



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Republique Algerienne Democratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة العربي التبسي - تبسة

Université Larbi Tébessi – Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de Master Académique**

En : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

**Par : GHALLABI Mohamed Wala Eddine
REBIAI Dhiya Eddine**

Sujet

**Conception d'un cycle frigorifique à basses
températures (-80°C)**

Présenté et soutenu publiquement, le 13 / 06 / 2022 , devant le jury composé de :

M^r BOAFFANE Abdelkrim

MCB

Président

M^r AGGOUN Rabah

MCB

Rapporteur

M^{me} ZAIDI Latifa

MAA

Examineur

Promotion : 2021/2022

Dédicace

Mon parcours universitaire s'est terminé après l'épuisement et les épreuves...

Et ici, je conclus mes recherches de fin d'études avec toute la vigueur et l'activité.

Je suis reconnaissant à mon professeur, RABAH AGGOUN, qui est un lien pour achever la recherche, et à tous ceux qui ont eu du mérite dans ma carrière et m'ont aidé, même un peu, parents, famille, amis et personnes respectées. Les professeurs.

Je vous présente mon mémoire de fin d'études.

ملخص

تتمحور دراستنا حول تصميم آلة تبريد تشتغل بمائعين لعدم توفر مائع واحد يحقق لنا الهدف المتمثل في تثبيت درجة حرارتها الداخلية عند -80 درجة مئوية في منطقة تبسة صيفا حيث تبلغ الحرارة 40 درجة مئوية.

قمنا بحساب قيمة الحرارة التي يتم طردها من المبرد حيث نستخدم دراسة الحمل الحراري الطبيعي بعد اختيار ابعاده.

من أجل إيجاد عوامل التشغيل (درجات حرارة المبخر والمكثف و المبادل الحراري) استعملنا طريقة التحسين التي تعطينا أفضل القيم المحققة لثمن الادنى من حيث استهلاك الطاقة الكهربائية و عناصر نظام التبريد والتي نستخدمها لتحديد مائعي التبريد اللذين يلبيان الشروط.

Summary

Our study revolves around the design of a refrigeration machine that works with two fluids for lack of a single fluid allowing us to maintain its internal temperature at -80 degrees Celsius in the region of Tébessa in summer where the base temperature reached 40 degrees Celsius.

We calculated the calorific contributions by transmission and by ventilation in the case of natural convection after having chosen the dimensions of the refrigerator studied.

In order to find the operating parameters (temperatures of the evaporator, condenser and heat exchanger), we used the optimization method which gives us the best values obtained for the lowest price in terms of consumption. electrical power and cooling system components. The values found allowed us to choose the two refrigerants that meet the conditions.

Résumé

Notre étude s'articule autour de la conception d'une machine frigorifique qui fonctionne avec deux fluides par manque d'un seul fluide nous permettant de maintenir sa température intérieure à -80 degrés Celsius dans la région de Tébessa en été où la température de base atteint 40 degrés Celsius.

Nous avons calculé les apports calorifiques par transmission et par ventilation dans le cas de la convection naturelle après avoir choisi les dimensions du réfrigérateur étudié.

Afin de trouver les paramètres de fonctionnement (températures de l'évaporateur, du condenseur et de l'échangeur de chaleur), nous avons utilisé la méthode d'optimisation qui nous donne les meilleures valeurs obtenues pour le prix le plus bas en termes de consommation d'énergie électrique et de composants du système de refroidissement. Les valeurs trouvées nous ont permis de choisir les deux fluides frigorigènes qui remplissent les conditions.

Table de matières :

Table de matières.....	I
liste des figures.....	III
Liste de tableau.....	IV
Liste de symbole.....	V
Introduction générale.....	1

Chapitre I: Généralités sur les machines frigorifiques

1. Histoire des machines frigorifiques.....	2
2. Définition.....	3
3. Types de cycles frigorifiques.....	3
3.1. Machine frigorifique à compression (ditherme).....	4
3.2. Machines frigorifiques trithermes	4
4. Eléments d'une machine frigorifique	5
4.1. Eléments principaux	5
4.1.1. Compresseur	5
4.1.1.1. Types des compresseurs	5
4.1.2. Condenseur	7
4.1.2.1. Types des condenseurs.....	7
4.1.3. Détendeur	7
4.1.3.1. Types de détendeurs	8
4.1.4. Évaporateur	8
4.1.4.1. Types dès l'évaporateur.....	9
4.1.5. Fluide frigorigène	9
4.2. Eléments secondaires	12
4.2.1. Thermostats	12
4.2.2. Bouteille anti-coups de liquide	12
4.2.3. Voyants.....	13
4.2.4. Filtre déshydrater.....	13
4.2.5. Pressostats	14

Chapitre II : Cycles des machines frigorifiques

1. présentation du circuit frigorifique élémentaire.....	16
2. Cycle de machine frigorifique (cycle Carnot modifié).....	17
2.1. Quantités d'énergie échangées au course de cycle.....	18
3. Amélioration du cycle de base	19
3.1. Installation bi-étagée à injection totale.....	20
3.2. Installation bi-étagée à injection totale.....	21

3.3. Installation en cascade.....	22
4. Phénomènes endothermiques et exothermiques.....	23
5. Coefficients de performance	23
6. Classification des machines frigorifiques	24
6.1. Machine consommant de l'énergie mécanique (système au moins ditherme)	24
6.2. Machine consommant de l'énergie thermique (système au moins trithermes)	25

Chapitre III: Dimensionnement du système frigorifique

1. Les conditions de fonctionnement	26
2. Détermination des apports calorifiques globaux	26
2.1. Murs verticaux.....	28
2.2. Mur du haut (horizontal)	29
2.3. Mur inférieur (du bas).....	30
3. Dimensionnement du système de réfrigération.....	31
3.1. critère sur lequel est basée l'optimisation	33
3.2. Expression finale du prix total des éléments du système	35
4. Choix des deux fluides frigorigènes.....	40
5. Dimensionnement numérique du système de réfrigération	41
5.1. Calcul des débits massiques.....	42
5.2. Calcul du COP _{FT} du système.....	42
5.3. Dimensionnement du compresseur	42
5.4. Dimensionnement de l'évaporateur.....	43
5.5. Dimensionnement du condenseur	43
5.6. Dimensionnement de l'échangeur de chaleur	44
5.7. Consommation d'électricité.....	44
5.8. Dimensionnement du détendeur.....	44
6. Résultats numériques.....	49
Conclusion.....	50

Liste des figures

Figure 1.1 : Principe de la machine frigorifique.

Figure 1.2 : Cycle d'une machine ditherme

Figure 1.3 : cycle tritherme

Figure 1.4 : les compresseurs.

Figure 1.5 : Les condenseurs.

Figure 1.6 : détendeur dans la machine frigorifique.

Figure 1.7 : évaporateur

Figure 1.8 : Le thermostat

Figure 1.9 : bouteille anti-coups de liquide

Figure 1.10 : Le voyant simple

Figure 1.11 : Voyant d'humidité

Figure 1.12 : le filtre déshydraté

Figure 2.1 : Cycle frigorifique élémentaire

Figure 2.2:Le cycle thermodynamique T.S de la machine frigorifique

Figure 2.3:Le cycle thermodynamique T.S de la machine frigorifique

Figure 2.4 : Le cycle thermodynamique P.H d'un système plusieurs étapes

Figure 2.5 : Installation bi-étagée à injection totale

Figure 2.6: Installation d'un échangeur entre les deux compresseurs

Figure 2.7 : Le cycle thermodynamique P.H d'un échangeur entre les deux compresseurs

Figure 2.8 : Installation en cascade

Figure 2.9 : Le cycle thermodynamique P.H d'un Installation en cascade

Figure 3.1 : dimensions du réfrigérate

Figure 3.2 : coupe transversale des murs et répartitions de la chaleur

Figure 3.3 : Le cycle thermodynamique P.H d'un Installation en cascade

Figure 3.4 : Installation en cascade

Figure 3.5 : cycle thermodynamique P.H du R1150

Figure 3.5 : cycle thermodynamique P.H du R134a

Liste des Table

Tableau 1.1 : caractéristiques physiques des frigorigènes

Tableau 3.1 : Résultats récapitulatifs

Tableau 3.2 : Enthalpies massiques aux sommets des cycles

Liste du symbole

A	Coefficient d'échange thermique	////////////////////////////////////
C_1	Prix compresseur par kilo watt	DA/kw
C_2	Prix l'évaporateur par mètre carrée	DA/m ²
C_3	Prix consommation par kilo watt	DA/kw
cop	Coefficient de performance	////////////////////////////////////
D	diamètre	m
e	épaisseur	m
\mathcal{F}	coefficient de frottement	////////////////////////////////////
G	coefficient global d'échange	W/k.m ²
H	Hauteur	m
h	enthalpie	KJ/Kg
$h_i ; h_e$	Coefficient d'échange	////////////////////////////////////
G	coefficient global d'échange	W/k.m ²
Gr	nombres de Grashoff	////////////////////////////////////
l	Longueur	m
L	longitude	m
\dot{m}	Débit massique	Kg/s
M	Masse molaire	g/mol
Nu	Nombre de nusselt	////////////////////////////////////
N	Désignation numérique du frigorigène	////////////////////////////////////
P	pression	Pa ; bar
Pr	Nombre de prandtl	////////////////////////////////////
P_{net}	puissance nette	KW
$P_{réel}$	Puissance réelle	KW
$P^*_{réel}$	Puissance consommée	KW
P_{cr}	Pression critique	bar
$Q_f ; Q_c$	quantité de chaleur	J
$\dot{Q}_f ; \dot{Q}_c$	apports calorifiques	w
R_e	nombre de Reynolds	////////////////////////////////////
s	entropique	KJ/k.Kg
S	surfasse	m ²
T_{sf}	Température désirée	°C ; K
T_{sc}	Température moyenne de base	°C ; K
T_{f1}	Température de premier évaporateur	°C ; K
T_{c1}	Température de premier condenseur	°C ; K
T_{f2}	Température de deuxième évaporateur	°C ; K
T_{c2}	Température de deuxième condenseur	°C ; K
\dot{V}	Débit volumétrique	m ³ /s
W	travail	J
x	Titre de vapeur	////////////////////////////////////
v	Viscosité cinématique	m ² /s
λ	Conductivité thermique	w/m.k
θ_b	Température d'ébullition	°C ; K
θ_{cr}	Température critique	°C ; K

Introduction

Au début des années 2020, une épidémie infectieuse appelée Covid-19 s'est propagée partout dans le monde. Avec l'avancement de la technologie et de la recherche scientifique, un vaccin contre cette maladie a été découvert mais il faut le stocker à des températures très basses (-80°C).

Notre étude consiste à la conception d'une machine frigorifique à compression de vapeur dans la région de Tébessa où la température extérieure de base en été est de 40°C .

Pour atteindre notre but, nous allons diviser notre travail en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présenterons des généralités sur les machines frigorifiques.

Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude des cycles thermodynamiques des machines frigorifiques à compression et leurs performances.

Dans le troisième chapitre, nous nous intéresserons au calcul des apports calorifiques par transmission et par ventilation du réfrigérateur et ensuite au dimensionnement du système frigorifique à installer.

Nous terminerons par une conclusion générale.

**CHAPITRE I: GÉNÉRALITES SUR LES MACHINES
FRIGORIFIQUES**

1. Histoire des machines frigorifiques

Avant l'invention des réfrigérateurs, on conservait les denrées périssables dans une pièce spéciale, le cellier, généralement orientée vers le Nord. L'usage se développa aussi, particulièrement à la Renaissance, de stocker la glace découpée l'hiver sur les étangs, dans une glacière. Il s'agissait d'un trou fermé par un couvercle isolant dans lequel on alternait des couches de paille, ou de sciure de bois, et de glace. Comme « l'air froid » descend et que « l'air chaud » monte, l'orifice de remplissage se situant en haut, la température basse se maintenait et une partie de la glace, ainsi stockée, se conservait jusqu'à l'été³.

Il existait aussi le leytès, également appelé cabenère, niche à lait, frigo à lait⁵ qui était un frigo servant à conserver le lait au frais après la traite et avant la descente au lieu de vente.

Des inventeurs tentèrent de fabriquer de la glace artificielle à la fin du 18 et au début du 19 siècle. En 1755, l'Écossais William Cullen obtient un peu de glace par vapeur d'eau sous « cloche à vide » et en fit la première démonstration publique en 1756.

En 1834, Jacob Perkins, un Américain, invente la première machine frigorifique fonctionnelle. Puis un peu plus tard, Perkins est crédité du premier brevet de réfrigération utilisant le cycle de compression de vapeur, attribué le 14 août 1835. Le système de la machine était l'utilisation de l'éther dans un cycle de compression de vapeur. Cette idée serait venue en premier d'un autre inventeur américain, Oliver Evans, qui avait conçu ce système en 1805, mais qui n'a jamais fait construire son projet.

En 1850, Ferdinand Carré invente une machine frigorifique à l'eau et à l'ammoniac.

La première utilisation industrielle d'une machine frigorifique est celle de James Harrison en 1851, lorsqu'il a fabriqué un système de réfrigération à compression de vapeur (vapor compression refrigeration system). James Harrison était un imprimeur écossais, émigré en Australie, qui avait acheté une entreprise de presse. Alors qu'il nettoyait des caractères à l'éther, il remarqua que le liquide refroidissait fortement le métal en s'évaporant. Harrison eut l'idée de comprimer l'éther gazeux avec une pompe pour le transformer en liquide, puis de laisser l'éther liquide revenir à l'état gazeux en provoquant un refroidissement. Harrison mit ce système en œuvre dans une brasserie australienne, où le gaz froid d'éther était pompé dans des tuyaux qui circulaient dans le bâtiment. Il utilisa le même principe pour fabriquer de la glace en faisant passer dans de l'eau les tuyaux refroidis par l'éther

gazeux. Mais il fit faillite en 1860 car la glace naturelle qu'on importait par bateau d'Amérique restait moins chère.

2. Définition

Une machine frigorifique, est un système thermodynamique destiné à assurer le froid d'un local ou d'un système à partir d'une source de chaleur externe dont la température est supérieure à celle du local ou du système à refroidir .C'est donc un système de froid qui transfère des calories d'un milieu à haut niveau de température vers un milieu où la température doit être inférieure. L'écoulement naturel de la chaleur s'effectuant toujours d'un corps chaud vers un corps froid, on peut définir également la machine frigorifique comme un matériel permettant de réaliser l'écoulement de chaleur inverse du sens naturel, c'est-à-dire d'un milieu chaud vers un milieu froid. Une dépense d'énergie sera bien entendu inévitable pour réaliser ce transfert inverse. L'énergie nécessaire pour assurer le transfert doit être inférieure à l'énergie calorifique utile pour que le système ait un quelconque intérêt.(figure 1)

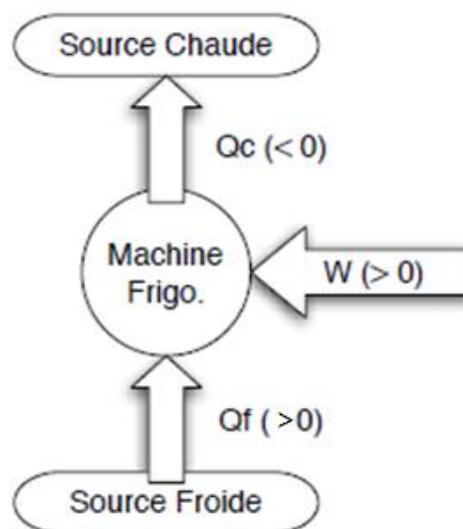


Figure 1.1 : Principe de la machine frigorifique.

3. Types de cycles frigorifiques

Si les systèmes de production du froid sont actuellement nombreux et variés, alors que le principe reste toujours le même, il s'agit d'extraire une quantité de chaleur Q_1 d'une source dite source utile à un niveau de température T_1 et injecter une quantité Q_2 à un autre niveau de température T_2 Si T_1 est inférieure à celle de la source gratuite disponible (à température T_2), d'après le deuxième principe, un

tel transfert reste impossible, l'apport d'une énergie est obligatoire. Suivant la nature de cette énergie mise en jeu (chaleur, travail) on distingue deux grandes catégories de machines :

- **Machines à compression mécanique** qui utilisent le travail comme énergie, elles fonctionnent entre deux sources de chaleur. À titre d'exemple les machines à changement de phase ou les machines à gaz.
- **Machines à énergie thermique** qui nécessitent un apport de chaleur comme énergie à un niveau de température T_3 . Ces machines fonctionnent généralement entre trois sources de chaleur.

3.1. Machine frigorifique à compression (ditherme)

Pour mettre en œuvre un cycle frigorifique, il est donc nécessaire de disposer d'au moins deux sources de chaleur (Figure I.2) L'une sera appelée source froide (celle dont on va extraire la chaleur) et l'autre la source chaude (celle où l'on va rejeter la chaleur).

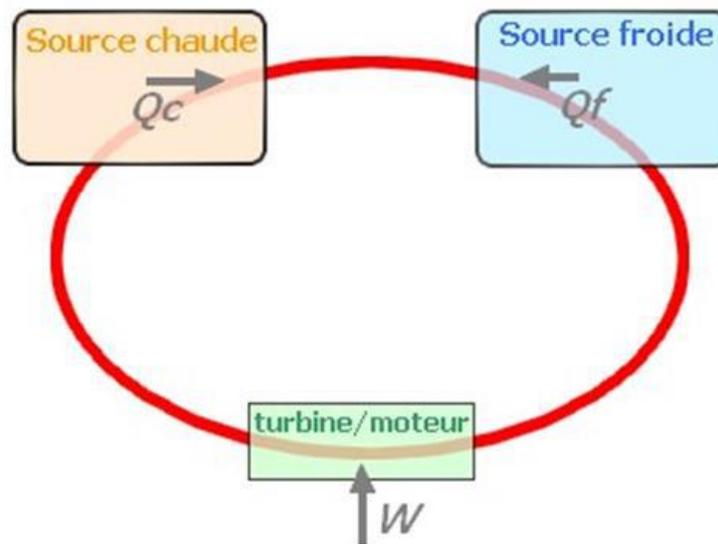


Figure1.2 : Cycle d'une machine ditherme

3.2. Machines frigorifiques trithermes

Si l'on dispose d'une troisième source de chaleur, il est possible de remplacer l'apport de travail mécanique du cycle ditherme par un apport de "chaleur motrice" à un niveau de température supérieur à la source chaude. De la chute de température entre le "très chaud" et le "chaud", il est possible d'obtenir un effet moteur.

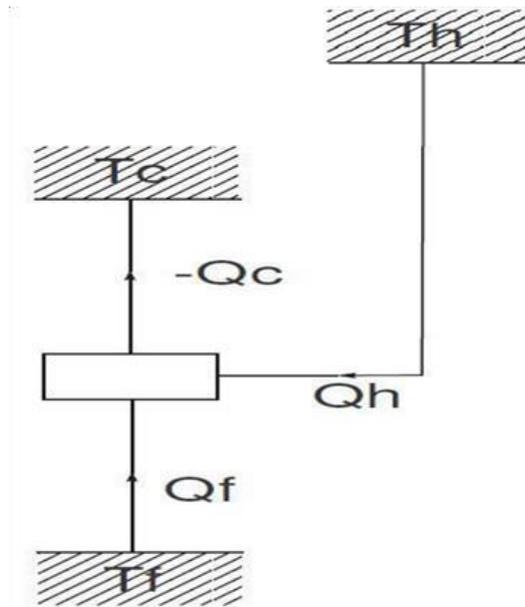


Figure1.3 : Cycle tritherme.

4. Eléments d'une machine frigorifique

4.1. Eléments principaux

La machine frigorifique comprend cinq éléments principaux qui sont^[1] :

- Le compresseur
- Le condenseur
- Le détendeur
- L'évaporateur
- Le Fluide frigorigène

4.1.1. Compresseur

Le compresseur aspire le fluide frigorigène gazeux (à bas niveau de température et de pression) issu de l'évaporateur, le comprime à un niveau plus haut de température et de pression puis le refoule vers le condenseur.

4.1.1.1. Types de compresseurs

Il existe deux grands types de compresseurs

4.1.1.1.1. Compresseurs volumétriques

Dans lesquels la compression des vapeurs est obtenue par la réduction du volume intérieur d'une chambre de compression, c'est le type de compresseur le plus répandu sur les installations frigorifiques.

Il existe plusieurs types de compresseurs volumétriques et la classification retenue permet de distinguer :

- **Compresseur à piston**

Le compresseur à piston alternatif : c'est le type de compresseur le plus répandu la compression des vapeurs est obtenue par le déplacement d'un ou de plusieurs pistons dans une capacité donnée (cylindre).

- **Compresseur à avis**

Parmi lesquels il faut distinguer les compresseurs mono vis (mono rotor) et les compresseurs double vis (bi rotors).

- **Compresseur à spirale**

Compresseurs scroll : dans lesquels la compression des vapeurs est obtenue par la rotation d'une spirale mobile dans une spirale fixe.

4.1.1.1.2 Compresseurs centrifuges

Aussi appelés turbocompresseurs dans lesquels la compression résulte de la force centrifuge obtenue par entraînement dynamique au moyen d'une roue à aubes, c'est un type de compresseurs destiné à des applications spécifiques et utilisés pour de grandes puissances (groupes frigorifiques de grande puissance en génie climatique par exemple).

