



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du Diplôme de Master en Energétique

Titre : Etude paramétrique du réfrigérateur cryogénique de Claude

Proposé et encadré par :
M. Younes Benkheda

Réalisé par :
sadok Bouziane abdelmoumen
Hamza fateh

Soutenu le 17/11/2020 devant le jury composé de:
Mr Nehal (Président)
Mr Said (Examineur)

Année universitaire 2019/2020

Remerciement

En premier lieu je tiens à remercier mon DIEU, notre créateur, pour m'avoir donné la force d'accomplir ce travail.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon directeur de mémoire, monsieur BENK HEDAYOUNES. Je le remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches.

Je remercie mes très chers parents, qui ont toujours été là pour moi. Je remercie mes sœurs et mon frère, pour leurs encouragements.

Enfin, je remercie mes amis qui ont toujours été là pour moi. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

Dédicace

Je dédie le fruit de mes années d'études à mes très chers parents qui m'ont tout donné, de leurs amours et leurs sacrifices éternels pour que je puisse suivre mes études dans des bonnes conditions et qui ne cessent pas de m'encourager et de veiller pour mon bien, sans leurs soutient ce travail n'aurait jamais vue les jours.

Et aussi à mon frère et mes sœurs chacun par son prénom.

À tous mes amis et collègues sans exception.

Résume :

Dans Ce sujet on a une étude thermodynamique très détaillée en se basant sur les paramètres influents sur le système de réfrigération cryogénique de Claude tels que l'effet de réfrigération ainsi que le FOM. L'effet de réfrigération ainsi que le travail de réfrigération sont très sensibles aux paramètres η_{isot} et η_{isen} ainsi qu'étude des paramètres influents [$X= me/m$] sur l'effet de réfrigération et le FOM.

Mots clé : Thermodynamique, cryogénie, cycle de Claude

Abstract :

In this topic we have a very detailed thermodynamic study based on the parameters influencing the Claude cryogenic refrigeration system such as the refrigeration effect as well as the FOM. The refrigeration effect and the refrigeration work are very sensitive to the η_{isot} and η_{isen} parameters and the study of the parameters [$X= me/m$] influencing the refrigeration effect and the FOM.

Keywords : Thermodynamics, cryogenics, Claude cycle

ملخص :

في هذا الموضوع، لدينا دراسة ديناميكية حرارية مفصلة للغاية بناءً على العوامل المؤثرة على نظام التبريد كلود مثل تأثير التبريد وكذلك FOM. إن تأثير التبريد وكذلك عمل التبريد حساسان جداً للعوامل η_{isot} و η_{isen} وكذلك دراسة العوامل المؤثرة [$X= me/m$] على تأثير التبريد و FOM.

الكلمات المفتاحية: الديناميكا الحرارية، التبريد، دورة كلود

Table des matières

Introduction générale

Chapitre 1 notions sur la cryogénie

1.1. Introduction	3
1.2. Définition	3
1.3. Historique de la cryogénie	4
1.4. Les propriétés physiques aux basses températures	6
1.4.1. Les propriétés des fluides cryogéniques	6
1.4.2. Les propriétés des matériaux	6
1.4.2.1 Propriétés thermiques	6
1.4.3. Propriétés mécaniques	8
1.5. transfert thermique	9
1.5.1. Conduction	9
1.5.2. Convection	9
1.5.3. Rayonnement	10
1.6. Stockage cryogéniques	11
1.7. Application de la cryogénie	11
1.7.1. La cryogénie alimentaire	11
1.7.2. La cryopréservation	12
1.7.3. La supraconductivité	12
1.7.4. La superfluidité	12
1.7.5. Le cryo-broyage	12
1.7.6. Givrage ou condensation cryogénique	13
1.8. Importance et utilisation des gaz liquéfiés	13
1.8.1. Obtention des gaz purs	14
1.8.2. Facilité et économie du transport Le transport	14
1.8.3. Usage des basses températures	15

Chapitre 2 les cycles de réfrigération

2-1 Définition de la réfrigération et de la liquéfaction	17
2-2 Propriétés de l'air	17
2-2-1 Propriétés particulières	18
2-2-1-1 Azote	18
2-2-1-2 Hydrogène	19

2-2-1-3 Hélium	20
2-2-2 Domaines d'utilisation des gaz industriels	22
2-3 production des base températures.....	23
2-3-1 l'effet de Joule Thomson	23
2-3-2 La détente adiabatique	25
2-3 Cycle de réfrigération	26
2-3-1 Machine de référence de Carnot	28
2-3-1-1 Coefficient de performance	28
2-3-2 Les différents cycles	29
2-3-2-1 Le cycle Joule Thomson.....	29
2-3-2-2 Le cycle de Brayton.....	29
2-3-2-3 cycle de claude	30
2-4 Equipements utilisés	31
2-4-1 Compresseur cryogénique :	31
2-4-2 Echangeurs de chaleurs	31
2-4-3 Régénérateurs :	31
2-4-4 Détendeurs cryogéniques.....	31
2-4-5 Autre composants.....	32
Chapitre 3 Etude thermodynamique des cycles de réfrigération	
3-1 Le cycle de réfrigération de Claude	34
3-1-1 Principe de cycle de Claude :	34
3-2 Rappel thermodynamique	35
3-2-1 premier principe de la thermodynamique appliqué à un système ouvert :.....	35
3-3 Bilan énergétique du cycle de réfrigération.....	36
3-3-1 Cycle de Claude.....	36
3-3-2 cycle de Collins	40
Chapitre 4 Etude paramétrique de cycle de réfrigération de claude	
4-1 Problématique	44
4-1-1 Influence de pression sur les paramètres de cycle de claude	44
4-1-1-1 Pour $P_2 = 10$ bar	48
4-1-1-2 Pour $P_2 = 20$ bar	56
4-1-1-3 Pour $P_2 = 30$ bar	
4-1-1-4 Pour $P_2 = 50$ bar :	

4-1-2 Discussion des résultats	60
Conclusion générale :	63
Références Bibliographies	1
Annexe	2

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1- 1: Echelle de température thermodynamique.....	4
Figure 1- 2: Différentes étapes vers les basses températures et leurs acteurs.....	5
Figure 1- 3: Givrage ou condensation cryogénique.....	13

Chapitre 2

Figure 2- 1: Principales origines de l'hydrogène produit en 2012 dans le monde	19
Figure 2- 2: détente de Joule-Thomson	23
Figure 2- 3: Les lignes isenthalpiques et les points d'inversion dans le diagramme (T-P)....	25
Figure 2- 4: cycle de réfrigération	27
Figure 2- 5: cycle de Carnot	28
Figure 2- 6: Description du cycle Joule Thomson	29
Figure 2- 7: Description du cycle de Brayton	30
Figure 2- 8: Description du cycle de Claude	30

Chapitre 3

Figure 3- 1: Diagramme énergétique du réfrigérateur de Claude	34
Figure 3- 2: Diagramme T-S de cycle de Claude.....	35
<i>Figure 3- 3: volume de contrôle C1.....</i>	<i>37</i>
Figure 3- 4: volume de contrôle C2.	38
Figure 3- 5: volume de contrôle C3.	39
Figure 3- 6: diagramme énergétique et diagramme T-S de cycle de Collins.	40
Figure 3- 7: volume de contrôle C4.	41

Chapitre 4

Figure 4- 1: le cycle de réfrigération dans les diagrammes T-S pour P= 10 bars.....	45
Figure 4- 2 : diagramme de travail réel et idéal de refrigeration on fonction X pour P2 = 10 bars.....	48
Figure 4- 3:le cycle de réfrigération dans les diagrammes T-S pour P= 20 bars.....	49
Figure 4- 4:diagramme de travail réel et idéal de refrigeration on fonction X pour P2 = 20 bars.....	52
Figure 4- 5:: le cycle de réfrigération dans les diagrammes T-S pour P= 30 bars.....	53
Figure 4- 6: diagramme de travail réel et idéal de refrigeration on fonction X pour P2 = 30 bars.....	56

Figure 4- 7: le cycle de réfrigération dans les diagrammes T-S pour P2= 50 bars	57
Figure 4- 8:diagramme de travail réel et idéal de refrigeration on fonction X pour P2 = 50 bars.....	60
Figure 4- 9: diagramme d'effet de refrigeration en fonction de X par rapport à chaque pression	60
Figure 4- 10: diagramme COP en fonction de X par rapport à chaque pression	61

Liste des tableaux

Chapitre 2

Tableau 2- 1: Conditions critiques des gaz permanents.....	18
--	----

Chapitre 4

Tableau 4- 1: les paramètre (H-S) des points de cycle de claude pour P2 = 10 bar	49
Tableau 4- 2: les paramètre (H-S) des points de cycle de claude pour P2 = 20 bar	57
Tableau 4- 3: les paramètre (H-S) des points de cycle de claude pour P2 = 30 bar	
Tableau 4- 4: les paramètre (H-S) des points de cycle de claude pour P2 = 50 bar	

NOMENCLATURE

Lettres Latines non indicées		
symbole	Désignation	Unité
T	Température	[K]
P	Pression	[bar]
h	Enthalpie massique	[kJ/kg]
S	Entropie massique	[kJ/kg.K]
m	Masse totale du gaz	[kg]
E_T	Energie totale	[kJ]
U	Energie interne	[kJ]
E_c	Energie cinétique	[kJ]
E_p	Energie potentielle	[kJ]
W	Travail massique	[kJ/kg]
Q	Chaleur massique	[kJ/kg]
\dot{W}	Puissance mécanique	[kW]
\dot{Q}	Puissance thermique	[kW]
\dot{m}	Débit massique du gaz	[kg/s]
\dot{m}_e	Débit massique traversant la turbine	[kg/s]
W_e	Travail massique de la turbine	[kJ/kg]
W_c	Travail massique du compresseur	[kJ/kg]
W/\dot{m}	Travail par unité de masse du gaz comprimé	[kJ/kg]
COP	Coefficient de performance	/
FOM	Facteur de mérite	%
x	Le temp de prelevement	/

Lettres Grecs		
Symbole	Désignation	Unité
μ_{J-T}	Coefficient de Joule-Thomson	/
μ_s	Coefficient de détente isentropique	/
η	rendement	%

Introduction général

La cryogénie est la science des basses températures se situant au-dessous de la barre de 120k (-153°C). Cette température représente la limite à partir de laquelle les principaux gaz atmosphériques (méthane, oxygène, azote, néon, hydrogène et hélium) se liquéfient. Elle possède de très nombreuses applications, notamment dans les secteurs alimentaires, médicaux, industriels et physiques.

Les études des basses températures sont réalisées dans le but de comprendre les phénomènes physiques qui se manifestent au sein de la matière, conduisant au développement de nombreux procédés comme : la conservation des aliments à l'aide de l'azote liquide, la supraconductivité, la superfluidité, le cryobroyage, givrage ou condensation cryogénique et récupération de plus de 90% des gaz destructeurs de la couche d'ozone [21].

Le monde actuel connaît depuis plus d'un siècle un important développement économique. La multiplication de denrées alimentaires, le développement chimique et pharmaceutique, la commercialisation des gaz liquéfiés et la climatisation ont provoqué une croissance importante de la production du froid glacial [6].

Les développements simultanés de la technologie et de la physique aux basses températures sont intimement liés à la course à la liquéfaction des gaz appelés gaz permanents, tel que : l'hélium (TLHe=-269°C), l'hydrogène (TLH2=-253°C), l'azote (TLN2=-196°C), l'argon (TLAr=-187°C), l'oxygène (TLO2=-183°C) et le GNL (TLGN=-161°C) [23].

Dans cette étude on a fait quatre chapitre , le premier chapitre on parle sur notions sur la cryogénie et leur utilisations , Le deuxième chapitre et une étude bibliographique des cycle de réfrigération et les domaines d'utilisation et leur paramètre , le troisième chapitre et un étude thermodynamique et énergétique sur les cycle de réfrigération (Claude et Collins) , pour le quatrième chapitre on a fait un étude paramétrique sur le cycle de réfrigération de claudes avec l'azote comme gaz de travail et l'influence de différent paramètre sur le système .

Chapitre 1

Notions sur la cryogénie

1.1. Introduction

Le mot cryogénie signifie production de froid glacial, mais aujourd'hui, il est synonyme de basses températures. Sur l'échelle de température, il n'y a pas de distinction claire lorsque la plage de réfrigération ordinaire se termine et que la cryogénie commence. Cependant, le National Bureau of Standards de Boulder (Colorado) considère que la température est inférieure à 123K en tant que température de fonctionnement cryogénique. Cela peut être accepté parce que la température d'ébullition des gaz permanents comme l'hélium (He), l'hydrogène (H), le néon (Ne), etc. sont inférieures à 123K L'ingénierie cryogénique traite du développement et de l'amélioration des techniques, procédés et équipements à basse température. Il traite de l'utilisation des phénomènes à basse température. En général, le système cryogénique se réfère à un groupe de composants interagissant impliquant une température basse.

1.2. Définition

La cryogénie, science et technologie des températures inférieures à 120 K, a entamé son deuxième siècle d'existence elle est le résultat d'une conjonction historique du progrès scientifique (déplacement progressif de la thermodynamique au cours du XIXe siècle, de la théorie macroscopique de l'énergie de J.Joule et S.Carnot, à la mécanique statistique des particules microscopique de L.Boltzman et J.W.Gibbs, et du progrès technologique (poursuite de la liquéfaction des gaz atmosphériques jusque-là considérés comme « non condensables », faisant appel aux études des propriétés des substances chimiques pures et de leurs mélanges, les appareils de compression, l'écoulement et les transferts de chaleur des fluides et les techniques d'isolation thermique [1]

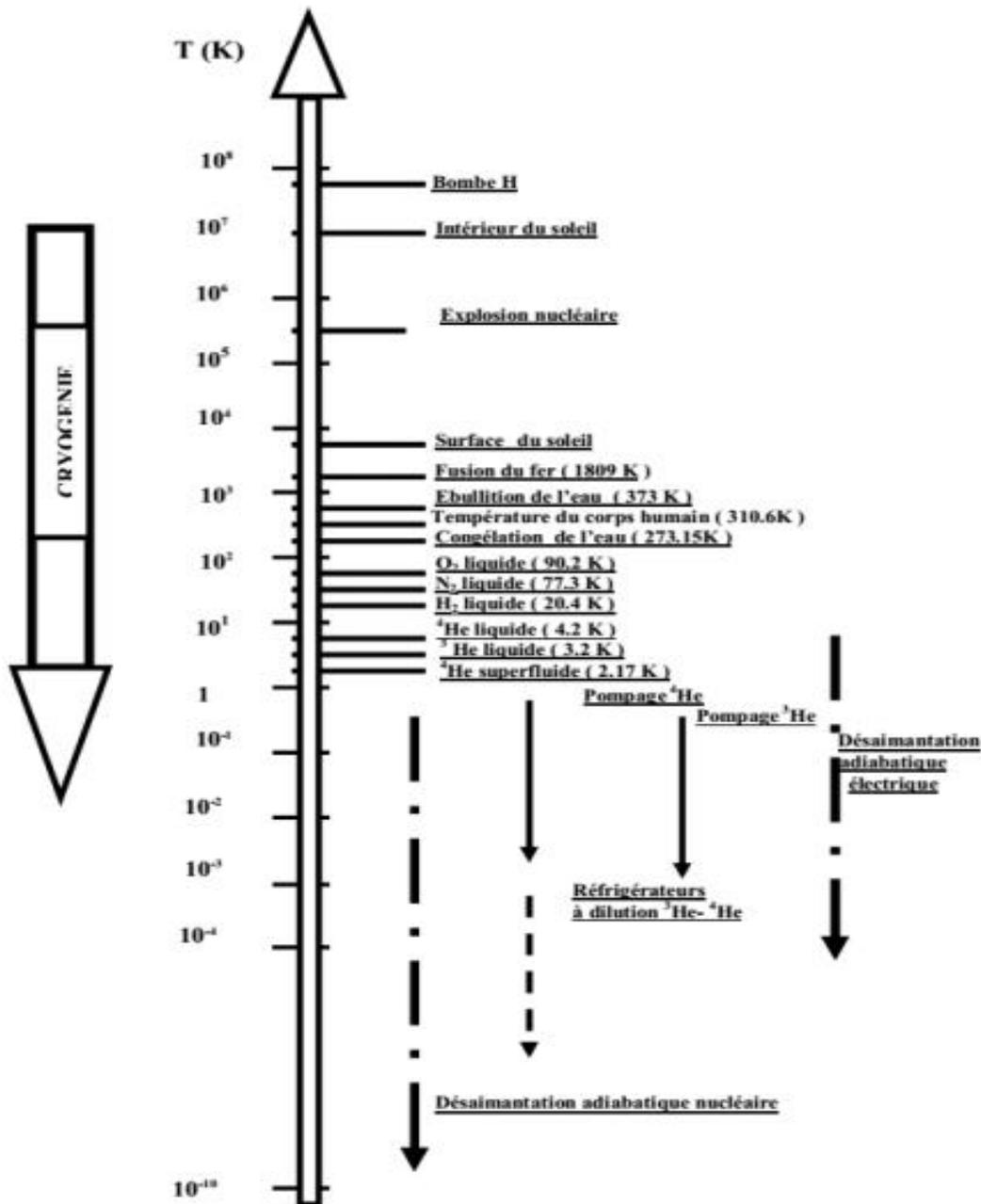


Figure 1- 1: Echelle de température thermodynamique

1.3. Historique de la cryogénie

Avoir de très basses températures, c'était l'objectif de grands nombres de chercheurs scientifiques et des physiciens. Jusqu'en 1870, aucun développement significatif n'a été fait dans le domaine de la cryogénie. C'était en 1877 quand Louis Paul Cailletet, un ingénieur minier français a produit des brouillards de gouttelettes d'oxygène liquide. En avril 1883, Wroblewski et Olszewski obtinrent de l'azote liquéfié et de l'oxygène au laboratoire de l'Université de Cracovie, en Pologne. En 1892, Dewar a développé un récipient isolé sous vide pour le stockage de fluide cryogénique. En 1907, Linde a installé la première usine de

liquéfaction d'air en Amérique. En 1908, H.Kamerlingh Onnes liquéfie l'hélium. En 1916, la première production commerciale d'Argon a été faite. En 1917 et 1922, la première production commerciale d'hélium et de néon a été faite respectivement. En 1933, le refroidissement magnétique a d'abord été utilisé pour atteindre une température inférieure à 1K. En 1937, l'isolation en poudre évacuée a été utilisée pour la première fois à l'échelle commerciale dans des réservoirs de stockage de fluides cryogéniques. En 1952, le bureau national du laboratoire de génie cryogénique des normes a été créé. En 1958, l'isolation cryogénique multicouche à haute efficacité a été développée. En 1966, un réfrigérateur à dilution utilisant des mélanges He-3-He-4 a été développé. En 1975, la température de transition super élevée record (23K) a été atteinte pour la première fois.[2]

