critique		°C	96,67
Pression critique	absolue	bar	42,50
Tension superficielle *(interface liquide/vapeur)*	à +10°C à -50°C	dyne/cm -1	8,35 13,59
Limite inférieure d'inflammabilité Limite supérieure d'inflammabilité	dans l'air à 20°C sous 1,013 bar	% en volume	2,2 9,5
Température d'auto-inflammation		°C	480

4.4.2. Système à absorption fonctionnant au gaz naturel

Les machines frigorifiques à absorption permettent de remplacer la compression en phase vapeur du réfrigérant par une compression en phase liquide d'une solution binaire. Cette solution est composée du réfrigérant et d'un absorbant.

Il faut disposer d'une source de chaleur pour pouvoir dissocier le réfrigérant de l'absorbant, Le générateur à haute pression est chauffé par une source de chaleur extérieure, les vapeurs

frigorigènes produites sont ensuite utilisées comme source d'énergie à la génératrice basse pression ce qui permet la séparation d'avantage du frigorigène. Un bruleur à gaz naturel peut être utilisé pour réchauffer le couple binaire dans le bouilleur

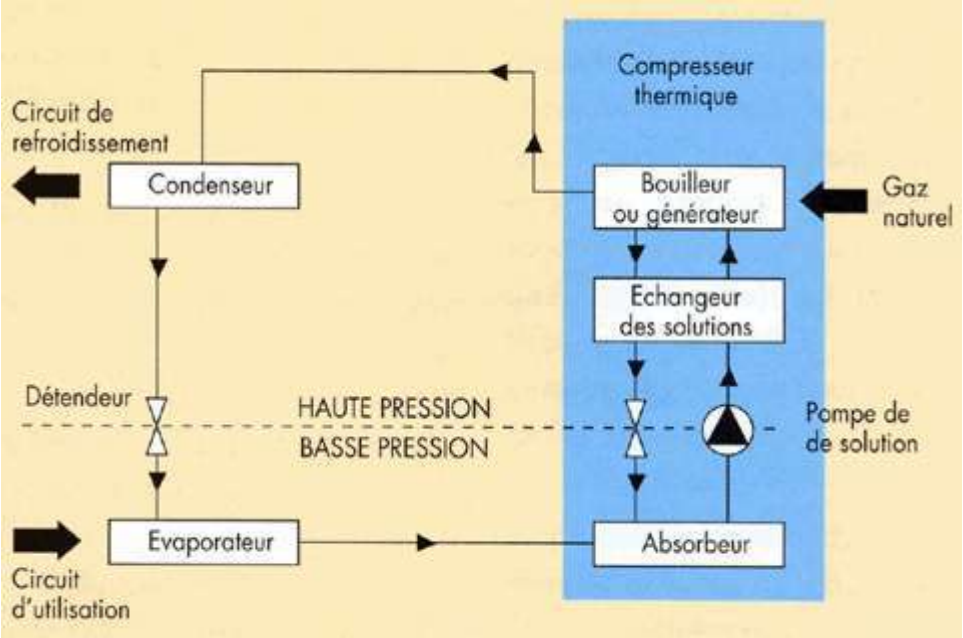


Figure 4. 14 : Machine frigorifique à absorption au gaz naturel

4.4.2.1. Fonctionnement d'une machine à absorption au gaz naturel

La mise en circulation du fluide frigorigène est assurée lors de la phase de compression. En fonction du moyen utilisé pour augmenter la pression et la température de ce fluide, on peut distinguer deux types de systèmes : les systèmes à compression mécanique et ceux à absorption. On remarque qu'une partie du circuit (condenseur, détendeur, évaporateur) est strictement identique pour les deux systèmes

Avec les systèmes à compression mécanique, la compression est réalisée par un compresseur mécanique entrainé par un moteur électrique.

Avec les systèmes à absorption, le passage de l'évaporateur vers le condenseur est réalisé par l'association du fluide frigorigène à un autre fluide qualifié d'absorbant. Ce mélange va permettre le passage du fluide frigorigène d'un niveau de basse pression/basse température à un niveau de haute pression/haute température sous l'effet d'un apport de chaleur,les machines commercialisées les plus performantes sont soit des machines eau/bromure de lithium, dites " à double effet ". Le double effet permet de faire passer le coefficient de performance (COP : rapport entre l'énergie frigorifique produite et le débit calorifique au brûleur) d'une moyenne

de 0,6 à plus de 1 aux conditions nominales de fonctionnement (COP frigorifique mesuré sur le PCS du gaz naturel). Cette amélioration des rendements est liée à la mise en œuvre d'un deuxième étage de régénération et d'un échangeur thermique supplémentaire. Le double effet a d'autre part autorisé le mode chauffage en alterné avec le mode froid ou en simultané. Enfin, signalons l'apparition de machines à cycle " triple effet ", dont le COP atteint 1,2 à 1,3 aux conditions nominales de fonctionnement.

C'est sur ce principe de l'absorption que fonctionnent les installations de climatisation au gaz naturel. De par sa simplicité, l'intérêt d'une telle machine est évident. Elle produit du froid et/ou du chaud et ce, sans complications techniques de mise en œuvre tout en respectant notre environnement.

En production de froid, pour 1 kWh de gaz naturel, on produit 1 kWh de froid et presque 2 kWh de chaud (à une température comprise entre 37 et 39 °C). La chaleur récupérée dans le condenseur de la machine peut être utilisée pour chauffer l'eau de bassin d'une piscine, pour réchauffer l'eau chaude sanitaire, pour préchauffer de l'air neuf, La climatisation à absorption au gaz naturel est bien une solution, Le coût d'exploitation de la solution au gaz est largement convaincant; ce bénéfice s'est ajouté aux autres atouts de cette solution :

- la faible nuisance sonore de l'installation.
- l'aspect écologique.
- la robustesse du matériel et le confort procuré par l'utilisation d'une machine procurant du chaud et du froid alternativement
- le coût du gaz influe directement la rentabilité du projet (cas de l'Algérie).

4.4.3. Interprétation des résultats :

L'étude de l'influence des certains paramètres sur la performance de la machine frigorifique à absorption solaire pour trouver les valeurs optimal afin d'améliorer le fonctionnement :

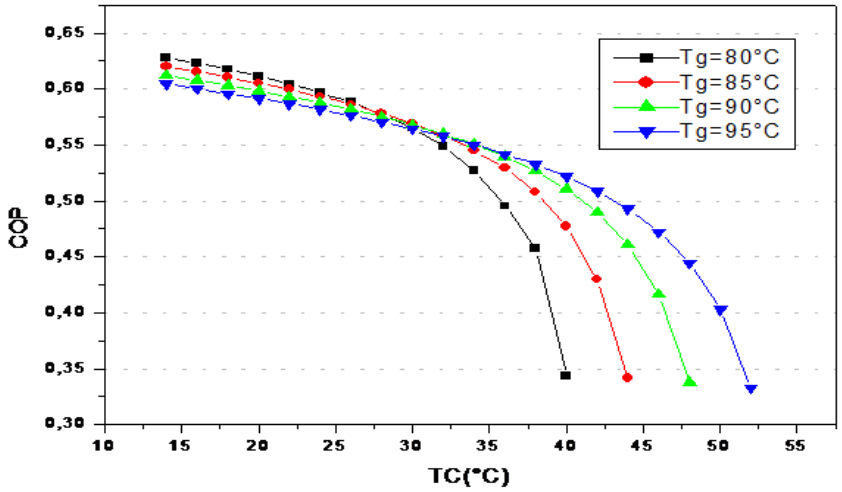


Figure 4. 15: Variation de COP en fonction de Tc

La Fig.4.15 : représente la variation de COP en fonction de Tc pour des valeurs croissantes de la température du générateur. Les résultats montre une diminution du COP qui accompagne l'accroissement de Tc, ce qui s'explique par un mauvais refroidissement au niveau du condenseur.

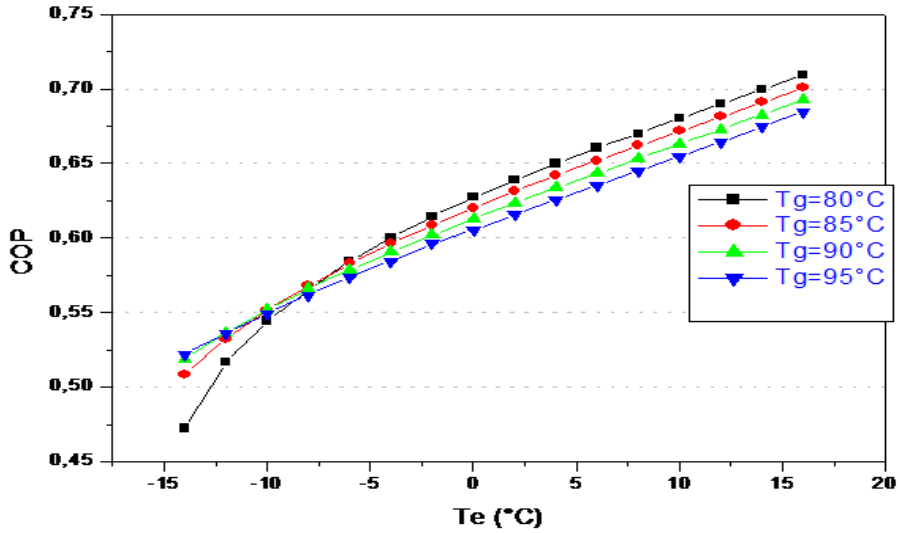


Figure 4. 16: Variation du COP en fonction de Te

La Figure **4.16 :** représente la variation du COP en fonction de Te, pour différents valeur de Tg. On à constate que la valeur du COP augmente avec l'augmentation de la température d'évaporation, lorsque les valeurs de la température d'évaporation sont modérés, le travail du compresseur est réduit donc un Cop important.