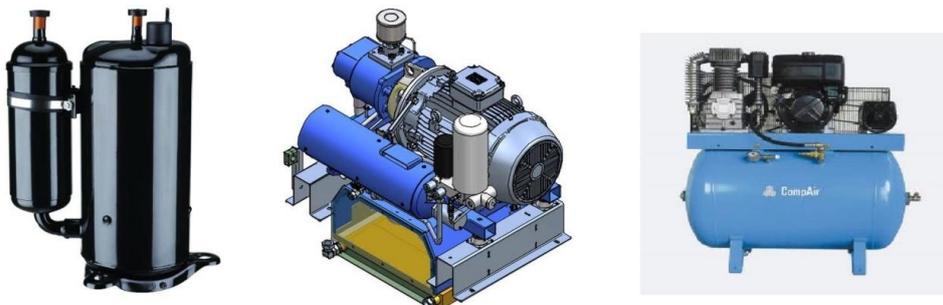


Figure 1.4 : Les compresseurs.

4.1.2. Condenseur

Le condenseur C'est un échangeur de chaleur qui va permettre l'évacuation de la chaleur contenue dans le fluide frigorigène gazeux issu du compresseur en le liquéfiant. Cette condensation (liquéfaction) est obtenue par le refroidissement du fluide frigorigène gazeux à pression constante par un médium qui peut être de l'eau ou de l'air.

4.1.2.1. Types de condenseurs

Les condenseurs sont des échangeurs thermiques entre le fluide frigorigène et un fluide de refroidissement. Le fluide frigorigène cède la chaleur acquise dans l'évaporateur et lors de la compression au fluide de refroidissement.

Lors de son passage dans le condenseur, le fluide frigorigène passe de l'état vapeur à l'état liquide On distingue deux familles de condenseurs suivant le fluide de refroidissement :

- **Condenseur à convection naturelle**

L'air au contact du faisceau ailette, s'échauffe et s'élève laissant la place à de l'air plus frais. Ils ne sont utilisés que pour des puissances à échanger très faibles (froid ménager : réfrigérateurs et congélateurs).

- **Condenseur à convection forcée**

On distingue deux des condenseurs à air à convection forcées ont utilisées à savoir : le faisceau vertical (utilisées pour les petites 5 et moyennes puissances) et le faisceau horizontal (pour les puissances supérieures).



Figure 1.5 : Les condenseurs.

4.1.3. Détendeur

le détendeur Permet de réduire la pression du fluide frigorigène liquide (création de pertes de charge) issu du condenseur avant son introduction dans l'évaporateur dans le but de permettre sa vaporisation à

basse température dans l'évaporateur Il régule aussi la quantité de fluide frigorigène liquide arrivant à l'évaporateur en fonction des besoins de "froid".



Figure 1.6 : Détendeur dans la machine frigorifique.

Les détendeurs sont destinés à l'alimentation des évaporateurs en fluide frigorigène. Suivant le principe de fonctionnement des évaporateurs, on distinguera :

4.1.3.1. Types de détendeurs

Ce sont des tubes de cuivre de longueur variable (de 1 à 7 m environ) et dont le diamètre intérieur varie entre de 0.6 à 2 mm. Expérimentale. Ils conviennent pour des installations de faible puissance thermiques et peu variables.

- **Détendeur thermostatique**

Ce sont les organes d'alimentation des évaporateurs les plus utilisés.

- **Détendeur électronique**

Le détendeur électronique permet des économies d'énergie électrique sur la consommation du compresseur avec un remplissage optimal de l'évaporateur et le maintien d'une surchauffe minimale stable.

4.1.4. Évaporateur

L'évaporateur C'est un échangeur de chaleur dans lequel le fluide frigorigène liquide à bas niveau de température et de pression va absorber la chaleur du milieu à refroidir (air ou eau) à pression constante devenant ainsi gazeux.

On distingue deux familles d'évaporateurs suivant le fluide à refroidir

4.1.4.1. Types de l'évaporateur

- **Évaporateur à convection naturelle**

On distingue les évaporateurs à tubes lisses et les évaporateurs constitués de tubes à ailettes.

- **Évaporateur à convection forcée**

C'est le type d'évaporateur le plus rencontré dans plusieurs applications Ils sont constitués de tubes à ailettes et sont munis d'un ventilateur(s) pour assurer la circulation de l'air à travers les surfaces d'échanges.

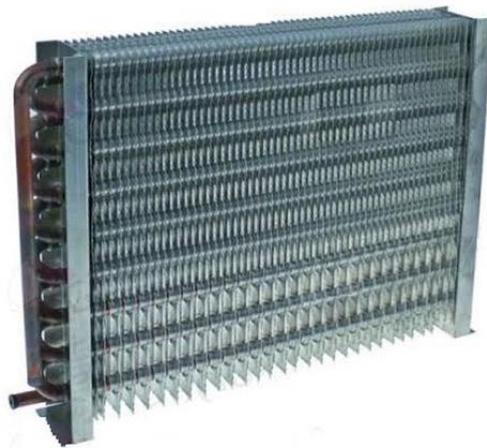


Figure 1.7 : Évaporateur

4.1.5. Fluide frigorigène

Le fluide frigorigène permet les échanges de chaleur dans un système frigorifique par ses changements d'état que sont l'évaporation et la condensation. Il peut se définir comme une substance chimique dont la température d'évaporation à la pression atmosphérique est inférieure à la température ambiante, autrement dit le fluide frigorigène doit être liquide à cette ambiance Par température ambiante, il faut comprendre l'ambiance ou le milieu à refroidir.

Le tableau 1.1 donne les températures d'évaporation (d'ébullition) de certains fluides frigorigènes à la pression atmosphérique ^[2]

- (1) Les températures sont également données en K dans le tableau « éléments ».
(2) Sous pression atmosphérique normale

Nom	Formule	N	M (g/mol)	θ_b (°C ,K)	θ_{cr} (°C ,K)	P_{cr} (bar)
ELEMENTS						
Azote	N ₂	R728	28.02	-195.81°C 77.35K	-147.05°C 126.1K	33.94
Oxygène	O ₂	R732	32	-182.96°C 90.19K	-118.38°C 154.77K	50.8
COMPOSES INOGENIQUES						
Eau	H ₂ O	R718	18.016	100°C	374.1°C	221.36
Ammonia	NH ₃	R717	17.03	-33.35	132.4	112.97
HYDROCARBURES						
Méthan	CH ₄	R50	16.04	-161.4°C	-82.4°C	46.4
n.pentane	C ₅ H ₁₂		72.15	36.1	196.6	33.7
HYDROCARBURES NON FLUORES						
Dichlorométhane	CH ₂ CL ₂	R30	84.94	40.1°C	235.4°C	59.7
chlorométhane	CH ₃ CL	R40	50.49	-24.2°C	143°C	66.7
HYDROCARBURES HALOGENES FLUORES						
Chlorodifluorométhane	CHCLF ₂	R22	86.48	-40.8°C	96°C	49.8
Trifluorométhane	CHF ₃	R23	70.01	-82.2°C	25.6°C	47.5
HYDROCARBURES HALOGENES FLUORES						
tétrafluoroéthane	CH ₂ F-CF ₃	R134a	102.03	-26.5°C	101.2°C	40.64
chlorodifluoroéthane	CH ₃ F ₂ CCL	R142b	100.5	-9.25°C	137.1°C	41.5
MELANG AZEOTROPIQUES D'HYDROCARBURES HALOGENES FLUORES						
Azéotrope : R13(59.9%) R23(40.1%)	CCLF ₃ /CHF ₃	R503	87.5	-88.7°C	19.5°C	43.26
Azéotrope : R32(48.2%) R115(37.8%)	CHF ₂ /C ₂ CLF ₅	R504	97.15	-57.2°C	66.1°C	48.41
AMINES ALIPHATIQUES						
méthylamine	CH ₃ NH ₃	R630	31.06	-92.5°C	-6.6°C	156.8

Tableau 1.1 : caractéristiques physiques des frigorigènes

Il est important pour un fluide frigorigène (réfrigérant) d'avoir une température d'évaporation peu élevée pour que le changement d'état (passage de la phase liquide à la phase vapeur) soit réalisable. Le changement d'état s'effectue à température et pression constantes et c'est durant cette phase que la quantité de chaleur absorbée (ou rejetée) est la plus importante.

Le fluide frigorigène étant un médium qui sert à évacuer de la chaleur possède des caractéristiques propres (physiques, thermodynamiques et chimiques). Il doit posséder les propriétés requises d'un bon fluide frigorigène que sont :

- 1- pour atteindre la température requise
- 2- être d'un coût peu élevé et d'un approvisionnement facile
- 3- ne pas détruire la couche d'ozone
- 4- avoir un faible potentiel d'effet de serre
- 5- avoir une grande chaleur latente de vaporisation
- 6- avoir un point d'ébullition sous la pression atmosphérique suffisamment bas compte tenu des conditions de fonctionnement désirées (de sorte que la température d'évaporation soit toujours à un niveau plus élevé que la température correspondant à la pression atmosphérique)
- 7- avoir une température critique élevée (de sorte que la température de condensation dans les conditions d'utilisation soit bien inférieure à cette température critique)
- 7- avoir un faible rapport de compression, c'est à dire faible rapport entre les pressions de refoulement et d'aspiration
- 8- avoir un faible volume massique de la vapeur saturée rendant possible l'utilisation d'un compresseur et de tuyauteries de dimensions réduites
- 9- ne pas avoir d'action sur le lubrifiant (huile) employé conjointement
- 10- être non toxique et sans effet sur la santé du personnel
- 11- être non inflammable et non explosif en mélange avec l'air,
- 12- être non corrosif, pas d'action sur les métaux constituant le circuit, pas d'action sur les joints
- 13- fuites faciles à détecter et à localiser par méthode visuelle

4.2. Eléments secondaires

4.2.1. Thermostats

Un thermostat est un organe capable de placer un contact dans une certaine position (rôle d'interrupteur électrique) sous l'effet d'une détection de température.



Figure 1.8 : Le thermostat

4.2.2. Bouteille anti-coups de liquide

Elle est placée entre l'évaporateur et le compresseur (à proximité du compresseur) et son rôle est d'éviter l'aspiration éventuelle de fluide frigorigène liquide par le compresseur. Elle est également appelée bouteille d'aspiration, bouteille de surchauffe ou séparateur de liquide. Le principe de fonctionnement est basé sur la séparation des phases vapeur et liquide du fluide frigorigène.

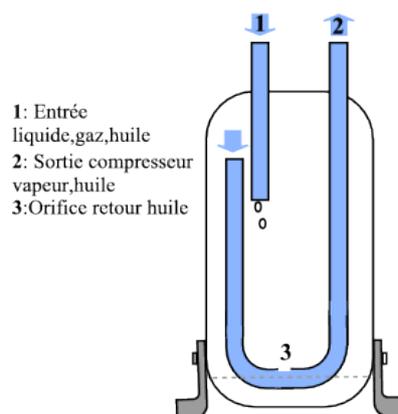


Figure 1.9 : Bouteille anti-coups de liquide

4.2.3. Voyants

Il faut distinguer parmi les voyants :

4.2.3.1. Voyant simple

Verre épais serti dans une embase métallique : est un organe placé juste avant le détendeur et après le filtre déshydraté. Il permet de contrôler la présence éventuelle de bulles donc de fluide frigorigène à l'état vapeur, indice d'anomalie (charge insuffisante en fluide frigorigène, filtre déshydrater bouche, SR insuffisant...).



Figure 1.10 : Le voyant simple

4.2.3.2. Voyant indicateur d'humidité

Est un voyant simple avec une double fonction, celle de l'indication de l'état de saturation du circuit frigorifique. Il s'agit d'un voyant avec une couronne indicatrice (sel chimique) qui change de couleur en fonction de la quantité d'eau contenue dans le fluide frigorigène. Le vert indique généralement un circuit sec (parfaitement déshydraté) et le jaune un circuit humide ; le vert clair indique que le filtre déshydrater est en train de se saturer.



Figure 1.11 : Voyant d'humidité

4.2.4. Filtre déshydraté

Il convient de distinguer:

- Le filtre qui sert à piéger les impuretés contenues dans le circuit frigorifique

- Le déshydrater qui permet l'élimination de l'humidité contenue dans le circuit frigorifique.

Le filtre déshydrater est un déshydrater qui assure une fonction secondaire de filtre et quelques fois une fonction supplémentaire antiacide (en fixant les acides qui apparaissent lors des diverses réactions nuisibles).



Figure 1.12 : Le filtre déshydraté

4.2.5. Pressostats

Un pressostat est un organe capable de placer un contact dans une certaine position (rôle d'interrupteur électrique) sous l'effet d'une détection de pression de fluide frigorigène.

Il existe plusieurs types de pressostat:



Figure 1.13 : Le pressostat

- les pressostats basse pression (PBP)
- les pressostats haute pression (PHP)
- les pressostats combiné
- les pressostats différentiels d'huile

**CHPITRE II: CYCLES DES MACHINES
FRIGORIFIQUES**

1. Présentation du circuit frigorifique élémentaire

_ Le fluide frigorigène liquide entre en ébullition et s'évapore en absorbant la chaleur du fluide extérieur. Dans un deuxième temps, le gaz formé est encore légèrement réchauffé par le fluide extérieur, c'est ce qu'on appelle la phase de surchauffe

_ Le compresseur va tout d'abord aspirer le gaz frigorigène à basse pression et à basse température. L'énergie mécanique apportée par le compresseur va permettre d'élever la pression et la température du gaz frigorigène. Une augmentation d'enthalpie en résultera.

_ Le gaz chaud provenant du compresseur va céder sa chaleur au fluide extérieur. Les vapeurs de fluide frigorigène se refroidissent ("désurchauffe"), avant l'apparition de la première goutte de liquide. Puis la condensation s'effectue jusqu'à la disparition de la dernière bulle de vapeur. Le fluide liquide peut alors se refroidir de quelques degrés (sous-refroidissement) avant de quitter le condenseur.

_ La différence de pression entre le condenseur et l'évaporateur nécessite d'insérer un dispositif "abaisseur de pression" dans le circuit. C'est le rôle du détendeur. Le fluide frigorigène se vaporise partiellement dans le détendeur pour abaisser sa température.

Le cycle est fermé, le fluide frigorigène évolue sous l'action du compresseur dans les quatre éléments constituant la machine frigorifique.

L'ensemble du cycle peut être représenté dans le diagramme enthalpie-pression. Sous la courbe en cloche se situent les états de mélange liquide-vapeur; à gauche de la cloche, le fluide est à l'état liquide (il se "sous-refroidit"), à droite, le fluide est à l'état vapeur (il "surchauffe")^[3].

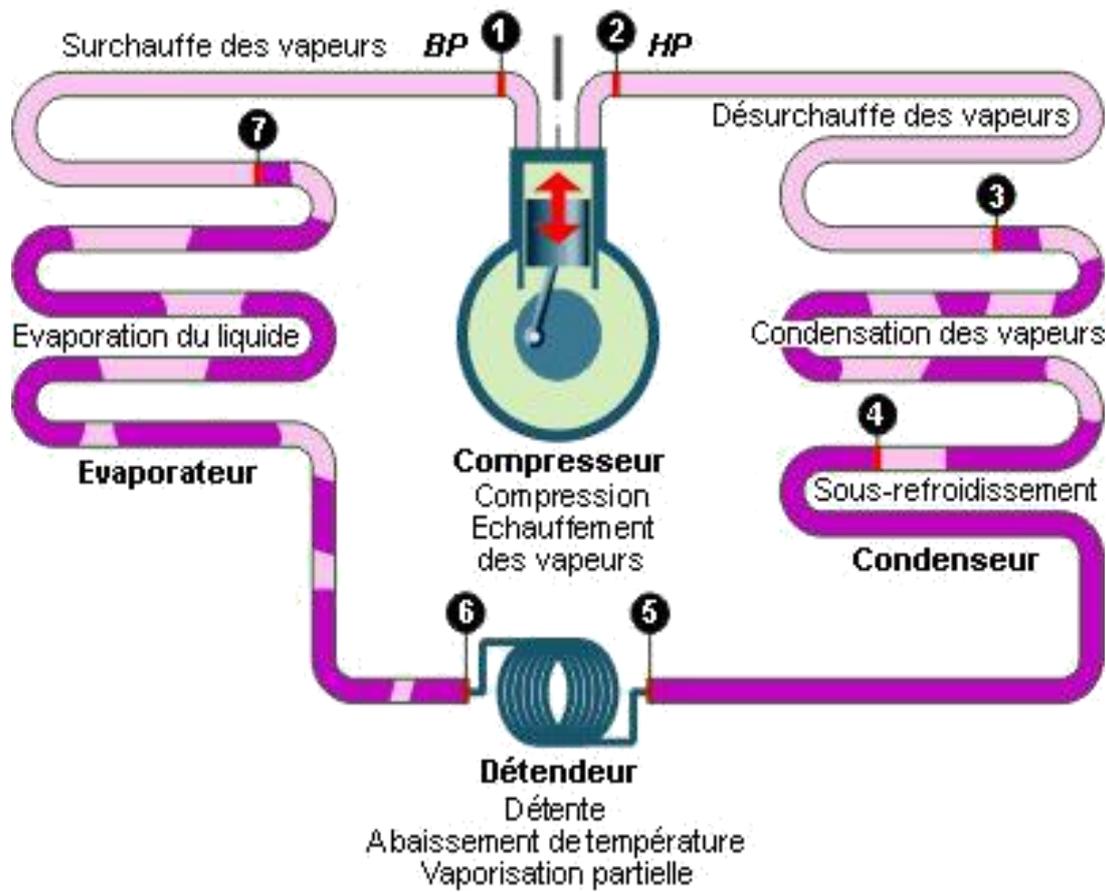


Figure 2.1 : Cycle frigorifique élémentaire

2. Cycle de machine frigorifique (cycle Carnot modifié)

Dans la machine frigorifique on fait décrire une série de transformations qui ramène, périodiquement, le fluide frigorigène dans son état initial. Le cycle de fonctionnement ainsi décrit est appelé cycle frigorifique.

_ Entre les points 1 et 2, la vapeur de frigorigène est comprimée de P_F à P_C . Si le compresseur était parfait la compression serait isentropique ($S = Cte$)

_ Entre les points 2 et 2', la vapeur de frigorigène est désurchauffée de T_2 à T_c , puis condensée à la température constante T_c en 3' et 3. Le liquide formé est sous-refroidi de T_c à T_3 .

_ Entre les points 3 et 4, le liquide frigorigène se détend dans le régleur de P_C à P_F en n'échangeant avec le milieu extérieur, ni énergie mécanique ni chaleur (sa surface d'échange

thermique est négligeable). L'enthalpie du frigorigène reste constante, la détente est isenthalpique.

Entre le point 4 et 1, le frigorigène se vaporise, sous la pression P_e , à la température T_f , en produisant le froid utile dans l'évaporateur. Ensuite l'et 1 La vapeur se surchauffe légèrement de T_r à T_1 , toujours sous la pression constante

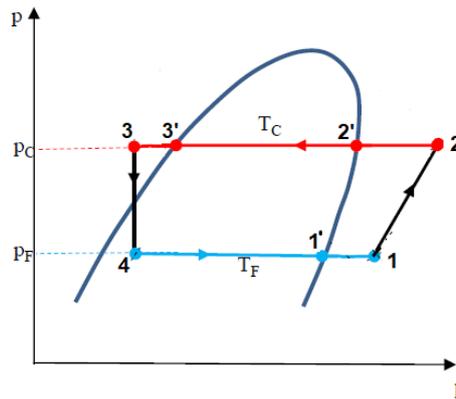


Figure 2.2: Le cycle thermodynamique P.h de la machine frigorifique

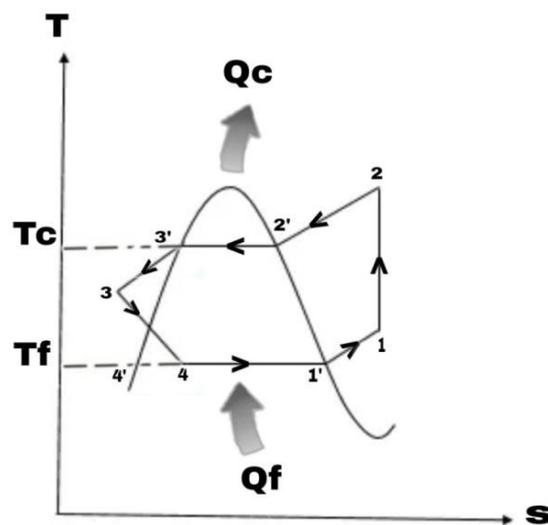


Figure 2.3: Le cycle thermodynamique T.S de la machine frigorifique

2.1. Quantités d'énergie échangées au cours de cycle

- Transformation (1→2)

Le fluide frigorigène est comprimé isentropiquement de la pression P_p à la pression P_c . Au cours de cette compression, la température du fluide s'élève de T_1 à T_2 ; ($T_2 > T_1$). La variation d'enthalpie est égale au travail reçu du milieu extérieur :

$$\Delta H = H_2 - H_1 = W (W > 0) \quad (2.1)$$

- **Transformation (2→3)**

La vapeur surchauffée se désurchauffe dans le condenseur (2→2') puis se condense d'une manière isobare (2'→3') et enfin se refroidit (3'→3) de 10°C en pratique

$$\Delta H = H_3 - H_2 = Q_C < 0 \quad (2.2)$$

- **Transformation (3→4)**

Le fluide traverse un détendeur. La détente est rapide et la détente est donc isenthalpique ; aucune force extérieure n'intervient :

$$\Delta H = H_4 - H_3 = 0 \quad (2.3)$$

- **Transformation (4→1)**

Le fluide à l'état liquide-vapeur passe dans l'évaporateur se vaporise (4→1') puis la vapeur saturée se surchauffe (1'→1)

$$\Delta H = H_1 - H_4 = Q_F > 0 \quad (2.4)$$

L'effet frigorigène

3. Amélioration du cycle de base

Partant d'une installation frigorifique composé des quatre éléments principes, son coefficient de performance peut être amélioré, en ajoutant certains accessoires ou en modifiant le parcours du fluide. ^[4]

3.1. Installation bi-étagée à injection totale

Deux cycles interdépendants sont utilisés avec trois niveaux de pression et une bouteille intermédiaire, le premier circuit de la haute est composé d'un compresseur d'un condenseur et d'un détendeur, le second celui de la basse pression est composé d'un compresseur d'un évaporateur et d'un détendeur ; des améliorations importantes peuvent être réalisés, en diminuant la puissance de compression, en augmentant la puissance frigorifique de l'évaporateur, d'où une augmentation du coefficient de performance.