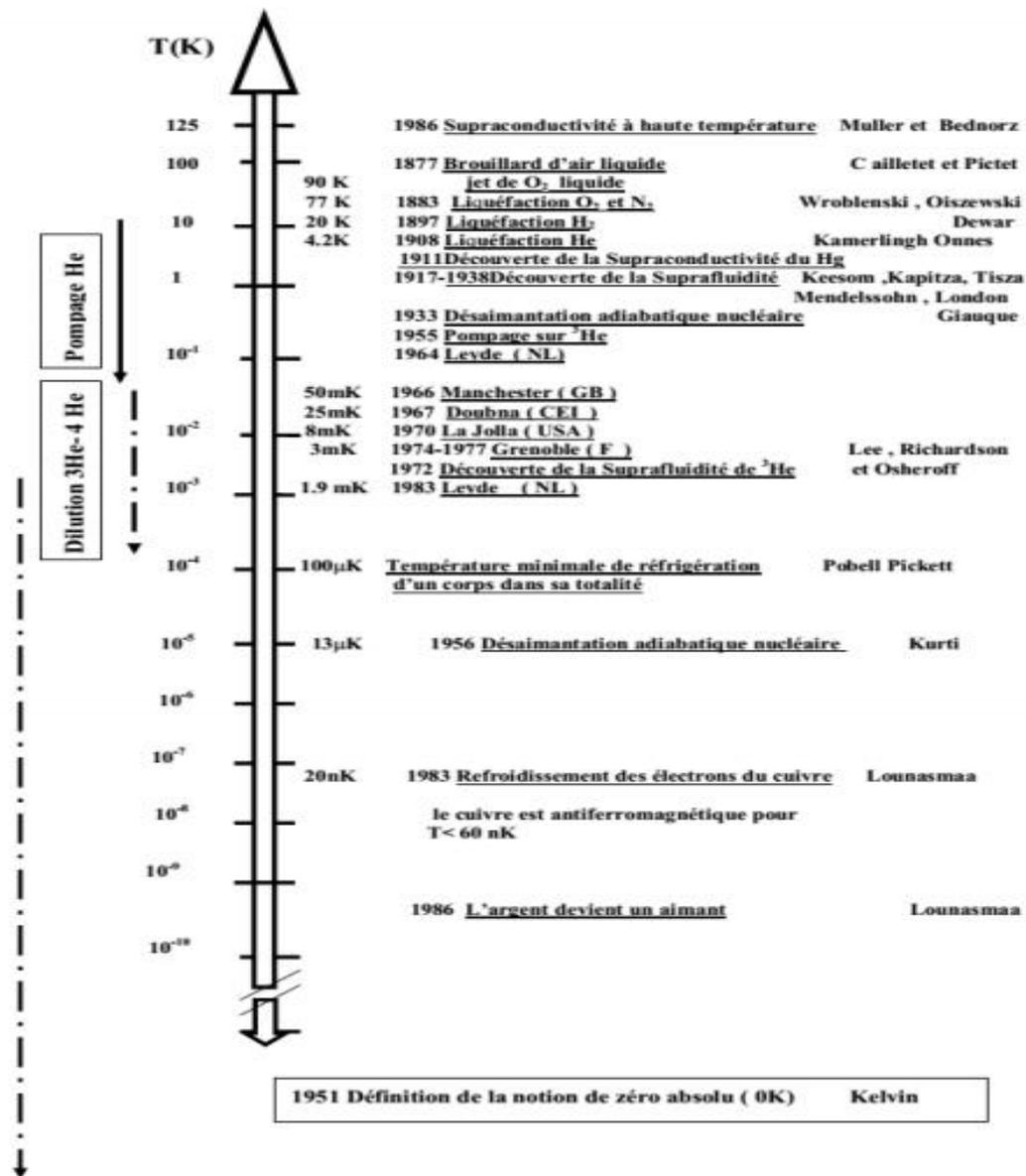


Figure 1- 2: Différentes étapes vers les basses températures et leurs acteurs

1.4. Les propriétés physiques aux basses températures

1.4.1. Les propriétés des fluides cryogéniques

Les liquides cryogéniques ont des caractéristiques spécifiques, qui nécessitent une attention toute particulière mais qui offrent également de nouvelles possibilités d'utilisation. Au vu de leurs faibles températures critiques et de leurs pressions critiques modérées, les cryogènes sont souvent utilisés dans le domaine supercritique ; avec une transition continue de la phase liquide à la phase gazeuse et une divergence de certaines propriétés thermodynamiques au point critique.[3]

Plus la viscosité diminue à basse température, plus les écoulements de liquide ou de vapeur deviennent fortement turbulents ; permettant d'atteindre des nombres de Reynolds très élevés lors d'expérience de laboratoire , ce qui constitue un outil précieux pour étudier les lois d'échelle de la turbulence des fluides . De plus, la variation simultanée de la densité de la viscosité et de la température permet de maintenir les conditions de similitude de Reynolds et de Mach dans les écoulements à échelle réduite ; ce phénomène est à la base des souffleries cryogéniques, outils essentiels pour la Conception des ailes d'avions supersoniques pour lesquels les effets de la compressibilité ne peuvent être négligés. Enfin, le taux de dilatation volumique élevé à basse température engendre des nombres de Rayleigh élevés et une forte convection naturelle. Des expériences pionnières ont récemment été menées sur les écoulements contrôlés à très hauts nombres de Reynolds et de Rayleigh en utilisant l'hélium cryogénique .[4]

1.4.2. Les propriétés des matériaux

Les techniques de réalisation des matériaux cryogéniques et la préparation d'ensembles expérimentaux aux basses températures mettent en œuvre des matériaux très variés : Matériaux isolants, conducteurs, voire surproducteurs électriques, Matériaux de structure

1.4.2.1 Propriétés thermiques :

Les Propriétés thermiques sont associées aux vibrations des atomes autour de leur position d'équilibre, aux mouvements des électrons, etc. L'amplitude des vibrations diminue avec la température. D'autres effets peuvent aussi contribuer aux propriétés thermiques (caractéristiques magnétiques, état supraconducteur, etc..

a) Capacité thermique massique : la Capacité thermique massique d'un matériaux peut être considérée comme la somme de plusieurs contributions (contribution associée au réseau cristallin, cristaux isolants, contribution associée aux électrons libres c'est le cas des métaux conducteurs), telle que :

$$C = \sum_i C_i(T) = C_{ph} + C_e$$

C_{ph} : la capacité thermique massique associée au réseau cristallin en fonction de la température de DEBYE. A basse température, elle varie comme le cube de la température [5] ;[6]

$$C_{ph} = \beta \cdot T^3$$

Avec T : température absolue

$$\beta = \frac{12 \cdot \pi^4 \cdot R}{5 \cdot \theta_D^3}$$

Où R : Constante universelle des gaz parfaits.

θ_D : Température de Debye qui est une caractéristique des matériaux et qui est obtenue généralement par voie expérimentale, son expression théorique est donnée par :

$$\theta_D = \frac{h \cdot v}{\sigma} \left(\frac{3 \cdot N}{3 \cdot \pi \cdot V} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Où h : Constante de PLANCK,

σ : Constante de STEFAN –BOLTZMANN.

v : Vitesse du son dans le solide.

N/V : nombre d'atomes par unité de volume du solide.

b) Conductivité thermique:

On définit deux conductivités thermiques :

K_{ph} : la Conductivité thermique du réseau.

K_e : la Conductivité électronique

Et la Conductivité thermique peut être représentée par la somme des deux contributions [5] :

$$K = K_{ph} + K_e$$

Avec :

$$K_{ph} = \frac{1}{3} \cdot C_{ph} \cdot V \cdot L_{ph} \cdot \rho$$

V : vitesse du son dans le solide.

ρ : Masse volumique

L_{ph} : libre parcours moyen des phonons

A basse température ($T \ll \theta_D$), V , ρ et L_{ph} peuvent être considérés comme constants et

$$K_{ph}/T^3 = \text{cte}$$

ET

$$K_e = (1/3)C_e \cdot V_F \cdot L_e \cdot \rho = \pi^2 \cdot n \cdot K_B^2 \cdot T \cdot (\tau/3 \cdot m_e)$$

m_e : Masse de l'électron.

n : nombre d'électrons libre par unité de volume.

V_F : la vitesse de fermi

L_e : le parcours moyen des électrons

τ : Temps moyen de diffusion ($\tau = L_e / V_F$)

A basse température $\tau = \text{cte}$, donc $K_e \propto T$. [1]

c) Dilatation thermique :

A basse température, l'existence de contraintes thermiques différentielles peut être la source d'efforts mécaniques pouvant entraîner des ruptures d'assemblage. Le coefficient de dilatation linéaire α est défini par :

$$\alpha = \frac{1}{L} \left(\frac{dL}{dT} \right)$$

D'après la définition de α , on peut en déduire la variation de longueur relative

$$\Delta L/L = \int_n^{T_f} \alpha(T) dT$$

A haute température, cette variation est proportionnelle à T , par contre à basse température, elle est proportionnelle à T^4 .

1.4.3. Propriétés mécaniques :

Lorsqu'on construit une « structure » cryogénique, il est essentiel de prendre en compte les propriétés mécaniques des matériaux [5] utilisés à la température de fonctionnement. La plupart des matériaux ductiles à température ordinaire deviennent fragiles à basse température. Le comportement aux basses températures des différents métaux et alliages

dépend de leur structure cristalline. Parmi les systèmes cubiques à face centrées (C.F.C) on peut citer le cuivre, nickel et ses alliages, l'aluminium et ses alliages, les aciers inoxydables (série 300), l'argent, le plomb, le laiton, L'or, le platine, en général ils restent ductiles jusqu'aux très basses températures.

Les systèmes cubiques centrés (C. C) tels que le fer α , les aciers ferritiques ; les aciers au carbone, Les aciers au nickel (< 10 %) , le molybdène , le niobium , le chrome , le tungstène deviennent souvent Fragiles aux basses températures.

Dans les structures hexagonales compactes , on peut citer le zinc , le béryllium , le titane, le cobalt , le magnésium sont par fois fragiles , (zinc) , par fois ductiles (titane) , leur ductilité étant toute fois diminuée par la présence d'impuretés et principalement par l'O₂, N₂, H₂, ...

1.5. transfert thermique

L'enthalpie de formation des fluides cryogéniques est faible, la capacité thermique massique des matériaux tend vers zéro, la conséquence immédiate est que toute entrée de chaleur va entraîner une évaporation notable des fluides cryogéniques et/ ou des échauffements importants La connaissance des caractéristiques à basse température des processus de Transfert thermique nécessite donc une approche particulière [5],[7]

1.5.1. Conduction

C'est le procédé de transfert de chaleur à l'intérieur de la matière sans transfert de masse. Il est décrit par la loi de FOURIER

$$\varphi' = -K S \frac{dt}{dx}$$

Avec φ' : flux de chaleur en W passant à travers la section S en m² au gradient de température dt /dx.

La conductivité thermique K en W/m.K est une propriété extrêmement importante en cryogénie : dans certains cas, il faut qu'elle soit très bonne (contact thermique) et, dans d'autres il faut qu'elle soit particulièrement faible pour éviter les transferts de chaleur parasites (isolement des cryostats) .

1.5.2. Convection

C'est le transfert d'énergie thermique par déplacement macroscopique de matière. On peut écrire

$$\varphi' = h_c \cdot S (T_p - T_f)$$

Avec :

hc : coefficient de convection en W/m² .K

S : surface d'échange en m²

Tp : température de la paroi en K

Tf : température du fluide loin de la paroi en K.

1.5.3. Rayonnement

Le rayonnement que l'on considère à basse température est essentiellement de très grande longueur d'onde. C'est-à-dire dans l'infrarouge lointain. Le maximum d'énergie spectrale émise correspond en effet à des longueurs d'onde qui vont de 9.65 Nm à température ordinaire à 725 Nm à 4 K. L'énergie WR émise par rayonnement d'une surface A est donnée par l'équation de STEFAN BOLTZMANN :

$$W_R = \sigma . e . A . T^4$$

Avec :

WR : énergie rayonnée exprimée en Watts.

e : pouvoir émissif de la surface A.

σ : Constante de S.

B : 5,67. 10⁻¹² W.cm⁻² .K⁻⁴

T : température en K

L'énergie rayonnée entre deux surfaces de températures T1 et T2 (T2 > T1) s'écrit :

$$W_R = \sigma . E . A_1 . (T_2^4 - T_1^4)$$

Avec :

A1 : aire en cm² de la surface qui reçoit l'énergie à température

T1, E : facteur qui tient compte des pouvoirs émissifs e2 et e1 des surfaces aux températures T1 et T2.

1.6. Stockages cryogéniques :

Les liquides sont stockés dans les réservoirs cryogéniques à basse pression suivant la température du produit. Ils sont installés tout près de leur unité de Production et sont dotés de pompe pour remplissage des citernes cryogéniques. Les réservoirs de stockage sont disposés en face d'un espace pour permettre aux camions citernes de faire les manœuvres nécessaires pour être en position idéale de remplissage, et Près de la mer pour de faciliter le processus de pompage du produit dans les navires.

Les réservoirs adaptés au stockage cryogénique :

Les réservoirs cryogéniques utilisés pour stocker les fluides cryogéniques, appelés quelque fois cryostats, sont des systèmes à double paroi métallique avec une isolation au sein de cette double paroi. Le stockage cryogénique, grâce à sa faible pression de travail comparée à celle des systèmes haute pression, permet de réduire le poids et améliorer les performances de ces systèmes en utilisant des nouveaux matériaux composites. Avec de tels systèmes, l'énergie massique spécifique stockée peut être similaire à celle de réservoirs traditionnels de carburant. Cependant une grande attention doit être portée au design du réservoir afin d'assurer la protection contre tout échange possible de chaleur, et empêcher ainsi l'évaporation de d'azote (phénomène de « boil-off »). Ce phénomène ne peut être évité, mais seulement minimisé.

Isolation des réservoirs de Stockage :

L'isolation thermique des vases ou réservoirs de stockage est d'autant plus importante que l'enthalpie de vaporisation des fluides cryogéniques est faible. Pour isoler les réservoirs cryogéniques, on dispose d'un nombre important de matériaux isolants. La conductivité thermique du matériau étant un facteur prépondérant ainsi que d'autres Critères doivent aussi être examinés pour le choix d'un isolant : la facilité de mise en œuvre, la durée de vie, la fiabilité de l'isolation réalisée, le prix, l'inflammabilité, la masse, les caractéristiques mécanique, les caractéristiques physiques, etc. Pour l'isolation des réservoirs cryogéniques, le choix de l'isolant dépend souvent de la taille du réservoir (plus le réservoir est petit, plus les caractéristiques thermiques doivent être bonnes)

Le super isolant est toujours retenu pour les réservoirs de moins de 1000 L de capacité destinés aux fluides tels que l'azote, l'oxygène, l'argon. En ce qui concerne le stockage de l'hélium et de l'hydrogène liquides, la super isolation est pratiquement obligatoire.[4]

1.7. Application de la cryogénie

1.7.1. La cryogénie alimentaire

La cryogénie alimentaire consiste en la conservation d'aliments par une surgélation très rapide laissant l'aliment dans l'état auquel il était au départ, contrairement à la congélation classique qui provoque la déshydratation de surface et la formation de gros cristaux de glace dans le produit.

- **Fonctionnement :**

L'aliment est plongé dans de l'azote liquide, l'énergie contenue dans les molécules de l'aliment passe dans l'azote et l'aliment se refroidit et se fige très vite car tous les mouvements et transformations moléculaires sont stoppés. Lorsqu'on réchauffe l'aliment, l'azote liquide s'évapore et les molécules de l'aliment se remettent en mouvement ; l'aliment est dans le même état que celui auquel il était avant d'être congelé.

1.7.2. La cryopréservation

La cryopréservation a pour but de suspendre l'évolution des cellules et de pouvoir les remettre en mouvement par la suite. Elle est utilisée pour conserver le sperme, les tissus avec l'espoir pour les gens ne pouvant plus être guéri avec les techniques médicales actuelles.

1.7.3. La supraconductivité

La supraconductivité est un phénomène rencontré dans certains matériaux à de très basses températures. Elle est caractérisée par l'absence totale de résistance électrique et l'annulation du champ magnétique à l'intérieur du matériau.

- **Utilité**

La supraconductivité permet de créer des électro-aimants plus puissants et au champ magnétique très homogène, elle est utilisée pour l'imagerie médicale et les accélérateurs de particules. Mais elle sert aussi à stocker de l'énergie et à réaliser la fusion thermonucléaire contrôlée (deux noyaux atomiques s'assemblent pour en former un plus gros).

1.7.4. La superfluidité

La superfluidité est une phase de matière caractérisée par l'absence totale de viscosité. Ainsi, les superfluides, placés dans une boucle fermée, peuvent couler indéfiniment sans frottement et passer au travers de trous aussi petits qu'un atome, il défie la gravité en remontant le long des parois de leur récipient. La science qui étudie la superfluidité s'appelle " quantum hydrodynamiques "

- **Utilité**

La superfluidité est utilisée dans les réfrigérateurs cryogéniques et comme " dissolvant de quantum " dans les techniques spectroscopiques.

1.7.5. Le cryo-broyage

Le cryo-broyage utilise un liquide cryogénique (azote liquide) pour refroidir avec précision les matériaux jusqu'à leur point de fragilisation afin d'en faciliter la réduction mécanique

- **Fonctionnement**

D'abord, la matière est découpée en blocs d'à peu près 1 cm puis elle est introduite au centre du broyeur. Le broyage est obtenu par percussion et projection, entre les morceaux

mobiles du rotor tournant à grande vitesse et les morceaux fixes. La matière est broyée progressivement et la finesse est contrôlée par une couronne tamisante. Le réglage de la finesse du produit à broyer est déterminé en choisissant l'équipement de broyage, la vitesse de rotation du rotor, le type et les perforations de la couronne tamisante.

1.7.6. Givrage ou condensation cryogénique

Le procédé du givrage ou de la condensation cryogénique est un système cryogénique de récupération des composés organiques volatils (COV) dans les flux gazeux. Il est particulièrement efficace dans les situations à faible concentration de solvant.

● **Fonctionnement**

La technologie fonctionne par contact direct avec l'azote liquide qui refroidit le flux de gaz chargé en solvants. Les COV se condensent et gèlent pour former une neige qui est alors éliminée grâce à des filtres en acier inoxydable. Ces filtres sont nettoyés à intervalles réguliers par des jets inversés de gaz comprimé qui font tomber la neige au fond du dispositif. Là, un chauffage électrique la fait fondre et les COV liquéfiés sont évacués. La technologie n'utilise qu'un seul condenseur et élimine Chapitre I Notions sur la cryogénie 15 avec efficacité les COV, pour obtenir des concentrations très basses sans l'aide d'un dégivreur ou d'un lit de charbon actif.[8]

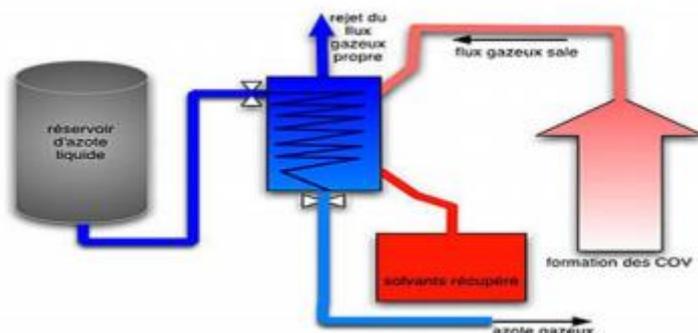


Figure 1- 3: Givrage ou condensation cryogénique

1.8. Importance et utilisation des gaz liquéfiés [9]

L'obtention et l'utilisation des gaz liquéfiés répondent à trois besoins essentiels:

- obtention de gaz purs à partir d'un mélange de gaz.
- facilité et économie de transport des gaz.
- usage des basses températures.

1.8.1. Obtention des gaz purs

Le but initial de la liquéfaction des gaz était la séparation des mélanges gazeux et l'obtention de gaz pur. Les travaux des premiers chercheurs s'appliquaient à la séparation des fractions gazeuses de l'industrie chimique, par ailleurs, ils cherchaient également à séparer les composants de l'air (Oxygène, azote, gaz rares).

• L'importance de gaz pur :

– Lois d'ébullition des fluides purs

– Sous une même pression, le liquide pur commence toujours à bouillir à la même température.

– Pendant toute la durée de l'ébullition, la température reste constante si la pression reste constante.

– Lois de condensation des fluides purs

– Sous une même pression, la vapeur commence toujours à se condenser à la même température.

– Pendant toute la durée de la condensation, la température reste constante si la pression reste constante.

1.8.2. Facilité et économie du transport Le transport

Des gaz à moyenne distance dans les canalisations ne se justifient que pour des débits importants s'assurant en des points bien déterminés, avec une certaine permanence dans le temps.