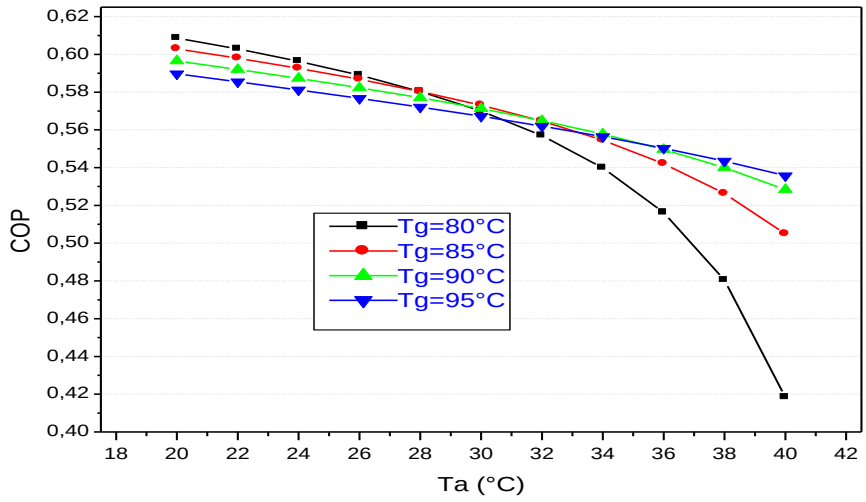
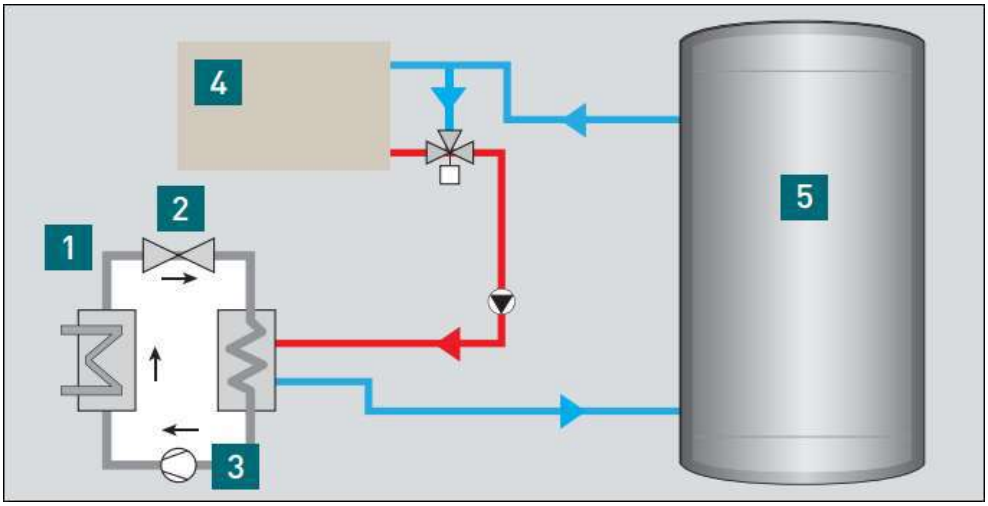


Figure 4. 17: Variation de COP en fonction de Ta

La Fig **4.17 :** représente la variation du COP en fonction de Ta pour différentes valeurs de Tg. On a constate que le coefficient de performance diminue avec l'augmentation de la température de l'absorbeur Ta. Ce fait est due au taux de circulation qui croit avec l'accroissement de la concentration riche en fluide frigorigène au niveau de l'absorbeur.

4.5. Stockage du froid en aval de l'évaporateur

Le ballon de stockage est placé en série, sur le départ de l'eau glacée vers les batteries froides. La température de l'eau d'alimentation des batteries froides est stable.



1. Groupe frigorifique
2. Détenteur
3. Compresseur
4. Climatiseur
5. Ballon eau glacée

Figure 4. 18: Schéma d'installation de stockage en aval de l'évaporateur

4.5.1 Principe de fonctionnement :

stocker le froid pour couvrir la charge de refroidissement requise du bâtiment par une décharge réservoir froid dans les périodes où la consommation d'électricité est élevée et que l'envoi de ces réservoirs dans les périodes où la faible consommation d'électricité, et expédiez chemin à travers la production de froid par le groupe de refroidissement ,ou est refroidi par fluide frigorigène, on obtient de l'eau froide dans le réservoir pour être stocké, et le réservoir de vidange soit dans les périodes de temps où la consommation d'électricité de haute, l'eau froide est acheminé vers le climatiseur où l'eau glacée se réchauffe par contact de l'air ambiant du local, puis retour vers le groupe frigorifique pour être refroidi.

L'eau glacée, peut permettre de stocker 10 kWh par m^3 de réservoir (J. patry et al, 2015)

4.5.2. Groupe frigorifique:

Il s'agit du cycle fondamental d'une installation frigorifique à un étage de compression d'un fluide frigorigène pur, l'extraction, le transfert et le rejet de la chaleur se font grâce a fluide frigorigène enfermé dans une machine frigorifique: c'est en effet le phénomène de la vaporisation d'un liquide, la condensation d'une vapeur, que s'appuient les principaux type de machines frigorifiques, La machine frigorifique à un étage de compression comprend des éléments suivants: Evaporateur, compresseur, condenseur, détendeur (F. Belfodil, 2007)

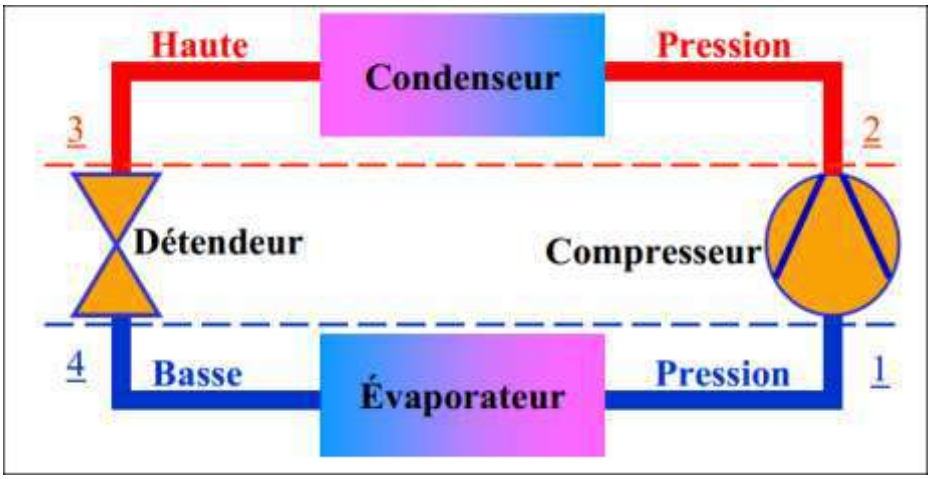


Figure 4. 19: Schéma du groupe frigorifique

4.5.3 Résultats et discussion

Tableau 4. 2 : **Résultats**

Mois	Q0 [kwh]	pt sans stockage[kwh]	Pt avec stockage[kwh]	coût sans stockage [DA]	coût avec stockage [DA]
Mai	118.566	27.57	17.57	721.64	459.89
Juin	130.9	30.44	20.44	796.77	535.01
Juillet	147.98	34.41	24.41	900.68	638.93
Aout	146.72	34.12	24.12	893.09	631.34
Sep	134.37	31.24	21.34	817.71	558.57

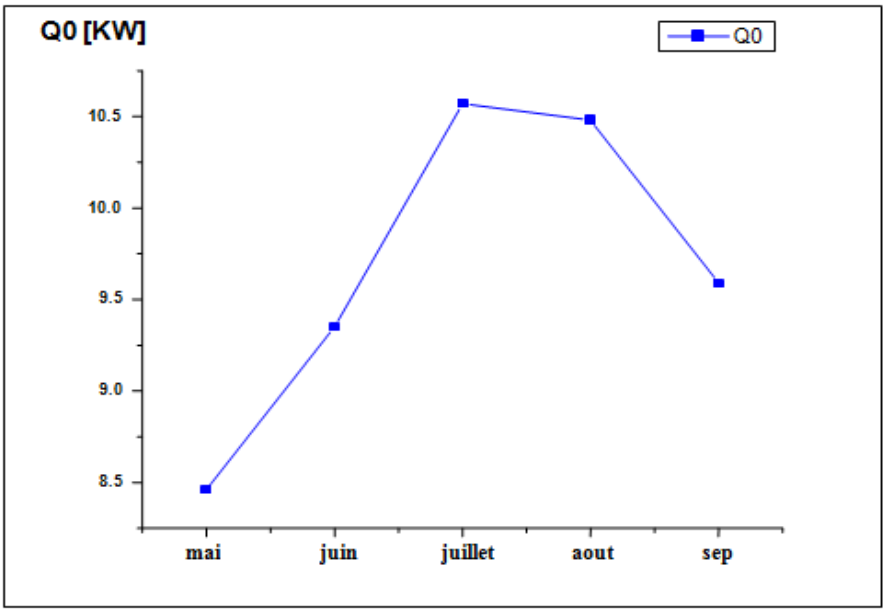


Figure 4. 20: Variation des apports calorifiques (Q_0)

Les résultats montrent durant la période estivale pour la région de Ouargla ou est situé le local, la valeur des apports calorifiques maximale est enregistrée pendant le moi de Juillet.et le minimum pendant le moi de mai.

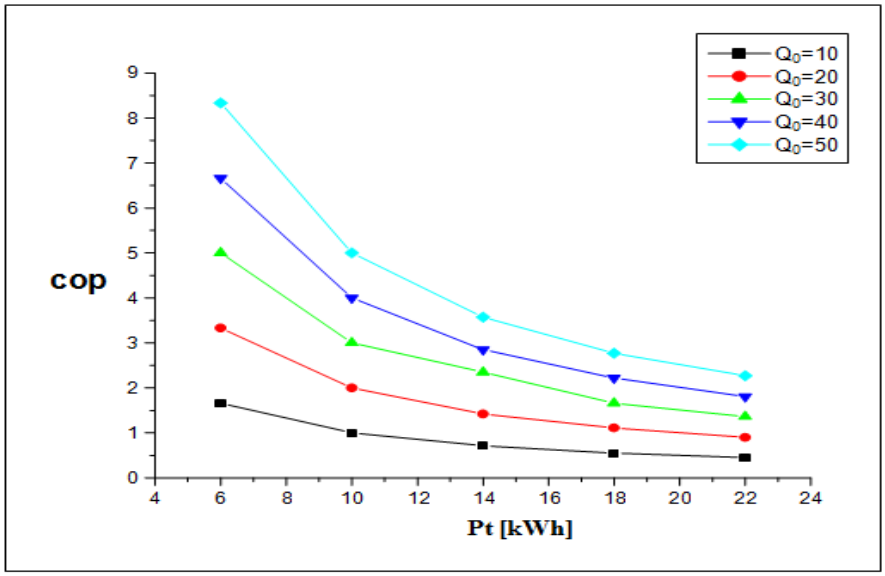


Figure 4. 21: Influence de la puissance du compresseur sur le COP

On constate que le COP croit en diminuant la puissance consommé par le compresseur Pt, on a un meilleur COP pour un travail de compression réduit (on sait que le travail de compression influe sur la puissance théorique consommé par le compresseur , le COP est proportionnel à la puissance frigorifique et inversement proportionnel à la puissance théorique consommé par le compresseur.