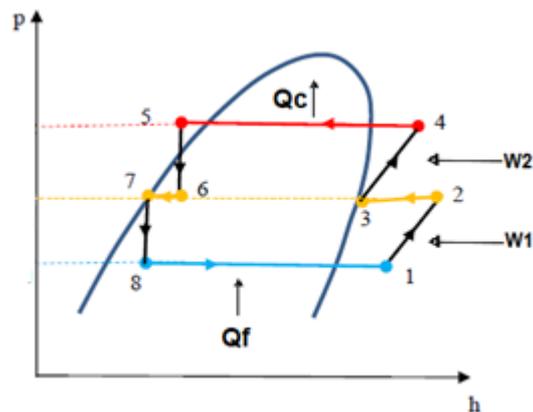


Figure 2.4 : Le cycle thermodynamique P.H d'un système plusieurs étapes

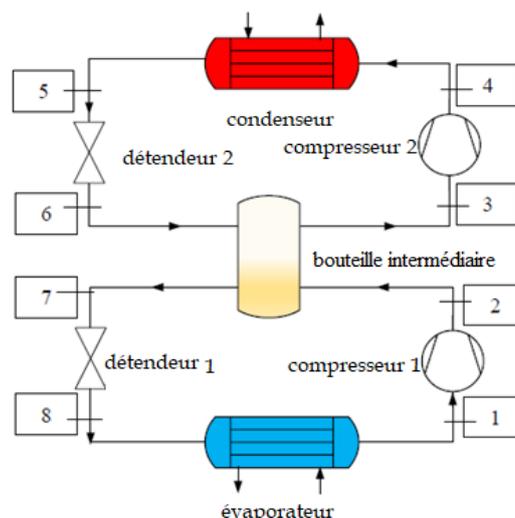


Figure 2.5 : Installation bi-étagée à injection totale

3.2. Installation d'un échangeur entre les deux compresseurs

C'est un type d'installation de compression bi-étagée montré dans la figure 13, où on modifie seulement la compression les autres éléments restants intacts, par ce procédé on réduit la puissance de compression, on améliore ainsi le coefficient de performance.

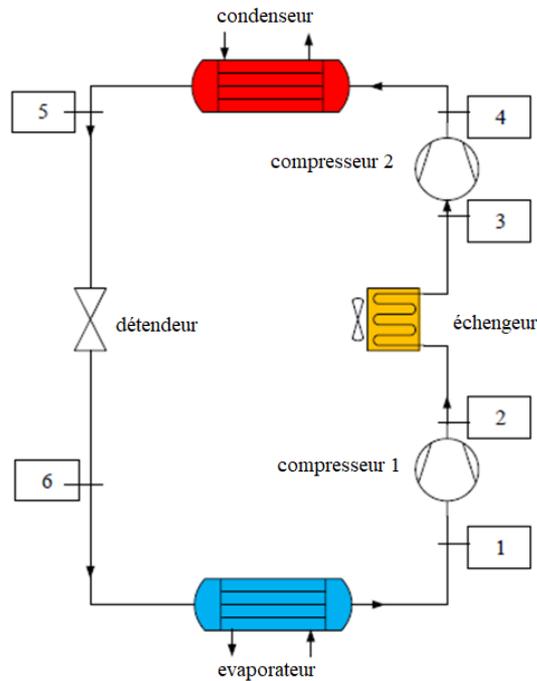


Figure 2.6: Installation d'un échangeur entre les deux compresseurs

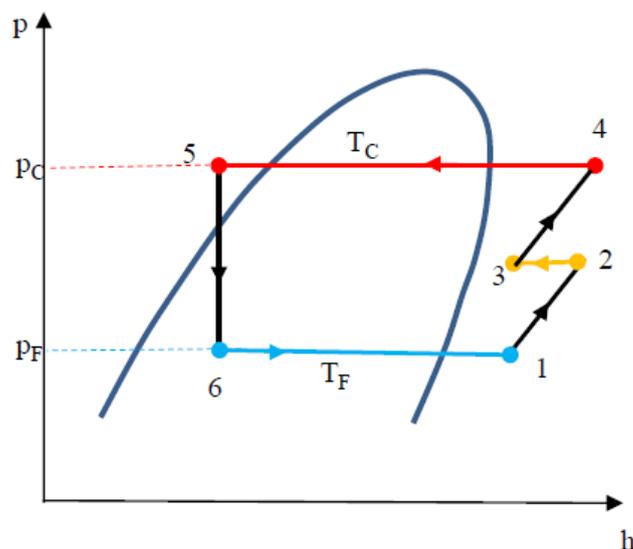


Figure 2.7 : Le cycle thermodynamique P.H d'un échangeur entre les deux compresseurs

3.3. Installation en cascade

Des machines frigorifiques peuvent être montées en cascade ou l'évaporateur d'un circuit est couplé au condenseur du deuxième indiqué sur la figure 2.8, les circuits sont séparés et des fluides frigorigènes appropriés peuvent être utilisés, on obtient ainsi de très basses températures.

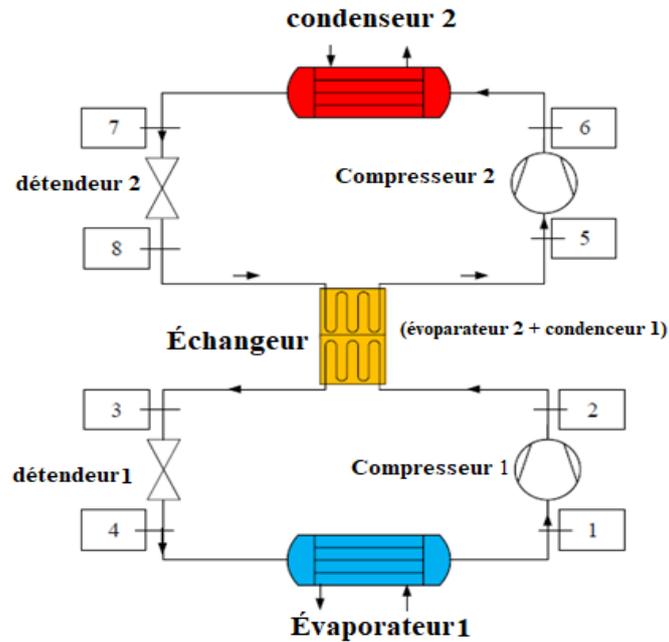


Figure 2.8 : Installation en cascade

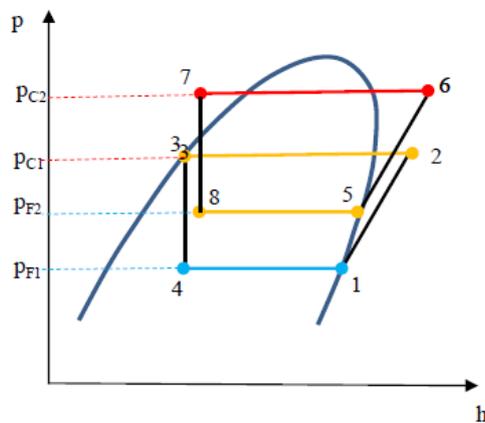


Figure 2.9 : Le cycle thermodynamique P.H d'un d'un Installation en cascade

4. Phénomènes endothermiques et exothermiques:

pour transférer de la chaleur d'un milieu à basse température vers un autre à température plus élevée, il faut mettre en œuvre :

- Un phénomène endothermique, s'effectuant à la température T_F de la source froide pour extraire de la chaleur au milieu extérieur froid.
- Un processus thermodynamique, pour élever le niveau thermique de cette chaleur de T_F à T_C .
- Un phénomène exothermique, s'effectuant à la température T_C du puits chaud pour rejeter la chaleur vers le milieu extérieur chaud.

-Ces phénomènes peuvent s'effectuer simultanément dans les diverses parties du système produisant du froid ou, plus généralement, déplaçant de la chaleur en continu. S'ils s'effectuent séquentiellement, les divers phénomènes évoqués ci-dessus se produisent successivement. La production du froid, ou plus généralement le déplacement de chaleur, s'effectue alors de manière discontinue ou intermittente.

-Le milieu, qui dans le système frigorifique est le siège de ces phénomènes, est dénommé fluide frigorigène. Dans le système, le frigorigène peut subir une transformation qui le laisse dans un état final différent de l'état initial (transformation ouverte) ou bien une série de transformations qui le ramène périodiquement dans le même état. Il a alors parcouru un cycle qui en l'occurrence est un cycle frigorifique.

5. Coefficients de performance

Pour caractériser l'efficacité d'une machine frigorifique ou d'une pompe à chaleur, on considère, respectivement :

- **Coefficient de performance frigorifique**

$$COP_F = \frac{\text{Froid produit à la source froide}}{\text{Énergie apportée au système}} \quad (2.5)$$

- **Coefficient de performance calorifique**

$$COP_C = \frac{\text{Chaleur dégagée au puits chaud}}{\text{Énergie apportée au système}} \quad (2.6)$$

Ces rapports adimensionnels sont objectivement des rendements, mais on évite de leur donner ce nom pour ne pas choquer les habitudes car ils ont très souvent des valeurs supérieures à l'unité, contrairement aux rendements des machines thermiques produisant de l'énergie mécanique.

6. Classification des machines frigorifiques

Selon l'énergie consommée, il existe de grandes familles des machines frigorifiques :

6.1. Machine consommant de l'énergie mécanique (système au moins ditherme) :

Grâce à l'énergie mécanique (ou équivalente) W fournie à ce système, on absorbe à la source froide, à la température thermodynamique T_F , l'énergie thermique Q_F . Au lieu de considérer les énergies, on peut s'intéresser aux puissances mises en oeuvre. Du fait de la puissance mécanique fournie P , on produit, à la source froide, une puissance frigorifique P_F selon le premier principe :

$$|Q_F| + |W| - |Q_C| = 0 \quad (2.7)$$

$$|W| = |Q_C| - |Q_F| \quad (2.8)$$

Ou encore :

$$|P| = |P_C| - |P_F| \quad (2.9)$$

Le coefficient de performance frigorifique COP_F d'une machine frigorifique ditherme :

$$COP_F = \frac{|Q_F|}{|Q_C| - |Q_F|} = \frac{1}{\frac{|Q_C|}{|Q_F|} - 1} \quad (2.10)$$

Il peut être supérieur, égal ou inférieur à 1 selon les conditions de fonctionnement du système. Pour une machine frigorifique (ou une pompe à chaleur) ditherme réversible, donc thermodynamiquement idéale, on doit satisfaire à la relation de Clausius :

$$\frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C} = 0 \quad (2.11)$$

$$\frac{|Q_C|}{|Q_F|} = \frac{T_C}{T_F} \quad (2.12)$$

Dans ce cas, les coefficients de performances frigorifique et calorifique de ces systèmes idéaux deviennent :

$$COP_{F.(id)}^W = \frac{T_F}{T_C - T_F} \quad (2.13)$$

$$COP_{C.(id)}^W = \frac{T_C}{T_C - T_F} \quad (2.14)$$

W: indiquant que le système reçoit du travail.

6.2. Machine consommant de l'énergie thermique (système au moins trithermes)

Outre la source froide à T_F et le puits chaud à T_C , ces systèmes, consommant de l'énergie thermique, mettent en œuvre au moins une troisième source de chaleur à T_M où la chaleur motrice leur est fournie. On a donc affaire à des systèmes (au moins) tri thermes.

Notons que selon le niveau thermique de cette troisième source T_M , on peut rencontrer les deux cas suivants :

$$-1^{er} \text{ cas : } T_M > T_C > T_F$$

$$-2^{eme} \text{ cas : } T_C > T_M > T_F$$

CHAPITRE III:
DIMENSIONNEMENT DU SYSTÈME FRIGORIFIQUE

1. Conditions de fonctionnement

Pour que le système de refroidissement fonctionne normalement, certaines conditions doivent être vérifiées :

La température désirée (de consigne) est $T_{SF} = -80^{\circ}\text{C}$

La température moyenne de base (Tébessa en été) est $T_{SC} = 40^{\circ}\text{C}$

Mais en pratique, il est préférable d'imposer un sous refroidissement près de 10°C du liquide saturé et une surchauffe de l'ordre de 5°C pour le bon fonctionnement du compresseur (y éviter la pénétration de liquide).

Dans ce cas, les conditions seront :

$$T_F \leq T_{SF} - 5^{\circ}\text{C} = -85^{\circ}\text{C}$$

$$T_C \geq T_{SC} + 10^{\circ}\text{C} = 50^{\circ}\text{C}$$

Les valeurs des températures de condensation T_C et d'évaporation T_F doivent être déterminées dans les conditions optimales pour lesquelles le prix d'investissement total (consommation d'électricité et éléments) soit minimal.

2. Détermination des apports calorifiques globaux

Notre étude consiste à la conception d'un réfrigérateur (basse température) de dimensions ($L \times l \times H = 1 \times 1 \times 1 = 1\text{m}^3$) dont la paroi extérieure à travers laquelle se fait l'échange de chaleur est constituée de deux plaques d'aluminium séparées par une couche de laine de verre de 1 cm d'épaisseur. Le réfrigérateur repose sur un support de telle sorte que toutes ses faces échangent de la chaleur par convection naturelle.

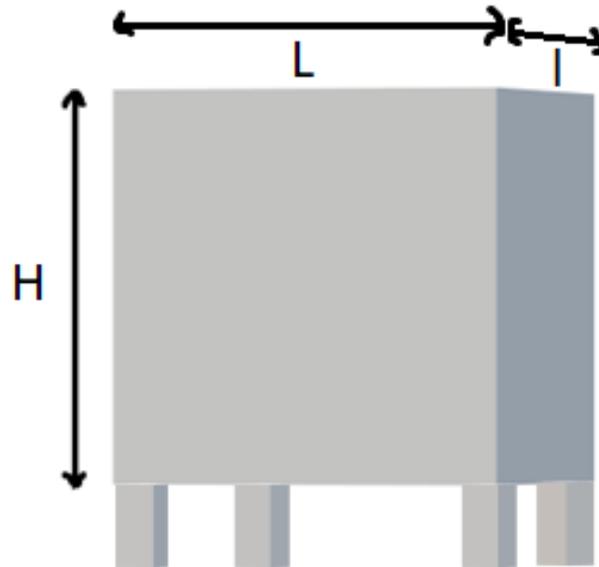


Figure 3.1 : dimensions du réfrigérateur

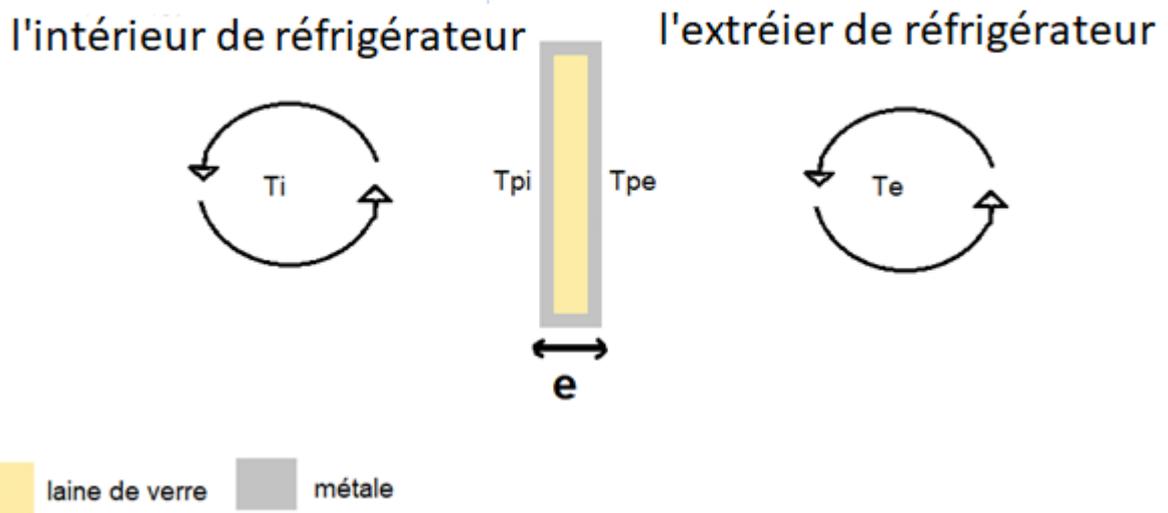


Figure 3.2 : coupe transversale des murs et répartitions de la chaleur

$$L=l=H = 1 \text{ m}$$

$$e = 1\text{cm}$$

$$T_i = T_{sf} = -80^\circ\text{C}$$

$$T_e = T_{sc} = 40^\circ\text{C}$$

T_{pi} est la température de la surface interne

T_{pe} est la température de la surface externe

Pour calculer \dot{Q}_F on doit écrire le bilan énergétique au niveau des six murs.

2.1. Murs verticaux

On calcule les apports calorifiques par transmission \dot{Q}_F pour les quatre murs verticaux, Commençons d'abord par calculer \dot{Q}_{FV} pour un seul mur :

$$\dot{Q}_{FV} = G_v \cdot S_v \cdot \Delta T$$

Où:

- $\Delta T = T_e - T_i$
- S_v est la surface d'échange d'une paroi verticale du réfrigérateur.
- G_v étant le coefficient global d'échange donné par : $G_v = \left(\frac{1}{h_i} + \sum \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_e} \right)^{-1}$

Coefficients h_i et h_e sont inconnus et peuvent être calculés en résolvant le système d'équations suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{Q}_{FV} = h_e \cdot S_v (T_e - T_{pe}) \\ \dot{Q}_{FV} = h_i \cdot S_v (T_{pi} - T_i) \\ \dot{Q}_{FV} = \frac{\lambda \cdot S}{e} \cdot S_v (T_{pe} - T_{pi}) \\ \frac{h_e \cdot L}{\lambda_f} = A_e \cdot Gr_e^m \cdot Pr^m \\ \frac{h_i \cdot L}{\lambda_f} = A_i \cdot Gr_i^m \cdot Pr^m \end{array} \right. \quad (3.1)$$

Gr_e et Gr_i sont les nombres de Grashoff intérieur et extérieur donnés par :

$$\text{Gr}_e = \frac{gL^3(T_e - T_{pe})}{T_e \nu^2} \quad (3.2)$$

$$\text{Gr}_i = \frac{\rho^2 g L^3 (T_{pi} - T_i)}{T_e \nu^2} \quad (3.3)$$

On suppose que le régime est laminaire ($10^4 < \text{Gr.Pr} < 10^9$)

Dans ce cas : $A=0.59$ $m=0.25$

En résolvant le système, on trouve les deux valeurs des coefficients d'échange :

$$\begin{cases} h_{ev} = 7.57 \text{ W/k.m}^2 \\ h_{iv} = 6.16 \text{ W/k.m}^2 \end{cases} \quad (3.4)$$

$$G_v = \left(\frac{1}{h_i} + \sum \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_e} \right)^{-1} = 1.75 \text{ W/k.m}^2 \quad (3.5)$$

$$\dot{Q}_{F1V} = G_v \cdot S_v \cdot \Delta T = 209.68 \text{ W} \quad (3.6)$$

Pour les quatre murs, on a :

$$\dot{Q}_{FV} = 4 \times \dot{Q}_{F1V} = 838.72 \text{ W} \quad (3.7)$$

2.2. Mur du haut (horizontal)

Pour calculer \dot{Q}_{FH} du mur du haut, on utilise la formule correspondant à une plaque horizontale avec le coté supérieur chaud et le coté inférieur froid.

$$\dot{Q}_{FH} = G_H \cdot S_H \cdot \Delta T \quad (3.8)$$

La longueur caractéristique du mur supérieur et donnée par :

$$L_{(\text{mur supérieur})} = \frac{S}{P} = \frac{L^2}{4L} = \frac{L}{4}$$

En résolvant le système, on trouve les deux valeurs des coefficients d'échange :

$$\begin{cases} h_{eH} = 7.27 \text{ W/k. m}^2 \\ h_{iH} = 5.84 \text{ W/k. m}^2 \end{cases} \quad (3.9)$$

$$G_H = \left(\frac{1}{h_i} + \sum \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_e} \right)^{-1} = 1.71 \text{ W/k.m}^2 \quad (3.10)$$

$$\dot{Q}_{FH} = G_H \cdot S_H \cdot \Delta T = 204.60 \text{ W} \quad (3.11)$$

2.3. Mur inférieur (du bas)

Pour Calculer \dot{Q}_{FB} du mur du bas, on utilise la formule correspondant à une plaque horizontale avec le coté supérieur froide le coté inférieur chaud

$$\dot{Q}_{FB} = G_B \cdot S_B \cdot \Delta T \quad (3.12)$$

La longueur caractéristique du mur inférieur et donnée par :

$$L_{(\text{mur inférieur})} = \frac{S}{P} = \frac{L^2}{4L} = \frac{L}{4}$$

En résolvant le système, on trouve les deux valeurs des coefficients d'échange :

$$\begin{cases} h_{eB} = 5.63 \text{ W/k. m}^2 \\ h_{iB} = 4.10 \text{ W/k. m}^2 \end{cases} \quad (3.13)$$

$$G_B = \left(\frac{1}{h_i} + \sum \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_e} \right)^{-1} = 1.43 \text{ W/k.m}^2 \quad (3.14)$$

$$\dot{Q}_{FB} = G_B \cdot S_B \cdot \Delta T = 171.38 \text{ W} \quad (3.15)$$

Les apports calorifiques par transmission sont alors :

$$\dot{Q}_F = \dot{Q}_{FV} + \dot{Q}_{FH} + \dot{Q}_{FB} = 1214.7 \text{ W} \quad (3.16)$$

le calcul des apports calorifiques par ventilation résultant du renouvellement de l'air de la chambre de refroidissement due à l'ouverture de la porte du réfrigérateur (taux de renouvellement égal à une fois par heure ; $N=1$) donne :

$$\dot{Q}_{Fvent} = \frac{N \cdot \dot{V}}{3600} C_p \cdot \Delta T = 33.6 \text{ W} \quad (3.17)$$

Ainsi, les apports calorifiques globaux \dot{Q}_{FT} sont :

$$\dot{Q}_{FT} = \dot{Q}_F + \dot{Q}_{Fvent} = 1248.3 \text{ W} \quad (3.18)$$

3. Dimensionnement du système de réfrigération

Pour dimensionner le système de réfrigération, on a besoin d'un fluide frigorigène qui s'évapore à une température inférieure ou égale à (-85°C) et se condense à une température supérieure ou égale à (50°C) . En recherchant dans le tableau des fluides frigorigènes, nous avons observé le manque du fluide approprié. Nous allons donc utiliser deux fluides dans une cascade avec couplage condenseur/évaporateur.