Pour le gaz naturel, par exemple, son transport par gazoduc est rentable pour des parcours terrestres où les débits sont importants et permanents. Pour les parcours maritimes on se heurte alors à des difficultés sérieuses : les pipes sous-marines sont très coûteuses et sont exposées à de hauts risques. Pour les autres gaz tels que l'oxygène et l'azote, par exemple, ils sont livrés par petites quantités, il n'est pas possible d'installer des canalisations de distribution. Ces gaz sont généralement livrés à l'état comprimé à 150 bar dans des bouteilles en acier. En raison de la grande épaisseur de ces bouteilles appelées à résister à une pression intérieure assez élevée, on obtient, alors, un poids important, la bouteille vide pèse 70 à 90 kg pour une charge utile de gaz inférieure à 10 kg.

Ceci a l'inconvénient du transport d'un poids mort de 7 à 9 fois supérieur à la charge utile entre le lieu de production et le lieu d'utilisation.

La solution la plus intéressante de nos jours consiste à liquéfier les gaz et à les transporter à l'état liquide par mer, par route ou par rail.

En effet, sous l'état liquide, un gaz occupe un volume environ 600 fois moindre que celui qu'il occupe à l'état gazeux dans les conditions normales de température et de pression.

Au point d'arrivée, les gaz sont regazéifiés pour être distribués à la consommation. Le gaz naturel, par exemple, est regazéifié puis distribué par canalisations.

L'oxygène et l'azote arrivent à l'état liquide aux centres de conditionnement où ils sont regazéifiés et mis en bouteilles pour la distribution à courte distance.

1.8.3. Usage des basses températures

Sous certaines conditions, la plupart des gaz ont des températures de condensation inférieures à la température ambiante et même inférieures à 0°.

Les gaz liquéfiés peuvent donc se trouver à de basses températures et les applications y sont nombreuses. Outre l'utilisation des gaz liquéfiés pour les besoins de la réfrigération et de la Climatisation, leur usage est également important dans l'industrie et dans les laboratoires de Recherche Où on a besoin d'effectuer des opérations et des expériences diverses à très basse température.

Chapitre 2

Les cycles de réfrigération

2-1 Définition de la réfrigération et de la liquéfaction :

La réfrigération d'un système consiste à en extraire de l'énergie, cette énergie peut être reçue d'extérieur au dissipée dans le système. On opère souvent dans ce cas à température constante. Par contre, la liquéfaction Consiste à lui retirer de l'énergie afin de le refroidir de puis la température ambiante jusqu'à son point de rosée, puis à condenser la vapeur saturée.

2-2 Propriétés de l'air : [10]

Les gaz atmosphériques sont les gaz qui se trouvent dans l'air qui nous entoure plus communément appelés « gaz industriels » font partie de notre vie quotidienne et concernent toutes les industries. Ils comprennent l'argon, le dioxyde de carbone, l'hélium, l'azote et l'oxygène.

Peu de temps après 1895, deux méthodes développées en parallèle par CARLVAN LINDE et GEORGES CLAUDE ont abouti à la production industrielle d'air liquide puis d'azote et d'oxygène.

Parmi ces gaz, l'argon, l'oxygène et l'azote, produits principalement par séparation des différents constituants de l'air. Cette séparation est obtenue en réduisant la température de l'air jusqu'à ce que chacun de ses composants se liquéfie et puisse être récupéré distinctement.

Parmi les deux gaz restants classés dans cette catégorie, l'obtention de dioxyde de carbone découle de plusieurs procédures de traitement chimique.

L'hélium ne se trouve à l'état naturel que dans l'écorce terrestre, lorsqu'il a été piégé dans des poches rocheuses non poreuses, de la même façon que l'on trouve le pétrole. Ces sortes de "puits d'hélium" n'existent que dans certaines parties du monde où les conditions géologiques sont réunies, ce qui fait de l'hélium un gaz rare et cher.

Séparément, chacun des gaz composant l'air dispose de caractéristiques propres, mais ensemble ils constituent un mélange capable de préserver la vie. Ce mélange est caractérisé par les mêmes composants, sinon les mêmes proportions, depuis plusieurs millions d'années.

La majorité des gaz atmosphériques sont classifiés comme gaz inertes, et seuls les gaz comburants comme l'oxygène et le dioxyde de carbone réagissent facilement avec d'autres éléments. Les traitements industriels exploitent pleinement ces propriétés ainsi que certaines autres caractéristiques des gaz atmosphériques.

Nom et symbole	Point critique	
	T [°C]	P[bar]
Air	-267.95	2.275
Azote N ₂	-239.91	12.38
Hydrogène H ₂	-228.75	27.56
Hélium He	-146.95	34.00
Néon Ne	-140.73	37.74
Monoxyde de carbone CO	-140.24	34.99
Argon Ar	-122.00	48.98
Oxygène O ₂	-118.57	50.43
Méthane CH ₄	-82.62	45.96
Krypton Kr	-63.75	55.02

Tableau 2- 1: Conditions critiques des gaz permanents

2-2-1 Propriétés particulières

2-2-1-1 Azote [11]

Le gaz azote est le constituant majoritaire de l'air (78,09 % en volume). L'azote liquide est un des fluides cryogéniques le plus employé.

Utilisations :

L'azote est extrait de l'air par un processus cryogénique. Il est ensuite utilisé : – soit sous forme gazeuse pour fournir une atmosphère inerte nécessaire aux procédés chimiques, métallurgiques, à l'élaboration de composants électroniques ou pour les emballages en atmosphère neutre. Dans ce cas, il est très souvent stocké sous forme liquide (1 L liquide = ~ 650 L de gaz), avant d'être vaporisé ; – comme « réfrigérant », sous forme liquide, par exemple dans les équipements électroniques (refroidissement de détecteurs infrarouge, de laser), dans l'industrie alimentaire (refroidissement très rapide des aliments, surgélation, maintien de la température pendant leur transport), en génie civil (gel de sols meubles avant excavation).

Propriétés :

La température d'ébullition de l'azote liquide saturée, à 1 bar, est de 77,3 K. Dans cet état, la densité du liquide est de 808,9 kg/m³ et l'enthalpie de vaporisation de 198,3 kJ/kg. L'azote liquide se solidifie à 63,2 K.

2-2-1-2 Hydrogène [11]

L'hydrogène naturel est composé de deux isotopes stables : l'hydrogène ¹H, de masse atomique 1 et le deutérium ²H, de masse atomique 2. L'hydrogène ordinaire est donc un mélange de H₂ et de molécules HD (¹H ²D) dans un rapport de 3 200/1. Il existe aussi un autre isotope très rare et radioactif de l'hydrogène, le tritium ³H, de masse atomique 3. La période ou demi-vie du tritium, c'est-à-dire le temps nécessaire pour que la moitié de ses atomes se désintègrent naturellement est de 12,32 années. Sur terre, le tritium n'existe pas à l'état naturel, sauf dans les très hautes couches de l'atmosphère. L'hydrogène est l'élément chimique le plus abondant dans l'univers. C'est aussi le plus simple et le plus léger. Dans notre système solaire, l'hydrogène moléculaire est abondant dans l'atmosphère des planètes géantes ; 93 % pour Saturne, et 84 % pour Neptune, par exemple, mais il n'existe qu'en faible quantité dans les planètes « telluriques » comme la Terre. Celles-ci ne sont pas assez massives pour retenir, par gravité, une molécule aussi légère que le dihydrogène. L'atmosphère terrestre ne contient que 0,00005 % d'hydrogène gazeux.

Production d'hydrogène :

Sur terre, l'hydrogène est toujours « associé » à d'autres éléments. On le trouve essentiellement dans l'eau (H₂O). Pour produire de l'hydrogène pur, il convient donc de le séparer des éléments chimiques auxquels il est lié. En 2011, 95 % de l'hydrogène produit provient des sources d'énergies fossiles (gaz naturel, pétrole) (figure 2-1)

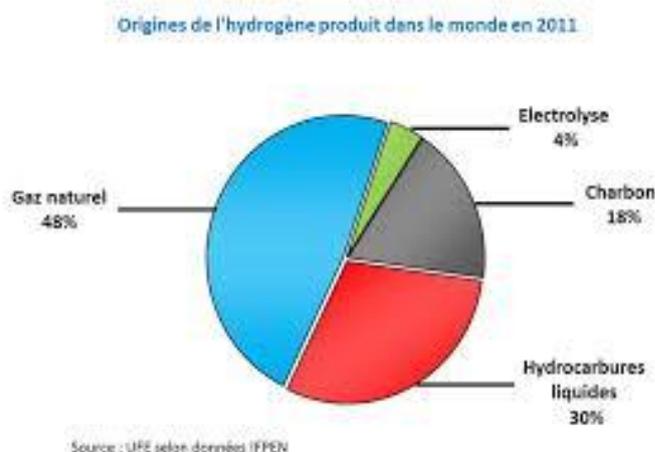


Figure 2- 1: Principales origines de l'hydrogène produit en 2012 dans le monde

Utilisations :

En 2012, la production mondiale d'hydrogène est d'environ 500 milliards de Nm³. Sous forme gazeuse, il est très majoritairement utilisé par l'industrie chimique (62 %) et pétrochimique (37 %). Il peut être liquéfié pour des problèmes de logistique et de transport (1 L liquide = 790 L de gaz) mais sa principale application sous cette forme est l'alimentation des moteurs cryogéniques des lanceurs fusées (exemple, Moteur Vulcain d'Ariane).

Hydrogène en cryogénie :

Le deutérium, peu abondant (3×10^{-4}) dans l'hydrogène, a des applications cryogéniques très particulières : chambres à bulles, source de neutrons froids, etc. L'hydrogène proprement dit est très léger ($\rho = 71 \text{ kg/m}^3$) en phase liquide. La phase gazeuse, même au voisinage de la liquéfaction, reste, à pression normale, plus légère que l'air ambiant : ses vapeurs, même froides, s'élèvent rapidement dans l'air. Sa température d'ébullition sous pression normale est de 20,4 K. Son enthalpie de formation (1 W évapore 115 cm³ /h) est 5 fois plus petite que celle de l'azote, mais 13 fois plus grande que celle de l'hélium. Dans certaines conditions (dispositions spéciales liées à la sécurité concernant son utilisation), il peut être intéressant de choisir l'hydrogène plutôt que l'hélium quand on veut travailler à des températures au-dessus de 15 K.

2-2-1-3 Hélium [12] [13]

L'hélium est un gaz très léger, parfaitement incolore, inodore et inerte, ce qui le rend précieux en chirurgie, en plongée sous-marine ou encore pour gonfler les aérostats.

L'hélium est l'élément le plus abondant de l'Univers après l'hydrogène et le constituant principal du Soleil.

Il est également le gaz le plus léger après l'hydrogène.

Propriétés :

L'hélium (He), est le deuxième gaz élémentaire le plus léger après l'hydrogène. C'est la plus petite de toutes les molécules et l'hélium présente un point d'ébullition le plus bas de tous les éléments. Incolore, inodore, insipide et non toxique, chimiquement inerte, l'hélium est ininflammable donc n'entretient pas la combustion. Dans des conditions standards de température et de pression, l'hélium se comporte pratiquement comme un gaz idéal. Virtuellement, l'hélium est monoatomique dans toutes les conditions. Il possède une conductivité thermique 5 fois plus élevée que celle de l'air et ne devient pas radioactif en cas d'irradiation. L'hélium est aussi le gaz le moins hydrosoluble de tous les gaz connus et sa vitesse de diffusion à travers les solides est trois fois supérieure à celle de l'air et d'environ 65% à celle de l'hydrogène.

Il ne se marie avec aucun autre corps connu. Comme il n'attaque pas les métaux, certains alliages rares sont soudés dans une enceinte remplie d'hélium. Ce gaz se dissout beaucoup moins facilement que l'azote dans le SANG, c'est pourquoi les plongeurs appelés à travailler à de grandes profondeurs respirent un mélange d'hélium et d'oxygène. L'hélium est également employé en anesthésie parce qu'il diminue les risques au cours de certaines opérations chirurgicales.

A la pression atmosphérique, l'hélium devient liquide à la plus basse des températures d'ébullition, à savoir -269°C et reste liquide jusqu'au zéro absolu ou presque. En tant que substance la plus froide connue, l'hélium joue un rôle important en recherche cryogénique. A $3,9^{\circ}\text{K}$, l'hélium liquide présente une super fluidité ou une viscosité virtuellement égale à zéro (Hélium II) ; il défie la gravité pour remonter les parois des récipients et devient ainsi un parfait conducteur de chaleur.

Utilisations :

Ses propriétés physiques uniques permettent ou améliorent de nombreuses applications dans l'industrie, la santé et la recherche.

Sous forme gazeuse :

- Travail des métaux... pour créer une atmosphère inerte et empêcher l'oxydation pendant le soudage de métaux comme l'aluminium, l'acier inoxydable, le cuivre et les alliages de magnésium.
- Ballons... gaz de remplissage idéal car l'hélium est plus léger que l'air et inerte. Gonflage des ballons météorologiques ou des ballons dirigeables.
- Fibres optiques... pour fournir une atmosphère protectrice pour la production des fibres optiques utilisées dans les câbles de télécommunication.
- Semi-conducteurs... pour créer une atmosphère contrôlée pour la fabrication de dispositifs semi-conducteurs, pour la croissance de cristaux de germanium et de silice pour les transistors et les lasers
- Détection des fuites... gaz de traçage préféré pour les systèmes sous pression ou sous vide, les systèmes de chauffage et de ventilation, ainsi que les canalisations et tuyauteries.
- Procédés chimiques... comme gaz vecteur pour l'analyse de la pureté et de la composition d'une substance chimique par chromatographie.
- Plongée sous-marine... réalisation d'atmosphère artificielle pour les plongées à grande profondeur ou le travail en caisson hyperbare.
- Aéronautique... pressurisation des réservoirs de combustibles liquides pour les fusées.
- Physique fondamentale ... la simplicité de sa structure atomique facilite la compréhension des phénomènes observés.

Sous forme liquide (à très basse température) :

- Santé/imagerie à résonance magnétique (IRM)... en raison de son bas point d'ébullition, l'hélium liquide est utilisé pour refroidir les aimants supraconducteurs utilisés dans l'imagerie à résonance magnétique.
- Résonance magnétique nucléaire (RMN)... l'hélium est le liquide par excellence pour garder les aimants aux températures de supraconduction.
- Physique des très basses températures...

- Etude de la supraconductivité ... Ce phénomène apparaît dans les métaux entre 0.1 K et 23 K suivant le corps étudié et l'hélium liquide permet d'atteindre ces températures.
- Etude de la superfluidité... Seul l'hélium possède cette particularité dont l'analyse permet d'accéder aux propriétés quantiques de la matière.
- Systèmes cryogéniques.

2-2-2 Domaines d'utilisation des gaz industriels : [14]

Aéronautique : Le gaz industriel est ici utilisé dans des processus de fabrication de pièces aéronautiques mais également dans le cadre de l'entretien et de la maintenance de celles-ci : traitement des matériaux, traitement thermique, soudage et notamment le gonflage des pneumatiques à l'azote.

Equipementiers automobiles : L'industrie automobile a recours aux gaz industriels à différents moments du processus de fabrication et d'assemblage : traitements thermiques, revêtements de surface, découpe, soudage des matériaux, etc.

Agro-alimentaire : Les gaz industriels sont utilisés dans l'industrie alimentaire à différentes étapes de la transformation, du conditionnement et aussi du transport des produits alimentaires. Du contrôle de température, au conditionnement sous atmosphère, le CO₂ est le gaz outil par excellence : dans les serres où la production d'algues, à l'utilisation de ses propriétés d'acide faible pour le traitement de l'eau, son usage se développe toujours plus.

L'industrie de la boisson est également concernée notamment celles qui produisent des boissons gazeuses.

BTP – Construction : Pour différents types de constructions allant du résidentiel aux infrastructures énergétiques, les gaz industriels sont utilisés notamment pour la fabrication, la découpe et le soudage des aciers. La fabrication de verre plat multicouche via les installations float glass requiert de l'hydrogène dont la fourniture se doit d'être sans faille.

Transport Décarboné :

La solution électrique à l'hydrogène gagne du terrain. La première offre grand public de transport électrique à l'hydrogène n'a échappé à personne.

Ainsi, HYPE société de taxi parisienne a enregistré 795000 km parcourus à fin septembre 2017. La station de remplissage Pont de l'Alma à Paris assure un fonctionnement parfaitement intégré aux besoins des clients et de son hébergeur, la ville de Paris.

Cette solution électrique à l'hydrogène suppose le stockage embarqué d'hydrogène comprimé à 450 b ou 700 b. Naturellement une station de remplissage "assure le plein" en 5 minutes, comme pour une station gasoil conventionnelle. Tous les modes de transport sont concernés, la bicyclette avec l'offre de Ataway, BUS urbain, navette fluviale à Nantes, trains, etc.

Ces stations de remplissage demandent des composants haute-pression dont IMI peut assurer la conception, la fabrication et les tests.

2-3 production des base températures

2-3-1 l'effet de Joule Thomson : [15]

L'énergie d'un gaz parfait est indépendante du volume et de la pression, elle ne dépend que de la température. En conséquence, la température d'un gaz idéal soumis à une détente adiabatique demeure inchangée dans le processus. En revanche, en 1854 James Prescott Joule et William Thomson (aussi connu sous le nom de Lord Kelvin) ont démontré que la température d'un gaz réel change dans une détente adiabatique. Ce phénomène connu sous le nom d'effet Joule-Thomson est aujourd'hui largement utilisé dans la liquéfaction des gaz.

Pour comprendre cet effet, il faut tenir compte du comportement non idéal des gaz en introduisant des paramètres comme les interactions intermoléculaires et le volume des particules. Cette non idéalité se traduit par un coefficient Joule-Thomson propre à chaque gaz.

Ce type de détente qui s'effectue sans échange de travail ni de chaleur avec le milieu extérieur est le premier mode fondamental de production du froid, se produit par le passage d'un gaz réel dans un orifice étroit ; puisque la détente s'effectue dans un milieu adiabatique ($Q=0$) dont le volume est constant (donc $W=0$), le changement de l'énergie interne est nul ($U=W+Q$). Le processus s'effectue donc à énergie interne constante.

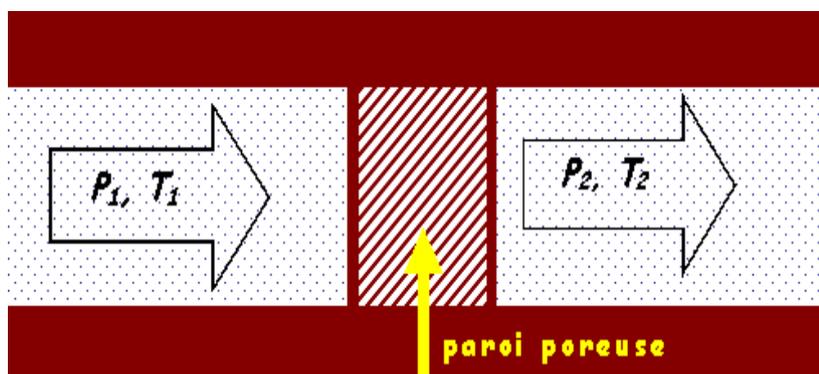


Figure 2- 2: détente de Joule-Thomson

Dans cette expérience schématisée à la figure 2-3, un gaz subit une détente à travers un disque poreux et passe d'une pression et d'une température initiale (P_1, T_1) à une pression et température finale (P_2, T_2). La chute s'effectue entièrement dans le disque poreux. Puisque l'expansion se produit en continu dû au débit de gaz. Cette expérience est beaucoup moins sensible aux imperfections expérimentales de Joule. Cette expérience se déroule toujours en milieu adiabatique et le travail W_i nécessaire pour faire passer un volume V_i à travers le disque est donné par :

$$W_i = - \int_{V_i}^0 P_i dv - P_i \int_{V_i}^0 dv = P_i V_i \quad (1)$$

A l'inverse, le travail fait par le gaz lorsqu'il émerge de l'autre côté du disque est donné par :

$$W_f = - \int_0^{V_f} P_f dv - P_i \int_0^{V_f} dv = -P_f V_f \quad (2)$$

Puisque le travail total dans le système est donné par la somme de W_i et de W_f

$$W = W_i + W_f = P_i V_i - P_f V_f$$

Et la variation de l'énergie interne du système est donnée par : $U = W+Q$ et puisque le processus est adiabatique ($Q=0$), il est possible d'écrire :

$$U_f - U_i = P_i V_i - P_f V_f$$

Cette dernière expression peut être réécrite sous la forme :

$$U_f + P_f V_f = U_i + P_i V_i \quad (3)$$

L'équation (3) démontre que la détente adiabatique d'un gaz, est un processus isenthalpique, C'est-à-dire où l'enthalpie demeure constante. Cet énoncé peut se réécrire de la façon suivante en utilisant la dérivée totale de l'enthalpie.

$$dH = \left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T dP + \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P dT \quad (4)$$

Et puisque l'expérience de Joule-Thomson consiste à mesurer le changement de température associé à un changement de pression pour un processus isenthalpique donc :

$$\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T dP + \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P dT = 0$$

$$\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T dP = - \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P dT$$

$$\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T = - \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_H$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_H = - \left[\frac{\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T}{\left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P} \right]$$

L'abaissement de la température en fonction de la pression peut être caractérisé par un coefficient μ_{J-T} tel que :

$$\mu_{J-T} = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_H$$

Appelé coefficient de Joule-Thomson.