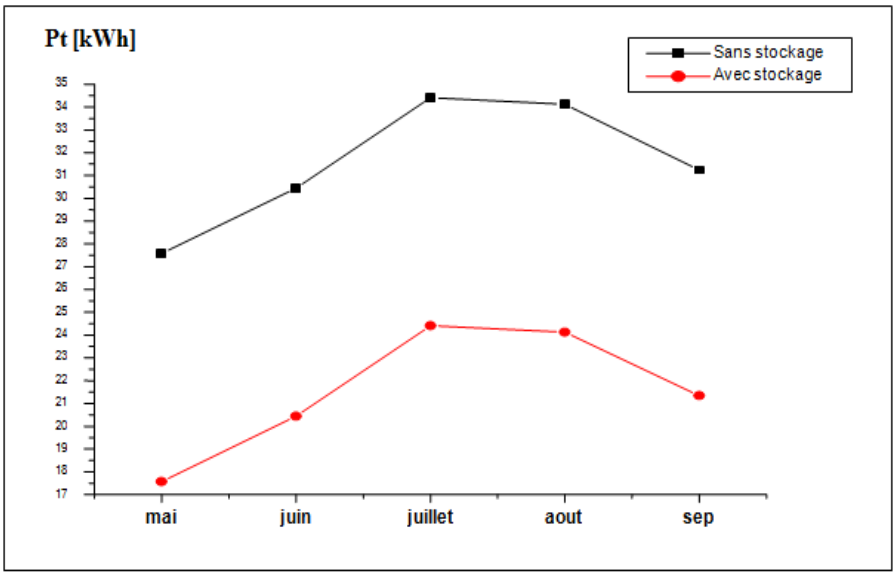


Figure 4. 22: Variation de la puissance de compresseur pendant la période estivale

Les résultats montrent que la valeur maximale de la consommation est enregistrée pendant les mois de Juillet et Aout, et diminue en mois de juin et septembre et on constate aussi que la consommation de l'énergie sans stockage est supérieure que celle avec stockage de 29%.

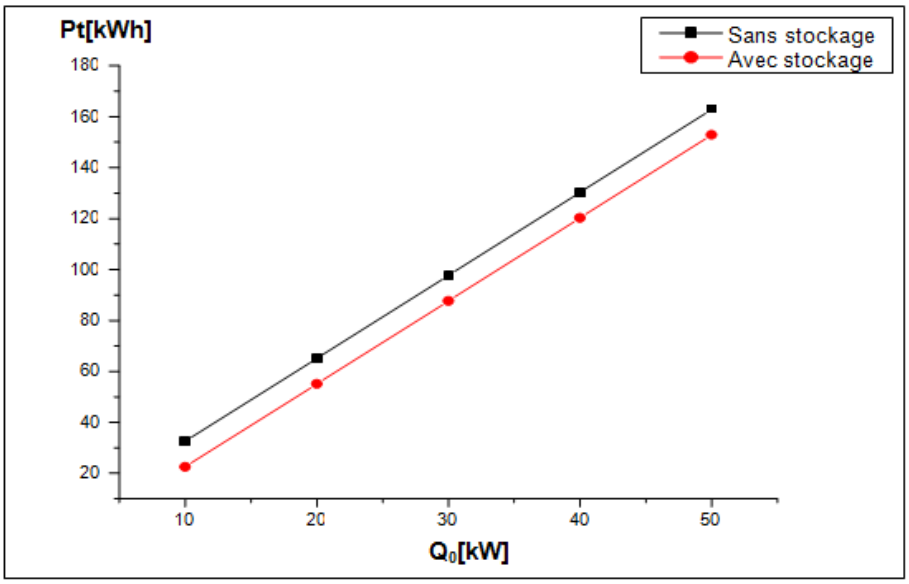


Figure 4. 23 : Variation de la puissance consommée par le compresseur en fonction de la puissance frigorifique**,**

la puissance frigorifique dépend des apports calorifiques du local,on constate que les la puissance frigorifique **(Q_0)** est proportionnel avec la puissance du compresseur **(Pt),** sachant que les dimensions du local et la température extérieure ont une influence importante sur la puissance frigorifique . La puissance de compresseur sans stockage est supérieure que la puissance de compresseur avec stockage (d'où l économie d'énergie consommée).

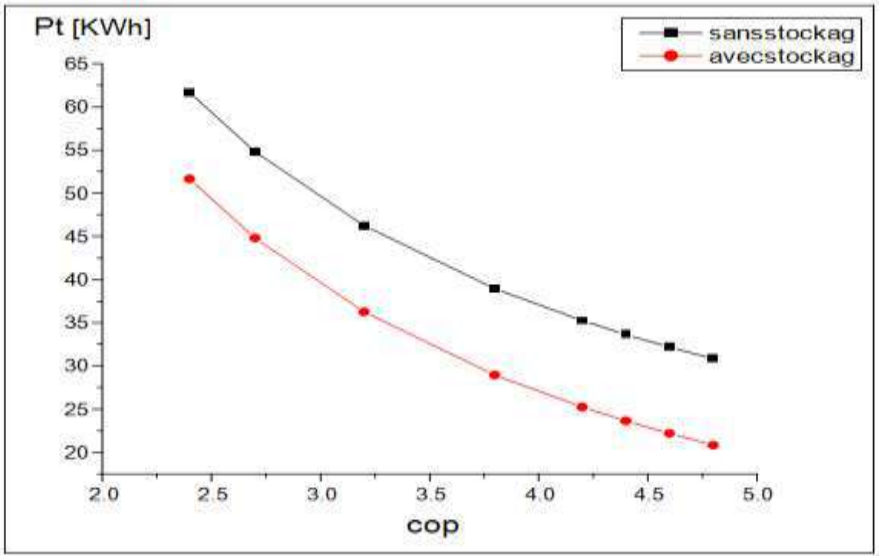


Figure 4. 24: Influence du cop sur la puissance consommée par le compresseur

Cette courbe montre qu'il ya une relation inversement proportionnelle entre la puissance de compresseur (Pt) et le COP, plus la machine frigorifique est performante, on réduit la

consommation énergétique, on constate aussi que la puissance de compresseur avec stockage est inférieure par rapport à la (Pt) sans stockage.

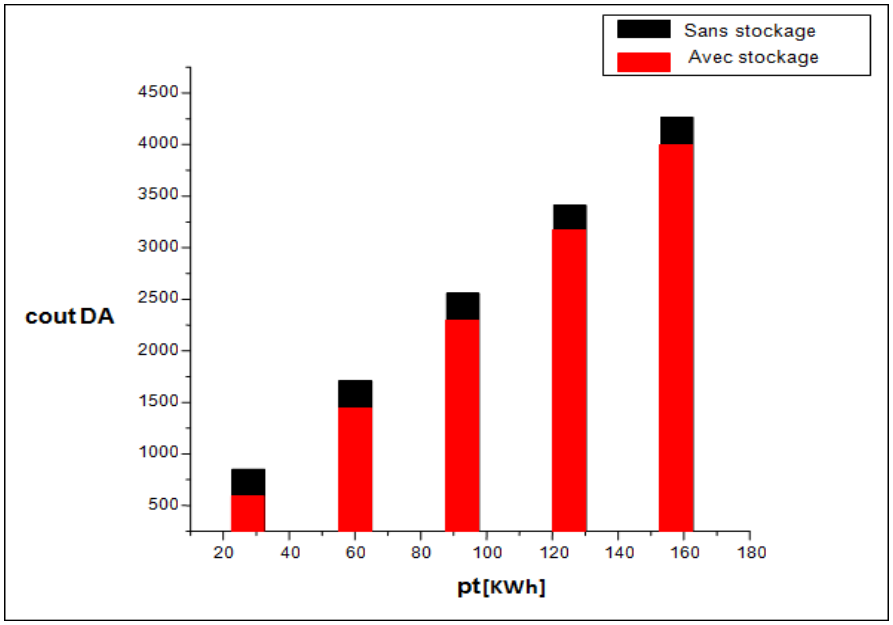


Figure 4. 25: Variation du coût de la consommation énergétique en fonction de la puissance consommée par la compresseur

On constate d'après les graphes que le coût de consommation d'énergie augmente avec l'augmentation de puissance, et le coût de consommation d'énergie électrique sans stockage de froid est supérieur 33% du coût de la consommation d'énergie électrique avec stockage

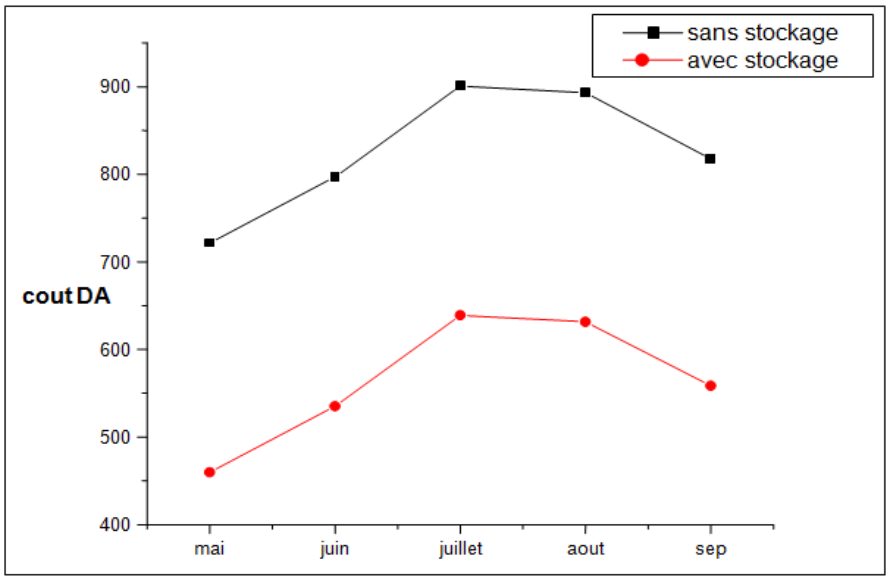


Figure 4. 26: Comparaison du coût de la consommation énergétique sans stockage et avec stockage pendant la période estivale

Les résultats montrent que la valeur maximale du coût de consommation d'énergie électrique est enregistrée pendant les mois de Juillet et Aout, et diminue en mois de mai et septembre et on remarque que la valeur du coût de la consommation d'énergie électrique sans stockage de froid est supérieur par rapport au coût de consommation d'énergie électrique avec stockage.