Avec l'ajout d'un second système complémentaire au premier système, le premier condenseur et le deuxième évaporateur forment un échangeur de chaleur.

Les températures de fonctionnement seront alors $(T_{f1}, T_{c1}, T_{f2}, T_{c2})$ et doivent vérifier les conditions suivantes :

$$T_{f1} \leq T_{sf} - 5^\circ\text{C}$$

$$T_{c1} > T_{f2}$$

$$T_{c2} \geq T_{sc} + 10^\circ\text{C}$$

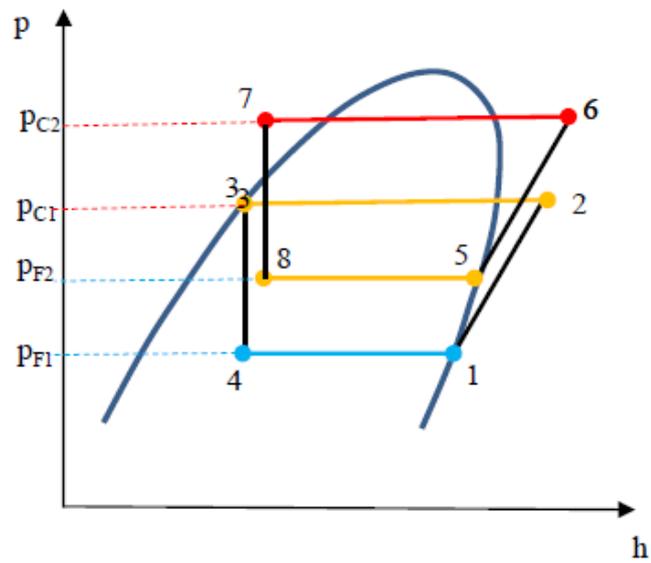


Figure 3.3 : Le cycle thermodynamique P.H d'un Installation en cascade

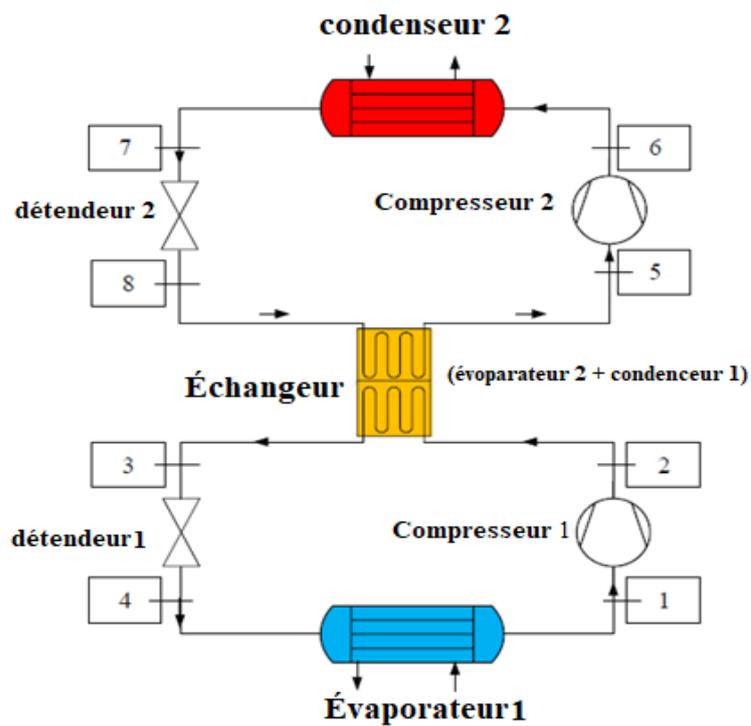


Figure 3.4 : Installation en cascade

3.1. Critère sur lequel est basée l'optimisation

Pour choisir les températures de fonctionnement, nous allons faire un calcul d'optimisation pour obtenir le prix des composants de la machine de refroidissement et de la consommation (pour une durée donnée) qui soit minimal.

- **Dimensionnement du Compresseur**

Le compresseur est caractérisé par la puissance réelle, de son rendement global qui tient compte de la présence des frottements et dont la valeur est estimée à 0.9 d'après les catalogues des constructeurs.

La puissance nette de compression fournie au fluide est donnée par :

$$P_{\text{net}} = \frac{\dot{Q}_F}{\text{COP}_F} \quad (3.19)$$

et celle réelle consommée :

$$P_{\text{réel}} = \frac{P_{\text{net}}}{\eta} \quad (3.20)$$

La puissance du compresseur à installer (acheté) doit être, en pratique, augmentée de 10 % pour qu'il puisse travailler à l'aise sans fatigue.

Donc :

$$P^*_{\text{réel}} = 1.1 P_{\text{réel}} \quad (3.21)$$

$$P^*_{\text{réel}} = \frac{1.1 \dot{Q}_F}{\eta \text{COP}_F} \quad (3.22)$$

considéreront que le kilowatt de puissance du compresseur est C1, son prix s'écrit :

$$\text{Prix} = C_1 \cdot P^*_{\text{réel}} \quad (3.23)$$

Puisqu'il y a deux compresseurs, le prix est donné par l'expression

$$\mathbf{prix}_{\text{comp}} = \mathbf{prix}_{\text{com1}} + \mathbf{prix}_{\text{com2}} \quad (3.25)$$

$$\mathbf{prix}_{\text{comp}} = C_1 \left(\frac{1.1\dot{Q}_{\text{FT1}}}{\eta\text{COP}_{\text{F1}}} + \frac{1.1\dot{Q}_{\text{FT2}}}{\eta\text{COP}_{\text{F2}}} \right) \quad (3.26)$$

- **Dimensionnement de l'évaporateur**

L'évaporateur doit absorber totalement la puissance de chaleur de l'intérieur du réfrigérateur et qui est égale à \dot{Q}_{FT} soit :

$$\dot{Q}_{\text{FT}} = S_{\text{ev}} \cdot \alpha_{\text{ev}} (T_{\text{SF}} - T_{\text{f1}}) \quad (3.27)$$

La surface d'échange est donc:

$$S_{\text{ev}} = \frac{\dot{Q}_{\text{FT1}}}{\alpha_{\text{ev}} (T_{\text{SF}} - T_{\text{f1}})} \quad (3.28)$$

Si le prix par mètre carré de l'évaporateur est C_2 , l'évaporateur revient à:

$$\mathbf{Prix}_{\text{ev}} = C_2 \cdot S_{\text{ev}} \quad (3.29)$$

- **Dimensionnement du Condenseur**

La puissance de chaleur dégagée par le condenseur lors du processus de condensation du fluide, est exprimée par :

$$\dot{Q}_{\text{C2}} = S_{\text{cd}} \cdot \alpha_{\text{cd}} (T_{\text{C2}} - T_{\text{SC}}) \quad (3.30)$$

La surface d'échange du condenseur est donnée par :

$$S_{cd} = \frac{\dot{Q}_{c2}}{\alpha_{cd}(T_{C2} - T_{SC})} \quad (3.31)$$

Avec le même prix unitaire C_2 , le prix du condenseur est :

$$\text{Prix}_{cd} = C_2 \cdot S_{cd} \quad (3.32)$$

• Dimensionnement de l'Échangeur de chaleur

L'échangeur de chaleur formé par le premier condenseur et le deuxième évaporateur est supposé isolé, la chaleur cédée par le premier est gagnée par le second, la surface et le prix de l'échangeur sont calculés comme suit :

$$S_{ech} = \frac{\dot{Q}_{c1}}{\alpha_g(T_{C1} - T_{f2})} = \frac{\dot{Q}_{fT2}}{\alpha_g(T_{C1} - T_{f2})} \quad (3.33)$$

$$\text{Prix}_{ech} = C_2 \cdot S_{ech} \quad (3.34)$$

α_g : coefficient global d'échange de chaleur entre les deux fluides.

• Consommation d'électricité

Le prix de consommation d'électricité est égal au produit de la puissance réelle du compresseur, de la durée nette de fonctionnement (en heure) et du prix unitaire d'électricité par kilowattheure (C_3) donc :

$$\text{Prix}_{cons} = C_3 t (P_{réel1} + P_{réel2}) \quad (3.35)$$

3.2. Expression finale du prix total des éléments du système

$$\text{Prix}_{Total} = \text{Prix}_{comp} + \text{Prix}_{ev} + \text{Prix}_{ech} + \text{prix}_{cond} + \text{prix}_{cons} \quad (3.36)$$

Comme le prix dépend des enthalpies massiques des fluides frigorigènes utilisés qui sont inconnues puisqu'elles dépendent des températures de fonctionnement et par manque de tables des propriétés thermodynamiques informatisées, on suppose que les deux fluides décrivent le cycle de Carnot réversible.

- **Pour le compresseur**

$$\text{prix}_{\text{comp}} = C_1 \left(\frac{1.1 \dot{Q}_{\text{FT1}} T_{f1}}{\eta \cdot \text{COP}_{\text{F1}}} + \frac{1.1 \dot{Q}_{\text{FT2}} T_{c1}}{\eta \cdot \text{COP}_{\text{F2}} T_{f1}} \right) \quad (3.37)$$

En admettant que $Q_{\text{F2}} = Q_{\text{C1}}$ et en appliquant le deuxième principe de la thermodynamique pour les deux cycles (loi de Clausius), on peut écrire :

$$\text{prix}_{\text{comp}} = C_1 \left(\frac{1.1 \dot{Q}_{\text{FT}} T_{f1}}{\eta (T_{c1} - T_{f1})} + \frac{1.1 \dot{Q}_{\text{FT}} T_{f2}}{\eta (T_{c2} - T_{f2})} \frac{T_{c1}}{T_{f1}} \right) \quad (3.38)$$

- **Pour l'évaporateur**

$$\text{prix}_{\text{ev}} = C_2 \left(\frac{\dot{Q}_{\text{F1}}}{\alpha_{\text{ev}} (T_{\text{SF}} - T_{f1})} \right) \quad (3.39)$$

α_{ev} : Coefficient d'échange thermique entre la paroi de l'évaporateur et l'air intérieur de l'enceinte à refroidir (réfrigérateur), et son expression :

$$\alpha_{\text{ev}} = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_f}{L} = \frac{\lambda_f \cdot A \cdot (g \cdot p_r \cdot L^3 (T_{\text{SF}} - T_{f1}))^m}{L \cdot (T_{\text{SF}} \cdot v^2)^m} = k_1 (T_{\text{SF}} - T_{f1})^m \quad (3.40)$$

$$\text{prix}_{\text{ev}} = C_2 \left(\frac{\dot{Q}_{\text{FT1}}}{k_1 (T_{\text{SF}} - T_{f1})^{m+1}} \right) \quad (3.41)$$

- **Pour le condenseur**

$$\text{prix}_{\text{con}} = C_2 \left(\frac{T_{C2} \cdot \dot{Q}_{FT2}}{\alpha_{cd}(T_{C2} - T_{SC})} \right) \quad (3.42)$$

$$\text{prix}_{\text{con}} = C_2 \left(\frac{T_{C2} \cdot \dot{Q}_{C1}}{\alpha_{cd}(T_{C2} - T_{SC})} \right) = C_2 \left(\frac{T_{C1} \cdot T_{C2} \cdot \dot{Q}_{FT1}}{\alpha_{cd} \cdot T_{f1}(T_{C2} - T_{SC})} \right) \quad (3.43)$$

α_{cd} : Coefficient d'échange thermique entre la paroi de condenseur et l'air intérieur, et son expression :

$$\alpha_{cd} = \frac{Nu \cdot \lambda_f}{L} = \frac{\lambda_f \cdot A(g \cdot p_r \cdot L^3 (T_{C2} - T_{SC}))^m}{L \cdot (T_{SC} \cdot v)^m} = k_2 (T_{C2} - T_{SC})^m \quad (3.44)$$

$$\text{prix}_{\text{con}} = C_2 \left(\frac{T_{C1} \cdot T_{C2} \cdot \dot{Q}_{FT1}}{k_2 (T_{C2} - T_{SC})^{m+1}} \right) \quad (3.45)$$

- **Pour l'échangeur de chaleur**

$$\text{prix}_{\text{ech}} = C_2 \left(\frac{\dot{Q}_{c1}}{\alpha_g (T_{C1} - T_{f2})} \right) \quad (3.46)$$

$$\text{prix}_{\text{ech}} = C_2 \left(\frac{\dot{Q}_{FT1}}{\alpha_g (T_{C1} - T_{f2})} \times \frac{T_{c1}}{T_{f1}} \right) \quad (3.47)$$

- **pour la consommation d'électricité**

$$\text{Prix}_{\text{cons}} = C_3 \cdot t \left(\frac{\dot{Q}_{FT1} \cdot T_{f1}}{\eta (T_{C1} - T_{f1})} + \frac{\dot{Q}_{FT1} \cdot T_{f2}}{\eta (T_{C2} - T_{f2})} \right) \quad (3.48)$$

Finalement, l'expression du prix totale devient :

$$\text{Prix}_{\text{Total}} = \dot{Q}_{Ft} \left[\frac{1.1C1 + t.C3}{\eta} \left(\frac{T_{f1}}{\eta (T_{C1} - T_{f1})} + \frac{T_{f2}}{\eta (T_{C2} - T_{f2})} \frac{T_{c1}}{T_{f1}} \right) + C_2 \left(\frac{1}{k_2 (T_{SF} - T_{f1})^{m+1}} + \frac{1}{\alpha_g (T_{C1} - T_{f2})} \cdot \frac{T_{c1}}{T_{f1}} + \frac{T_{C1} T_{C2}}{T_{f1} k_2 (T_{C2} - T_{SC})^{m+1}} \right) \right] \quad (3.49)$$

Nous allons chercher les valeurs optimales des températures de fonctionnement pour lesquelles le prix total soit minimal.

Pour simplifier l'écriture, posons : $T_{f1}=x$; $T_{c1}=y$; $T_{f2}=z$; $T_{c2}=w$; $\text{Prix}_{\text{total}}=P(x,y,z,w)$

il faut annuler les dérivées partielles de la fonction prix par rapport aux quatre variables x , y , z et w .

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{y \cdot \dot{Q}_{FT1}}{x^2} \left[1000C1 \left(\frac{x^2(m+1)}{yk_1(T_i - x)^{m+2}} + \frac{1}{\alpha_g(y-z)} + \frac{w}{k_2z(w - T_e)^{m+1}} \right) + \frac{1.1C1 + t.C3}{\eta} \left(\frac{w}{z} - 2 \right) \right] = 0 \quad (3.50)$$

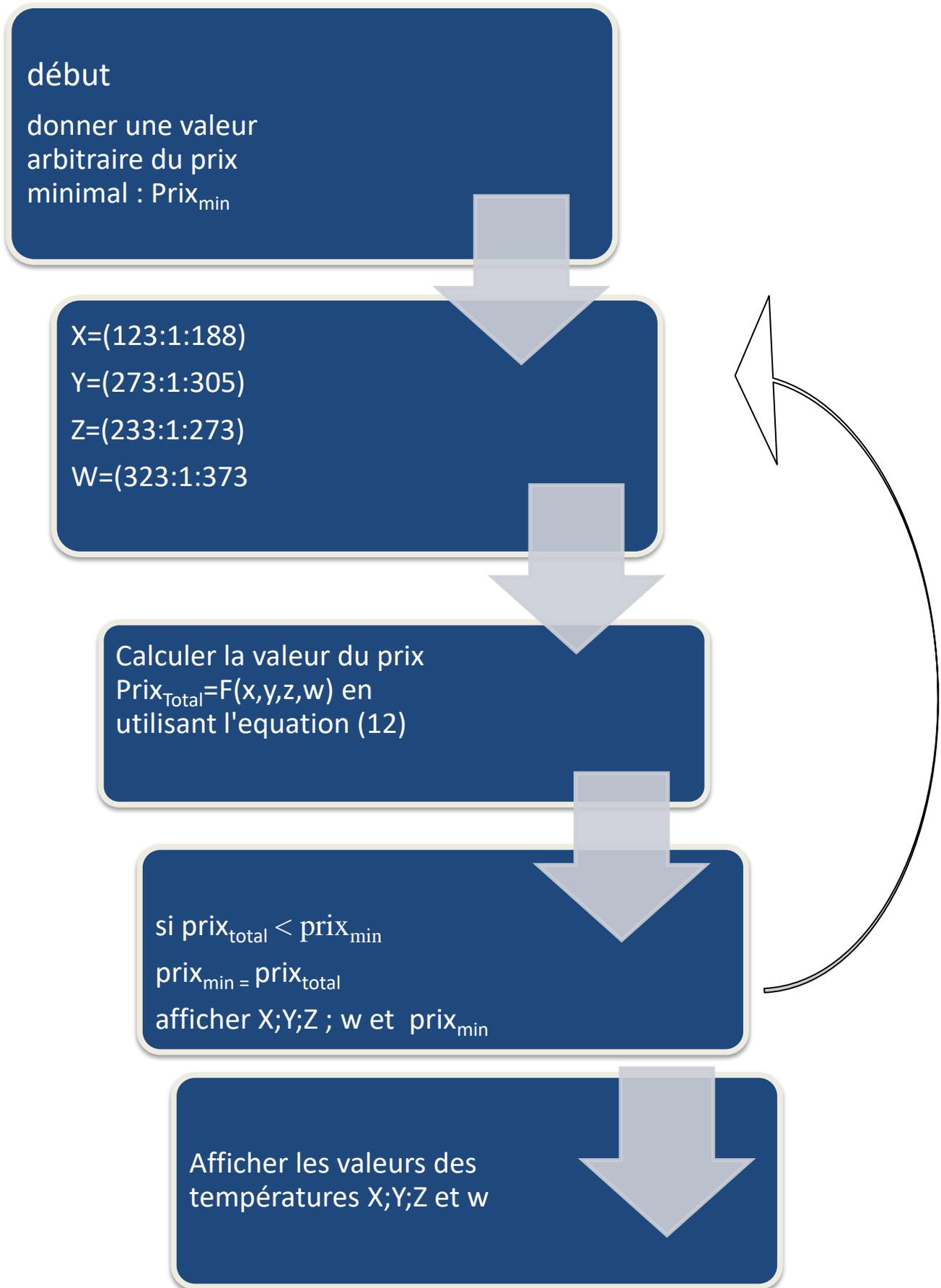
$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{z \cdot \dot{Q}_{FT1}}{x} \left[\frac{-1000C1}{(y-z)^2} + \frac{w}{z^2} \left(\frac{w \cdot 1000C1}{k_2(w - T_e)^{m+1}} + \frac{1.1C1 + t.C3}{\eta} \right) \right] = 0 \quad (3.51)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\dot{Q}_{FT1}}{x} \left[\frac{1000C1}{\alpha_g(y-z)^2} - \frac{y \cdot w}{z^2} \left(\frac{w \cdot 1000C1}{k_2(w - T_e)^{m+1}} - \frac{1.1C1 + t.C3}{\eta} \right) \right] = 0 \quad (3.52)$$

$$\frac{\partial p}{\partial w} = \frac{y \cdot \dot{Q}_{FT1}}{x \cdot z} \left[\frac{1000C1}{k_2} \left(\frac{w - T_e - (m+1)}{(w - T_e)^{m+2}} \right) + \frac{1.1C1 + t.C3}{\eta} \right] = 0 \quad (3.53)$$

On obtient ainsi un système algébrique de quatre équations non linéaires à quatre inconnues irrésolvables analytiquement. Nous allons donc procéder par méthode numérique ; celle du point fixe (facile à programmer).