Ce coefficient est une mesure de la variation de la température en fonction de la pression durant un processus isenthalpique, il représente aussi la pente de la courbe $h = \text{cste}$ dans le diagramme (T-P).

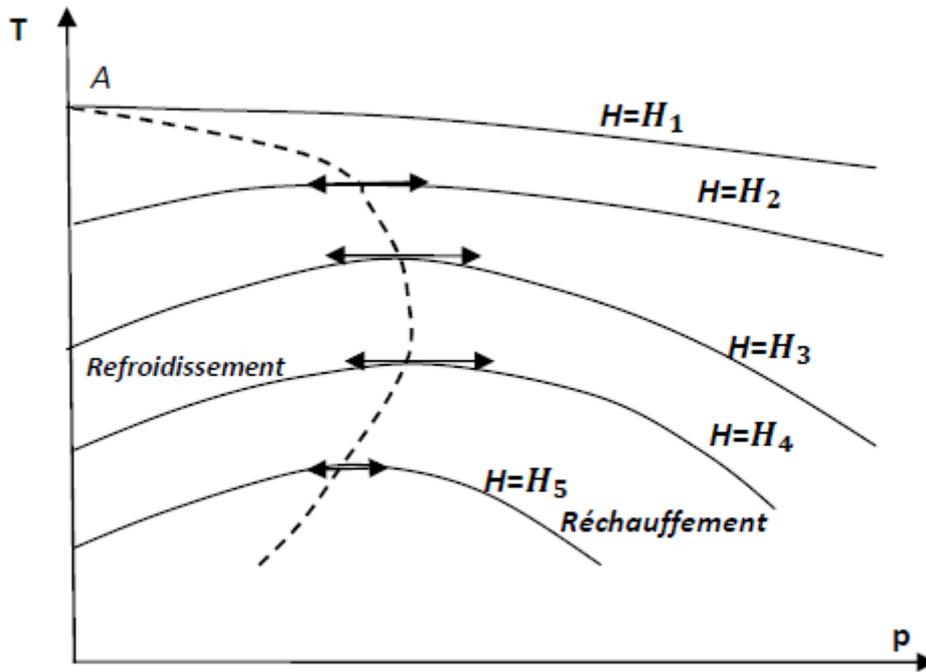


Figure 2- 3: Les lignes isenthalpiques et les points d'inversion dans le diagramme (T-P)

Les courbes $T=f(P)$ passent par un maximum nommé point d'inversion. Et la courbe en pointille réunissant les points de pente est appelée la courbe d'inversion, elle est donc donnée par la relation : $\mu_{J-T} = 0$ ou bien $\mu_{J-T} = \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)_H = 0$.

A partir de la figure (2-4), nous constatons que

$$\begin{cases} \mu_{J-T} < 0 & \text{Détente avec augmentation de la température } T_2 > T_1 \\ \mu_{J-T} = 0 & \text{Détente sans variation de température } T_2 = T_1 \\ \mu_{J-T} > 0 & \text{Détente avec diminution de la température } T_2 < T_1 \end{cases}$$

Il est tout à fait clair qu'un effet de refroidissement par détente de Joule-Thomson ne peut avoir lieu que si le fluide est en dessous de la température d'inversion maximale notée T_{inv} .

Si $T_1 > T_{inv}$ alors $T_1 > T_2$ (réchauffement du fluide).

Si $T_2 < T_{inv}$ alors $T_1 < T_2$ (refroidissement du fluide).

2-3-2 La détente adiabatique [16]

La deuxième méthode pour produire les basses températures, c'est la détente adiabatique du gaz à travers une machine d'expansion, pour ce cas idéal la détente est réversible et adiabatique (isentropique), on définit alors un coefficient de détente isentropique.

$$\mu_s = \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_s$$

On pouvait d'ailleurs s'y attendre car le travail produit par le système est, en vertu du principe de l'équivalence compensé par diminution d'énergie interne, donc de la température. La

détente isentropique, pour une même température de départ et entre deux pressions données, provoque un abaissement de température plus important que la détente isenthalpique. Elle est donc plus intéressante, mais son emploi est toujours combiné avec celle-ci car il n'est pas possible, pour des raisons technologiques, d'admettre la présence de liquide dans les machines de détente.

2-3 Cycle de réfrigération :

Fonctionnement

Le cycle de réfrigération existe, d'ailleurs comme tous les autres cycles, de quatre étapes comme la figure ci-dessous nous le montre. Le cycle de réfrigération est un cycle inverse parce que la course est inverse de celle d'une montre. Les étapes sont :

1. Le compresseur qui presse le gaz de l'évaporateur au condenseur
2. Un condenseur où la chaleur est transmise à l'espace donc le fluide refroidi de nouveau pour qu'il puisse prendre assez de chaleur dans l'évaporateur.
3. Un papillon des gaz ou le fluide s'expand isenthalpique et donc le fluide devient un mélange de fluide et gaz à basse pression.
4. L'évaporateur où la chaleur est absorbée par le fluide et l'intérieur refroidi.

L'expansion au-delà du papillon des gaz est basée sur l'effet de Joule Thomson. On ne peut expliquer cet effet qu'avec la théorie des gaz réels. Il faut donc aussi respecter l'interaction entre les molécules. L'expansion d'un gaz augmente l'énergie potentielle car les forces d'attraction intermoléculaire diminuent. Parce qu'il n'y a pas de travail fourni par le papillon des gaz sur le gaz, la loi de conservation d'énergie nous dit que l'énergie cinétique diminuera.

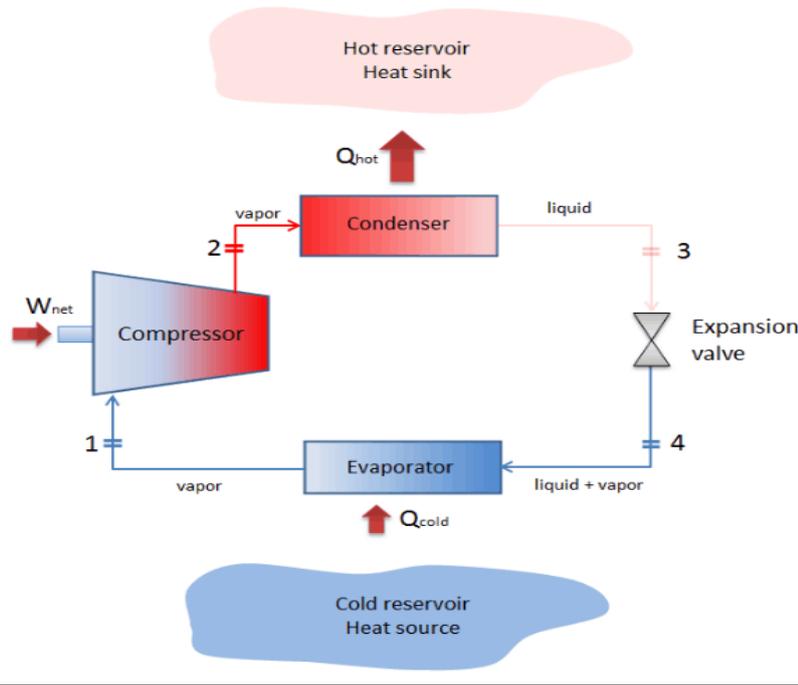


Figure 2- 4: cycle de réfrigération

L'application du premier principe de la thermodynamique permet d'écrire : [17]

$$\Delta U = W + Q_c + Q_f \quad (1)$$

Où U est l'énergie interne du système (J), Q_c et Q_f sont les quantités de chaleur des sources froides et chaudes (J) et W est le travail reçu par le fluide (J).

On en déduit la relation suivante :

$$Q_c + Q_f = -W < 0 \quad (2)$$

L'application du second principe de la thermodynamique permet d'écrire :

$$\Delta S = S_e + S_c = \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} + S_c = 0 \quad (3)$$

Où S est l'entropie du système ($J.K^{-1}$), S_e est l'entropie échangée entre le système et le milieu extérieur ($J.K^{-1}$) et S_c est l'entropie créée ($J.K^{-1}$).

Dans le cas d'une transformation réversible, l'entropie créée S_c est nulle. Dans ce cas, l'équation (3) s'écrit :

$$\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} = 0 \quad (4)$$

Si la transformation est irréversible, l'entropie créée S_c est positive. Dans ce cas, l'équation (3) s'écrit :

$$\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0 \quad (5)$$

2-3-1 Machine de référence de Carnot [17]

La machine de Carnot est une machine idéale à cycle fermé qui fonctionne selon un cycle réversible.

Dans le sens moteur, c'est le cycle le plus efficace pour obtenir du travail à partir de deux sources de chaleur de températures constantes. Dans le sens récepteur (cycle inverse), c'est le moyen le plus efficace de transférer de la chaleur d'une source froide à une source chaude à partir d'une source de travail.

Ce cycle est constitué de deux isothermes (l'une à T_c et l'autre à T_f) séparées par deux transformations adiabatiques réversibles (isentropiques).

La Figure 2.5 présente les diagrammes Température – Entropie (T-S) et Pression – Volume (P-V) du cycle de Carnot .

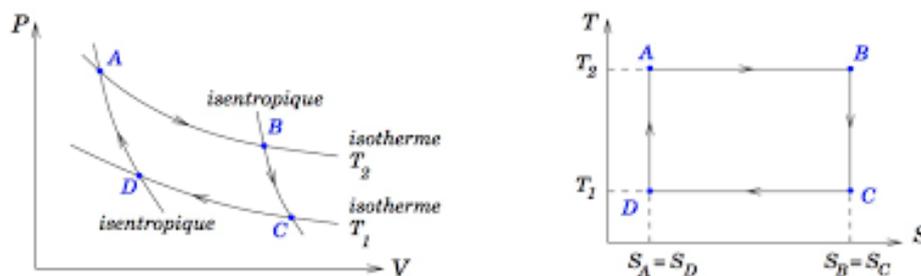


Figure 2- 5: cycle de Carnot

2-3-1-1 Coefficient de performance

Dans le cas des machines réceptrices, on ne parle pas de rendement mais de coefficient de performance.

$$COP = \frac{\text{énergie transférée utile}}{\text{énergie fournie}}$$

COP du cycle de Carnot

Dans le cas du cycle de Carnot en sens récepteur, le coefficient de performance COP s'écrit :

$$COP = \frac{Q_f}{W}$$

Ce cycle est réversible donc l'entropie créée S_c est nulle. Compte tenu des équations (2) et (4), on obtient dans ce cas particulier :

$$COP = \frac{T_f}{T_c - T_f}$$

Le COP d'un cycle de Carnot inverse ne dépend que des valeurs des températures des sources de chaleur. C'est le COP maximal que l'on puisse obtenir avec une machine ditherme réceptrice. Pour un cycle réel, la présence d'irréversibilité ne permet pas d'envisager la réalisation d'un cycle de Carnot.

2-3-2 Les différents cycles [17]

Pour refroidir un fluide cryogénique, on lui applique une série de transformations thermodynamiques. Les principales transformations utilisées sont :

- Transférer de la chaleur entre un fluide chaud et un fluide froid via un échangeur de chaleur.
- Pomper sur un bain liquide en équilibre avec sa vapeur. Cela a pour effet d'abaisser la pression du fluide et donc la température en suivant la ligne de saturation gaz/liquide.
- Effectuer une détente isenthalpique, souvent appelée détente Joule Thomson ($DH = 0$). Cela consiste à détendre le gaz à travers un orifice. Si cette détente s'effectue au-dessous de la température d'inversion, elle s'accompagne d'un refroidissement du gaz (la température d'inversion de l'hélium est d'environ 40K).
- Extraire de la chaleur via un travail extérieur sur une turbine ou un piston (transformation Isentropique $\Delta S = 0$).

2-3-2-1 Le cycle Joule Thomson

Un réfrigérateur utilisant le cycle Joule Thomson consiste en (figure 2-4) :

- Une compression isotherme à l'aide de compresseurs et de refroidisseurs (5-6-1)
- Un refroidissement isobare dans des échangeurs (1-2)
- Une détente Joule Thomson en dessous de la température d'inversion du fluide, afin d'obtenir du liquide (2-3).
- Un réchauffement isobare à travers des échangeurs (4-5).

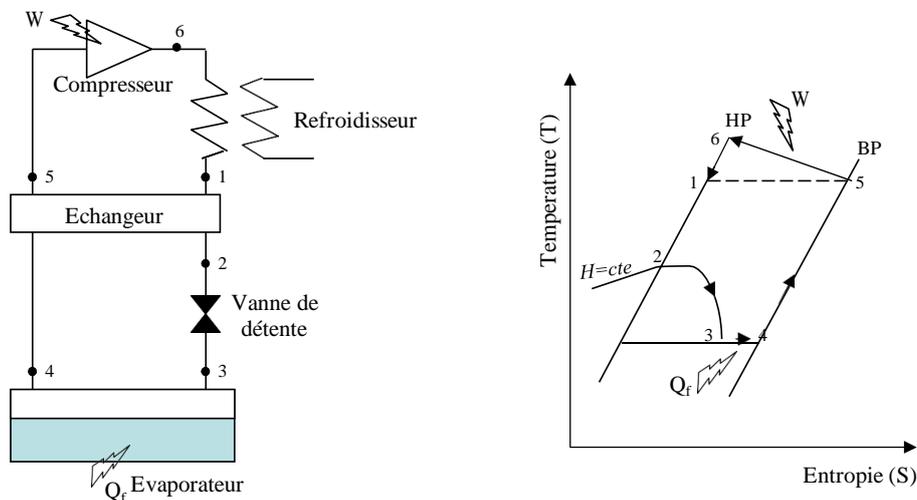


Figure 2- 6: Description du cycle Joule Thomson

2-3-2-2 Le cycle de Brayton

Un réfrigérateur utilisant le cycle de Brayton consiste en (figure 2-5) :

- Une compression isotherme à l'aide de compresseurs et de refroidisseurs (5-6-1)
- Un refroidissement isobare dans des échangeurs (1-2)
- Une détente isentropique (2-3).

- Un réchauffement isobare à travers des échangeurs (4-5).

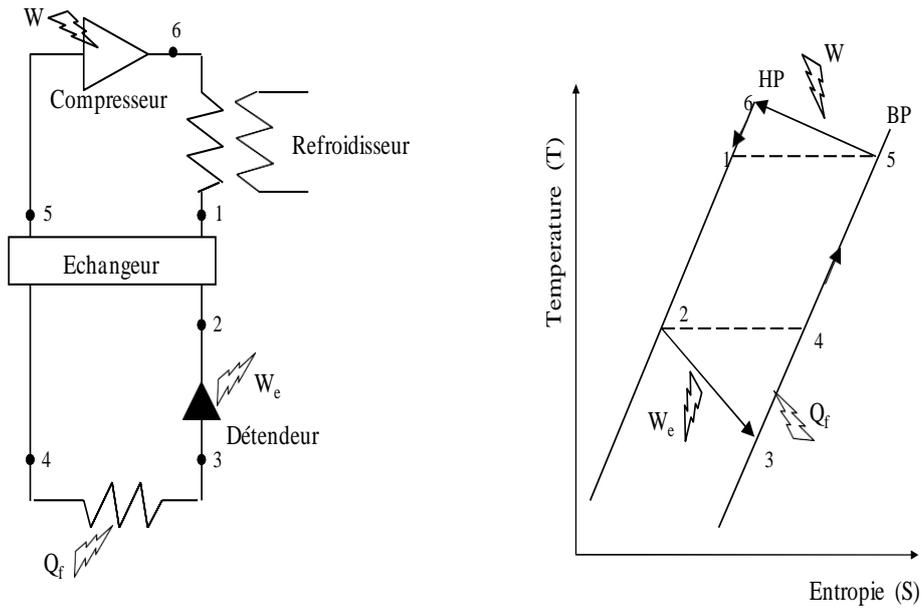


Figure 2- 7: Description du cycle de Brayton

2-3-2-3 cycle de Claude

Le cycle de Claude est l'assemblage d'un cycle de Brayton à un ou plusieurs étages et d'un cycle Joule Thomson. Le cycle de Brayton pré-refroidit le cycle Joule Thomson.

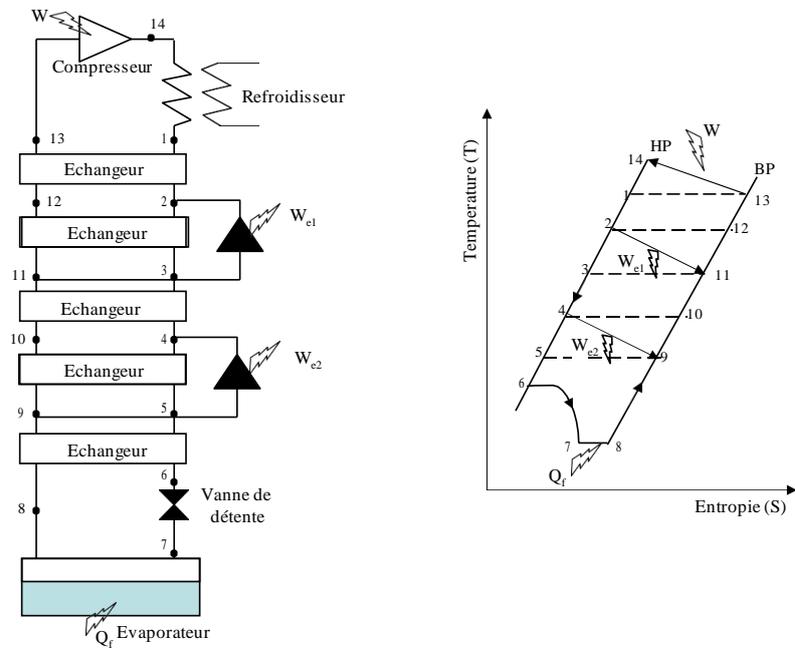


Figure 2- 8: Description du cycle de Claude

2-4 Equipements utilisés [18]

2-4-1 Compresseur cryogénique :

Les compresseurs cryogéniques peuvent être volumétriques (alternatifs ou rotatifs) ou à impulsion (centrifuges). Dans le domaine de la cryogénie, deux contraintes importantes nous obligent à faire un bon choix d'un compresseur.

- Il faut que le processus de compression soit le plus possible isotherme.
- Le processus doit se faire sans polluer le gaz afin de ne pas boucher les échangeurs.

Les compresseurs alternatifs secs ; sont chers et peu fiables, et les compresseurs lubrifiés ont une grande fiabilité, mais polluent les gaz par l'huile. Le développement des systèmes de séparation d'huile a permis d'utiliser le compresseur à vis lubrifié, dans lequel la grande quantité d'huile injectée permet d'obtenir une compression isotherme.

2-4-2 Echangeurs de chaleurs :

Un échangeur de chaleur peut être considéré comme un appareil vital seulement au bon fonctionnement d'une installation industrielle. Mis à part les appareils de laboratoire, dont certains utilisent des échangeurs bobinés, les réfrigérateurs modernes sont construits avec des échangeurs à plaques ailettes en alliage d'aluminium qui sont compactes et très efficaces pour favoriser l'échange d'une quantité d'énergie (chaleur) importante.