4.5.4. Conclusion :

Nous concluons que le stockage de froid dans la sécurisation de l'énergie potentielle disponible comme objectif principal de réduire la consommation de L'énergie électrique au cours de la période de pointe, ce qui assure un équilibre entre la production et la demande d'électricité

Le stockage de froid est une des réponses à la gestion d'énergie

1. Déplacement de la consommation d'électricité des heures de pointes vers les heures creuses.

2. Gestion de la consommation électrique amélioration de la gestion énergétique, production nocturne plus efficace, réduction de la puissance électrique, consommation électrique supplémentaire limitée.

Chapitre 5

Optimisation de la consommation énergétique en climatisation

5.1. Introduction

Le poids croissant des dépenses en climatisation préoccupe actuellement les gestionnaires et les usagers, ce qui conduit à étudier des dispositions de construction visant à réduire les apports calorifiques à travers les parois.

Un bâtiment est conçu pour protéger les usagers des effets climatiques, chaud et froid en créant un microclimat intérieur satisfaisant pour l'exercice de diverses activités, tout en assurant une gestion efficace de l'énergie. Le secteur du bâtiment réputé grand consommateur d'énergie, la réduction de cette consommation est au cœur des préoccupations des bâtisseurs qui inscrivent leur réflexion dans le cadre du développement durable ou encore de la haute qualité environnementale.

L'atteinte de ces objectifs conduit à l'apparition de solutions passives, qui ont été développées en augmentant fortement l'isolation des différentes composantes de l'enveloppe pour empêcher au maximum les déperditions de chaleur vers l'extérieur. Ceci explique l'évolution des techniques de construction et le développement de nouveaux matériaux servant à l'isolation thermique et qui peuvent réduire le coût de la construction, d'une part et baisser la facture énergétique, d'autre part.

Une bonne isolation augmente le confort thermique et permet de faire des économies importantes en énergie, l'investissement dans le domaine d'isolation très souvent amorti en quelques années, pour cela choisir le site d'implantation à conception compacte capable de réduire la surface exposée au soleil et d'augmenter l'inertie thermique, il faut tenir compte de l'orientation, l'orientation Est-Ouest est préférable, sélectionner les matériaux utilisés pour la construction de l'enveloppe représente un enjeu considérable pour la réduction des consommations énergétiques dans le secteur du bâtiment, exemple pour l'isolation thermique des murs extérieurs, utiliser une double murette avec une lame d'air au milieu, elle est moins couteuse et a la fois c'est une isolation thermique et phonique, La position correcte des fenêtres peut minimiser les flux de chaleur est provoquer une ventilation naturelle pendant la soirée en position ouverte.

L'amélioration du confort thermique avec l'intégration des solutions bioclimatiques telles que la cheminée solaire, l'échangeur air-sol et les murs végétalisés dans l'archétype choisi est très

efficace pour le rafraichissement de l'air pendant l'été car il réduit la consommation énergétique de climatisation (Saifi. N, 2016).

5.2. Orientation

L'orientation se rapporte à l'angle d'azimut d'une surface à Nord vrai relatif; la direction générale dans laquelle une surface fait face. Tandis que l'orientation réelle est habituellement donnée en degrés du nord (à partir de l'orientation nord). L'orientation est la disposition d'un bâtiment ou d'un aménagement urbain par rapport aux éléments d'un site ou au point cardinal. L'orientation d'un logement est désignée par celle de sa face principale, en général celle qui comporte la plus grande surface de vitrage (Bellara S, 2005).

L'orientation d'un habitat répond à plusieurs critères: les besoins en lumière naturelle, l'intérêt d'utiliser le rayonnement solaire pour le chauffage, ou au contraire la nécessité de s'en protéger pour éviter la surchauffe, la protection du vent en hiver ou en tire profit pour le rafraîchissement d'été (les possibilités de ventilation naturelle), les vues, sont autant de paramètres importants pour le choix de l'orientation.

L'orientation des façades et des baies par rapport au soleil et au vent dominant et l'ensoleillement est la qualité de l'exposition au soleil. Conduit à choisir une disposition en fonction de données climatiques.

5.3. L'isolation thermique du bâtiment

Le secteur résidentiel est à l'origine de 35% de la consommation d'énergie finale en Algérie. Les perspectives de développement du parc de logements conduiront à un accroissement exponentiel de cette consommation énergétique. Dans ce contexte, la réalisation de logements efficaces énergétiquement s'impose comme une nécessite à la maîtrise des consommations énergétiques du secteur résidentiel.

L'utilisation de parois lourdes dans le domaine de la construction est l'une des solutions classiques pour se protéger des agressions climatiques cette solution ne permet pas d'atteindre un niveau de confort satisfaisant surtout dans les régions chaudes où l'inertie des parois doit être associée à une isolation thermique.

L'évolution des méthodes de construction, le besoin d'un confort thermique plus approprie et le souci d'économie d'énergie ont suscite un intérêt pour une amélioration de l'isolation, la

recherche des matériaux et des techniques de mise en œuvre susceptibles de réduire le flux de chaleur à travers l'enveloppe des bâtiments. Les techniques ont pour rôle principal la conservation des calories par un ensemble de dispositions réduisant l'échange de chaleur entre deux espaces de températures différentes intérieur et 'extérieur d'une construction.

5.3.1. Les isolants utilisés en Algérie :

1. Polystyrène expansé :

Le polystyrène est un matériau alvéolaire rigide, peu dense, dont les principales utilisations sont l'isolation thermique des bâtiments et l'emballage des produits industriels ou alimentaires, il est réalisé à l'usine de Sonatrach à El-Annaser- Alger, dans la variante moulé en blocs

2. Mousses phénoliques:

Les plaque en mousses phénolique sont utilisés pour l'isolation des plafonds et des cloisons et portes, et pour l'isolation des réfrigérateurs, l'isolation des tuyaux pour le transport isotherme, Elles sont fabriquées dans les usines Sonatrach Chelef en plaques rigides.

3. Le liège expansé :

Le liège est le produit de la récolte de l'écorce du chaine-liège qui pousse dans les régions méditerranéennes. ce matériau est fabriqué à Jijel par la Société Nationale des industries des lièges et du bois et composés en plusieurs couches la première couche a une dure irrégulière et réservée à l'isolation et autre couches sont utilisées pour fabrication débouchons ou de revêtement de sols.

4. Bêton Cellulaire :

Le béton cellulaire autoclave est un matériau silicocalcaire obtenu à l'autoclave d'un mélange de sable siliceux, de chaux et de ciment, et du dégagement gazeux (addition, ou moment du gâchage, de poudre d'aluminium).

L'isolation thermique procure un certains nombre d'avantages dont les principaux sont:

La diminution du coût global de construction en associant l'isolation à des structures légères, l'économie d'énergie en diminuant la puissance des installations de chauffage et de climatisation,

la durabilité des constructions en protégeant les éléments du bâtiment contre les effets de variation de température.

5.4. Les solutions bioclimatiques

5.4.1. Cheminée solaire

La cheminée solaire fournit au bâtiment la ventilation pendant le jour sans recyclage d'air dans la pièce. Une cheminée solaire peut être un des composants d'un bâtiment, dans lequel un ou plus de murs d'une cheminée sont transparents, le mur vitré permet le rayonnement solaire d'accumuler assez de chaleur pour induire l'effet de cheminée. L'énergie solaire réchauffe l'air à l'intérieur de la cheminée. En raison de la différence de la température d'air, un gradient de densité entre l'intérieur et l'extérieur de la cheminée provoque un mouvement ascendant d'air.

L'écoulement est provoqué par la différence de masse volumique entre l'air intérieur chaud et l'air extérieur froid. L'air chaud possède une masse volumique plus faible que l'air froid et tend à monter. L'air froid est plus lourd et tend à rester au sol. L'air chaud et humide s'élève vers les cheminées et est remplacé par de l'air froid et sec.

5.4.2. Echangeur air-sol

L'échangeur air-sol est un système géothermique consiste à rafraîchir l'air ventilé dans un bâtiment. II suffit d'enterrer un ou plusieurs tuyaux sur un trajet suffisamment long et de faire circuler l'air. L'air extérieur transite dans ce réseau de gaines par convection forcée, se réchauffe en hiver ou se refroidit en été, avant d'être soufflé dans le bâtiment. Le principe de l'échangeur air-sol est de faire circuler l'air neuf dans un conduit enterré grâce à un ventilateur, avant de l'insuffler dans le bâtiment. En hiver, l'air se réchauffe au cours de son parcours souterrain, les besoins de chauffage liés au renouvellement d'air des locaux sont alors réduits et le maintien hors gel du bâtiment peut être assuré, le puits est alors dit puits canadien. En été, l'air extérieur profite de la fraîcheur du sol pour se refroidir et arriver dans le bâtiment durant la journée à une température inférieure à celle d'extérieure, le puits est alors dit puits provençal (Romuald J, 2009).

5.4.3. Végétalisation des bâtiments

Dans toutes ces formes, la végétation protège le bâtiment en réduisant les transferts de chaleur par convection et les gains par rayonnement ce qui améliore le comportement énergétique grâce à l'évapotranspiration qui rafraîchit l'air ambiant extérieur et intérieur des bâtiments, la végétation peut constituer une seconde enveloppe du bâtiment (mur végétal, toit végétal).

Le mur végétal est une paroi qui s'élève parallèlement aux murs du bâtiment à protéger. Selon son orientation et sa composition, le mur vert servira à la fois d'écran contre les vents dominants, le bruit, l'ensoleillement mais également la pollution.

La toiture végétalisée est une solution intelligente pour renforcer les performances thermiques et phoniques de l'habitat, le principe de la toiture végétale consiste à recouvrir d'un substrat végétalisé un toit plat ou à faible pente.

5.5. Données géographiques

La wilaya de Ouargla est située au Sud-est Algérien, elle est distante de 800 km de la capitale Alger. Elle couvre une superficie de 163,323 km², elle est peuplée de 210,175 habitants (Ghedamsi R, 2013), La ville de Ouargla est située à 128 mètres d'altitude, une latitude φ=31°57'N, une longitude λ=05°24'E et un Albédo : ρ = 0.35.