Nous avons écrit un programme en MATLAB. Il y a un problème de convergence. Ce qui nous a poussés à utiliser une autre méthode permettant de calculer la valeur du prix pour toutes les valeurs des variables dans leurs intervalles (balayage) et d'afficher le prix minimal ainsi que les valeurs des températures correspondantes. L'organigramme suivi et le suivant :



Avec les données numériques du problème, les résultats obtenus sont consignés dans le tableau :
 $C_1=34700$; $C_2=1140$; $C_3=3.47$ $K_1=2.64$; $K_2=2.08$ $\alpha_g=200$

$$X=T_{f1} = -91^{\circ}\text{C}$$

$$Y=T_{c1} = 2^{\circ}\text{C}$$

$$Z=T_{f2} = 0^{\circ}\text{C}$$

$$W=T_{c2} = 57^{\circ}\text{C}$$

(3.54)

4. Choix des deux fluides frigorigènes

Après avoir trouvé les températures optimales de fonctionnement, nous allons choisir les fluides qui puissent travailler dans les conditions suivantes :

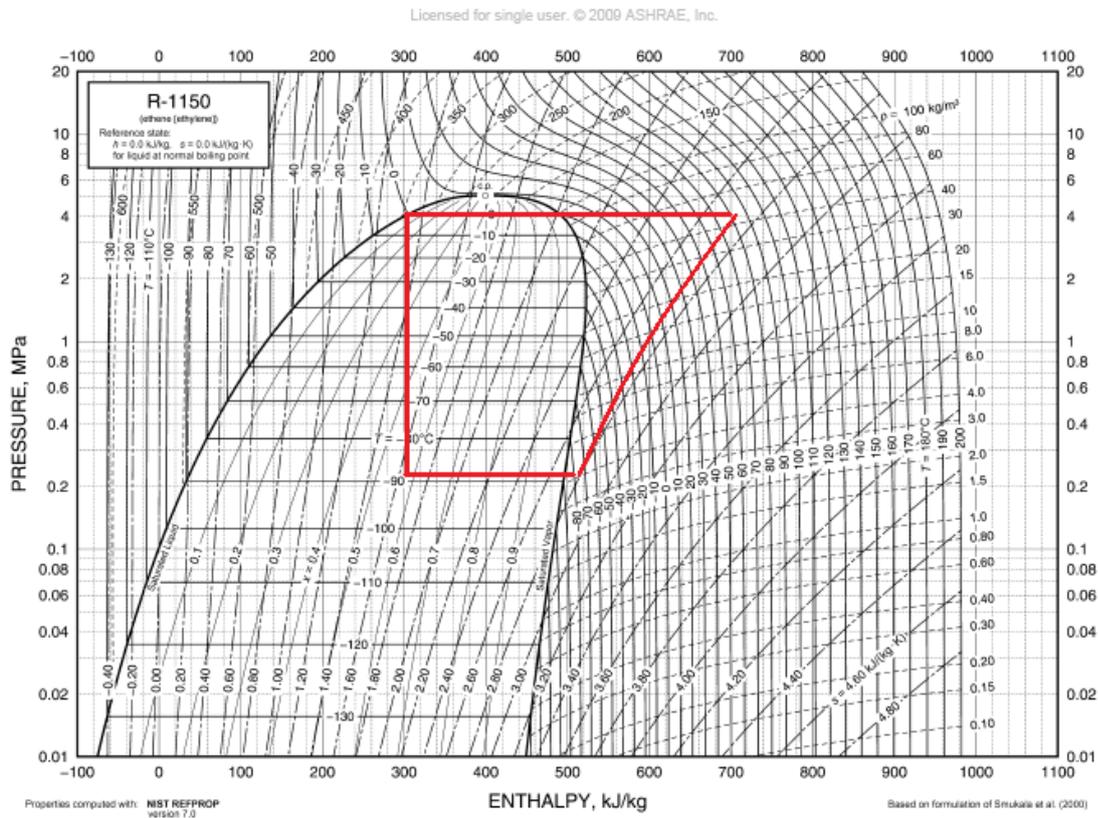


Fig. 24 Pressure-Enthalpy Diagram for Refrigerant 1150 (Ethylene)

Figure 3.5 : cycle thermodynamique P.H du R1150

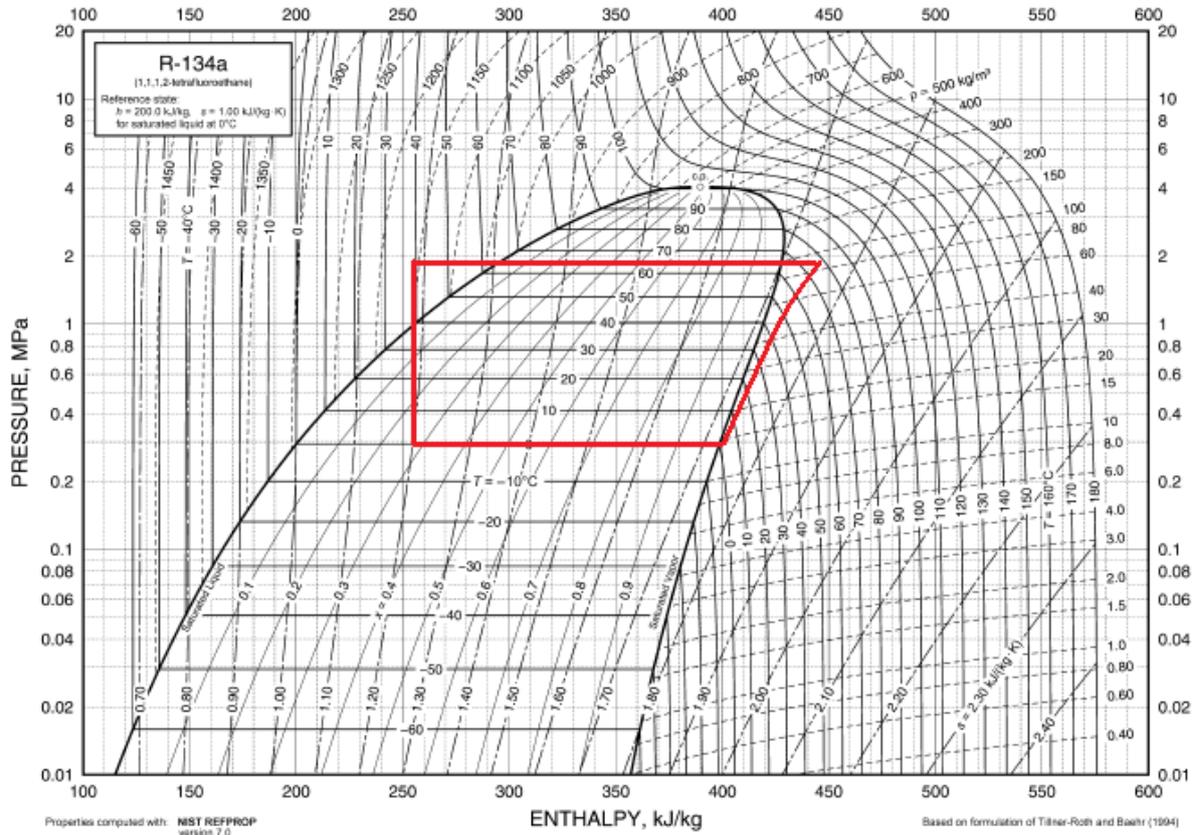


Fig. 8 Pressure-Enthalpy Diagram for Refrigerant 134a

Figure 3.5 : cycle thermodynamique P.H du R134a

Le premier entre -91°C est 2°C ; le deuxième entre 0°C et 57°C soient R1150 et R134a respectivement.

5. Dimensionnement numérique du système de réfrigération :

Calcul des enthalpies massiques aux sommets des deux cycles :

Pour R1150 :

$$\begin{cases} h_1 = 500 \text{ KJ/Kg} ; S_1 = 2.7 \text{ KJ/Kgk} \\ h_2 = 700 \text{ KJ/Kg} (s_2 = s_1) \\ h_3 = h_4 = 310.75 \text{ KJ/Kg} \end{cases} \quad (3.55)$$

Pour R134 a :

$$\begin{cases} h_5 = 399.3 \text{ KJ/Kg}; S_5 = 1.73 \text{ KJ/Kgk} \\ h_6 = 434.35 \text{ KJ/Kg} (s_6 = s_5) \\ h_7 = h_8 = 267.2 \text{ KJ/Kg} \end{cases} \quad (3.56)$$

5.1. Calcul des debits massiques

Pour le premier cycle (R1150):

$$\dot{m}_1 = \frac{\dot{Q}_{FT}}{h_1 - h_4} = 6.59 \text{ g/s} \quad (3.57)$$

Pour le deuxième cycle (R134a):

$$\dot{m}_2 = \frac{\dot{Q}_{F2}}{h_5 - h_8} = \frac{\dot{Q}_{c1}}{h_5 - h_8} \quad (3.58)$$

$$\dot{m}_2 = \frac{\dot{m}_1}{(h_5 - h_8)} (h_2 - h_3) = 19.42 \text{ g/s} \quad (3.59)$$

5.2. Calcul du COP_{FT} du système

$$\text{cop}_{Ft} = \frac{\dot{Q}_{FT}}{P_{neet1} + P_{neet2}} = \frac{\dot{m}_1 (h_1 - h_4)}{\dot{m}_1 (h_2 - h_1) + \dot{m}_2 (h_6 - h_5)} \quad (3.60)$$

$$\text{cop}_{Ft} = 0.62 \quad (3.61)$$

5.3. Dimensionnement du compresseur

Pour le premier compresseur (à installer) :

$$P^*_{\text{réel1}} = \frac{1.1\dot{Q}_{FT1}}{\eta\text{COP}_{F1}} = \frac{1.1\dot{m}_1(h_2 - h_1)}{\eta} \quad (3.62)$$

$$P^*_{\text{réel1}} = 1.61 \text{KW} \quad (3.63)$$

Pour le second compresseur (à installer) :

$$P^*_{\text{réel2}} = \frac{1.1\dot{Q}_{FT2}}{\eta\text{COP}_{F2}} = \frac{1.1\dot{m}_2(h_6 - h_5)}{\eta} \quad (3.64)$$

$$P^*_{\text{réel2}} = 0.83 \text{KW} \quad (3.65)$$

.5.4.Dimensionnement del'évaporateur

On doit calculer la surface d'échange de l'évaporateur:

$$S_{\text{ev}} = \frac{\dot{Q}_{FT1}}{k_1(T_{SF} - T_{f1})^{m+1}} = \frac{\dot{m}_1(h_1 - h_4)}{k_1(T_{SF} - T_{f1})^{m+1}} \quad (3.66)$$

$$S_{\text{ev}} = 23.58 \text{ m}^2 \quad (3.67)$$

5.5. Dimensionnement du condenseur

On doit calculer la surface d'échange de condenseur:

$$S_{\text{cd}} = \frac{\dot{Q}_{c2}}{k_2(T_{C2} - T_{SC})^{m+1}} = \frac{\dot{m}_2(h_6 - h_7)}{k_2(T_{C2} - T_{SC})^{m+1}} \quad (3.68)$$

$$S_{\text{cd}} = 45.21 \text{ m}^2 \quad (3.69)$$

5.6. Dimensionnement de l'échangeur de chaleur

$$S_{ech} = \frac{\dot{Q}_{c2}}{\alpha_g(T_{C1}-T_{f2})} = \frac{\dot{m}_2(h_6-h_7)}{\alpha_g(T_{C1}-T_{f2})} \quad (3.70)$$

$$S_{ech} = 8.11 \text{ m}^2 \quad (3.71)$$

5.7. Consommation d'électricité

Pour le premier compresseur:

$$P_{réel1} = \frac{P^*_{reel1}}{1.1} \quad (3.72)$$

$$P_{réel1} = 1.46 \text{ W} \quad (3.73)$$

Pour le deuxième compresseur:

$$P_{réel2} = \frac{P^*_{reel2}}{1.1} \quad (3.74)$$

$$P_{réel2} = 0.75 \text{ W} \quad (3.75)$$

5.8. Dimensionnement du détendeur

L'organe de détente isenthalpique peut être un tube capillaire ou thermostatique. Pour le dimensionnement du capillaire nous calculons sa longueur:

D'après la loi de Poiseuille, la perte de charge linéaire est exprimée par :

$$\Delta P = P_c - P_f = \frac{1}{2} \rho v^2 \mathcal{F} \frac{L}{D^2} \quad (3.76)$$

$$L = \frac{2\Delta P D^2}{\rho v^2 \mathcal{F}} \quad (3.77)$$

On choisit le diamètre intérieur D du capillaire (D=2mm)

On détermine la vitesse de l'écoulement par la relation :

$$v = \frac{4\dot{m}}{\pi \rho D^2} \quad (3.78)$$

Le coefficient de frottement \mathcal{F} est donné par la loi :

Pour le régime laminaire :

$$\mathcal{F} = \frac{64}{Re} \quad (3.79)$$

Pour le régime turbulent :

$$\mathcal{F} = \frac{0.316}{Re^{0.25}} \quad (3.80)$$

Le nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (3.81)$$

- **Pour le premier cycle (R1150)**

Dimensionnement la vitesse

$$V_1 = \frac{4\dot{m}_1}{\pi \rho_{34} D^2} \quad (3.82)$$

$$\rho_{34} = \frac{\rho_3 + \rho_4}{2} \quad (3.83)$$

$$\rho_4 = \rho_{4'} + x_4(\rho_{1'} - \rho_{4'}) \quad (3.84)$$

$$x_4 = \frac{h_4 - h_{4'}}{h_{1'} - h_{4'}} \quad (3.85)$$

$$x_4 = 0.6 \quad (3.86)$$

$$\rho_4 = 222.32 \text{ kg/m}^3 \quad (3.87)$$

$$\rho_{34} = 256.1 \text{ kg/m}^3 \quad (3.88)$$

$$V_1 = 9.44 \text{ m/s} \quad (3.89)$$

$$v_{34} = \frac{v_3 + v_4}{2} \quad (3.90)$$

$$v_4 = v_{4'} + x_4(v_{1'} + v_{4'}) \quad (3.91)$$

$$v_4 = 0.447 (10^{-5}) \text{ m}^2/\text{s} \quad (3.92)$$

$$v_{34} = 0.36 (10^{-5}) \text{ m}^2/\text{s} \quad (3.93)$$

Le frottement

$$R_{e1} = 5244.44 \quad (3.94)$$

Le régime c'est une turbulent

$$\mathcal{F}_1 = \frac{0.316}{R_{e1}^{0.25}} = 0.037 \quad (3.95)$$

Dimensionnement la longueur

$$L_1 = \frac{2(P_{c1} - P_{F1})D^2}{\rho_{34}v_1^2\mathcal{F}_1} = 0.46 \text{ m} \quad (3.96)$$

• **Pour le deuxième cycle (R134a)**

Dimensionnement la vitesse

$$V_2 = \frac{4\dot{m}_2}{\pi\rho_{78}D^2} \quad (3.97)$$

$$\rho_{78} = \frac{\rho_7 + \rho_8}{2} \quad (3.98)$$

$$\rho_8 = \rho_{8'} + x_8(\rho_{7'} - \rho_{8'}) \quad (3.99)$$

$$x_8 = \frac{h_8 - h_{8'}}{h_{5'} - h_{8'}} \quad (3.100)$$

$$x_8 = 0.36 \quad (3.101)$$

$$\rho_8 = 2335.18 \text{ kg/m}^3 \quad (3.102)$$

$$\rho_{78} = 1704.29 \text{ kg/m}^3 \quad (3.103)$$

$$V_2 = 3.63 \text{ m/s} \quad (3.104)$$

$$v_{34} = \frac{v_3 + v_4}{2} \quad (3.105)$$

$$v_8 = v_{8'} + x_8(v_{5'} - v_{8'}) \quad (3.106)$$

$$v_{34} = 0.1776 (10^{-5}) \text{ m}^2/\text{s} \quad (3.107)$$

Dimensionnement le frottement

$$Re_2 = 4087.84 \quad (3.108)$$

Le régime c'est une turbulent

$$\mathcal{F}_2 = \frac{0.316}{Re^{0.25}} = 0.04 \quad (3.109)$$

Dimensionnement la longueur

$$L_2 = \frac{2(P_{c2} - P_{F2})D^2}{\rho_{78}v_2^2\mathcal{F}_2} = 0.27 \text{ m} \quad (3.110)$$

6. Résultats numériques

	Température(°c) / Pression(bar)		Q _{f1} (w)	L (m)	C ₁ (DA/kw)	C ₂ (DA/m ²)	C ₃ (DA/kwh)	K	V (m/s)
	T _c /P _c	T _f /P _f							
Cycle1	2/4.3	-91/0.23	1248.3	0.46	37500	1140	3.47	2.64	9.44
Cycle2	57/1.57	0/0.31		0.27	37500	1140	3.47	2.08	3.63

	Surface d'échange (m ²)			\dot{m} (g/s)	P [*] _{réel} (Kw)	P _{réel} (Kw)	COP _{ft}	R _e	\mathcal{F}
	S _{ev} (m ²)	S _{cd} (m ²)	S _{ech} (m ²)						
Cycle1	23.58	45.21	8.11	6.59	1.61	1.46	0.62	5244.44	0.037
Cycle2				19.42	0.83	0.75		4087.84	0.04

Tableau 3.1 Résultats récapitulatifs

R1150	h ₁ (KJ/kg)	500
	h ₂ (KJ/kg)	700
	h ₃ (KJ/kg)	310.75
	h ₄ (KJ/kg)	310.75
R134a	h ₅ (KJ/kg)	399.3
	h ₆ (KJ/kg)	434.35
	h ₇ (KJ/kg)	267.2
	h ₈ (KJ/kg)	267.2

Tableau 3.2 : Enthalpies massiques aux sommets des cycles

Conclusion

Notre travail consistait à la conception d'une machine frigorifique à compression de vapeur pour maintenir à -80°C l'intérieur d'un réfrigérateur destiné au stockage des vaccins fabriqués pour le covid_19 dans la région de Tébessa dont la température de base en été est estimée à 40°C .

Nous avons d'abord déterminé les apports calorifiques globaux par transmission et par ventilation du réfrigérateur étudié.

Nous sommes ensuite préoccupés de l'effet des paramètres de fonctionnement, qui sont les températures d'évaporation et de condensation sur le coût total de l'installation et la consommation électrique. Nous avons utilisé deux fluides par manque d'un seul qui puisse fonctionner dans de telles conditions. Nous nous sommes intéressés à l'optimisation pour obtenir un coût total minimal de l'installation et la consommation électrique.

Après avoir écrit le bilan énergétique au niveau des éléments de la machine utilisant les principes de la thermodynamique et du transfert de chaleur avec simplification (cycle de Carnot réversible), nous avons obtenu un système algébrique de quatre équations non linéaires à quatre inconnues non résolvable analytiquement.

Une méthode numérique est inévitable soit celle du point fixe dont la convergence n'était pas assurée d'où l'utilisation d'une autre méthode permettant de calculer la valeur du prix pour toutes les valeurs des variables dans leurs intervalles (balayage) et d'afficher le prix minimal ainsi que les valeurs des températures correspondantes.

Nous avons écrit un programme en MATLAB qui nous a donné les résultats numériques concernant le dimensionnement de l'installation.

Enfin, dans notre cas, nous avons choisi comme fluides le R1150 et le R134a pour faire fonctionner la machine frigorifique dans les conditions de température considérées.

Les surfaces de l'évaporateur et du condenseur paraissent importantes et techniquement difficiles à installer. Pour les réduire, il faut des ventilateurs pour assurer l'échange de chaleur par convection forcée.