2-4-3 Régénérateurs :

Dans une installation cryogénique, le régénérateur est destiné à stocker momentanément la chaleur cédée par le fluide à haute pression s'écoulant de la température ambiante (T_a) à la température froide (T_f) avant de restituer à ce fluide repassant de (T_f) à (T_a) après détente. Et d'un point de vue technologique, ces régénérateurs doivent avoir :

- Une capacité thermique infinie par rapport à celle du fluide cryogénique.
- Une conductivité thermique nulle dans le sens longitudinal pour empêcher les apports de chaleur parasite par conduction du bout chaud au bout froid.
- Une conductivité thermique infinie dans le sens radial pour assurer une bonne diffusivité thermique lors des échanges d'énergie (sous forme thermique).

2-4-4 Détendeurs cryogéniques

● Détendeur alternatif

Fut la première détente utilisée, ce type de dispositif est encore apprécié par les opérateurs de petits appareils de laboratoire qui peuvent en assurer facilement son entretien. Sa vitesse de rotation est limitée à 300 tr/min. lorsque le débit volumique à traiter devient important, seule la turbine permet d'apporter la fiabilité et l'efficacité requise.

● Les turbines à paliers à gaz hydrostatique ou hydrodynamique

A paliers statiques, elles sont alimentées par un faible débit de gaz haute pression d'environ 4% du débit de cycle. Ils ont de ce fait une force de sustentation importante et indépendante de la vitesse de rotation.

Et les paliers dynamiques qui n'ont pas à être alimentés, supportent mal les variations rapides des conditions de fonctionnement et ont une force de sustentation décroissante avec la vitesse de rotation.

La technologie actuelle des paliers à gaz est bien adaptée à la réfrigération. Les paliers statiques permettent d'atteindre des puissances extraites dans la gamme de 100 KW, autre fois réservée aux seules turbines à paliers à huile.

2-4-5 Autre composants

Généralement, les autres composants particuliers qui constituent un réfrigérateur ou un liquéfacteur sont :

-Les vannes cryogéniques.

-Les absorbeurs : pendant de longue période de fonctionnement, il est possible que des fuites se déclarent. Les quantités d'impuretés, même à des concentrations très faibles peuvent provoquer un bouchage dans les circuits. Pour pallier cet inconvénient, une capacité remplie de matériau absorbant est intercalée dans les circuits haute pression à une température permettant de piéger les impuretés.

Chapitre 3

Etude thermodynamique des cycle de réfrigération

3-1 Le cycle de réfrigération de Claude [19]

3-1-1 Principe de cycle de Claude :

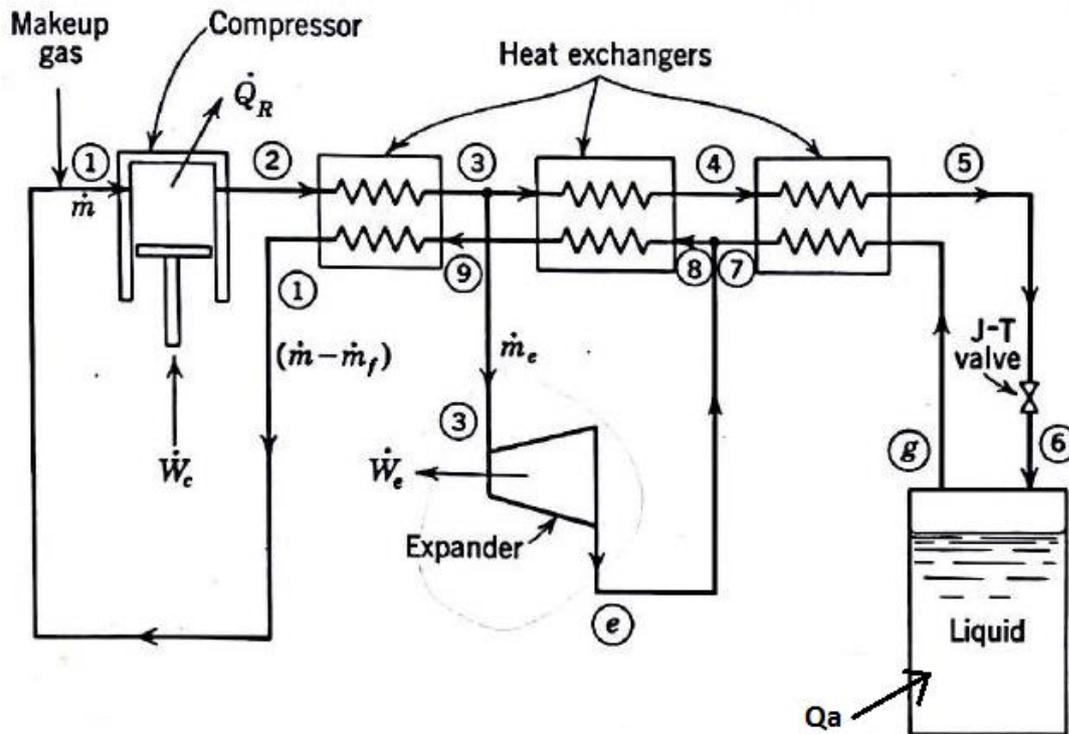


Figure 3- 1: Diagramme énergétique du réfrigérateur de Claude

Ce cycle comprend comme illustre la figure 3-1 :

- Un compresseur.
- Un premier échangeur de chaleur, à la suite duquel une fraction importante du gaz à haute pression passe dans une machine de détente et est envoyé vers le gaz à basse pression.
- Un deuxième et un troisième échangeur, dans lesquels passe le reste du gaz à haut pression.
- Une vanne de détente.
- Un réservoir de liquide avec séparation du gaz qui retourne au compresseur à travers les trois échangeurs.
- Une entrée du gaz frais au compresseur.

Fonctionnement :

Le principe de fonctionnement est comme suit (Figure 3.2) :

Le gaz est d'abord comprimé de P1 à P2 à température constante, il est refroidi de 2 en 3 dans le premier échangeur. Une partie me est détendue dans la turbine par une détente isentropique qui l'amène en e, ce gaz s'ajoute ensuite au courant gazeux qui revient du réservoir de liquide. Le reste du gaz traverse les deux autres échangeurs en 4 et 5, il subit une détente isenthalpique dans la vanne et pénètre dans le réservoir. Une partie se liquéfie, la partie gazeuse se dégage en g et traverse toute la série des échangeurs, après mélange en e avec la partie me, le courant gazeux est réchauffé à T1 et retourne à l'aspiration du compresseur avec une masse m de gaz frais.

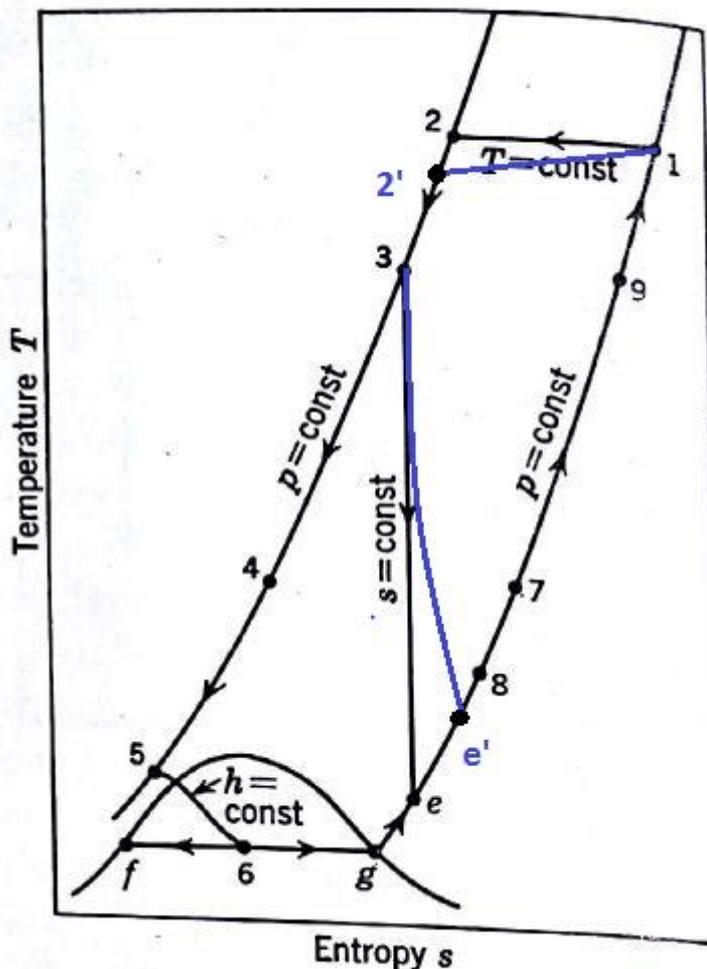


Figure 3- 2: Diagramme T-S de cycle de Claude

3-2 Rappel thermodynamique : [20]

3-2-1 premier principe de la thermodynamique appliqué à un système ouvert :

La variation d'énergie totale d'un système ouvert résulte des échanges d'énergies avec le milieu extérieur :

$$\Delta E_T = \Delta U + \Delta E_P + \Delta E_C = \varphi + W_t + \Delta U_{ij} + \Delta E_{Cij} + \Delta E_{Pij} + W_{t_{ij}}$$

- Energie interne : $\Delta U_{ij} = \sum_i U_i - \sum_j U_j$
- Energie cinétique : $\Delta E_{Cij} = \sum_i \frac{1}{2} m_i C_i^2 - \sum_j \frac{1}{2} m_j C_j^2$
- Energie potentielle : $\Delta E_{Pij} = \sum_i m_i g z_i + \sum_j m_j g z_j$

$$\Delta E_T = \varphi + W_t + \sum_i \left(U_i + \frac{1}{2} m_i C_i^2 + m_i g z_i + P_i V_i \right) - \sum_j \left(U_j + \frac{1}{2} m_j C_j^2 + m_j g z_j + P_j V_j \right)$$

Si on introduit l'enthalpie : $H = U + PV$ de plus, si on note par : $h_t = H + C^2 + gz$

$$\Delta E_T = \varphi + W_t + \sum_i m_i (h_T) + \sum_j m_j (h_T)$$

En divisant par « dt » on obtient :

$$\frac{dE_t}{dt} = \dot{E}_t = \dot{\varphi} + \dot{W}_t + \sum_i \dot{m}_i (h_T) + \sum_j \dot{m}_j (h_T)$$

\dot{E}_t : Puissance totale échangée avec le milieu extérieur

$\dot{\varphi}$: Puissance thermique échangée avec le milieu extérieur

\dot{W}_t : Puissance technique échangée avec le milieu extérieur

$\dot{m}_i \dot{m}_j$: Débit massique de fluide

En considérant un régime permanent : $\frac{dE_t}{dt} = \dot{E}_t = 0$

D'où : $\dot{\varphi} + \dot{W}_t = \dot{m}(h_{Ts} - h_{Te}) = \dot{m}\Delta h_T$

3-3 Bilan énergétique du cycle de réfrigération: [19]

3-3-1 Cycle de Claude

a-Compresseur :

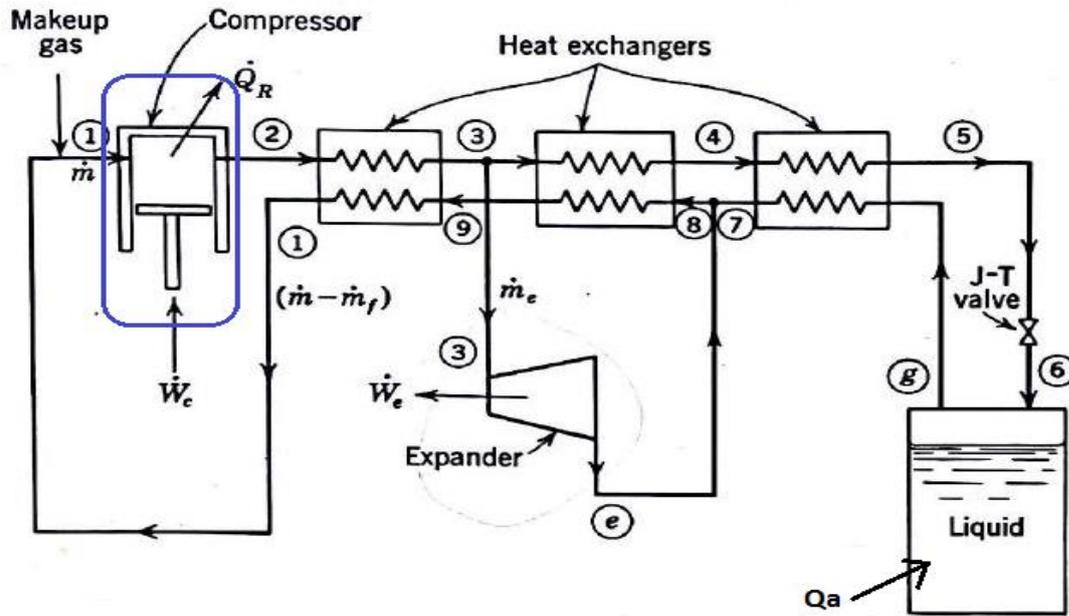


Figure 3- 3: volume de contrôle C1

En considère un régime permanent : $\dot{E} = \dot{S}$

$$\frac{dE_t}{dt} = \dot{E}_t = \dot{\phi} + \dot{W}_t + \sum_i \dot{m}_i (h_T) + \sum_j \dot{m}_j (h_T)$$

$$\frac{dE_t}{dt} = \dot{E}_t = 0$$

Donc : avec $\dot{W}_t = \dot{W}_c$

$$\dot{W}_c + \dot{\phi}_R + \sum_i \dot{m}_i (h_T) + \sum_j \dot{m}_j (h_T) = 0$$

$$\dot{W}_c - \dot{\phi}_R + \dot{m}h_1 - \dot{m}h_2 = 0$$

$$\dot{W}_c = \dot{m}(h_2 - h_1) + \dot{\phi}_R$$

$$\text{On a : } \dot{\phi}_R = \dot{m}T_1(S_1 - S_2)$$

$$\dot{W}_c = \dot{m}(h_2 - h_1) + \dot{m}T_1(S_2 - S_1)$$

$$\boxed{\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}} = T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2)}$$

b-Expander :

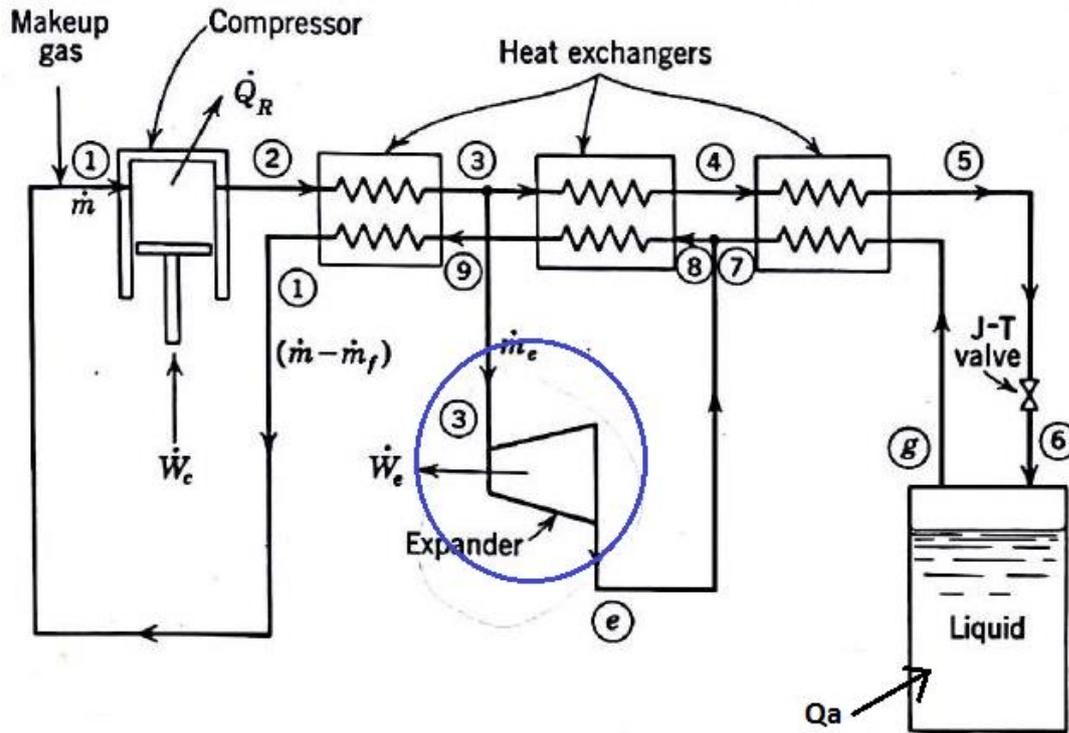


Figure 3- 4: volume de contrôle C2.

En considère un régime permanent : $\dot{E} = \dot{S}$

$$\frac{dE_t}{dt} = \dot{E}_t = \dot{\phi} + \dot{W}_t + \sum_i \dot{m}_i (h_T) + \sum_j \dot{m}_j (h_T)$$

$$\frac{dE_t}{dt} = \dot{E}_t = 0$$

Donc : avec $\dot{\phi} = 0$ adiabatique, $\dot{W}_t = \dot{W}_e$

$$\dot{W}_e + \sum_i \dot{m}_i (h_T) + \sum_j \dot{m}_j (h_T) = 0$$

$$\dot{W}_e + \dot{m}h_3 - \dot{m}_e h_e = 0$$

On devise sur \dot{m}

$$\frac{\dot{W}_e}{\dot{m}} = \frac{\dot{m}_e}{\dot{m}} (h_e - h_3)$$

Avec : $x = \frac{\dot{m}_e}{\dot{m}}$

$$\boxed{\frac{\dot{W}_e}{\dot{m}} = X(h_e - h_3)}$$

c- Expression de l'effet de réfrigération :

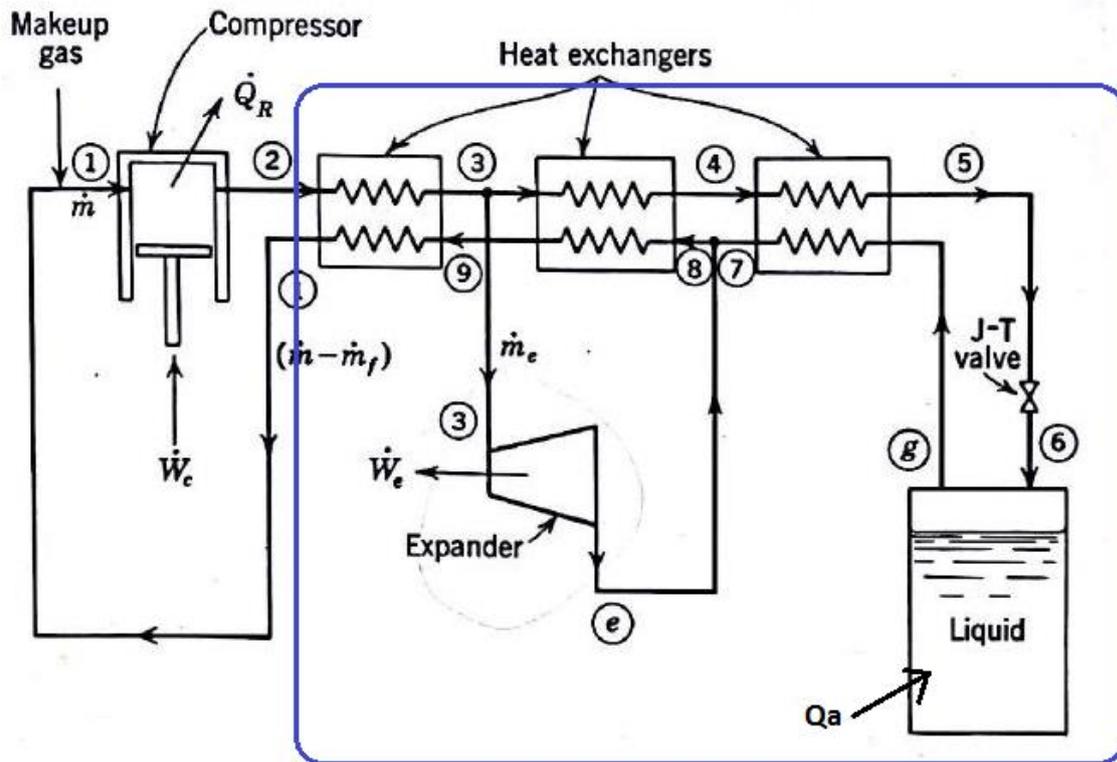


Figure 3- 5: volume de contrôle C3.

$$\dot{W}_e + \dot{\phi}_a + \sum_i \dot{m}_i (h_T) + \sum_j \dot{m}_j (h_T) = 0$$

$$\dot{\phi}_a + \dot{m}_e (h_e - h_3) = \dot{m} (h_1 - h_2)$$

On devise sur \dot{m} :

$$\frac{\dot{\phi}_a}{\dot{m}} = (h_1 - h_2) + X(h_3 - h_e)$$

d- Le travail net :

$$W_{net} = \sum \dot{W} = \dot{W}_c + \dot{W}_e$$

$$\frac{W_{net}}{\dot{m}} = \frac{\dot{W}_c}{\dot{m}} + \frac{\dot{W}_e}{\dot{m}}$$

$$\frac{W_{net}}{\dot{m}} = T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2) + X(h_e - h_3)$$

•Travail réel

$$W_{réel \text{ de compression}} = \frac{W_{compression \text{ theorique}}}{\eta_{isot}}$$

$$W_{\text{isentropique réel}} = W_{\text{isentropique théorique}} \times \eta_{\text{isent}}$$

e- Le coefficient de performance COP

Le coefficient de performance COP est défini comme étant la quantité de chaleur cédée par la source froide et par unité de travail consommé.