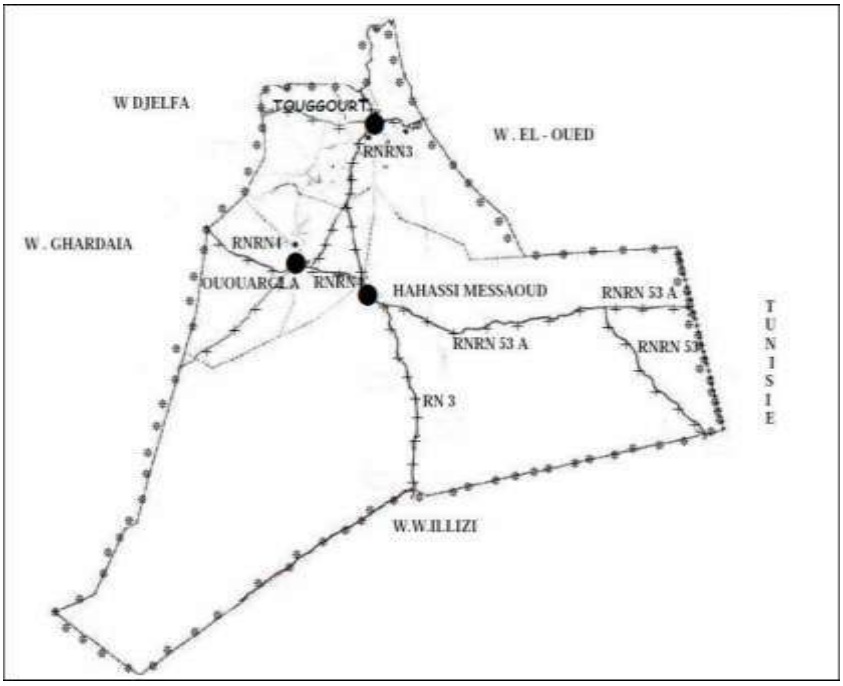


Figure 5. 1: **Situation géographique de la ville de Ouargla**

5.5.1 Données météorologiques

La température peut atteindre 49°C en été et 0°C la nuit en hiver, l'humidité relative enregistre des taux allant de 25.3 à 66.2 %. Les précipitations sont rares et irrégulières et varient entre 0,22 mm et 17,1 mm par an. Les vents dominants sont ceux de N/NE et S/SE avec une vitesse pouvant atteindre 4.85 m/s et parfois dépasse 20 m/s.

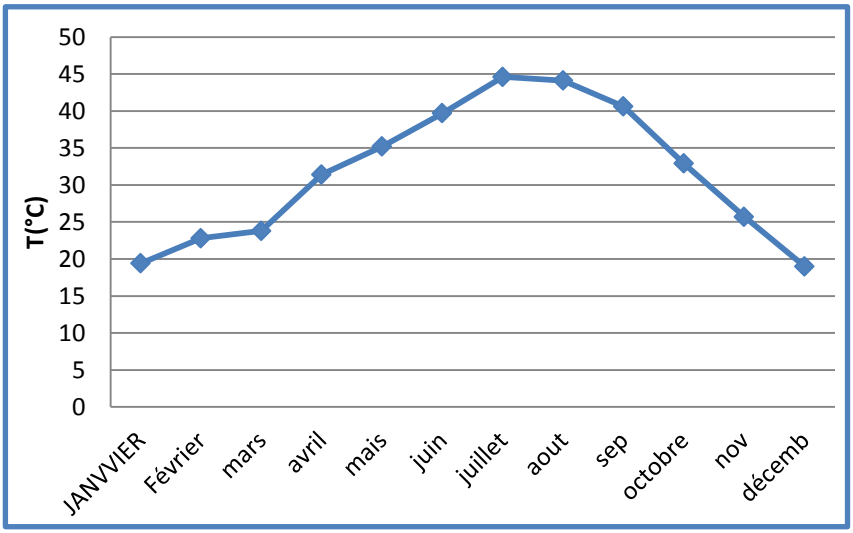


Figure 5. 2: V**ariation de la température dans la région de Ouargla**

La figure 5.2 : représente la variation de la température dans la région de Ouargla pendant une année, on remarque que la température atteint son max pendant le mois de juillet.

5.6. Application

Le local est composé d'un séjour orienté au Nord-Est, une cuisine est située au Nord, deux chambre l'une orientée au Nord-Ouest et l'autre au Sud-Ouest, un garage est situé au Sud-Est et deux salles de bain l'une est orientée Ouest et l'autre au Sud-Est.

5.6.1.Matériaux de constructions utilisés :

1. Le mortier :

Le mortier est obtenu par le mélange d'un liant (plâtre ou ciment), de sable, d'eau et éventuellement d'additions. Des compositions multiples de mortier peuvent être obtenues en jouant sur les différents paramètres: liant (type et dosage), adjuvants et ajouts, dosage en eau. En ce qui concerne le liant, tous les ciments et les chaux sont utilisables; leur choix et le dosage sont fonction de l'ouvrage à réaliser et de son environnement.

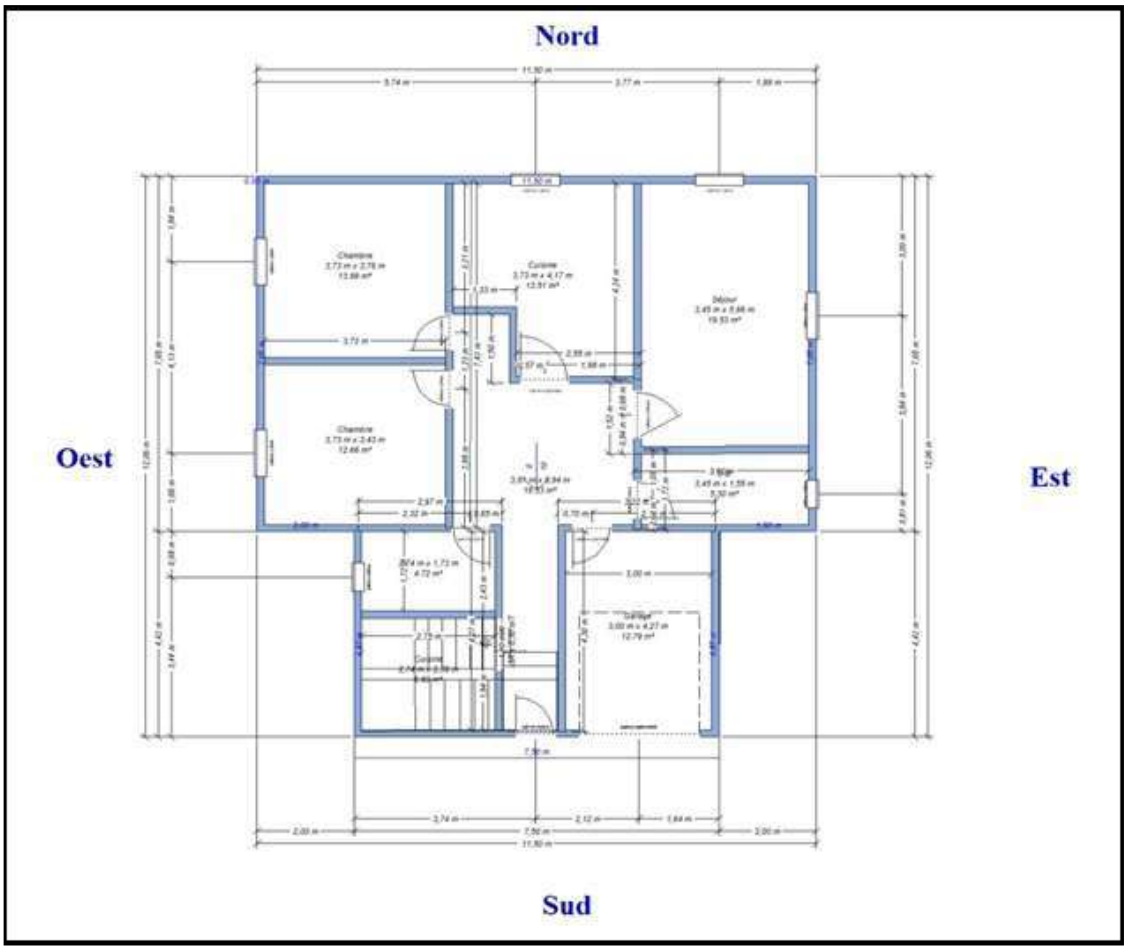


Figure 5. 3: **Plan du local**

2 . Le béton :

Le béton est un matériau composite aggloméré constitué de granulats durs de diverses dimensions collées entre eux par un liant. les granulats sont des grains de pierre, sable, gravier, cailloux et le liant est un ciment, Les différents granulats forment le squelette granulaire du mortier ou du béton. Le ciment, l'eau et les adjuvants forment la pâte liante.

3 .Briques :

La brique est uns produit céramique, dont la matière première est de l'argile, avec ou sans additifs. La forme des briques est généralement parallélépipède rectangle. Elles sont couramment utilisées dans la construction des bâtiments et des travaux publics. Les briques peuvent se diviser en 3 groupes principaux : brique poreuses, brique ordinaire, briques d'argiles creuses à perforation.

5.7. Bilan thermique du local

Le bilan thermique s'articule sur un ensemble de paramètres qui permettent d'obtenir une puissance frigorifique installée suffisante et capable d'assurer le confort désiré dans un local.

Coefficient de transmission global:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum_{I=1}^{n} \frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_e}} \quad \textbf{(5.1)}$$

α_i : le coefficient superficiel de transmission par convection interne.

α_e : le coefficient superficiel de transmission par convection externe.

e_i : épaisseur de chaque couche de paroi.