RÉFÉRENCES

[1] : composants d'une machine à compression de vapeur

[2] : propriétés thermodynamiques du R134a

[3] : <https://energieplus-lesite.be/techniques/climatisation8/production-de-froid/machine-frigorifique-a-compression/>

[4] : cycle thermodynamique d'une machine à compression de vapeur.pdf

ANNEXE

Thermophysical Properties of Refrigerants

Refrigerant 1150 (Ethylene) Properties of Saturated Liquid and Saturated Vapor

Temp.,* °C	Pres- sure, MPa	Density, kg/m ³ Liquid	Volume, m ³ /kg Vapor	Enthalpy, kJ/kg		Entropy, kJ/(kg·K)		Specific Heat c_p , kJ/(kg·K)			Velocity of Sound, m/s		Viscosity, μ Pa·s		Thermal Cond., mW/(m·K)		Surface Tension, mN/m	Temp.,* °C
				Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	c_p/c_v	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor		
-169.16 ^b	0.00012	654.6	252.640	-158.09	409.42	-1.1789	4.2787	2.429	1.187	1.333	1767	202.7	685.7	0.77	270.6	6.80	28.14	-169.16
-165	0.00025	649.3	129.690	-147.97	414.35	-1.0835	4.1160	2.432	1.188	1.333	1740	206.7	598.1	1.64	264.9	6.62	27.31	-165
-160	0.00053	643.0	62.7190	-135.81	420.24	-0.9736	3.9408	2.432	1.189	1.333	1707	211.3	514.5	2.47	258.1	6.59	26.33	-160
-155	0.00107	636.6	32.5570	-123.66	426.12	-0.8685	3.7848	2.429	1.191	1.334	1673	215.9	448.6	3.13	251.3	6.71	25.35	-155
-150	0.00203	630.1	17.9740	-111.52	431.97	-0.7679	3.6454	2.424	1.194	1.334	1639	220.3	395.8	3.66	244.5	6.92	24.38	-150
-145	0.00362	623.6	10.4720	-99.41	437.78	-0.6715	3.5204	2.419	1.198	1.335	1604	224.5	352.7	4.09	237.9	7.18	23.42	-145
-140	0.00614	617.1	6.39510	-87.33	443.54	-0.5790	3.4080	2.414	1.203	1.336	1569	228.6	317.2	4.44	231.2	7.47	22.47	-140
-135	0.01000	610.5	4.07100	-75.27	449.24	-0.4902	3.3065	2.409	1.210	1.337	1534	232.5	287.5	4.74	224.7	7.78	21.53	-135
-130	0.01565	603.8	2.68800	-63.22	454.85	-0.4046	3.2145	2.406	1.218	1.339	1498	236.3	262.3	5.00	218.3	8.09	20.59	-130
-125	0.02368	597.1	1.83310	-51.19	460.37	-0.3220	3.1310	2.404	1.228	1.341	1463	239.8	240.7	5.23	212.0	8.39	19.66	-125
-120	0.03474	590.3	1.28650	-39.16	465.79	-0.2423	3.0548	2.404	1.240	1.344	1427	243.2	222.0	5.44	205.8	8.70	18.74	-120
-115	0.04961	583.4	0.92612	-27.12	471.08	-0.1651	2.9850	2.406	1.254	1.348	1390	246.3	205.7	5.63	199.7	9.00	17.83	-115
-110	0.06911	576.5	0.68196	-15.06	476.22	-0.0903	2.9210	2.409	1.271	1.353	1354	249.2	191.3	5.81	193.7	9.30	16.93	-110
-105	0.09420	569.4	0.51239	-2.97	481.21	-0.0176	2.8619	2.416	1.290	1.358	1316	251.8	178.5	5.99	187.9	9.61	16.04	-105
-103.77 ^b	0.10133	567.7	0.47899	0.00	482.41	0.0000	2.8481	2.418	1.295	1.360	1307	252.4	175.6	6.03	186.5	9.68	15.83	-103.77
-100	0.12585	562.2	0.39198	9.16	486.03	0.0532	2.8073	2.424	1.312	1.365	1279	254.2	167.0	6.16	182.2	9.92	15.16	-100
-98	0.14059	559.3	0.35377	14.02	487.90	0.0810	2.7866	2.429	1.321	1.368	1264	255.1	162.7	6.23	179.9	10.04	14.82	-98
-96	0.15662	556.4	0.32007	18.90	489.74	0.1085	2.7664	2.434	1.331	1.371	1249	255.9	158.6	6.30	177.7	10.17	14.47	-96
-94	0.17402	553.5	0.29026	23.79	491.55	0.1358	2.7468	2.439	1.342	1.375	1233	256.7	154.7	6.37	175.5	10.30	14.12	-94
-92	0.19285	550.5	0.26382	28.69	493.32	0.1628	2.7277	2.445	1.353	1.379	1218	257.4	150.9	6.44	173.3	10.44	13.78	-92
-90	0.21320	547.5	0.24030	33.60	495.06	0.1896	2.7092	2.451	1.365	1.383	1203	258.1	147.2	6.51	171.2	10.57	13.44	-90
-88	0.23514	544.5	0.21933	38.53	496.76	0.2161	2.6911	2.458	1.377	1.387	1187	258.7	143.6	6.58	169.0	10.71	13.10	-88
-86	0.25874	541.4	0.20058	43.48	498.43	0.2425	2.6734	2.465	1.391	1.392	1172	259.3	140.2	6.65	166.9	10.85	12.76	-86
-84	0.28409	538.4	0.18378	48.44	500.05	0.2686	2.6562	2.473	1.404	1.397	1156	259.9	136.9	6.72	164.8	11.00	12.42	-84
-82	0.31127	535.3	0.16869	53.41	501.64	0.2945	2.6394	2.482	1.419	1.402	1140	260.4	133.7	6.80	162.7	11.15	12.09	-82
-80	0.34034	532.2	0.15510	58.41	503.18	0.3202	2.6229	2.491	1.434	1.408	1125	260.8	130.6	6.87	160.7	11.30	11.75	-80
-78	0.37141	529.0	0.14284	63.43	504.68	0.3457	2.6069	2.501	1.450	1.414	1109	261.2	127.5	6.95	158.6	11.46	11.42	-78
-76	0.40454	525.8	0.13176	68.47	506.14	0.3711	2.5911	2.512	1.467	1.420	1093	261.5	124.6	7.02	156.6	11.62	11.09	-76
-74	0.43982	522.6	0.12172	73.53	507.55	0.3963	2.5757	2.524	1.484	1.427	1077	261.8	121.7	7.10	154.6	11.79	10.77	-74
-72	0.47733	519.3	0.11260	78.61	508.91	0.4214	2.5606	2.536	1.503	1.435	1061	262.1	118.9	7.18	152.6	11.96	10.44	-72
-70	0.51716	516.1	0.10431	83.72	510.23	0.4463	2.5457	2.549	1.522	1.443	1044	262.3	116.2	7.26	150.6	12.14	10.12	-70
-68	0.55939	512.7	0.09675	88.86	511.49	0.4710	2.5311	2.563	1.543	1.451	1028	262.4	113.6	7.34	148.6	12.33	9.80	-68
-66	0.60411	509.4	0.08985	94.03	512.70	0.4957	2.5168	2.578	1.565	1.460	1012	262.5	111.0	7.42	146.7	12.52	9.48	-66
-64	0.65141	506.0	0.08354	99.23	513.85	0.5202	2.5026	2.594	1.588	1.470	995	262.5	108.5	7.51	144.7	12.72	9.16	-64
-62	0.70136	502.5	0.07776	104.46	514.95	0.5446	2.4887	2.611	1.612	1.480	978	262.4	106.0	7.60	142.8	12.92	8.85	-62
-60	0.75406	499.0	0.07246	109.72	515.99	0.5689	2.4749	2.629	1.638	1.491	962	262.3	103.6	7.68	140.9	13.14	8.53	-60
-58	0.80960	495.5	0.06758	115.02	516.97	0.5932	2.4614	2.648	1.665	1.503	945	262.2	101.2	7.78	139.0	13.36	8.23	-58
-56	0.86807	491.9	0.06310	120.36	517.88	0.6173	2.4479	2.668	1.694	1.516	928	262.0	98.9	7.87	137.1	13.59	7.92	-56
-54	0.92955	488.2	0.05896	125.74	518.73	0.6414	2.4346	2.690	1.725	1.529	911	261.7	96.6	7.96	135.2	13.84	7.61	-54
-52	0.99414	484.5	0.05514	131.16	519.51	0.6654	2.4214	2.714	1.757	1.544	894	261.3	94.4	8.06	133.4	14.09	7.31	-52
-50	1.0619	480.8	0.05161	136.62	520.21	0.6894	2.4083	2.739	1.792	1.560	876	260.9	92.2	8.16	131.5	14.35	7.01	-50
-48	1.1330	476.9	0.04834	142.14	520.84	0.7133	2.3953	2.766	1.829	1.577	859	260.5	90.1	8.27	129.7	14.63	6.71	-48
-46	1.2075	473.0	0.04530	147.70	521.39	0.7372	2.3824	2.795	1.869	1.596	841	259.9	87.9	8.38	127.8	14.91	6.42	-46
-44	1.2854	469.1	0.04249	153.32	521.86	0.7611	2.3694	2.826	1.912	1.616	823	259.3	85.8	8.49	126.0	15.22	6.13	-44
-42	1.3669	465.0	0.03987	158.99	522.24	0.7850	2.3565	2.859	1.958	1.638	806	258.7	83.8	8.60	124.2	15.53	5.84	-42
-40	1.4521	460.9	0.03743	164.73	522.53	0.8089	2.3436	2.895	2.007	1.662	787	257.9	81.8	8.72	122.3	15.86	5.55	-40
-38	1.5410	456.7	0.03515	170.52	522.72	0.8328	2.3306	2.934	2.061	1.688	769	257.1	79.7	8.84	120.5	16.21	5.27	-38
-36	1.6339	452.4	0.03303	176.39	522.81	0.8568	2.3176	2.976	2.119	1.717	751	256.3	77.8	8.97	118.7	16.58	4.99	-36
-34	1.7307	448.0	0.03105	182.33	522.79	0.8809	2.3045	3.022	2.182	1.749	732	255.3	75.8	9.10	116.8	16.97	4.71	-34
-32	1.8315	443.5	0.02919	188.35	522.65	0.9050	2.2913	3.072	2.252	1.784	714	254.3	73.8	9.24	115.0	17.38	4.44	-32
-30	1.9366	438.9	0.02745	194.45	522.38	0.9292	2.2779	3.127	2.328	1.823	695	253.2	71.9	9.39	113.2	17.82	4.17	-30
-28	2.0459	434.1	0.02581	200.65	521.98	0.9535	2.2643	3.188	2.413	1.866	676	252.0	70.0	9.54	111.3	18.29	3.90	-28
-26	2.1596	429.2	0.02427	206.94	521.44	0.9780	2.2505	3.254	2.507	1.914	656	250.7	68.1	9.69	109.5	18.78	3.64	-26
-24	2.2779	424.2	0.02283	213.34	520.74	1.0027	2.2365	3.329	2.612	1.969	637	249.4	66.2	9.86	107.6	19.32	3.38	-24
-22	2.4008	419.0	0.02146	219.85	519.86	1.0276	2.2221	3.412	2.731	2.031	617	248.0	64.3	10.04	105.8	19.90	3.13	-22
-20	2.5284	413.6	0.02017	226.49	518.80	1.0527	2.2074	3.506	2.866	2.101	596	246.4	62.4	10.22	103.9	20.53	2.88	-20
-18	2.6610	408.0	0.01895	233.27	517.53	1.0781	2.1922	3.612	3.021	2.182	576	244.8	60.5	10.42	102.0	21.22	2.63	-18
-16	2.7985	402.2	0.01780	240.21	516.04	1.1039	2.1765	3.735	3.200	2.277	555	243.1	58.7	10.63	100.0	21.98	2.39	-16
-14	2.9412	396.1	0.01670	247.32	514.28	1.1300	2.1602	3.878	3.411	2.387	533	241.3	56.8	10.86	98.1	22.83	2.15	-14
-12	3.0893	389.8	0.01565	254.63	512.24	1.1567	2.1431	4.046	3.661	2.520	511	239.3	54.9	11.10	96.1	23.78	1.92	-12
-10	3.2428	383.0	0.01466	262.17	509.87	1.1839	2.1252	4.247	3.965	2.680	489	237.3	52.9	11.36	94.1	24.88	1.70	-10
-8	3.4019	375.9	0.01370	269.96	507.10	1.2118</												

θ : °C
 h : kJ/kg
 p : bar
 v : dm³/kg
 s : kJ/(kg.K)

STATE OF SATURATION — ETAT SATURÉ

100		90		80		70		60		50	
liquide	vapour										
1.552	2.657	1.194	4.620	1.078	6.463	1.004	8.675	0.9505	11.48	0.9117	14.73
374.6	407.7	343.4	425.9	322.8	429.3	304.6	429.2	287.8	427.2	273.4	424.4
39.70	1.612	32.41	1.668	26.30	1.687	21.14	1.698	16.80	1.705	13.50	1.709
1.462	2.930	1.179	4.795	1.069	6.664	0.9984	8.925	0.9458	11.80	0.9157	14.32
369.3	412.2	341.1	426.5	320.9	429.5	302.9	429.1	286.2	427.0	275.0	424.7
38.90	1.624	31.75	1.671	25.75	1.688	20.67	1.699	16.41	1.705	13.84	1.709
1.404	3.157	1.165	4.971	1.061	6.868	0.9925	9.181	0.9412	12.13	0.9117	14.73
365.3	415.3	338.9	427.0	319.0	429.5	301.2	429.0	284.5	426.7	273.4	424.4
38.12	1.633	31.11	1.673	25.20	1.690	20.21	1.699	16.02	1.706	13.50	1.709
1.360	3.362	1.152	5.149	1.053	7.077	0.9867	9.443	0.9367	12.47	0.9117	14.73
361.8	417.6	336.8	427.5	317.2	429.6	299.5	428.8	282.9	426.4	273.4	424.4
37.36	1.640	30.47	1.675	24.66	1.691	19.76	1.700	15.64	1.706	13.50	1.709
1.325	3.555	1.139	5.328	1.045	7.291	0.9812	9.712	0.9324	12.82	0.9117	14.73
358.7	419.5	334.7	427.9	315.3	429.6	297.8	428.6	281.3	426.1	273.4	424.4
36.62	1.646	29.84	1.677	24.13	1.692	19.31	1.701	15.27	1.707	13.50	1.709
1.296	3.739	1.128	5.510	1.038	7.509	0.9757	9.988	0.9281	13.18	0.9117	14.73
355.8	421.0	332.6	428.3	313.5	429.6	296.1	428.4	279.7	425.7	273.4	424.4
35.88	1.651	29.23	1.679	23.61	1.693	18.88	1.702	14.90	1.707	13.50	1.709
1.271	3.919	1.117	5.695	1.031	7.732	0.9704	10.27	0.9239	13.55	0.9117	14.73
353.1	422.3	330.6	428.6	311.7	429.6	294.4	428.2	278.1	425.4	273.4	424.4
35.16	1.655	28.62	1.681	23.10	1.694	18.45	1.702	14.54	1.708	13.50	1.709
1.249	4.096	1.106	5.882	1.024	7.959	0.9653	10.56	0.9197	13.93	0.9117	14.73
350.5	423.4	328.6	428.8	309.9	429.5	292.7	428.0	276.5	425.1	273.4	424.4
34.46	1.659	28.03	1.683	22.60	1.695	18.02	1.703	14.19	1.708	13.50	1.709
1.229	4.271	1.096	6.072	1.017	8.192	0.9602	10.86	0.9157	14.32	0.9117	14.73
348.1	424.3	326.7	429.0	308.2	429.4	291.1	427.7	275.0	424.7	273.4	424.4
33.76	1.662	27.44	1.684	22.11	1.696	17.61	1.704	13.84	1.709	13.50	1.709
1.211	4.445	1.087	6.266	1.011	8.431	0.9553	11.17	0.9117	14.73	0.9117	14.73
345.7	425.2	324.7	429.2	306.4	429.3	289.4	427.5	273.4	424.4	273.4	424.4
33.08	1.665	26.87	1.686	21.62	1.697	17.20	1.704	13.50	1.709	13.50	1.709

v
 h
 s

STATE OF SATURATION — ETAT SATURÉ

θ : °C
 p : bar
 v : dm³/kg
 h : kJ/kg
 s : kJ/(kg.K)

θ	liquid		vapour		liquid		vapour		liquid		vapour		liquid		vapour	
	p	v	h	s	p	v	h	s	p	v	h	s	p	v	h	s
50	13.17	0.9078	15.14	0.8726	20.04	0.8427	26.73	0.8166	36.09	0.7937	49.52	1.723	4	4.153	213.6	404.3
		271.8	424.0	256.5	419.9	241.8	415.1	227.5	409.9	210.8	403.7	404.3	10	4.153	213.6	404.3
		1.239	1.709	1.191	1.713	1.144	1.716	1.097	1.719	1.049	1.723	1.723	4.153	1.049	1.723	1.723
49	12.84	0.9040	15.57	0.8694	20.61	0.8399	27.53	0.8142	37.22	0.7915	51.16	1.16				
		270.3	423.6	255.0	419.4	240.3	414.6	226.1	409.4	212.2	403.7	403.7	9	4.017	212.2	403.7
		1.234	1.710	1.187	1.713	1.139	1.716	1.092	1.719	1.044	1.723	1.723	4.017	1.044	1.723	1.723
48	12.52	0.9003	16.01	0.8662	21.21	0.8372	28.35	0.8118	38.39	0.7894	52.87	1.16				
		268.7	423.2	253.6	419.0	238.9	414.1	224.7	408.8	210.8	403.1	403.1	8	3.884	210.8	403.1
		1.229	1.710	1.182	1.714	1.135	1.717	1.087	1.720	1.039	1.723	1.723	3.884	1.039	1.723	1.723
47	12.20	0.8966	16.46	0.8631	21.82	0.8345	29.21	0.8095	39.61	0.7873	54.65	1.16				
		267.2	422.8	252.1	418.5	237.5	413.6	223.3	408.3	209.5	402.6	402.6	7	3.754	209.5	402.6
		1.224	1.711	1.177	1.714	1.130	1.717	1.082	1.720	1.034	1.724	1.724	3.754	1.034	1.724	1.724
46	11.90	0.8930	16.93	0.8601	22.46	0.8318	30.09	0.8071	40.87	0.7852	56.50	1.16				
		265.6	422.4	250.6	418.1	236.0	413.1	221.9	407.7	208.1	402.0	402.0	6	3.627	208.1	402.0
		1.220	1.711	1.172	1.714	1.125	1.717	1.078	1.720	1.030	1.724	1.724	3.627	1.030	1.724	1.724
45	11.59	0.8895	17.41	0.8571	23.11	0.8292	31.01	0.8048	42.18	0.7831	58.42	1.16				
		264.1	422.0	249.1	417.6	234.6	412.6	220.5	407.1	206.8	401.4	401.4	5	3.504	206.8	401.4
		1.215	1.711	1.168	1.715	1.121	1.717	1.073	1.721	1.025	1.725	1.725	3.504	1.025	1.725	1.725
44	11.30	0.8860	17.90	0.8541	23.79	0.8266	31.95	0.8025	43.54	0.7811	60.42	1.16				
		262.6	421.6	247.6	417.1	233.2	412.1	219.1	406.6	205.4	400.8	400.8	4	3.384	205.4	400.8
		1.210	1.712	1.163	1.715	1.116	1.718	1.068	1.721	1.020	1.725	1.725	3.384	1.020	1.725	1.725
43	11.00	0.8825	18.41	0.8512	24.49	0.8241	32.93	0.8003	44.95	0.7790	62.51	1.16				
		261.1	421.2	246.2	416.6	231.7	411.5	217.7	406.0	204.0	400.2	400.2	3	3.268	204.0	400.2
		1.206	1.712	1.158	1.715	1.111	1.718	1.063	1.721	1.015	1.725	1.725	3.268	1.015	1.725	1.725
42	10.72	0.8792	18.94	0.8483	25.21	0.8216	33.95	0.7980	46.41	0.7770	64.68	1.16				
		259.6	420.8	244.7	416.1	230.3	411.0	216.3	405.5	202.7	399.6	399.6	2	3.154	202.7	399.6
		1.201	1.712	1.154	1.715	1.106	1.718	1.059	1.722	1.010	1.726	1.726	3.154	1.010	1.726	1.726
41	10.44	0.8759	19.48	0.8455	25.96	0.8191	35.00	0.7958	47.93	0.7751	66.95	1.16				
		258.0	420.3	243.2	415.6	228.9	410.5	215.0	404.9	201.3	399.0	399.0	1	3.043	201.3	399.0
		1.196	1.713	1.149	1.716	1.102	1.719	1.054	1.722	1.005	1.726	1.726	3.043	1.005	1.726	1.726

θ p liquid vapour liquid vapour liquid vapour liquid vapour liquid vapour liquid vapour liquid vapour

STATE OF SATURATION — ETAT SATURÉ

θ : °C
 p : bar
 v : dm³/kg
 h : kJ/kg
 s : kJ/(kg.K)

θ	liquid		vapour		liquid		vapour		liquid		vapour	
	θ	p	v	h	v	h	v	h	v	h	v	h
0	0.7731	69.31	0.7545	99.39	0.7375	146.7	0.7220	224.2	0.7078	356.8		
0	200.0	398.4	-10	186.7	173.7	386.2	-30	161.1	149.0	373.5		
2.936	1.000	1.727	2.014	0.9512	1.733	1.740	0.8506	0.8503	0.5182	0.7995		
0	0.7712	71.77	0.7527	103.2	0.7359	152.8	0.7205	234.4				
-1	198.7	397.8	-11	185.4	391.7	385.5	-31	159.9				
2.831	0.9955	1.727	1.936	0.9462	1.733	1.741	0.8112	0.8453				
0	0.7692	74.33	0.7510	107.2	0.7343	159.3	0.7190	245.2				
-2	197.3	397.2	-12	184.1	391.1	384.9	-32	158.6				
2.730	0.9906	1.728	1.860	0.9412	1.734	1.742	0.7732	0.8402				
0	0.7673	77.01	0.7493	111.3	0.7327	166.0	0.7176	256.6				
-3	196.0	396.6	-13	182.8	390.5	384.3	-33	157.4				
2.631	0.9857	1.728	1.787	0.9362	1.735	1.743	0.7367	0.8351				
0	0.7654	79.80	0.7475	115.7	0.7312	173.1	0.7162	268.6				
-4	194.7	396.0	-14	181.5	389.9	383.6	-34	156.2				
2.535	0.9808	1.729	1.716	0.9312	1.735	1.744	0.7016	0.8300				
0	0.7636	82.72	0.7458	120.3	0.7296	180.5	0.7147	281.3				
-5	193.3	395.4	-15	180.2	389.3	383.0	-35	155.0				
2.441	0.9759	1.730	1.647	0.9262	1.736	1.745	0.6679	0.8249				
0	0.7617	85.77	0.7441	125.1	0.7281	188.4	0.7133	294.7				
-6	192.0	394.8	-16	178.9	388.6	382.4	-36	153.8				
2.351	0.9710	1.730	1.580	0.9212	1.737	1.746	0.6355	0.8198				
0	0.7599	88.95	0.7425	130.1	0.7265	196.7	0.7119	308.9				
-7	190.7	394.2	-17	177.6	388.0	381.8	-37	152.6				
2.263	0.9660	1.731	1.516	0.9162	1.738	1.747	0.6043	0.8147				
0	0.7581	92.28	0.7408	135.4	0.7250	205.4	0.7105	324.0				
-8	189.4	393.6	-18	176.3	387.4	381.1	-38	151.4				
2.177	0.9611	1.731	1.453	0.9112	1.739	1.748	0.5744	0.8096				
0	0.7563	95.75	0.7392	140.9	0.7235	214.5	0.7091	339.9				
-9	188.0	393.0	-19	175.0	386.8	380.5	-39	150.2				
2.094	0.9561	1.732	1.393	0.9061	1.739	1.749	0.5457	0.8046				

v
h
s

liquid
liquide

vapour
vapeur

liquid
liquide

vapour
vapeur

liquid
liquide

vapour
vapeur

SUPERHEATED VAPOUR — VAPEUR SURCHAUFFÉE

θ : °C
 p : bar
 v : dm³/kg
 h : kJ/kg
 s : kJ/(kg.K)