- $$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_a / \dot{m}}{\dot{W}_{\text{net}} / \dot{m}}$$

- $$\text{COP}_{\text{ideal}} = -\frac{Q_f}{W} = -\frac{mT_f(S_4 - S_3)}{mT_f(S_4 - S_3) \times mT_c(S_1 - S_2)} = -\frac{1}{1 - \frac{T_c(S_1 - S_2)}{T_f(S_4 - S_3)}} = \frac{T_f}{T_c - T_f}$$

f- Figure of Merit FOM

$$\text{FOM} = \frac{\text{COP}}{\text{COP}_{\text{ideal}}}$$

3-3-2 cycle de Collins : [19]

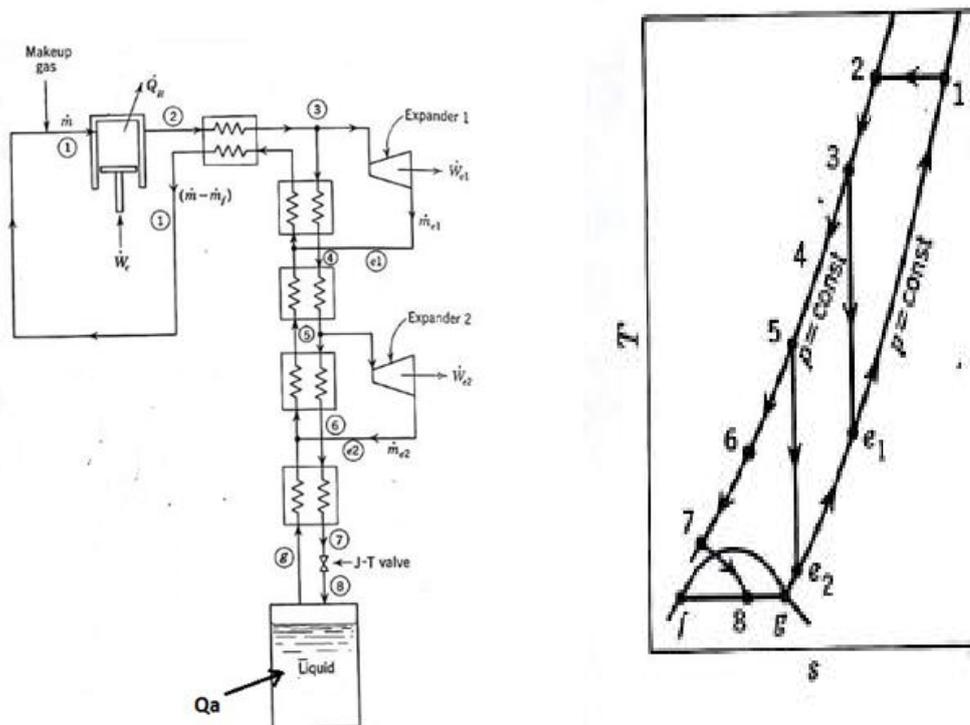


Figure 3- 6: diagramme énergétique et diagramme T-S de cycle de Collins.

a-Expression de l'effet de réfrigération :

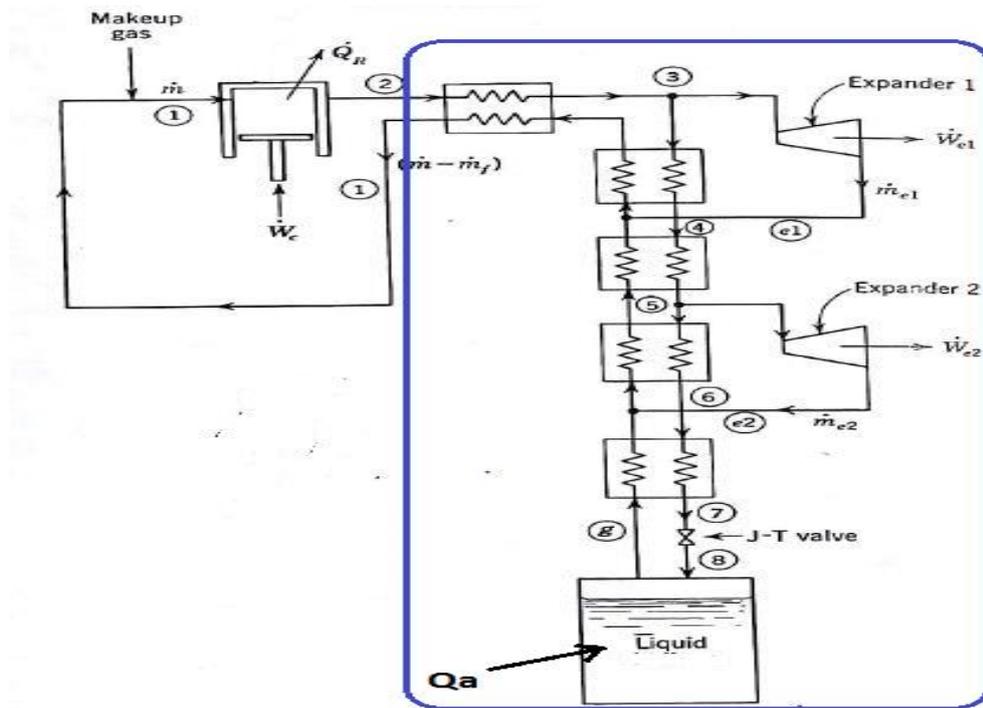


Figure 3- 7: volume de contrôle C4.

$$\dot{W}_{e1} + \dot{W}_{e2} + \dot{\phi}_a + \sum_i \dot{m}_i (h_T) + \sum_j \dot{m}_j (h_T) = 0$$

On a : $\dot{W}_{e1} = \dot{m}_{e1}(h_{e1} - h_3)$ et $\dot{W}_{e2} = \dot{m}_{e2}(h_{e2} - h_5)$

$$\dot{\phi}_a + \dot{m}_{e1}(h_{e1} - h_3) + \dot{m}_{e2}(h_{e2} - h_5) = \dot{m}(h_1 - h_2)$$

On divise par \dot{m} , avec $\frac{\dot{m}_{e1}}{\dot{m}} = X1$ et $\frac{\dot{m}_{e2}}{\dot{m}} = X2$

$$\frac{\dot{\phi}_a}{\dot{m}} = (h_1 - h_2) + X1(h_3 - h_{e1}) + X2(h_5 - h_{e2})$$

Pour n vases d'expansion :

$$\frac{\dot{\phi}_a}{\dot{m}} = (h_1 - h_2) + \sum_j X_j (h_{2j+1} - h_{ej})$$

b- le travail net :

$$W_{net} = \sum \dot{W} = \dot{W}_c + \dot{W}_{e1} + \dot{W}_{e2}$$

$$\frac{W_{net}}{\dot{m}} = \frac{\dot{W}_c}{\dot{m}} + \frac{\dot{W}_{e1}}{\dot{m}} + \frac{\dot{W}_{e2}}{\dot{m}}$$

$$\frac{W_{net}}{\dot{m}} = T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2) + X1(h_{e1} - h_3) + X2(h_{e2} - h_5)$$

Pour n vases d'expansion :

$$\frac{W_{net}}{\dot{m}} = T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2) + \sum_j^n X_j(h_{ej} - h_{2j+1})$$

Chapitre 4
Etude paramétrique du
cycle de réfrigération de
claude

4-1 Problématique

Un réfrigérateur cryogénique de claudé utilise l'azote comme un gaz de travail

Les conditions de fonctionnement sont :

- $P_1 = 1 \text{ bar}$
- $T_1 = 290 \text{ K}$ $T_f = 80 \text{ K}$
- $X = m_e/m = 0.1$

Travail demande :

Utiliser le diagramme T-S de la littérature pour les fluides cryogéniques (Azote).

- Tracez le cycle de réfrigération dans les diagrammes T-S.
- Calculer les effets de réfrigération, le COP, ainsi que le FOM pour un x donné ($x = m_e/m$).
- Pour P_1 donnée, faites varier P_2 et tracer la courbe donnant le travail de réfrigération en fonction de x pour un fluide donné. X varie de 0 à 0.2 par pas de 0.05.
- Pour P_1 donnée, faites varier P_2 et tracer la courbe donnant l'effet de réfrigération en fonction de x pour un fluide donné. X varie de 0 à 0.2 par pas de 0.05.
- Déterminer le travail de réfrigération ainsi que le FOM en fonction de x.

Dans le cas réel on a $\eta_{\text{isot}} = \frac{W \text{ de compression théorique}}{W \text{ de compression réel}}$, η_{isot} variant de 0,95 à 1

- Déterminer le travail réel pour η_{isot} donné

Dans le cas réel $\eta_{\text{isent}} = \frac{W \text{ isentropique réel}}{W \text{ isentropique théorique}}$, η_{isent} variant de 0,98 à 1

- Déterminer le travail isentropique réel pour η_{isot} donné

4-1-1 Influence de pression sur les paramètres de cycle de claudé

4-1-1-1 pour $P_2 = 10 \text{ bars}$:

- le cycle de réfrigération dans les diagrammes T-S :

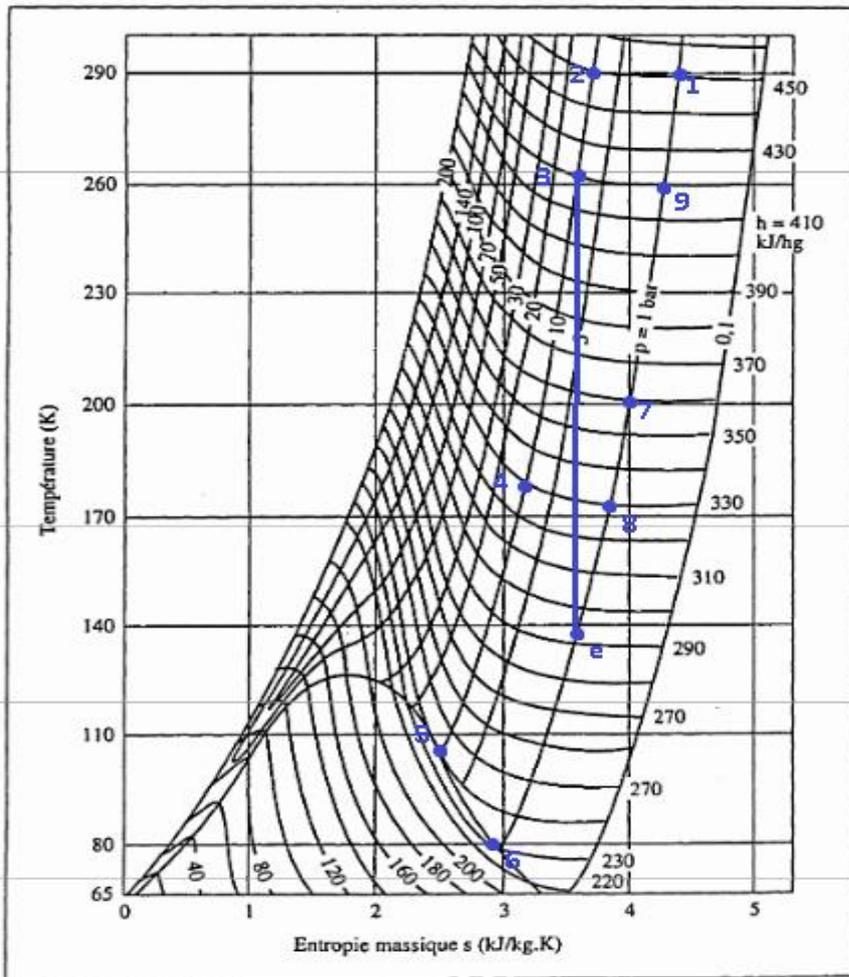


Diagramme de l'azote.

Figure 4- 1: le cycle de réfrigération dans les diagrammes T-S pour P= 10 bars

- les paramètre de cycle (H-S)

Point	H (KJ/KG)	S (KJ/Kg .K)
1	451	4.38
2	449	3.7
3	420	3.58
e	292.5	3.58

Tableau 4- 1: les paramètre (H-S) des points de cycle de claudé pour P2 = 10 bars

- L'effet de réfrigération :

$$\frac{\varphi_a}{m} = (h_1 - h_2) + X(h_3 - h_e)$$

$$\frac{\varphi_a}{m} = (451 - 449) + 0.1(420 - 292.5)$$

$$\frac{\varphi_a}{m} = 14.75 \text{ KJ/Kg}$$

• **Travail de réfrigération :**

$$\frac{W_{net}}{m} = T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2) + X(h_e - h_3)$$

$$\frac{W_{net}}{m} = 290(4.38 - 3.7) - (451 - 449) + 0.1(292.5 - 420)$$

$$\frac{W_{net}}{m} = 182.45 \text{ KJ/Kg}$$

• **Le coefficient de performance COP :**

$$COP = \frac{\frac{\varphi_a}{m}}{\frac{W_{net}}{m}}$$

$$COP = \frac{14.75}{182.45}$$

$$COP = 0.080$$

$$COP_{ideal} = \frac{T_f}{T_c - T_f}$$

$$COP_{ideal} = \frac{80}{290 - 80}$$

$$COP_{ideal} = 0.38$$

• **Figure of Merit FOM :**

$$FOM = \frac{COP}{COP_{ideal}}$$

$$FOM = \frac{0.080}{0.38}$$

$$FOM = 0.21 = 21 \%$$

• **Le travail de réfrigération ainsi que le FOM en fonction de x :**

Le travail de réfrigération

$$\frac{W_{net}}{m} = T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2) + X(h_e - h_3)$$

$$\frac{W_{net}}{m} = 290(4.38 - 3.7) - (451 - 449) + X(292.5 - 420)$$

$$\frac{W_{net}}{m} = 195.2 - 127.5X$$

Le FOM

$$FOM = \frac{COP}{COP_{ideal}}$$

$$FOM = \frac{\frac{\frac{\varphi_a}{m}}{\frac{W_{net}}{m}}}{COP_{ideal}}$$

$$FOM = \frac{2 + 127.5X}{195.2 - 127.5X} / 0.38$$

• le travail réel pour η_{isot} et η_{isent} donné :

Pour $\eta_{isot} = 0.95$ et $\eta_{isent} = 1$

$$\frac{W_C \text{ réel}}{m} = \frac{\frac{W_C}{m}}{\eta_{isot}}$$

$$\frac{W_e \text{ réel}}{m} = \frac{W_e}{m} \times \eta_{isent}$$

$$\frac{W_{net \text{ réel}}}{m} = \frac{T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2)}{\eta_{isot}} + X(h_e - h_3) \eta_{isent}$$

$$\frac{W_{net \text{ réel}}}{m} = \frac{290(4.38 - 3.7) - (451 - 449)}{0.95} + 0.1(292.5 - 420)$$

$$\frac{W_{net \text{ réel}}}{m} = 192.72 \text{ KJ/Kg}$$

Pour $\eta_{isent} = 0.98$ et $\eta_{isot} = 1$

$$\frac{W_{net \text{ réel}}}{m} = 290(4.38 - 3.7) - (451 - 449) + 0.1(292.5 - 420) \times 0.98$$

$$\frac{W_{net \text{ réel}}}{m} = 182.705 \text{ KJ/Kg}$$

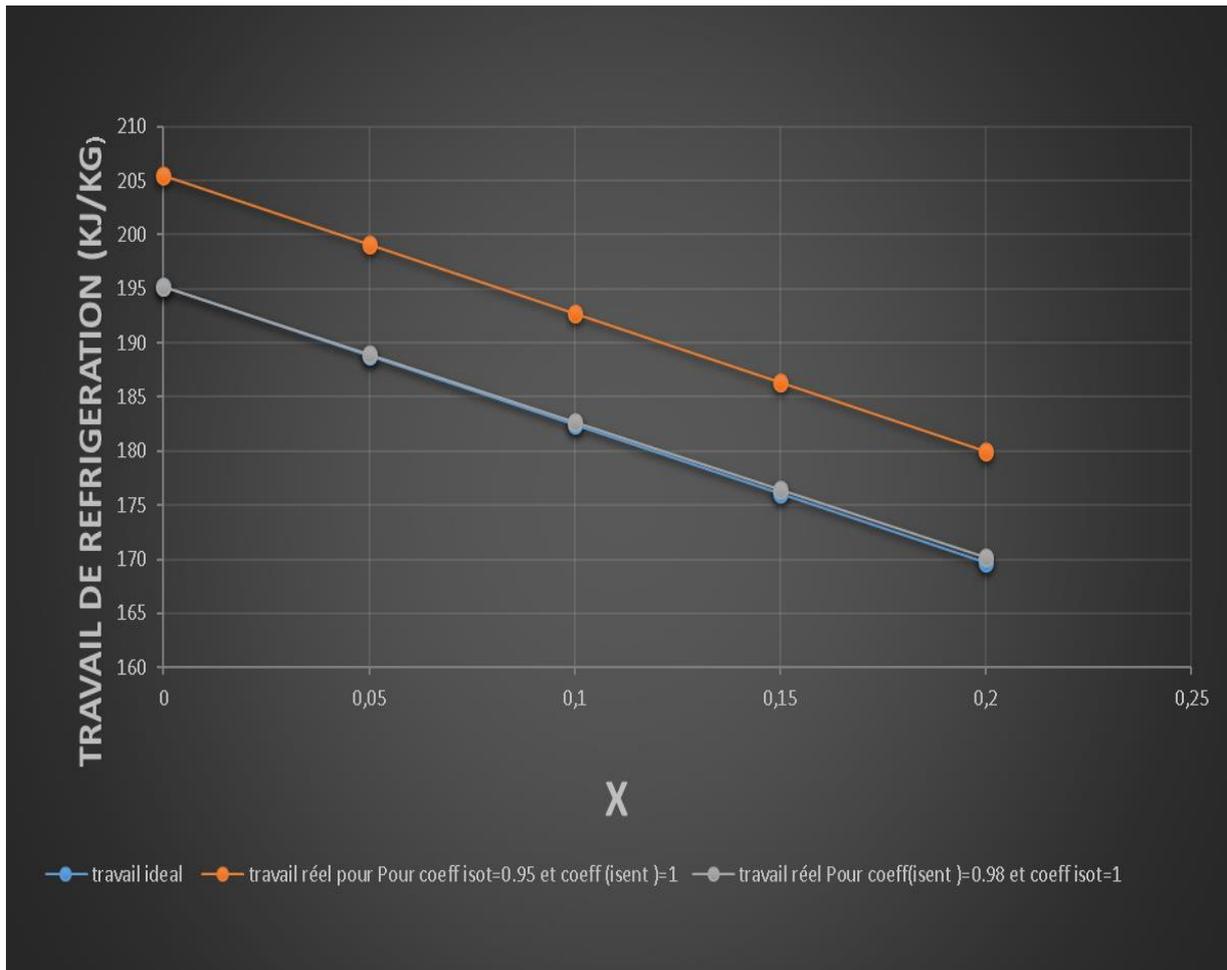


Figure 4- 2 : diagramme de travail réel et idéal de réfrigération on fonction X pour P2 = 10 bars