λ : cœfficient de conductivité thermique en thermique.

$$\mathrm{Qtot} = \mathrm{Qcl} + \mathrm{QL} \quad \textbf{(5.2)}$$

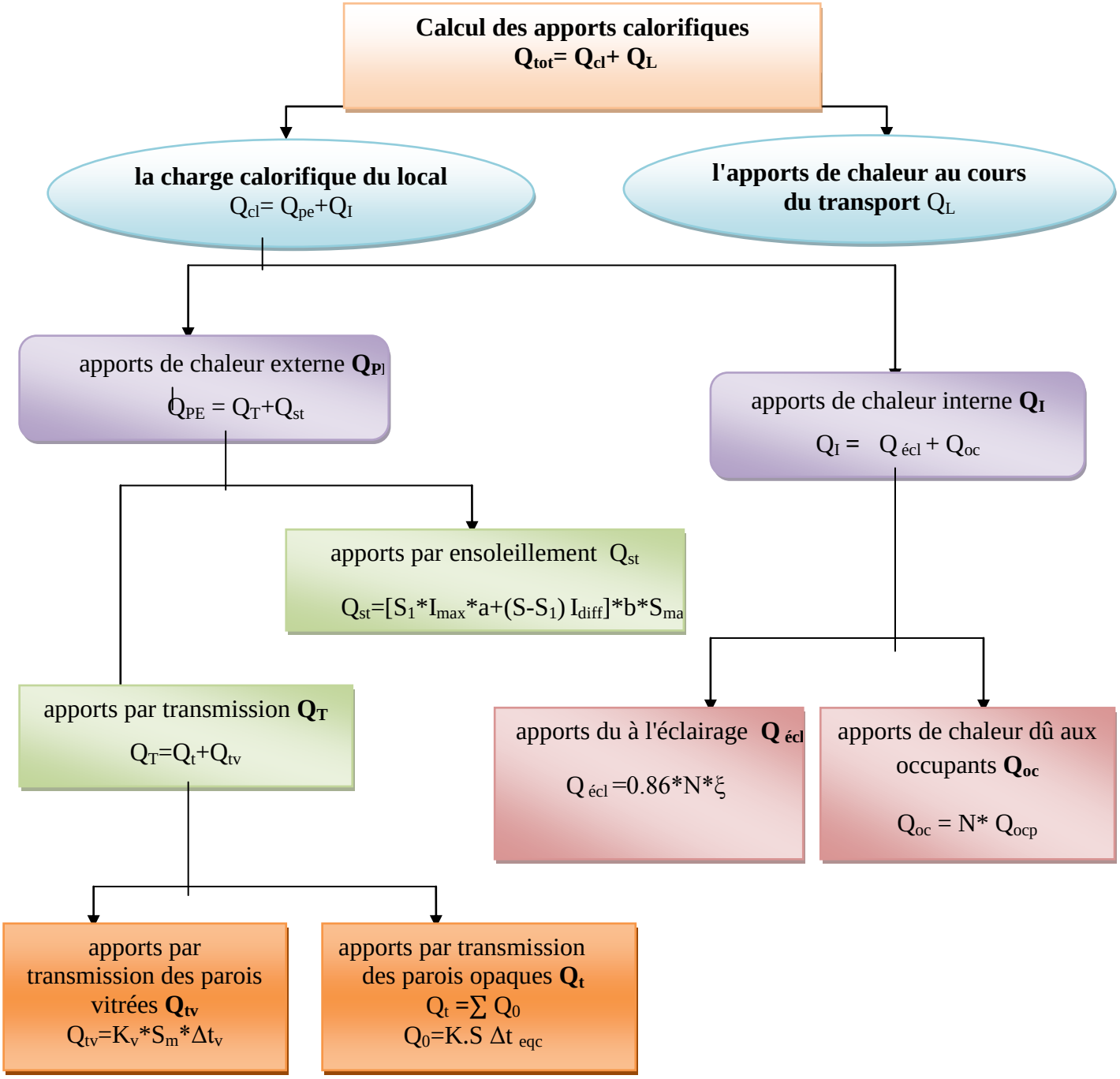
La charge calorifique du local

$$\mathrm{Qcl} = \mathrm{Qpe} + \mathrm{QI} \quad \textbf{(5.3)}$$

Q_{pe}: apport de chaleur externe

Q_I : apport de chaleur interne.

5.7.1.Organigramme de calcul des apports calorifiques du local:



Application:

Ti=20°C Tex= 44.6°C

Local 1

Tableau 5. 1: Apports par transmission des parois opaques (local 1)

	Mur Sud	Mur Nord	Mur ouest	Mur Est	plafond	Plancher	Porte	Fenêtre
S(m²)	11.49	10.29	15.92	16.92	23.13	23.13	2.2	2.4
K	1.40	1.61	1.40	1.61	1.33	0.185	1.72	4.5
ΔT_{eqc}(°C)	16	24.6	16	24.6	24.6	15	16	24.6

Local 2

Tableau 5. 2 Apports par transmission des parois opaques (local 2)

	Mur Sud	Mur Nord	Mur ouest	Mur Est	plafond	plancher	Porte	Fenêtre
S(m²)	12.33	12.33	11.22	10.66	17	17	1.76	1.2
K	1.40	1.61	1.61	1.40	1.33	0.185	1.72	4.5
ΔT_{eqc}(°C)	16	24.6	24.6	16	24.6	15	16	24.6

Tableau 5. 3: Besoins énergétiques des deux locaux

	Locale 1	Locale 2
quantité de chaleur par transmission Q_{tr}	2838.8	2232.34
Apports par ensoleillement	165.43	82.71
Apports de chaleur dux aux occupants	700	300
Apports dus à l'éclairage	1191.96	1191.96
Les apports internes Q_I	1891.96	1491.96
apports de chaleur externe Q_{pe}	3004.23	2315.05
La charge calorifique du locale Q_{cl}	4896.19	3807.01
L'apports de chaleur au cours du transport	200	200
Q_{tot}	126 ,96 kWh	

En utilisant le logiciel MATLAB, pour calculer les besoins énergétiques des deux locaux à climatises en période estivale dans la région de Ouargla. Q_T =126 ,96 kWh

Tableau 5. 4: **Besoins énergétiques par mois**

mois	Q0 kWh
Mais	118.57
Juin	130.90
Juillet	147.98
Aout	146.72
Septembre	134.37

Les résultats trouvés par (Saifi N., 2016) ont montré que la consommation énergétique dans l'archétype « A » diminue avec l'utilisation des solutions bioclimatiques.

Tableau 5. 5: **Consommation énergétique sans et avec les solutions bioclimatique**

		Qc (kWh/m²)					
Mois	**Confort**	**Janvier**	**Février**	**Mars**	**Avril**	**Mai**	**Juin**
Sans solutions bioclimatiques	Chauf	15.17	8.30	6.18	0	0	0
	Clim	0	0	0	5.67	10.39	18.21
Avec solutions bioclimatiques	Chauf	8.51	5.09	4.32	0	0	0
	Clim	0	0	0	4.00	6.59	10.44
Mois		**Juillet**	**Août**	**Sept.**	**Oct.**	**Nov.**	**Déc.**
Sans solutions bioclimatiques	Chauf	0	0	0	0	6.53	13.84
	Clim	24.23	22.32	14.24	7.19	0	0
Avec solutions bioclimatiques	Chauf	0	0	0	0	4.46	7.67
	Clim	13.62	12.57	8.51	5.17	0	0

La période de la climatisation dans la ville de Ouargla s'étend du mois de mai jusqu'au moi d'octobre.

Tableau 5. 6: Consommation énergétique pendant la période estivale(ville de Ouargla)

	Qc (kWh/m^2)	
Mois	Sans solutions bioclimatiques	Avec solutions bioclimatiques
Avril	5.67	4.00
Mai	10.39	6.59
Juin	18.21	10.44
Juillet	24.23	13.62
Aout	22.32	12.57
Septembre	14.24	8.51
Octobre	7.19	5.17

La consommation énergétique diminue avec l'utilisation des solutions bioclimatiques, si on prend le mois de juillet à Ouargla, la consommation énergétique est de 24.23 kWh/m^2 sans solutions bioclimatiques, alors qu'avec solutions bioclimatiques la consommation énergétique est de l'ordre de 13.62kWh/m^2, donc économie d'énergie.

Tableau 5. 7:Coût de la consommation Energétique en utilisant la machine frigorifique Mécanique/ absorption pour différents valeurs du COP

Consommation Energétique		Comp. sans sol.		Absorp. sans sol.	
		Cop= 3		Cop=1.4	
Mois	Q0 Sans sol	Pt sans sol	DA Sans sol	Qb (KWh) Sans sol	Dinars Sans sol
Avril	5.67	**1.89**	48.22	**4.05**	35.90
Mai	10.39	**3.46**	88.37	**7.42**	65.79
Juin	18.21	**6.07**	154.89	**13.00**	115.31
Juillet	24.23	**8.07**	206.09	**17,30**	153.43
Aout	22.32	**7.44**	189.85	**15.94**	141.33
Septembre	14.24	**4.74**	121.12	**10.17**	90.17
Octobre	7.19	**2.39**	61.15	**5.13**	45.52

Consommation Energétique		Comp avec sol		Absorp avec sol	
		Cop= 3		Cop=1.4	
Mois	Q0 avec sol	Pt avec sol	DA avec sol	Qb (KWh) avec sol	Dinars avec sol
Avril	4	**1.33**	34.02	**2.85**	25.32
Mai	6.59	**2.19**	56.05	**4.70**	41.73
Juin	10.44	**3.48**	88.80	**7.45**	66.10
Juillet	13.62	**4.54**	115.85	**9.72**	86.24
Aout	12.57	**4.19**	106.91	**8.97**	79.59
Septembre	8.51	**2.83**	72.38	**6.07**	53.88
Octobre	5.17	**1.72**	43.97	**3.69**	32.73

5.8. Résultats et discussion

Pour la climatisation du local on utilise soit une installation frigorifique à compression mécanique et une installation frigorifique à absorption, puis on procède à une comparaison.

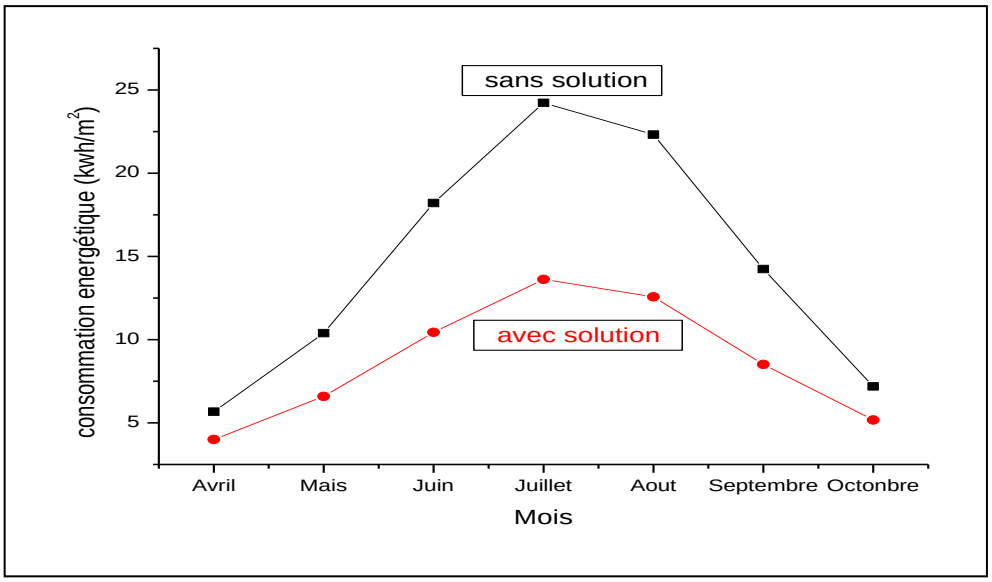


Figure 5. 4: consommation énergétique de la climatisation Pendant la période estivale (Ouargla)

D'après la figure **5.4,** pour un local situé à Ouargla au sud-est de l'Algérie, dans la période estivale ou on a besoin de la climatisation, le maximum de la consommation énergétique est atteint le mois de juillet. En utilisant les solutions bioclimatiques les besoins énergétiques diminuent de 60%.