		Saturated vapour																	
		40	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	40	
θ_{sat}	100	3.839	4.355	4.746	5.074	5.364	5.626	5.868	6.094	6.308	6.511	6.893	7.250	7.587	7.909	8.219	v		
p_{sat}	39.70	435.2	447.8	457.8	466.6	474.7	482.4	489.7	496.7	503.6	510.3	523.4	536.2	548.9	561.4	573.8	h		
	38.12	1.685	1.718	1.744	1.767	1.787	1.806	1.824	1.841	1.858	1.874	1.904	1.934	1.962	1.989	2.016	s		
		4.108	4.612	5.003	5.333	5.627	5.893	6.140	6.371	6.590	6.798	7.190	7.557	7.904	8.236	8.556			
	96	436.2	448.0	457.7	466.3	474.2	481.7	488.9	495.8	502.6	509.3	522.3	535.0	547.5	559.9	572.3			
	36.62	1.689	1.720	1.746	1.768	1.788	1.807	1.825	1.842	1.858	1.874	1.904	1.933	1.962	1.989	2.015			
		4.384	4.879	5.269	5.602	5.899	6.170	6.422	6.658	6.882	7.096	7.498	7.876	8.233	8.575	8.905			
	94	437.0	448.1	457.5	465.8	473.6	481.0	488.1	494.9	501.6	508.2	521.1	533.7	546.1	558.5	570.8			
	35.16	1.693	1.723	1.747	1.769	1.789	1.807	1.825	1.842	1.858	1.874	1.904	1.933	1.961	1.988	2.015			
		4.670	5.156	5.546	5.882	6.184	6.459	6.716	6.958	7.187	7.406	7.820	8.207	8.576	8.928	9.268			
	92	437.6	448.2	457.2	465.4	473.0	480.3	487.2	494.0	500.6	507.1	519.9	532.4	544.7	557.0	569.3			
	33.76	1.699	1.727	1.750	1.771	1.790	1.808	1.825	1.842	1.858	1.874	1.904	1.933	1.960	1.988	2.014			
		4.966	5.445	5.835	6.175	6.481	6.762	7.024	7.271	7.505	7.730	8.155	8.554	8.933	9.297	9.648			
	90	438.0	448.2	456.9	464.9	472.3	479.5	486.4	493.1	499.6	506.0	518.7	531.1	543.4	555.6	567.7			
	32.41	1.702	1.728	1.751	1.771	1.790	1.808	1.826	1.842	1.858	1.874	1.903	1.932	1.960	1.988	2.014			
		5.274	5.746	6.138	6.481	6.792	7.078	7.345	7.598	7.839	8.069	8.506	8.916	9.307	9.683	10.04			
	88	438.4	448.1	456.5	464.3	471.7	478.7	485.5	492.1	498.6	504.9	517.4	529.8	541.9	554.1	566.2			
	31.11	1.705	1.730	1.752	1.772	1.791	1.809	1.826	1.842	1.858	1.874	1.903	1.932	1.960	1.987	2.013			
		5.594	6.062	6.455	6.802	7.118	7.409	7.683	7.941	8.188	8.424	8.873	9.296	9.699	10.09	10.46			
	86	438.6	447.9	456.1	463.7	470.9	477.9	484.6	491.1	497.5	503.8	516.2	528.4	540.5	552.6	564.6			
	29.84	1.707	1.731	1.753	1.772	1.791	1.809	1.826	1.842	1.858	1.873	1.903	1.932	1.959	1.986	2.013			
		5.928	6.392	6.788	7.139	7.459	7.757	8.036	8.301	8.554	8.797	9.258	9.694	10.11	10.51	10.90			
	84	438.7	447.6	455.7	463.1	470.2	477.0	483.6	490.1	496.4	502.7	514.9	527.1	539.1	551.1	563.0			
	28.62	1.709	1.733	1.754	1.773	1.792	1.809	1.826	1.842	1.858	1.873	1.903	1.931	1.959	1.986	2.012			
		6.276	6.738	7.136	7.492	7.818	8.121	8.407	8.678	8.938	9.187	9.662	10.11	10.54	10.95	11.35			
	82	438.7	447.3	455.2	462.5	469.4	476.1	482.7	489.0	495.3	501.5	513.7	525.7	537.7	549.6	561.5			
	27.44	1.711	1.734	1.755	1.774	1.792	1.809	1.826	1.842	1.858	1.873	1.903	1.931	1.958	1.985	2.012			
		6.639	7.101	7.502	7.862	8.194	8.504	8.796	9.074	9.341	9.597	10.09	10.55	10.99	11.42	11.83	v		
	80	438.7	447.0	454.6	461.8	468.6	475.2	481.7	488.0	494.2	500.3	512.4	524.3	536.2	548.0	559.9	h		
	27.44	1.711	1.734	1.755	1.774	1.792	1.809	1.826	1.842	1.858	1.873	1.902	1.931	1.958	1.985	2.012	s		

Vapeur saturée

SUPERHEATED VAPOUR — VAPEUR SURCHAUFFÉE

v : dm³/kg
 h : kJ/kg
 s : kJ/(kg.K)

θ : °C
 p : bar

40

	40	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	40
--	----	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	----

Saturated vapour

θ_{sat}	6.463	7.019	7.481	7.885	8.252	8.590	8.906	9.205	9.491	9.764	10.03	10.53	11.01	11.47	11.91	12.33	v
p_{sat}	429.3	438.5	446.6	454.0	461.1	467.8	474.3	480.7	486.9	493.1	499.1	511.1	523.0	534.7	546.5	558.3	h
	1.687	1.713	1.735	1.756	1.775	1.792	1.810	1.826	1.842	1.858	1.873	1.902	1.930	1.958	1.985	2.011	s

	6.868	7.417	7.880	8.289	8.661	9.005	9.329	9.636	9.928	10.21	10.48	11.00	11.49	11.96	12.42	12.86	
	429.5	438.3	446.1	453.4	460.3	466.9	473.4	479.7	485.8	491.9	497.9	509.8	521.6	533.3	545.0	556.7	
	1.690	1.715	1.736	1.756	1.775	1.793	1.810	1.826	1.842	1.858	1.873	1.902	1.930	1.958	1.984	2.011	

	7.291	7.834	8.299	8.712	9.091	9.443	9.774	10.09	10.39	10.68	10.96	11.49	12.00	12.49	12.96	13.42	
	429.6	438.0	445.7	452.8	459.5	466.1	472.4	478.6	484.7	490.7	496.7	508.5	520.2	531.8	543.4	555.1	
	1.692	1.716	1.737	1.757	1.776	1.793	1.810	1.826	1.842	1.857	1.872	1.902	1.930	1.957	1.984	2.010	

	7.732	8.272	8.739	9.158	9.544	9.903	10.24	10.56	10.87	11.17	11.46	12.01	12.53	13.04	13.53	14.00	
	429.6	437.7	445.1	452.1	458.7	465.2	471.4	477.6	483.6	489.6	495.5	507.2	518.8	530.3	541.9	553.5	
	1.694	1.717	1.738	1.758	1.776	1.793	1.810	1.826	1.842	1.857	1.872	1.901	1.929	1.957	1.984	2.010	

	8.192	8.731	9.202	9.628	10.02	10.39	10.73	11.07	11.38	11.69	11.99	12.55	13.10	13.62	14.12	14.62	
	429.4	437.3	444.5	451.4	457.9	464.2	470.4	476.5	482.5	488.4	494.2	505.8	517.4	528.8	540.3	551.8	
	1.696	1.719	1.739	1.758	1.776	1.794	1.810	1.826	1.842	1.857	1.872	1.901	1.929	1.956	1.983	2.009	

	8.675	9.214	9.690	10.12	10.52	10.90	11.25	11.59	11.92	12.24	12.54	13.13	13.69	14.23	14.75	15.26	
	429.2	436.8	443.9	450.6	457.0	463.3	469.4	475.4	481.3	487.2	493.0	504.5	515.9	527.3	538.8	550.2	
	1.698	1.720	1.740	1.759	1.777	1.794	1.810	1.826	1.842	1.857	1.872	1.901	1.929	1.956	1.983	2.009	

	9.181	9.722	10.20	10.64	11.05	11.44	11.80	12.15	12.49	12.81	13.13	13.74	14.32	14.88	15.42	15.95	
	429.0	436.3	443.3	449.8	456.2	462.3	468.4	474.3	480.2	486.0	491.7	503.1	514.5	525.8	537.2	548.6	
	1.699	1.721	1.741	1.759	1.777	1.794	1.810	1.826	1.842	1.857	1.872	1.901	1.928	1.956	1.982	2.008	

	9.712	10.26	10.74	11.19	11.61	12.00	12.38	12.74	13.09	13.42	13.75	14.37	14.98	15.56	16.12	16.67	
	428.6	435.8	442.6	449.0	455.3	461.3	467.3	473.2	479.0	484.7	490.4	501.8	513.1	524.3	535.6	547.0	
	1.701	1.722	1.741	1.760	1.777	1.794	1.810	1.826	1.842	1.857	1.871	1.900	1.928	1.955	1.982	2.008	

	10.27	10.82	11.31	11.77	12.20	12.60	12.99	13.36	13.72	14.06	14.40	15.05	15.67	16.27	16.86	17.43	
	428.2	435.2	441.8	448.2	454.3	460.3	466.2	472.0	477.8	483.5	489.2	500.4	511.6	522.8	534.0	545.3	
	1.702	1.723	1.742	1.760	1.778	1.794	1.811	1.826	1.842	1.857	1.871	1.900	1.928	1.955	1.982	2.008	

	10.86	11.41	11.92	12.38	12.82	13.24	13.63	14.02	14.39	14.74	15.09	15.76	16.41	17.03	17.64	18.23	v
	427.7	434.6	441.1	447.3	453.4	459.3	465.1	470.9	476.6	482.2	487.9	499.0	510.2	521.3	532.4	543.7	h
	1.704	1.724	1.743	1.761	1.778	1.795	1.811	1.826	1.842	1.856	1.871	1.900	1.928	1.955	1.981	2.007	s

θ_{sat}
 p_{sat}

Vapeur saturée

40

	40	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	40
--	----	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	----

θ : °C
 h : kJ/kg
 p : bar
 s : kJ/(kg.K)

SUPERHEATED VAPOUR — VAPEUR SURCHAUFFÉE

		Saturated vapour										Vapeur saturée										
		θ	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	θ				
p_{sat}	θ_{sat}																					
60	16.80	11.48	12.04	12.55	13.03	13.48	13.91	14.32	14.71	15.09	15.46	15.82	16.52	17.19	17.83	18.46	19.08	60				
		427.2	433.9	440.3	446.4	452.4	458.3	464.0	469.7	475.4	481.0	486.5	497.6	508.7	519.8	530.9	542.0					
		1.705	1.725	1.743	1.761	1.778	1.795	1.811	1.826	1.841	1.856	1.871	1.900	1.927	1.954	1.981	2.007					
58	16.02	12.13	12.70	13.23	13.71	14.18	14.62	15.04	15.44	15.84	16.22	16.59	17.31	18.01	18.68	19.34	19.98	58				
		426.7	433.2	439.5	445.5	451.4	457.2	462.9	468.6	474.1	479.7	485.2	496.2	507.2	518.2	529.3	540.4					
		1.706	1.725	1.744	1.761	1.778	1.795	1.811	1.826	1.841	1.856	1.871	1.899	1.927	1.954	1.981	2.007					
56	15.27	12.82	13.40	13.94	14.44	14.91	15.36	15.80	16.22	16.63	17.02	17.41	18.16	18.88	19.58	20.26	20.93	56				
		426.1	432.5	438.6	444.6	450.4	456.1	461.8	467.4	472.9	478.4	483.9	494.8	505.7	516.7	527.7	538.7					
		1.707	1.726	1.744	1.762	1.779	1.795	1.811	1.826	1.841	1.856	1.871	1.899	1.927	1.954	1.980	2.006					
54	14.54	13.55	14.14	14.69	15.20	15.69	16.16	16.61	17.04	17.46	17.87	18.27	19.05	19.80	20.53	21.24	21.94	54				
		425.4	431.7	437.7	443.6	449.4	455.0	460.6	466.2	471.6	477.1	482.5	493.4	504.2	515.1	526.0	537.0					
		1.708	1.727	1.745	1.762	1.779	1.795	1.811	1.826	1.841	1.856	1.871	1.899	1.927	1.954	1.980	2.006					
52	13.84	14.32	14.93	15.49	16.01	16.52	17.00	17.46	17.91	18.35	18.77	19.19	20.00	20.78	21.54	22.28	23.00	52				
		424.7	430.9	436.8	442.6	448.3	453.9	459.4	464.9	470.4	475.8	481.2	492.0	502.7	513.6	524.4	535.4					
		1.709	1.727	1.745	1.763	1.779	1.795	1.811	1.826	1.841	1.856	1.870	1.899	1.926	1.953	1.980	2.006					
50	13.17	15.14	15.76	16.33	16.88	17.39	17.89	18.37	18.84	19.29	19.73	20.16	21.00	21.81	22.61	23.38	24.14	50				
		424.0	430.1	435.9	441.6	447.3	452.8	458.3	463.7	469.1	474.5	479.8	490.5	501.2	512.0	522.8	533.7					
		1.709	1.728	1.746	1.763	1.779	1.795	1.811	1.826	1.841	1.856	1.870	1.899	1.926	1.953	1.980	2.006					
48	12.52	16.01	16.64	17.23	17.79	18.32	18.84	19.34	19.82	20.29	20.75	21.20	22.07	22.92	23.74	24.55	25.34	48				
		423.2	429.2	435.0	440.6	446.2	451.6	457.1	462.5	467.8	473.1	478.5	489.1	499.7	510.4	521.2	532.0					
		1.710	1.729	1.746	1.763	1.780	1.795	1.811	1.826	1.841	1.856	1.870	1.899	1.926	1.953	1.980	2.006					
46	11.90	16.93	17.57	18.18	18.76	19.31	19.84	20.36	20.86	21.35	21.82	22.29	23.20	24.08	24.94	25.79	26.61	46				
		422.4	428.3	434.0	439.6	445.1	450.5	455.9	461.2	466.5	471.8	477.1	487.6	498.2	508.8	519.5	530.3					
		1.711	1.729	1.747	1.763	1.780	1.796	1.811	1.826	1.841	1.856	1.870	1.898	1.926	1.953	1.979	2.005					
44	11.30	17.90	18.56	19.19	19.79	20.36	20.91	21.45	21.97	22.47	22.97	23.46	24.41	25.33	26.23	27.11	27.97	44				
		421.6	427.4	433.0	438.5	443.9	449.3	454.6	459.9	465.2	470.4	475.7	486.2	496.7	507.3	517.9	528.6					
		1.712	1.730	1.747	1.764	1.780	1.796	1.811	1.826	1.841	1.856	1.870	1.898	1.926	1.953	1.979	2.005					
42	10.72	18.94	19.62	20.27	20.88	21.48	22.05	22.60	23.14	23.67	24.19	24.70	25.69	26.65	27.59	28.51	29.42	42				
		420.8	426.5	432.0	437.4	442.8	448.1	453.4	458.6	463.9	469.1	474.3	484.7	495.2	505.7	516.3	526.9					
		1.712	1.730	1.747	1.764	1.780	1.796	1.811	1.826	1.841	1.856	1.870	1.898	1.926	1.953	1.979	2.005					

θ

SUPERHEATED VAPOUR — VAPEUR SURCHAUFFÉE

v : dm³/kg
 h : kJ/kg
 s : kJ/(kg.K)

θ : °C
 p : bar

θ_{sat} p_{sat}	Saturated vapour																				
	$\Delta\theta$ 5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100						
40	20.04	20.74	21.41	22.05	22.66	23.26	23.84	24.40	24.95	25.49	26.02	26.55	27.05	27.55	28.06	28.55	29.04	29.52	30.01	30.49	30.95
10.16	419.9	425.5	431.0	436.3	441.7	446.9	452.2	457.4	462.5	467.7	472.9	478.1	483.2	488.3	493.6	498.8	504.1	509.3	514.6	519.8	525.2
	1.713	1.731	1.748	1.764	1.780	1.796	1.811	1.826	1.841	1.856	1.870	1.885	1.898	1.912	1.926	1.940	1.953	1.967	1.979	1.992	2.005
38	21.21	21.94	22.63	23.29	23.93	24.55	25.15	25.74	26.31	26.87	27.43	27.99	28.51	29.06	29.56	30.09	30.59	31.11	31.60	32.09	32.59
9.630	419.0	424.5	429.9	435.2	440.5	445.7	450.9	456.1	461.2	466.3	471.5	476.7	481.8	486.9	492.1	497.2	502.5	507.7	513.0	518.2	523.5
	1.714	1.731	1.748	1.765	1.781	1.796	1.812	1.827	1.841	1.856	1.870	1.885	1.898	1.912	1.926	1.940	1.953	1.967	1.979	1.992	2.005
36	22.46	23.21	23.93	24.61	25.28	25.92	26.55	27.16	27.76	28.35	28.93	29.51	30.06	30.60	31.16	31.71	32.24	32.79	33.30	33.81	34.34
9.118	418.1	423.5	428.8	434.1	439.3	444.5	449.6	454.7	459.9	465.0	470.1	475.2	480.3	485.4	490.5	495.6	500.9	506.1	511.3	516.5	521.8
	1.714	1.732	1.749	1.765	1.781	1.796	1.812	1.827	1.841	1.856	1.870	1.885	1.898	1.912	1.926	1.940	1.953	1.967	1.979	1.992	2.005
34	23.79	24.57	25.31	26.03	26.72	27.39	28.04	28.68	29.31	29.92	30.53	31.11	31.71	32.24	32.87	33.48	34.00	34.53	35.11	35.66	36.21
8.627	417.1	422.5	427.8	433.0	438.1	443.3	448.3	453.4	458.5	463.6	468.6	473.7	478.8	483.8	489.0	494.1	499.3	504.4	509.6	514.8	520.1
	1.715	1.732	1.749	1.765	1.781	1.797	1.812	1.827	1.842	1.856	1.870	1.885	1.898	1.912	1.926	1.940	1.953	1.967	1.979	1.992	2.005
32	25.21	26.02	26.79	27.53	28.25	28.95	29.64	30.31	30.96	31.60	32.24	32.87	33.48	34.09	34.69	35.28	35.88	36.46	37.05	37.62	38.20
8.156	416.1	421.4	426.7	431.8	436.9	442.0	447.1	452.1	457.1	462.2	467.2	472.3	477.3	482.4	487.4	492.5	497.7	502.8	508.0	513.1	518.4
	1.715	1.733	1.749	1.766	1.781	1.797	1.812	1.827	1.842	1.856	1.870	1.885	1.898	1.912	1.926	1.940	1.953	1.967	1.979	1.992	2.005
30	26.73	27.57	28.37	29.15	29.90	30.63	31.34	32.04	32.73	33.40	34.07	34.74	35.37	36.00	36.64	37.26	37.89	38.51	39.12	39.72	40.34
7.704	415.1	420.4	425.5	430.6	435.7	440.7	445.8	450.8	455.7	460.7	465.7	470.7	475.8	480.8	485.9	490.9	496.0	501.0	506.3	511.6	516.7
	1.716	1.733	1.750	1.766	1.782	1.797	1.812	1.827	1.842	1.856	1.871	1.885	1.899	1.912	1.926	1.940	1.953	1.967	1.979	1.992	2.005
28	28.35	29.22	30.06	30.87	31.65	32.42	33.17	33.90	34.62	35.33	36.03	36.74	37.39	38.03	38.73	39.37	40.00	40.65	41.27	41.89	42.62
7.272	414.1	419.3	424.4	429.5	434.5	439.5	444.4	449.4	454.4	459.3	464.3	469.3	474.3	479.3	484.3	489.3	494.4	499.4	504.6	509.8	515.0
	1.717	1.734	1.750	1.766	1.782	1.797	1.813	1.827	1.842	1.856	1.871	1.885	1.899	1.912	1.926	1.940	1.953	1.967	1.979	1.992	2.006
26	30.09	31.00	31.87	32.72	33.54	34.34	35.12	35.89	36.65	37.39	38.12	38.84	39.56	40.27	40.97	41.67	42.36	43.05	43.72	44.39	45.07
6.858	413.1	418.2	423.3	428.3	433.2	438.2	443.1	448.0	453.0	457.9	462.8	467.7	472.7	477.6	482.7	487.6	492.8	497.8	503.0	508.0	513.2
	1.717	1.734	1.751	1.767	1.782	1.798	1.813	1.828	1.842	1.857	1.871	1.885	1.899	1.912	1.926	1.940	1.953	1.967	1.980	1.992	2.006
24	31.95	32.90	33.81	34.69	35.55	36.40	37.22	38.02	38.82	39.60	40.37	41.11	41.89	42.67	43.43	44.18	44.93	45.67	46.40	47.12	47.86
6.462	412.1	417.1	422.1	427.1	432.0	436.9	441.8	446.7	451.6	456.5	461.4	466.3	471.2	476.1	481.1	486.0	490.9	495.8	500.7	505.6	510.5
	1.718	1.735	1.751	1.767	1.783	1.798	1.813	1.828	1.843	1.857	1.871	1.885	1.899	1.912	1.926	1.940	1.953	1.967	1.980	1.992	2.006
22	33.95	34.94	35.89	36.82	37.72	38.60	39.47	40.31	41.15	41.97	42.78	43.58	44.38	45.18	45.95	46.74	47.51	48.28	49.04	49.79	50.51
6.084	411.0	416.0	420.9	425.8	430.7	435.6	440.5	445.3	450.2	455.0	459.9	464.8	469.7	474.6	479.6	484.5	489.5	494.4	499.6	504.6	509.8
	1.718	1.735	1.752	1.767	1.783	1.798	1.813	1.828	1.843	1.857	1.872	1.885	1.899	1.912	1.927	1.940	1.954	1.967	1.980	1.992	2.006

Vapeur saturée $\Delta\theta$ 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 60 70 80 90 100 Δh

SUPERHEATED VAPOUR — VAPEUR SURCHAUFFÉE

θ : °C
 p : bar
 v : dm³/kg
 h : kJ/kg
 s : kJ/(kg.K)