4-1-1-1 Pour P₂ = 20 bars :

- le cycle de réfrigération dans les diagrammes T-S :

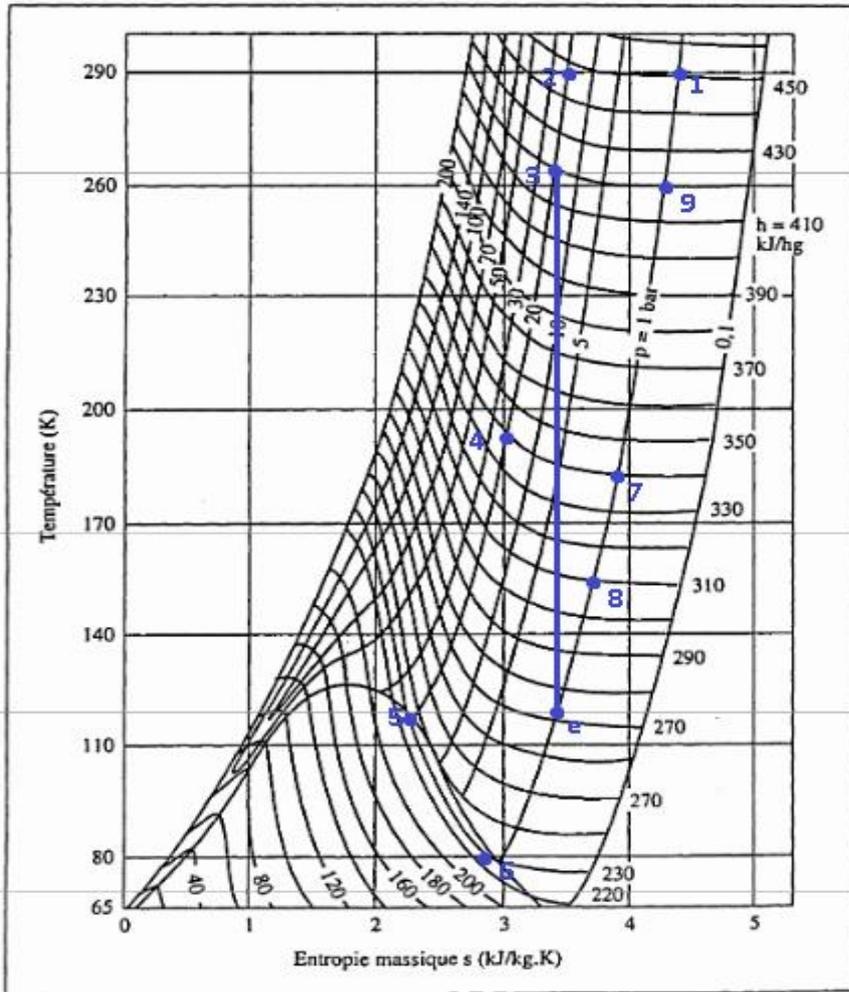


Diagramme de l'azote.

Figure 4- 3:le cycle de réfrigération dans les diagrammes T-S pour P= 20 bars

- les paramètre de cycle (H-S)

Point	H (KJ/KG)	S (KJ/Kg .K)
1	451	4.38
2	447	3.54
3	420	3.42
e	272.5	3.42

Tableau 4- 2: les paramètre (H-S) des points de cycle de clude pour P2 = 20 bars

- L'effet de réfrigération :

$$\frac{\varphi_a}{m} = (h_1 - h_2) + X(h_3 - h_e)$$

$$\frac{\varphi_a}{m} = (451 - 447) + 0.1(420 - 272.5)$$

$$\frac{\varphi_a}{m} = 18.75 \text{ KJ/Kg}$$

• **Travail de réfrigération :**

$$\frac{W_{net}}{m} = T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2) + X(h_e - h_3)$$

$$\frac{W_{net}}{m} = 290(4.38 - 3.54) - (451 - 447) + 0.1(272.5 - 420)$$

$$\frac{W_{net}}{m} = 224.85 \text{ KJ/Kg}$$

• **Le coefficient de performance COP :**

$$COP = \frac{\frac{\varphi_a}{m}}{\frac{W_{net}}{m}}$$

$$COP = \frac{18.75}{224.85}$$

$$COP = 0.083$$

$$COP_{ideal} = \frac{T_f}{T_c - T_f}$$

$$COP_{ideal} = 0.38$$

• **Figure of Merit FOM :**

$$FOM = \frac{COP}{COP_{ideal}}$$

$$FOM = \frac{0.083}{0.38}$$

$$FOM = 0.22 = 22 \%$$

• **Le travail de réfrigération ainsi que le FOM en fonction de x :**

Le travail de réfrigération

$$\frac{W_{net}}{m} = T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2) + X(h_e - h_3)$$

$$\frac{W_{net}}{m} = 290(4.38 - 3.54) - (451 - 447) + X(272.5 - 420)$$

$$\frac{W_{net}}{m} = 239.6 - 147.5X$$

Le FOM

$$FOM = \frac{COP}{COP_{ideal}}$$

$$FOM = \frac{\frac{\frac{\varphi_a}{m}}{W_{net}}}{COP_{ideal}}$$

$$FOM = \frac{4 + 147.5X}{239.6 - 147.5X} / 0.38$$

• le travail réel pour η_{isot} et η_{isent} donné :

Pour $\eta_{isot} = 0.95$ et $\eta_{isent} = 1$

$$\frac{W_C \text{ réel}}{m} = \frac{W_C}{m} \eta_{isot}$$

$$\frac{W_e \text{ réel}}{m} = \frac{W_e}{m} \times \eta_{isent}$$

$$\frac{W_{net \text{ réel}}}{m} = \frac{T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2)}{\eta_{isot}} + X(h_e - h_3) \eta_{isent}$$

$$\frac{W_{net \text{ réel}}}{m} = \frac{290(4.38 - 3.54) - (451 - 447)}{0.95} + 0.1(272.5 - 420)$$

$$\frac{W_{net \text{ réel}}}{m} = 237.46 \text{ KJ/Kg}$$

Pour $\eta_{isent} = 0.98$ et $\eta_{isot} = 1$

$$\frac{W_{net \text{ réel}}}{m} = 290(4.38 - 3.54) - (451 - 447) + 0.1(272.5 - 420) \times 0.98$$

$$\frac{W_{net \text{ réel}}}{m} = 225.145 \text{ KJ/Kg}$$

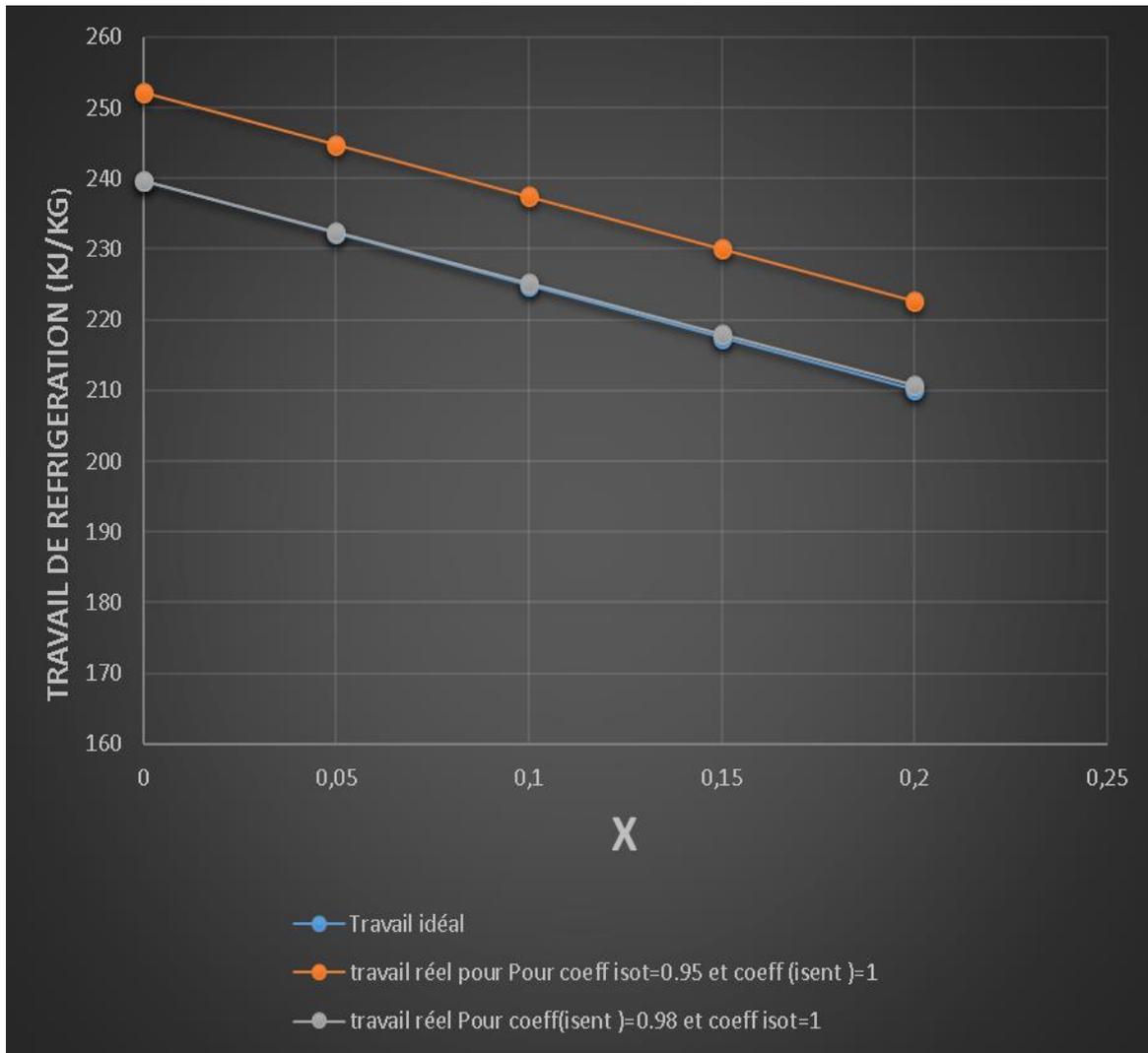


Figure 4- 4:diagramme de travail réel et idéal de refrigeration on fonction X pour P₂ = 20 bars

4-1-1-3 Pour P₂= 30 bars :

- le cycle de réfrigération dans les diagrammes T-S :

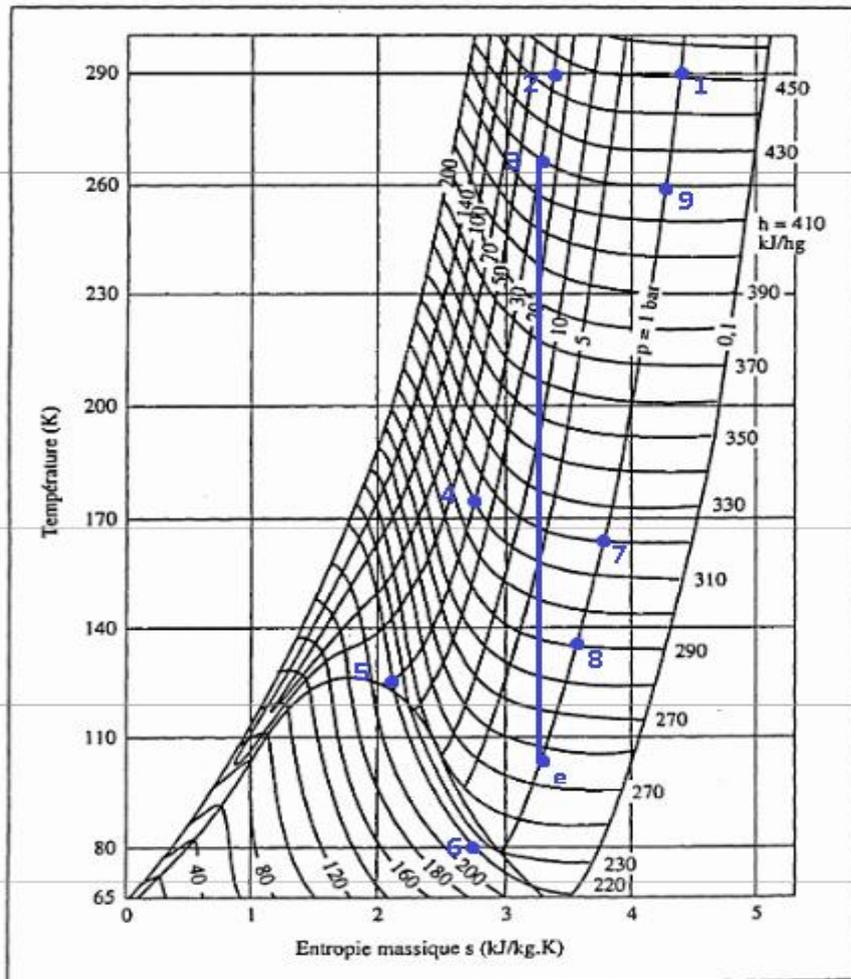


Diagramme de l'azote.

Figure 4- 5:: le cycle de réfrigération dans les diagrammes T-S pour P= 30 bars

- les paramètre de cycle (H-S)

Point	H (KJ/KG)	S (KJ/Kg .K)
1	451	4.38
2	444	3.39
3	420	3.29
e	266	3.29

Tableau 4- 3 : les paramètre (H-S) des points de cycle de claudé pour P2 = 30 bars

- L'effet de réfrigération :

$$\frac{\varphi_a}{m} = (h_1 - h_2) + X(h_3 - h_e)$$

$$\frac{\varphi_a}{m} = (451 - 444) + 0.1(420 - 257.5)$$

$$\frac{\varphi_a}{m} = 23.25 \text{ KJ/Kg}$$

• **Travail de réfrigération :**

$$\frac{W_{net}}{m} = T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2) + X(h_e - h_3)$$

$$\frac{W_{net}}{m} = 290(4.38 - 3.39) - (451 - 444) + 0.1(257.5 - 420)$$

$$\frac{W_{net}}{m} = 263.85 \text{ KJ/Kg}$$

• **Le coefficient de performance COP :**

$$COP = \frac{\frac{\varphi_a}{m}}{\frac{W_{net}}{m}}$$

$$COP = \frac{23.25}{263.85}$$

$$COP = 0.088$$

$$COP_{ideal} = \frac{T_f}{T_c - T_f}$$

$$COP_{ideal} = \frac{80}{290 - 80}$$

$$COP_{ideal} = 0.38$$

• **Figure of Merit FOM :**

$$FOM = \frac{COP}{COP_{ideal}}$$

$$FOM = \frac{0.088}{0.38}$$

$$FOM = 0.23 = 23 \%$$

• **Le travail de réfrigération ainsi que le FOM en fonction de x :**

Le travail de réfrigération

$$\frac{W_{net}}{m} = T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2) + X(h_e - h_3)$$

$$\frac{W_{net}}{m} = 290(4.38 - 3.39) - (451 - 444) + X(257.5 - 420)$$

$$\frac{W_{net}}{m} = 280.1 - 162.5X$$

Le FOM

$$FOM = \frac{COP}{COP_{ideal}}$$

$$FOM = \frac{\frac{\frac{\varphi_a}{m}}{W_{net}}}{COP_{ideal}}$$

$$FOM = \frac{7 + 162.5X}{280.1 - 162.5X} / 0.38$$

• le travail réel pour η_{isot} et η_{isent} donné :

Pour $\eta_{isot} = 0.95$ et $\eta_{isent} = 1$

$$\frac{W_C \text{ réel}}{m} = \frac{W_C}{m \eta_{isot}}$$

$$\frac{W_e \text{ réel}}{m} = \frac{W_e}{m} \times \eta_{isent}$$

$$\frac{W_{net \text{ réel}}}{m} = \frac{T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2)}{\eta_{isot}} + X(h_e - h_3) \eta_{isent}$$

$$\frac{W_{net \text{ réel}}}{m} = \frac{290(4.38 - 3.39) - (451 - 444)}{0.95} + 0.1(257.5 - 420)$$

$$\frac{W_{net \text{ réel}}}{m} = 278.59 \text{ KJ/Kg}$$

Pour $\eta_{isent} = 0.98$ et $\eta_{isot} = 1$

$$\frac{W_{net \text{ réel}}}{m} = 290(4.38 - 3.39) - (451 - 444) + 0.1(257.5 - 420) \times 0.98$$

$$\frac{W_{net \text{ réel}}}{m} = 264.175 \text{ KJ/Kg}$$

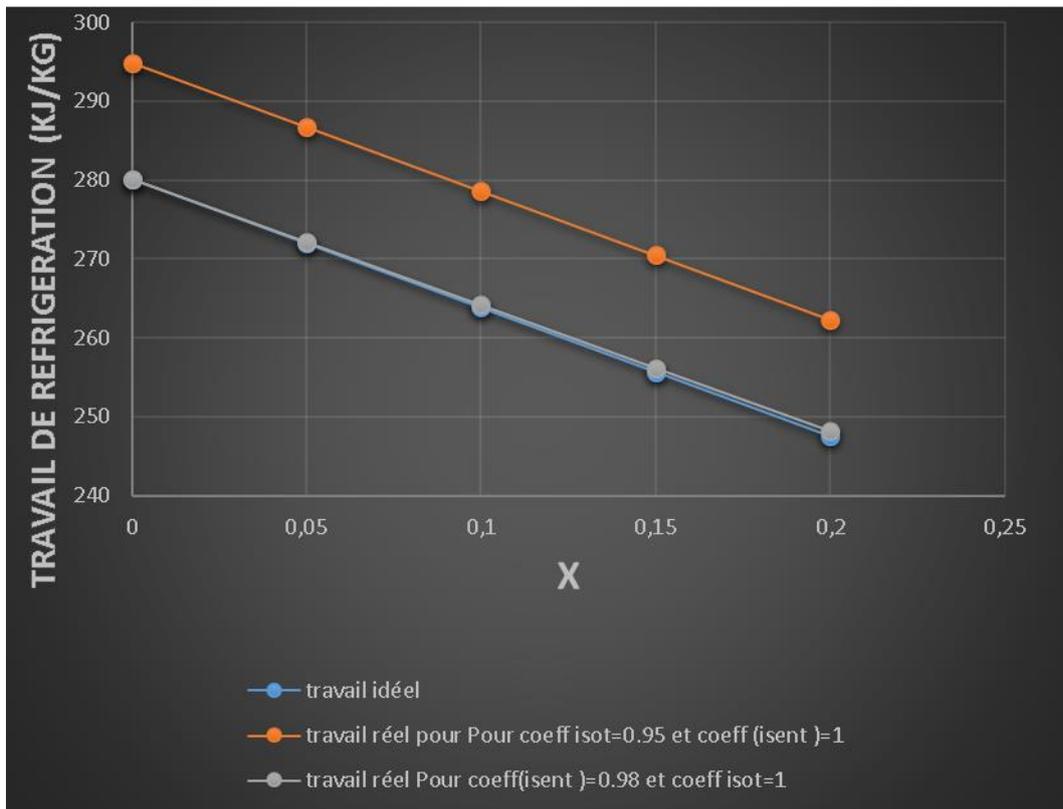


Figure 4- 6: diagramme de travail réel et idéal de refrigeration on fonction X pour P₂ = 30 bars

4-1-1-2 Pour P₂ = 50 bar :

- le cycle de réfrigération dans les diagrammes T-S :

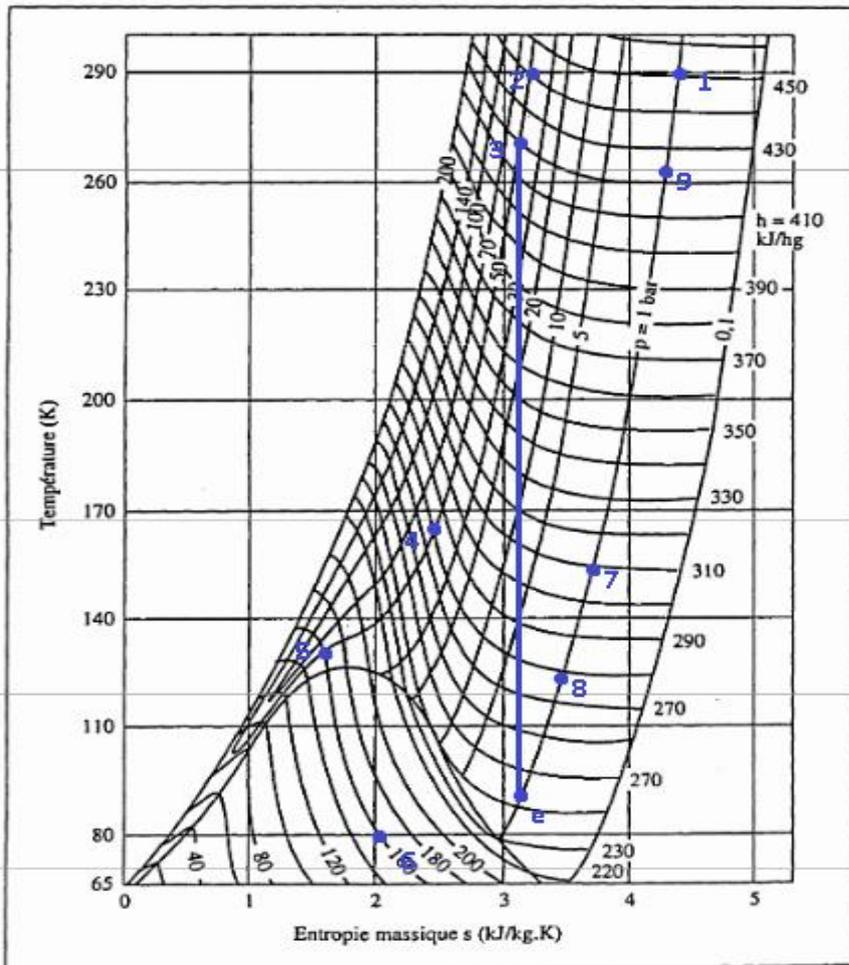


Diagramme de l'azote.