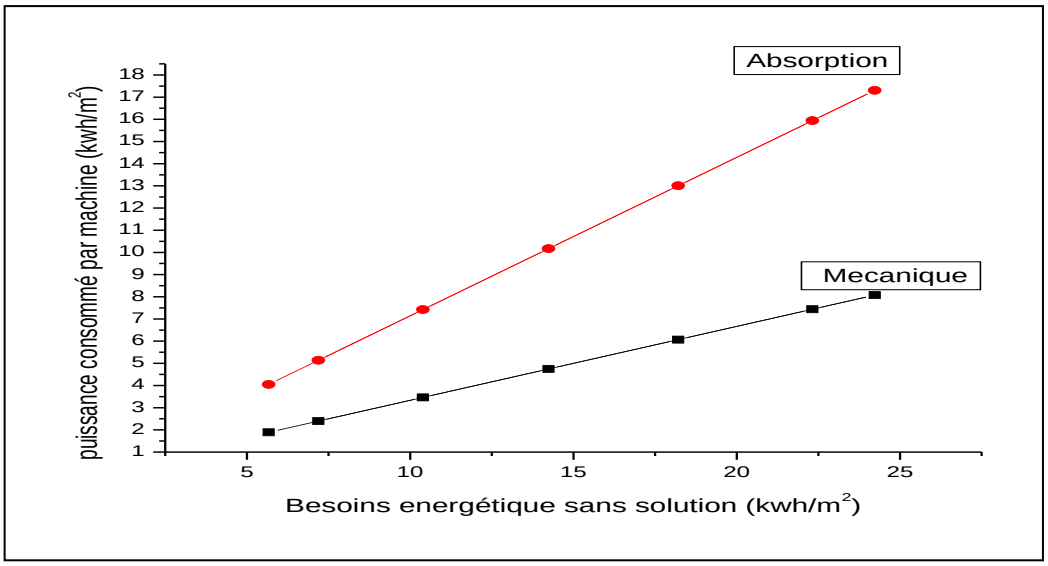


Figure 5. 5: Puissance consommée par machine frigorifique en fonction des besoins énergétiques

On remarque que la puissance consommée par la machine frigorifique à absorption est plus élevée que celle de machine frigorifique à compression mécanique, mais la machine à absorption consomme de l'énergie sous forme de gaz naturel, et la machine à compression consomme de l'énergie électrique.

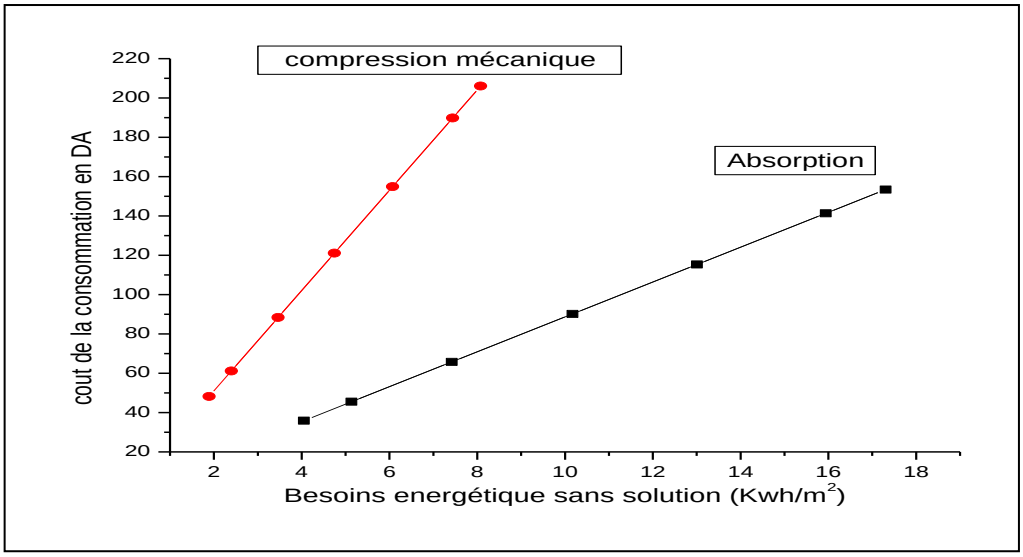


Figure 5. 6: coût de la consommation en fonction des besoins énergétiques

L'énergie électrique coute plus cher que le gaz naturel en Algérie, c'est pour cela que le coût d'une une installation frigorifique à compression mécanique qui utilise de l'énergie électrique est supérieur à celui d'une une installation frigorifique à absorption qui utilise le gaz naturel comme source d'énergie.

5.9. Conclusion

Pour optimiser la consommation énergétique en climatisation, on doit commencer par le choix du site ainsi que orientation du local à climatiser, et tenir en considération l'isolation thermique du bâtiment et le choix des matériaux de construction, la consommation énergétique diminue avec l'utilisation des solutions bioclimatiques.

D'autre part l'utilisation d'une machine frigorifique à absorption pour la climatisation du local est très justifié. Sachant que la machine frigorifique à absorption est rustique demandant très peu de maintenance et l'absence de machines tournantes de forte puissance fait des machines frigorifiques à absorption silencieuses, à l'opposé de la machine à compression mécanique qui utilise de l'énergie électrique qui est très coûteuse.

Conclusion

Conclusion

Afin de répondre aux besoins croissants en froid industriel et climatisation, la recherche s'oriente aujourd'hui vers des technologies de réfrigérations alternatives, en effet les exigences environnementales limitent les technologies classiques, les systèmes de réfrigération classiques sont basés sur la compression de vapeur qui existe depuis des années, bien qu'il s'agisse d'une technologie fiable, elle a comme principal inconvénient l'utilisation de fluides frigorigènes nocifs pour l'environnement .

Un bâtiment est conçu pour protéger les usagers des effets climatiques en créant un microclimat intérieur satisfaisant pour l'exercice de diverses activités, tout en assurant une gestion efficace de l'énergie. Le secteur du bâtiment réputé grand consommateur d'énergie , la réduction de cette consommation est la préoccupations des bâtisseurs qui inscrivent leur réflexion dans le cadre du développement durable ou encore de la haute qualité environnementale, l'atteinte de ces objectifs conduit à l'apparition de solutions passives, qui ont été développées en augmentant fortement l'isolation des différentes composantes de l'enveloppe pour empêcher au maximum les déperditions de chaleur vers l'extérieur, ceci explique l'évolution des techniques de construction et le développement de nouveaux matériaux servant à l'isolation thermique, et qui peuvent réduire le coût de la construction, donc baisser la facture énergétique.

On peut utiliser des systèmes de climatisation relativement simples et économiques, telque la machine frigorifique à absorption d'ou la possibilité de développer les systèmes de climatisation couplés à un système solaire pouvant garantir les conditions de confort. Pour optimiser la consommation énergétique en climatisation, le cas du local choisi situé à Ouargla, on doit commencer par le choix du site ainsi que son orientation, une bonne isolation thermique du bâtiment, et appliquer les solutions bioclimatiques, d'autre part le choix d'une machine frigorifique à absorption, la climatisation du local coute nettement moins cher que la machine frigorifique à compression mécanique qui utilise de l'énergie électrique.

. Les propriétés thermodynamiques du certains fluides parmi les plus utilisés dans le domaine du froid, Il s'agit des mélanges réfrigérants: R407C et R507.en utilisant la représentation par une équation cubique en volume et à deux paramètres qui est représentée par l'équation de Peng – Robinson, on comparant ses résultats à celles données par le logiciel Cool Pack, L'application de l'équation de Peng-Robinson, dans le cas des fluides (R407C, R507) donne

des résultats satisfaisants, pour la détermination des caractéristiques thermodynamiques, Les relations calculant les propriétés thermodynamiques des fluides frigorigènes HFC, d'après les résultats Le coefficient de performance dépend essentiellement de la nature de fluide frigorigène, le COP d'une machine frigorifique à compression mécanique augmente avec l'augmentation de la température d'évaporation et l'inverse pour l'augmentation de la température de condensation. En comparant les deux fluides frigorigènes R407C, R507, pour les mêmes conditions de fonctionnement, on remarque que le R507 présente un meilleur coefficient de performance.

La réduction de la quantité du fluide frigorigène peut être réalisée par l'utilisation des micro-canaux dans les échangeurs de chaleurs de l'installation frigorifique, L'utilisation des micro-carnaux a l'avantage de contribuer à une augmentation significative de la compacité des échangeurs de chaleur et à une amélioration non négligeable des performances énergétiques des systèmes.

A partir des résultats d'analyse, on montre la présence de différents régimes d'écoulement diphasique dans le capillaire. Les causes d'inversion du sens de l'écoulement diphasique sont mises en évidence. On a identifié un écoulement oscillatoire qui se situe généralement entre un écoulement annulaire à l'aval et un écoulement à bulles discrètes dispersées dans le liquide situé en amont du capillaire.

Le stockage de froid dans la sécurisation de l'énergie potentielle disponible comme objectif principal de réduire la consommation de L'énergie électrique au cours de la période de pointe, ce qui assure un équilibre entre la production et la demande d'électricité

Le stockage de froid est une des réponses à la gestion d'énergie : le déplacement de la consommation d'électricité des heures de pointes vers les heures creuses, et le gestion de la consommation électrique et production nocturne plus efficace.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Ait-Mekideche, M.2013, Synthèse des bilans d'activités et Comptes sociaux consolidés des sociétés du Groupe Sonelgaz Juin 2014; Newsletter presse n°29.

Alexis. G.K. 2005, Exergy analysis of ejector-refrigeration cycle using water as working fluid, international journal of energy research, 25,pp 96-100.

Armas, J.C., Lapido, M., Gomez, J.R., Valdivia, Y., 2011, A thermodynamic evaluation of chilled water central air conditioning systems using artificial intelligence tools. Ing. Investig. 31, 134_142.

APRUE, 2012, Agence Nationale pour la Promotion et Rationalisation de l'Utilisation de l'énergie, Consommation Energétique Finale de l'Algérie.

ASHRAE.1993. Handbook, American society of heating, refrigerating and air conditioning engineers, Inc., Atlanta ; McGraw-Hill, New York.

Barret, M., 1991. La modélisation des propriétés thermodynamiques des fluides réels. Application, Thèse de l'université Paris I.