θ_{sat} P_{sat}	Saturated vapour										θ_{sat} P_{sat}				
	40	5	10	15	20	25	30	35	40	45		50	60	70	80
20 5.723	37.12	38.12	39.10	40.04	40.97	41.88	42.77	43.65	44.52	45.38	47.06	48.71	50.34	51.95	53.54
18 5.378	414.9	419.8	424.6	429.5	434.3	439.1	443.9	448.7	453.6	458.4	468.2	478.0	487.9	497.9	508.1
5.049	1.736	1.752	1.768	1.784	1.799	1.814	1.829	1.843	1.858	1.872	1.900	1.927	1.954	1.981	2.007
16 4.736	39.48	40.53	41.55	42.54	43.52	44.48	45.42	46.34	47.26	48.16	49.94	51.69	53.41	55.12	56.80
14 4.437	413.7	418.6	423.4	428.2	433.0	437.8	442.5	447.3	452.1	456.9	466.6	476.4	486.2	496.2	506.3
12 4.153	1.736	1.753	1.768	1.784	1.799	1.814	1.829	1.844	1.858	1.872	1.900	1.928	1.955	1.982	2.008
10 3.884	42.01	43.11	44.18	45.23	46.26	47.27	48.26	49.24	50.21	51.16	53.05	54.90	56.72	58.52	60.31
8 3.627	412.6	417.4	422.1	426.9	431.6	436.4	441.1	445.9	450.7	455.4	465.1	474.8	484.6	494.5	504.6
6 3.384	1.737	1.753	1.769	1.784	1.800	1.815	1.829	1.844	1.858	1.873	1.901	1.928	1.955	1.982	2.008
4 3.154	44.73	45.89	47.02	48.13	49.21	50.28	51.33	52.37	53.39	54.40	56.39	58.35	60.28	62.20	64.09
2 2.996	411.4	416.1	420.9	425.6	430.3	435.0	439.7	444.5	449.2	454.0	463.5	473.2	483.0	492.8	502.8
1.721	1.738	1.754	1.770	1.785	1.800	1.815	1.830	1.845	1.859	1.873	1.901	1.929	1.955	1.982	2.008
1.722	47.67	48.89	50.09	51.25	52.40	53.53	54.64	55.73	56.82	57.89	60.00	62.08	64.13	66.16	68.17
1.723	410.2	414.9	419.6	424.3	429.0	433.6	438.3	443.0	447.7	452.5	462.0	471.6	481.3	491.1	501.1
1.723	1.738	1.754	1.770	1.786	1.801	1.816	1.831	1.845	1.859	1.874	1.902	1.929	1.956	1.983	2.009
1.724	50.84	52.13	53.39	54.63	55.84	57.03	58.21	59.37	60.52	61.65	63.90	66.11	68.29	70.44	72.58
1.724	409.0	413.7	418.3	423.0	427.6	432.3	436.9	441.6	446.3	451.0	460.4	470.0	479.6	489.4	499.4
1.724	1.739	1.755	1.771	1.786	1.801	1.816	1.831	1.846	1.860	1.874	1.902	1.930	1.957	1.983	2.009
1.725	54.27	55.63	56.97	58.27	59.56	60.82	62.07	63.30	64.52	65.73	68.11	70.46	72.78	75.08	77.35
1.725	407.8	412.4	417.1	421.7	426.3	430.9	435.5	440.1	444.8	449.5	458.9	468.4	478.0	487.7	497.6
1.725	1.740	1.756	1.771	1.787	1.802	1.817	1.832	1.846	1.861	1.875	1.903	1.930	1.957	1.984	2.010
1.726	57.97	59.42	60.83	62.22	63.58	64.92	66.25	67.56	68.85	70.14	72.67	75.17	77.65	80.09	82.52
1.726	406.6	411.2	415.8	420.3	424.9	429.5	434.1	438.7	443.3	447.9	457.3	466.8	476.3	486.0	495.9
1.726	1.741	1.757	1.772	1.788	1.803	1.818	1.832	1.847	1.861	1.876	1.904	1.931	1.958	1.985	2.011
1.726	61.99	63.52	65.02	66.49	67.94	69.37	70.78	72.17	73.55	74.92	77.62	80.28	82.92	85.53	88.13
1.726	405.4	409.9	414.5	419.0	423.5	428.1	432.6	437.2	441.8	446.4	455.7	465.1	474.7	484.3	494.1
1.726	1.741	1.757	1.773	1.788	1.804	1.818	1.833	1.848	1.862	1.876	1.904	1.932	1.959	1.986	2.012
1.726	64.68	67.97	69.56	71.13	72.67	74.19	75.69	77.17	78.64	80.10	82.99	85.83	88.65	91.44	94.21
1.726	404.1	408.7	413.2	417.7	422.2	426.7	431.2	435.8	440.3	444.9	454.2	463.5	473.0	482.6	492.4
1.726	1.742	1.758	1.774	1.789	1.804	1.819	1.834	1.849	1.863	1.877	1.905	1.933	1.960	1.986	2.013

Vapeur saturée

SUPERHEATED VAPOUR — VAPEUR SURCHAUFFÉE

θ : °C
 p : bar
 v : dm³/kg
 h : kJ/kg
 s : kJ/(kg.K)

		40	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	40
Saturated vapour																		
θ_{sat}	69.31	71.07	72.80	74.49	76.16	77.80	79.42	81.02	82.61	84.18	85.74	88.82	91.86	94.87	97.86	100.8	v	
p_{sat}	0	2.936	4.029	4.119	4.163	4.208	4.253	4.298	4.343	4.388	4.434	4.526	4.619	4.713	4.809	4.906	4.906	h
	2.936	1.743	1.759	1.775	1.790	1.805	1.820	1.835	1.849	1.864	1.878	1.906	1.934	1.961	1.987	2.014	s	
	74.33	76.21	78.05	79.86	81.64	83.39	85.12	86.83	88.52	90.20	91.87	95.16	98.42	101.6	104.8	108.0		
	-2	2.730	4.017	4.105	4.150	4.194	4.239	4.283	4.328	4.373	4.419	4.510	4.603	4.697	4.792	4.889		
	2.730	1.744	1.760	1.776	1.791	1.806	1.821	1.836	1.850	1.865	1.879	1.907	1.935	1.962	1.988	2.015		
	79.80	81.81	83.77	85.70	87.60	89.47	91.32	93.15	94.96	96.76	98.54	102.1	105.6	109.0	112.5	115.9		
	-4	3.960	4.004	4.048	4.092	4.136	4.180	4.224	4.269	4.313	4.358	4.449	4.542	4.636	4.730	4.824		
	2.535	1.745	1.761	1.777	1.792	1.807	1.822	1.837	1.851	1.866	1.880	1.908	1.936	1.963	1.990	2.016		
	85.77	87.91	90.00	92.07	94.10	96.10	98.08	100.0	102.0	103.9	105.8	109.6	113.4	117.1	120.8	124.4		
	-6	3.948	3.992	4.035	4.079	4.123	4.166	4.210	4.254	4.34.3	4.38.8	4.47.9	4.57.0	4.66.3	4.75.8	4.85.3		
	2.351	1.746	1.762	1.778	1.793	1.808	1.823	1.838	1.852	1.867	1.881	1.909	1.937	1.964	1.991	2.017		
	92.28	94.56	96.81	99.02	101.2	103.3	105.5	107.6	109.7	111.7	113.8	117.8	121.9	125.9	129.8	133.8		
	-8	3.936	3.979	4.022	4.066	4.109	4.152	4.196	4.28.4	4.32.8	4.37.3	4.46.3	4.55.4	4.64.7	4.74.1	4.83.6		
	2.177	1.748	1.763	1.779	1.794	1.809	1.824	1.839	1.854	1.868	1.882	1.910	1.938	1.965	1.992	2.019		
	99.39	101.8	104.2	106.6	109.0	111.3	113.5	115.8	118.0	120.3	122.5	126.9	131.2	135.5	139.8	144.0		
	-10	3.924	3.966	4.009	4.052	4.095	4.138	4.182	4.22.5	4.31.3	4.35.7	4.44.7	4.53.8	4.63.0	4.72.3	4.81.8		
	2.014	1.733	1.749	1.765	1.780	1.796	1.811	1.826	1.855	1.869	1.884	1.912	1.939	1.967	1.993	2.020		
	107.2	109.8	112.4	114.9	117.4	119.9	122.4	124.8	127.2	129.6	132.0	136.7	141.4	146.1	150.7	155.3		
	-12	3.911	3.954	3.996	4.039	4.082	4.124	4.168	4.21.1	4.29.8	4.34.2	4.43.1	4.52.2	4.61.3	4.70.6	4.80.1		
	1.860	1.734	1.750	1.766	1.782	1.797	1.812	1.827	1.856	1.871	1.885	1.913	1.941	1.968	1.995	2.021		
	115.7	118.5	121.3	124.1	126.8	129.4	132.1	134.7	137.3	139.9	142.5	147.6	152.6	157.6	162.6	167.6		
	-14	3.899	3.941	3.983	4.026	4.068	4.110	4.153	4.19.6	4.28.3	4.32.7	4.41.5	4.50.5	4.59.6	4.68.9	4.78.3		
	1.716	1.735	1.752	1.767	1.783	1.798	1.813	1.828	1.858	1.872	1.886	1.914	1.942	1.970	1.996	2.023		
	125.1	128.1	131.1	134.1	137.0	139.9	142.7	145.6	148.4	151.2	153.9	159.5	164.9	170.4	175.8	181.1		
	-16	3.886	3.928	3.970	4.012	4.054	4.13.9	4.18.2	4.22.5	4.26.8	4.31.1	4.40.0	4.48.9	4.58.0	4.67.2	4.76.6		
	1.580	1.737	1.753	1.769	1.784	1.800	1.830	1.844	1.859	1.874	1.888	1.916	1.944	1.971	1.998	2.025		
	135.4	138.7	141.9	145.1	148.2	151.4	154.4	157.5	160.6	163.6	166.6	172.6	178.5	184.4	190.2	196.0	v	
	-18	3.874	3.915	3.957	3.999	4.040	4.12.5	4.16.7	4.21.0	4.25.3	4.29.6	4.38.4	4.47.3	4.56.3	4.65.5	4.74.8	h	
	1.453	1.739	1.755	1.770	1.786	1.801	1.831	1.846	1.861	1.875	1.889	1.918	1.945	1.973	2.000	2.027	s	

Vapeur saturée 40 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 60 70 80 90 100 40

SUPERHEATED VAPOUR — VAPEUR SURCHAUFFÉE

θ : °C
 p : bar
 v : dm³/kg
 h : kJ/kg
 s : kJ/(kg.K)

θ_{sat} p_{sat}	Saturated vapour										$\Delta\theta$					
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50		60	70	80	90	100
-20	146.7	150.3	153.8	157.2	160.6	164.0	167.4	170.7	174.0	177.3	180.5	187.0	193.4	199.8	206.2	212.5
1.335	390.3	394.4	398.5	402.7	406.8	411.0	415.2	419.5	423.8	428.1	432.4	436.8	445.6	454.6	463.8	473.1
-22	1.740	1.756	1.772	1.788	1.803	1.818	1.833	1.848	1.862	1.877	1.891	1.919	1.947	1.975	2.002	2.028
1.224	163.1	166.9	170.6	174.3	178.0	181.6	185.2	188.8	192.4	195.9	202.9	209.9	216.9	223.8	230.7	237.6
-24	389.0	393.1	397.2	401.3	405.4	409.6	413.8	418.0	422.2	426.5	432.6	438.7	444.8	451.0	457.2	463.4
1.120	1.758	1.774	1.789	1.805	1.820	1.835	1.850	1.865	1.880	1.895	1.921	1.949	1.977	2.004	2.030	2.056
-26	173.1	177.2	181.4	185.4	189.4	193.4	197.4	201.3	205.2	209.1	212.9	220.6	228.2	235.8	243.3	250.8
1.024	387.7	391.7	395.8	399.9	404.0	408.1	412.3	416.5	420.7	424.9	432.0	439.1	446.2	453.3	460.4	467.5
-28	1.760	1.776	1.791	1.807	1.822	1.837	1.851	1.866	1.881	1.895	1.923	1.951	1.979	2.006	2.033	2.060
0.9339	192.9	197.4	201.8	206.2	210.5	214.8	219.1	223.3	227.5	231.8	240.1	248.4	256.7	264.9	273.1	281.3
-30	386.4	390.4	394.5	398.5	402.6	406.7	410.8	415.0	419.2	423.5	432.0	440.8	449.6	458.6	467.8	476.9
0.8506	1.762	1.778	1.793	1.808	1.824	1.839	1.853	1.868	1.883	1.897	1.925	1.953	1.981	2.008	2.035	2.062
-32	210.3	215.2	220.0	224.7	229.5	234.2	238.8	243.5	248.1	252.7	261.8	270.9	279.9	288.9	297.9	306.8
0.7732	385.1	389.1	393.1	397.1	401.2	405.3	409.4	413.5	417.7	421.9	430.5	439.1	448.0	456.9	466.1	475.1
-34	1.764	1.780	1.795	1.811	1.826	1.841	1.855	1.870	1.885	1.899	1.927	1.955	1.983	2.010	2.037	2.064
0.6355	224.2	229.6	234.9	240.2	245.4	250.5	255.7	260.8	265.8	270.9	285.9	295.9	305.8	315.6	325.4	335.2
-36	383.8	387.8	391.7	395.7	399.8	403.8	407.9	412.0	416.2	420.4	428.9	437.5	446.3	455.2	464.3	473.3
0.5744	1.766	1.782	1.797	1.813	1.828	1.843	1.858	1.872	1.887	1.901	1.930	1.958	1.985	2.013	2.040	2.067
-38	251.1	256.9	262.6	268.3	274.0	279.6	285.2	290.8	296.3	301.8	312.8	323.7	334.6	345.4	356.2	366.9
0.5182	382.5	386.4	390.4	394.4	398.4	402.4	406.5	410.6	414.7	418.9	427.3	435.9	444.6	453.5	462.6	471.6
-40	1.768	1.784	1.800	1.815	1.830	1.845	1.860	1.875	1.889	1.904	1.932	1.960	1.988	2.015	2.042	2.069
0.4621	268.6	275.0	281.4	287.7	293.9	300.2	306.3	312.5	318.6	324.7	342.8	354.8	366.7	378.6	390.5	402.3
-42	381.2	385.1	389.0	393.0	397.0	401.0	405.0	409.1	413.2	417.3	425.7	434.3	443.0	451.8	460.8	469.7
0.4058	1.771	1.786	1.802	1.817	1.833	1.848	1.862	1.877	1.892	1.906	1.935	1.963	1.991	2.018	2.045	2.072
-44	294.7	301.8	308.8	315.7	322.6	329.4	336.2	342.9	349.7	356.4	376.3	389.5	402.7	415.8	428.9	441.9
0.3495	379.9	383.8	387.7	391.6	395.5	399.5	403.5	407.6	411.7	415.8	424.1	432.6	441.3	450.1	459.1	467.9
-46	1.773	1.789	1.805	1.820	1.835	1.850	1.865	1.880	1.894	1.909	1.937	1.966	1.993	2.021	2.048	2.075
0.2932	331.7	339.4	347.1	354.6	362.2	369.6	377.1	384.5	391.9	399.2	413.9	428.5	443.0	457.5	472.0	486.4
-48	378.6	382.5	386.3	390.2	394.1	398.1	402.1	406.1	410.2	414.3	422.6	431.0	439.6	448.4	457.4	466.2
0.2369	1.776	1.792	1.807	1.823	1.838	1.853	1.868	1.883	1.897	1.912	1.940	1.968	1.996	2.024	2.051	2.078
-50	356.8	365.3	373.8	382.2	390.6	398.9	407.2	415.4	423.6	431.8	456.1	472.3	488.3	504.4	520.4	536.3
0.1806	377.3	381.1	385.0	388.8	392.7	396.7	400.6	404.6	408.7	412.7	421.0	429.4	438.0	446.7	455.6	464.3
-52	1.779	1.794	1.810	1.825	1.841	1.856	1.871	1.885	1.900	1.915	1.943	1.971	1.999	2.027	2.054	2.081
0.1243	407.2	415.4	423.6	431.8	440.0	448.1	456.1	464.1	472.1	480.0	504.4	520.4	536.3	552.1	567.8	583.4
-54	382.5	386.4	390.4	394.4	398.4	402.4	406.5	410.6	414.7	418.9	427.3	435.9	444.6	453.5	462.6	471.6
0.0679	1.782	1.797	1.813	1.828	1.843	1.858	1.872	1.887	1.901	1.915	1.943	1.971	1.999	2.027	2.054	2.081
-56	240.2	245.4	250.5	255.7	260.8	265.8	270.9	275.9	280.9	285.9	305.8	323.7	341.6	359.4	377.1	394.7
0.0114	391.7	395.7	399.8	403.8	407.9	412.0	416.2	420.4	424.6	428.9	437.5	446.3	455.2	464.3	473.3	482.2
-58	1.784	1.800	1.815	1.830	1.845	1.860	1.875	1.889	1.904	1.918	1.946	1.974	2.001	2.028	2.055	2.082
0.0059	287.7	293.9	300.2	306.3	312.5	318.6	324.7	330.7	336.7	342.8	378.6	404.4	430.1	455.7	481.2	506.6
-60	389.0	393.0	397.0	401.0	405.0	409.1	413.2	417.3	421.4	425.5	434.3	443.0	451.8	460.8	469.7	478.6
0.0004	1.802	1.817	1.833	1.848	1.862	1.877	1.892	1.906	1.920	1.934	1.962	1.990	2.017	2.044	2.071	2.098
-62	315.7	322.6	329.4	336.2	342.9	349.7	356.4	363.0	369.6	376.2	415.8	441.6	467.3	492.9	518.4	543.8
0.0000	387.7	391.6	395.5	399.5	403.5	407.6	411.7	415.8	420.0	424.1	432.6	441.3	450.1	459.1	468.0	476.9
-64	1.805	1.820	1.835	1.850	1.865	1.880	1.894	1.909	1.923	1.937	1.966	1.993	2.020	2.047	2.074	2.101
0.0000	347.1	354.6	362.2	369.6	377.1	384.5	391.9	399.2	406.5	413.8	456.1	481.8	507.4	532.9	558.3	583.6
-66	386.3	390.2	394.1	398.1	402.1	406.1	410.2	414.3	418.4	422.5	431.0	439.6	448.4	457.4	466.2	475.1
0.0000	1.807	1.823	1.838	1.853	1.868	1.883	1.897	1.912	1.926	1.940	1.968	1.996	2.024	2.051	2.078	2.105
-68	382.2	390.6	398.9	407.2	415.4	423.6	431.8	440.0	448.1	456.1	481.8	507.4	532.9	558.3	583.6	608.8
0.0000	1.810	1.825	1.841	1.856	1.871	1.885	1.900	1.915	1.929	1.943	1.971	1.999	2.027	2.054	2.081	2.108
-70	398.9	407.2	415.4	423.6	431.8	440.0	448.1	456.1	464.1	472.1	504.4	530.1	555.7	581.2	606.6	631.9
0.0000	1.811	1.826	1.841	1.855	1.870	1.884	1.898	1.912	1.926	1.940	1.968	1.996	2.024	2.051	2.078	2.105
-72	245.4	250.5	255.7	260.8	265.8	270.9	275.9	280.9	285.9	290.9	315.6	341.3	366.9	392.4	417.8	443.1
0.0000	1.780	1.795	1.810	1.825	1.840	1.855	1.870	1.885	1.900	1.915	1.943	1.971	1.999	2.027	2.054	2.081
-74	391.7	395.7	399.8	403.8	407.9	412.0	416.2	420.4	424.6	428.9	437.5	446.3	455.2	464.3	473.3	482.2
0.0000	1.781	1.796	1.811	1.826	1.841	1.856	1.871	1.886	1.901	1.916	1.944	1.972	2.000	2.027	2.054	2.081
-76	262.6	268.3	274.0	279.6	285.2	290.8	296.3	301.8	307.3	312.8	342.8	368.5	394.1	419.6	445.1	470.5
0.0000	1.782	1.797	1.812	1.827	1.842	1.857	1.872	1.887	1.902	1.917	1.945	1.973	2.001	2.028	2.055	2.082
-78	390.4	394.4	398.4	402.4	406.5	410.6	414.7	418.9	423.0	427.1	435.9	444.6	453.5	462.6	471.6	480.5
0.0000	1.783	1.798	1.813	1.828	1.843	1.858	1.873	1.888	1.903	1.918	1.946	1.974	2.001	2.028	2.055	2.082
-80	1.800	1.815	1.830	1.845	1.860	1.875	1.890	1.905	1.920	1.935	1.963	1.991	2.018	2.045	2.072	2.099
-82	287.7	293.9	300.2	306.3	312.5	318.6	324.7	330.7	336.7	342.8	378.6	404.4	430.1	455.7	481.2	506.6
0.0000	1.784	1.799	1.814	1.829	1.844	1.859	1.874	1.889	1.904	1.919	1.947	1.975	2.002	2.029	2.056	2.083
-84	389.0	393.0	397.0	401.0	405.0	409.1	413.2	417.3	421.4	425.5	434.3	443.0	451.8	460.8	469.7	478.6
0.0000	1.785	1.800	1.815	1.830	1.845	1.860	1.875	1.890	1.905	1.920	1.948	1.976	2.003	2.030	2.057	2.084
-86	315.7	322.6	329.4	336.2	342.9	349.7	356.4	363.0	369.6	376.2	415.8	441.6	467.3	492.9	518.4	543.8
0.0000	1.786	1.801	1.816	1.831	1.846	1.861	1.876	1.891	1.906	1.921	1.949	1.977	2.004	2.031	2.058	2.085
-88	387.7	391.6	395.5	399.5	403.5	407.6	411.7	4								