Barclay, J.A. 1984. S. Sarangi, Selection of Regenerator Geometry for Magnetic Refrigerator Applications, Intersociety Cryogenic Symposium.

Belfodil, F. 2007, Mémoire de magister Génie Mécanique (Élaboration d'un Programme pour le Calcul des Paramètres Thermodynamiques et Énergétiques des nouveaux fluides Frigorigènes et Application au Calcul des Cycles Frigorifiques), Université Ibn Khaldoun –Tiaret.

Benaoudia, M. 2001. Les contributions à l'optimisation en régime stationnaire des installations frigorifiques à absorption avec la solution Hydro- Ammoniacale, thèse de Doctorat, Université Technique de Construction BUCAREST.

Berkoune. A. 2002. Aide mémoire de mécanique des fluides. Office des publications universitaires. pp. 149-153.

Brown, G. V. 1976. Magnetic heat pumping near-room temperature, Journal of Applied Physics,18, 36-73.

Bolaji B.O, Huan Z. 2013. Ozone depletion and global warming: Case for the use of natural refrigerant, Renewable and Sustainable Energy Reviews 18, p 49–54.

Calm, J.M. 2008. The next generation of refrigerants - historical review, considerations, and Outlook, Int. J. Refrigeration vol: 31, p 1123-1133.

Calabrese, D., 2012. Low global warming potential alternative refrigerants evaluation program.

Cengel, Y. A., M. A. Boles, 2001, Thermodynamics, An Engineering approach, 3ème Edition

Chunnanond, K**.** Aphornratana. S.2003. Ejector: applications in refrigeration technology, Elsevier Ltd.23, P 134-140.

Clodic, D. 2002. L. Palandre, Inventaires des émissions des fluides frigorigènes.

Coquelet, C. 2003. Études des fluides frigorigènes. Mesures et modélisation, Thèse de doctorat, Ecole des mines de Paris.

Chougui M. L., 2010, Simulation et étude comparée de cycle a absorption (H_2O-LiBr) a usage de froid. cas de l'unité de production de détergent Henkel, mémoire de magister, université Mentouri Constantine.

Coleman, J.W, S.Garimella. 1999, Characterisation of two phase flow patterns in small diameter and rectangular tubes, Int .Heat Mass Transfer, 42 (15) pp .2869-88 .

Décret exécutif n° 2000-73 du 26 Dhou El Hidja 1420 correspondant au 1^{ér} Avril 2000 complétant le décret exécutif n° 93-165 du 10 Juillet 1993 réglementant les émissions atmosphériques de fumées

Dorantes, R. 1992 Performance théoriques et expérimentales d'une machine frigorifique tritherme a ejecto-compression. Influence de la nature du fluide de travail. Analyses énergétique et exégétique.

Duminil,M. 2012. Généralités, BE9730, Théorie des machines frigorifiques,Techniques de l'Ingénieur.

Dutton, J. c**.** 1986. Carroll. B. F**.** 1986**,** Optimal supersonic Ejector Designs. Journal of fluids engineering. vol. 108. p 416

Engelbrecht, K.L. Engelbrecht, G.F Nellis, S.A. Klein, A.M. Boeder.2005, Modeling

Active Magnetic Regenerative Refrigeration Systems, International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Montreux , Switzerland,37, 27-30.

Engelbrecht, K, Engelbrecht, G. Nellis, S. Klein. 2005, A Numerical Model Of An

Active Magnetic Regenerator Refrigeration System, Air- Conditioning And Refrigeration Technology Institute, ARTI- 21CR/612-10075.

Fukuda, S., Kondou, C., Takata, N., Koyama, S.2014, Low GWP refrigerants R1234ze(E) and R1234ze(Z) for high temperature heat pumps, International journal of Refrigeration, 40, 161-173.

Gschneider ,K, Jr, V.K. Pecharsky, A. Tsokol.2005, Recent developments in magneto caloric materials, Reports on progress in physics,28, 1479-1539.

Gschneider, K, Jr, V.K. Pecharsky.2006, Rare Earths and Magnetic Refrigeration, Journal of Rare Earths, 52, 641-642.

Hardy,S. 2004, Thorez J.-P., Ozone, pollution et vieux frigos , Connaître pour agir, publication de l'Agence régionale de l'environnement de Haute-Normandie, Arehn.

Hekayati, J,Akbar.Roosta, Jafar.javannmardi.2015, thermodynamic modeling of refrigerants solubility in ionic liquid using original and modified Sanchez- becmbe equation of stat

Jesus.E, Mora.R, carlo.PerezT, Frlix.F, Gonzalez.NJuanDe. 2014, thermodynamic properties of refrigerants using artificial neural networks, int journal of ref, 46,9-16.

Kanddlikar, S.G, W.J.Grande.2002,Evolution of micro channel flow passages– thermohydrolic performances and fabrication technology, proce.IMECE, pp.1-13

Khalid,A, Joudi, Ali.H. Lafta. 2001, Simulation of a simple absorption refrigeration system, Energy Conversion and Management, 42, 13,pp. 1575-1605.

Kherris, S, M. Makhlouf, Dj. Zebbar et O. Sebbane. 2013, Contribution Study Of The Thermodynamics Properties Of The Ammonia-Water Mixtures, Thermal science, doi:10.2298/TSCI110206083K, 3, pp. 891– 902.

Kyoto Protocol, 1998. Report of the Conference of the Parties. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC).

Lazzu´ s, J.A., 2009. Prediction of solid vapor pressures for organic and inorganic compounds using a neural network.Thermochim. Acta 489, 53,62.

Lemmon, Eric W. 2006, Propriétés Thermophysiques des Systèmes Fluides, NIST (National Institute of Standards and Technology).

Louahlia, H,B. Micheri.2007, Unsteady steam condensation flow patterns inside a miniature tube, Applied Thermal Engineering, vol. 27, pp. 1225-1235

Maake-H, W, J Eckert.1993, le nouveau Pohlman, deuxième PYC Edition 1993

Mancin, S, Diani, A., Doretti, L., Rossetto, L. 2014, R134a and R1234ze(E) liquid and flow boiling heat transfer in a high porosity copper foam, International Journal of Heat and Mass Transfer, 74 , 77–87.

Mederic, B.2014, Etude de la condensation convective en mini tube: analyse des instabilités, Thèse de Docteur de l'université Paul Sabatier, Toulouse, France.

Mohanraj, M, Jayaraj, S., Muraleedharan, C.2009. Environment friendly alternatives to halogenated refrigerants-A review, International Journal of Greenhouse Gas Control 3, 108-119.

Moghadassi, A, Parvizian, F., Mohsen Hosseini, S., Sharifi, A.2008, Prediction of pvt properties of ammonia by using artificial neural network and equations of state. ARPN J. Eng. Appl. Sci. 3, 18,27.

Mohanraj M. 2013, Energy performance assessment of R410A as a possible alternative refrigerant to R134a in domestic refrigerators, Energy for Sustainable Development 17, 471–476

Mota-Babiloni A, Navarro-Esbrı J., Barraga A., Moles F., Peris B. 2014, Theoretical comparison of low GWP alternatives for different refrigeration configurations taking R404A as baseline, International Journal of Refrigeration, 44, 81-90.

Nahdi. E. 1989, Etude paramétrique expérimentale des caractéristiques du système tritherme a éjecteur.

NT– GLACEO.2011, Notice indicative d'installation et d'utilisation (IU-0008-FR201104).

ODAYMET,A. 2010, transfert thermique local et identification des structures d'écoulement lors de la condensation dans un micro canal en silicium. thèse Belfort, France.

PATRY, J. 2015, REBOUL, C et Tristan, R, Technologies pour le stockage du froid. Percebois, J. 2012. Rapport - Énergies 2050, Centre d'analyse stratégique, France.

RAPIN, JP. 2014, Machine à compression mécanique, BE9740, Théorie des machines frigorifiques, Techniques de l'Ingénieur, 2014

RAPIN, JP. 2003, Aide-mémoire formulaire du froid, 12e édition 2003.

RAPIN, JP. 2006, Formulaire du froid, 13ème Edition DUNOD.

RAPIN, JP. 1998, installations frigorifiques, tome 2, 5e édition PYC 1988.

Selvaraju. A.2003, Mani. A. Analysis of an ejector with environment friendly refrigerants, Elsevier Ltd.

Shanov,B. 2004. Shanov, Contribution à l'Etude d'un Dispositif de Réfrigération Magnétique, Projet de fin d'étude, LEG 2004.

Tishin, A.M.1999, Hand Book of Magnetic Material, Vol.12, Ed Buschow K.H.J., North Holland, Amsterdam

Twu ,C. H, J. E. Coon, J. R.1995, Cunningham, A new generalized alpha function for a cubic equation of state. PR and SRK Equations, fluid phase Equilib.

Vasile, C. Muller, C.2006, Innovative design of a magneto caloric system, International Journal of Refrigeration, 1318-1326

Vliet, G.C,M.B. Lawson, R.A. 1982. Lithgow, Water-Lithium Bromide Double-

Effect Absorption Cooling Cycle Analysis, ASHRAE Transactions, 88 , pp. 811–823

Vrinat, G.2009, Froid et développement durable, BE9740, Machines frigorifiques industrielles, Techniques de l'Ingénieur.

Wu X., Hu S, Mo S.2013, Carbon footprint model for evaluating the global warming impact of food transport refrigeration systems, Journal of Cleaner Production 54 , 115-124.

Yattara, A, Y. Zhu, M. Mosa Ali.2003, Comparison between solar single-effect and single-effect double-lift absorption machines (Part I), Applied Thermal Engineering, 23, pp. 1981–1992.

Yu,B.f, Q. Gao, B. Zhang, X.Z. Meng, Z. Chen.2003, Review on Research of Room Temperature Magnetic Refrigeration, International Journal of Refrigeration 26, 622-636.

Yu, B, F. Yu, Q. Gao, C. F. Wang, B. Zhang, D. X. Yang et Y. Zhang. 2005, Experimental investigation on refrigeration performance of a reciprocating active magnetic regenerator of room temperature magnetic refrigeration', International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Montreux, Suisse.

Zimm,C, A. Jastrab, A. Sternberg, V.K. Pecharsky, Jr. Gschneider, M. Osborne, I. Anderson. 1998, Description and performance of near-room temperature magnetic refrigerator, Adva ces in Cryogenic Engineering 43, pp.1759-1766, 1998.159.

Zimm,C, A. Boerder, J. Chell, A. Sternberg, A. Fujita, S. Fujieda, K. Fukamichi. 2006, Design and performance of a permanent-magnet rotary refrigerator, International Journal of Refrigeration 29, pp. 1302-1306.