Figure 4- 7: le cycle de réfrigération dans les diagrammes T-S pour P2= 50 bars

- les paramètre de cycle (H-S) :

Point	H (KJ/KG)	S (KJ/Kg .K)
1	451	4.38
2	440	3.25
3	420	3.125
e	241	3.125

Tableau 4- 3: les paramètre (H-S) des points de cycle de claudé pour P2 = 50 bar

- L'effet de réfrigération :

$$\frac{\varphi_a}{m} = (h_1 - h_2) + X(h_3 - h_e)$$

$$\frac{\varphi_a}{m} = (451 - 440) + 0.1(420 - 241)$$

$$\frac{\varphi_a}{m} = 28.9 \text{ KJ/Kg}$$

- Travail de réfrigération :

$$\frac{W_{net}}{m} = T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2) + X(h_e - h_3)$$

$$\frac{W_{net}}{m} = 290(4.38 - 3.25) - (451 - 440) + 0.1(241 - 420)$$

$$\frac{W_{net}}{m} = 298.8 \text{ KJ/Kg}$$

- Le coefficient de performance COP :

$$COP = \frac{\frac{\varphi_a}{m}}{\frac{W_{net}}{m}}$$

$$COP = \frac{28.9}{298.8}$$

$$COP = 0.097$$

$$COP_{ideal} = \frac{T_f}{T_c - T_f}$$

$$COP_{ideal} = \frac{80}{290 - 80}$$

$$COP_{ideal} = 0.38$$

- Figure of Merit FOM :

$$FOM = \frac{COP}{COP_{ideal}}$$

$$FOM = \frac{0.097}{0.38}$$

$$FOM = 0.255 = 25.5 \%$$

- Le travail de réfrigération ainsi que le FOM en fonction de x :

Le travail de réfrigération

$$\frac{W_{net}}{m} = T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2) + X(h_e - h_3)$$

$$\frac{W_{net}}{m} = 290(4.38 - 3.25) - (451 - 440) + X(231 - 390)$$

$$\frac{W_{net}}{m} = 316.7 - 159X$$

Le FOM

$$FOM = \frac{COP}{COP_{ideal}}$$

$$FOM = \frac{\frac{\frac{\varphi_a}{m}}{W_{net}}}{COP_{ideal}}$$

$$FOM = \frac{11 + 159X}{316.7 - 159X} / 0.38$$

• le travail réel pour η_{isot} et η_{isent} donné :

Pour $\eta_{isot} = 0.95$ et $\eta_{isent} = 1$

$$\frac{W_C \text{ réel}}{m} = \frac{W_C}{m} \eta_{isot}$$

$$\frac{W_e \text{ réel}}{m} = \frac{W_e}{m} \times \eta_{isent}$$

$$\frac{W_{net \text{ réel}}}{m} = \frac{T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2)}{\eta_{isot}} + X(h_e - h_3) \eta_{isent}$$

$$\frac{W_{net \text{ réel}}}{m} = \frac{290(4.38 - 3.25) - (451 - 440)}{0.95} + 0.1(241 - 420)$$

$$\frac{W_{net \text{ réel}}}{m} = 315.47 \text{ KJ/Kg}$$

Pour $\eta_{isent} = 0.98$ et $\eta_{isot} = 1$

$$\frac{W_{net \text{ réel}}}{m} = 290(4.38 - 3.25) - (451 - 440) + 0.1(241 - 420) \times 0.98$$

$$\frac{W_{net \text{ réel}}}{m} = 299.158 \text{ KJ/Kg}$$

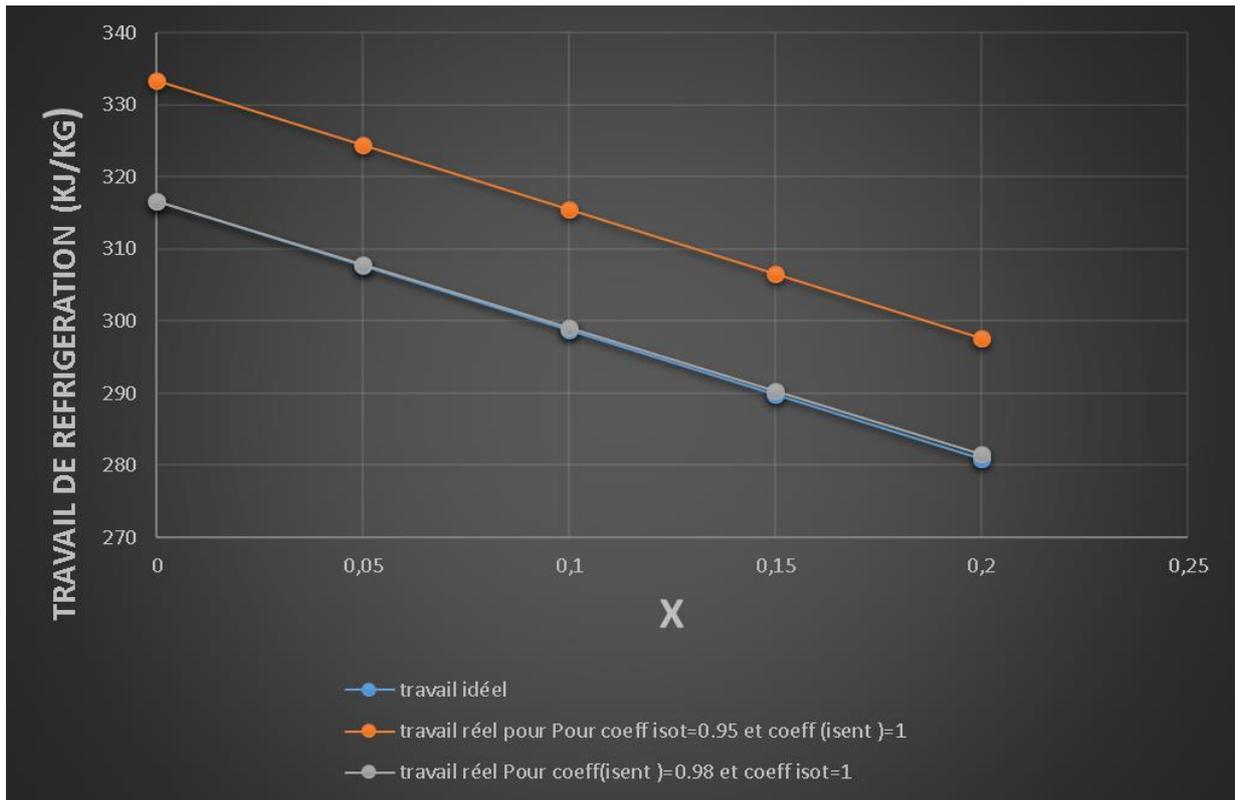


Figure 4- 8:diagramme de travail réel et idéal de refrigeration on fonction X pour P2 = 50 bars

- diagramme d'effet de refrigeration en fonction de X par rapport à chaque pression :

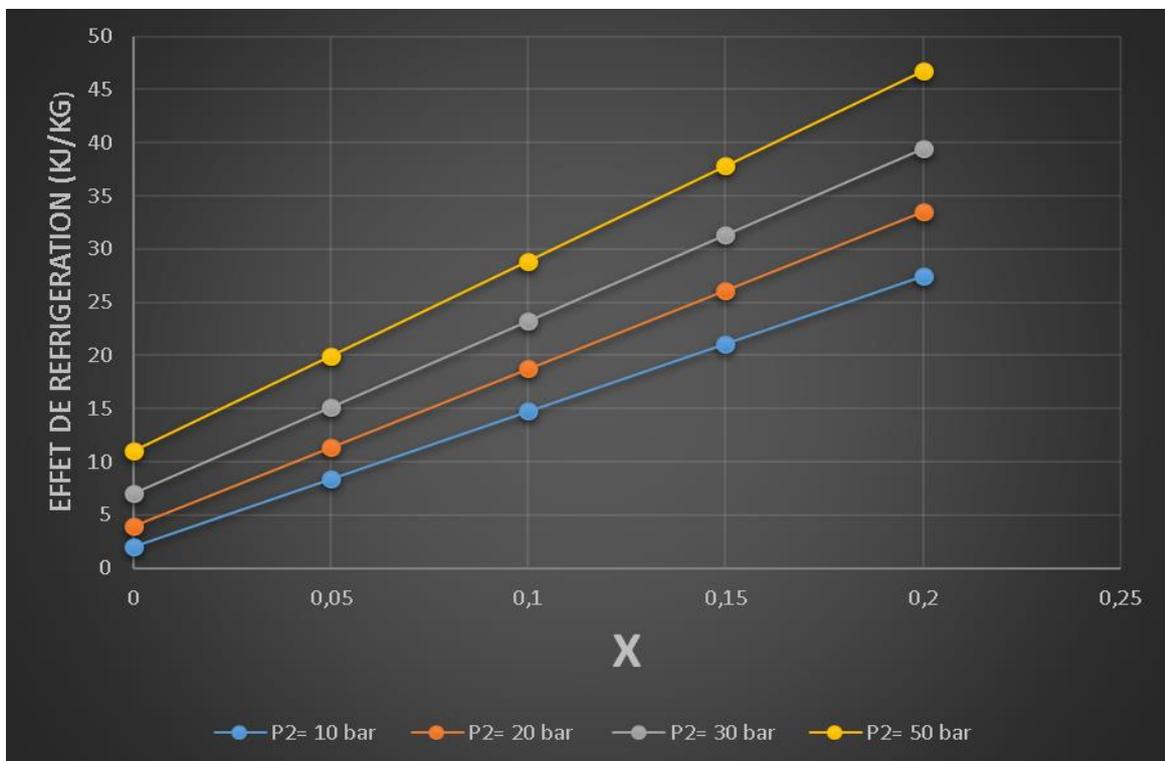


Figure 4- 9: diagramme d'effet de refrigeration en fonction de X par rapport à chaque pression

- diagramme de coefficient de performance COP en fonction de X par rapport à chaque pression :

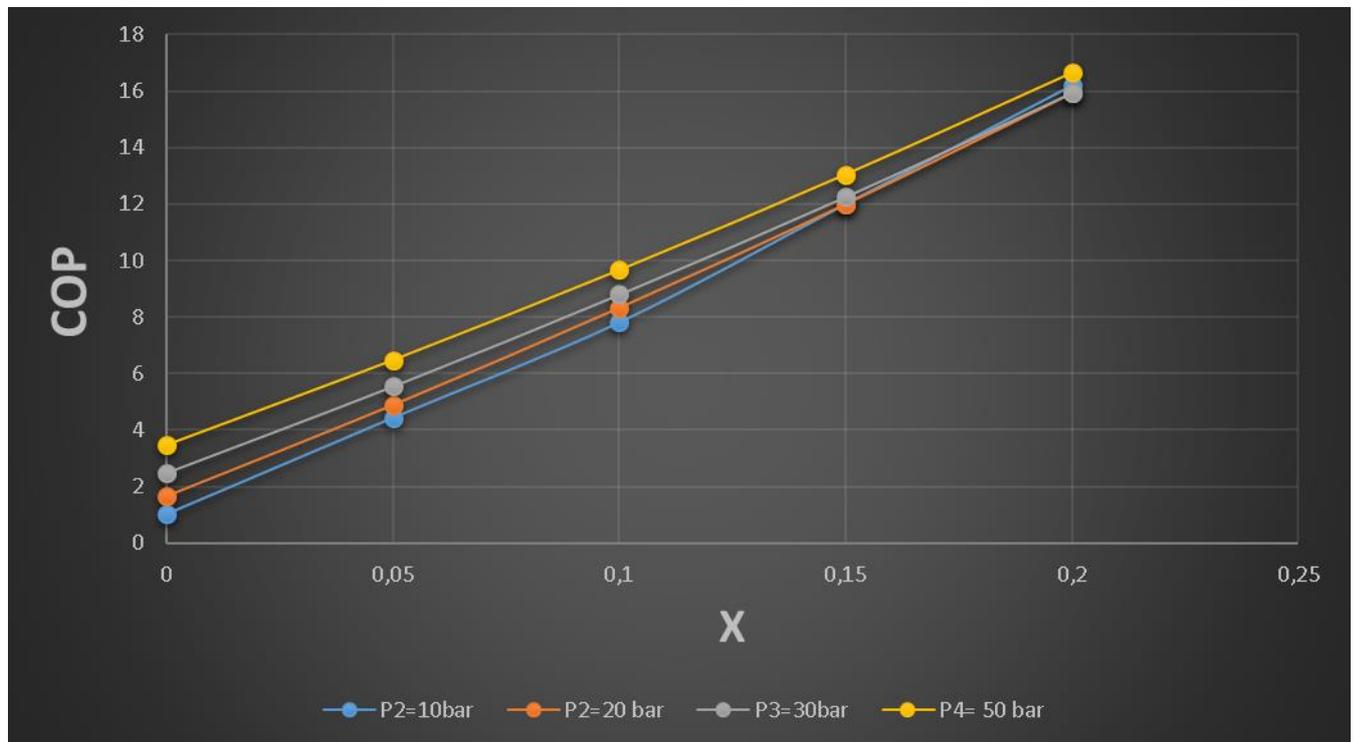


Figure 4- 10: diagramme COP en fonction de X par rapport à chaque pression

4-1-2 Discussion des résultats

- D'après les figures (4-2) (4-4) (4-6) (4-8), nous voyons le travail de réfrigération idéal et réel augmente quand on a augmenté la pression P₂ de 10 à 50 bars ; par contre dans chaque figure de chaque pression on a vu que les travaux diminuent quand on a augmenté les valeurs de X.
- De ces figures aussi on a vu que le travail réel isotherme est plus grand que le travail idéal et le travail réel isentropique ; le travail réel isentropique et le travail idéal si proches l'une de l'autre que les deux courbes se superposent presque.
- D'après la figure (4-9) on a vu l'effet de réfrigération augmente chaque fois on a augmenté la pression P₂, il augmente aussi chaque fois on a augmenté la valeur de X.
- D'après la figure (4-10) on a vu que le coefficient de performance augmente chaque fois on a augmenté la pression P₂ il augmente aussi chaque fois on a augmenté la valeur de X.
- D'après les calculs que nous avons faits ont vu que le FOM augmente chaque fois on a augmenté la pression P₂.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Dans cette mémoire on a fait une étude thermodynamique très détaillée en se basant sur les paramètres influents sur le système de réfrigération cryogénique de Claude tels que l'effet de réfrigération ainsi que le FOM. L'effet de réfrigération ainsi que le travail de réfrigération sont très sensibles aux paramètres η_{isot} et η_{isen} ainsi qu'à l'étude des paramètres influents $[X = m_e/m]$ sur l'effet de réfrigération et le FOM.

Avec cette étude et d'après les résultats on a conclu que :

La pression P_2 et la valeur de X sont des paramètres influents sur le FOM, COP, l'effet de réfrigération et le travail de réfrigération.

Le coefficient de compression (isotherme) et le coefficient isentropique η_{isot} et η_{isen} sont des paramètres influents sur le travail de réfrigération, spécialement le coefficient de compression parce que lorsqu'on prend $\eta_{\text{isot}} = 0.95$ nous avons trouvé le travail de réfrigération réel isotherme plus grand que le travail idéal et le travail réel isentropique.

Les diagrammes que nous avons faits sont réalisés par l'Excel on a varié X de 0 à 0.2 par pas de 0.05 pour voir son effet sur le travail de réfrigération et l'effet de réfrigération et le COP, aussi pour voir l'effet de η_{isot} et η_{isen} sur le travail de réfrigération.

Références Bibliographiques

- [1] Air liquide Advanced Technologies l'énergie de la cryogénie et des gaz
- [2] cryogenic systems (second edition) by RANDALL F. BARRON
- [3] PHILIPPE LEBRUN. cryophysique et cryo_ingénieur. CERN. opération européenne pour la recherche nucléaire Bulletin de l'IIF (2003)
- [4] Djelloul Amel. Simulation de cycle de Claude pour la liquéfaction de l'air de l'azote et l'oxygène. Mémoire magister Alger 2006. Constantine
- [5] Technique De l'ingénieur
- [6] HANDBOOK of cryogenic Engineering (1998)
- [7] HASELDEN G.G cryogenic Fundamentals (1998)
- [8] société Amen. techno-science.net ; [en ligne]. (Modifier le 6 juin 2004). Disponible sur : <https://www.techno-science.net/définition/1386.html> (consulté le 16/05/2019)
- [9] A. ARKHARON theory and design of cryogenic system (1981)
- [10] Linde gaz industriels France
- [11] Propriétés des fluides cryogéniques par Christian GIANESE Ingénieur de recherche à l'Institut Néel, CNRS, Grenoble
- [12] « Hélium ». Axis : L'encyclopédie Multimédia Hachette (1993). [Cd-Rom]. Version 1.00.07 © LE LIVRE DE PARIS - HACHETTE 1993
- [13] « Hélium ». Encyclopédie Microsoft Encarta 97 (1996). [Cd-Rom]. © Microsoft Corporation 1996
- [14] l'usine nouvelle L'EXPO permanente
- [15] I.U.T. de Saint-Omer Dunkerque Département Génie Thermique et énergie .
- [16] Le froid et ses applications dans l'industrie du gaz – collection des techniques gazières association technique de l'industrie du gaz en France.
- [17] Fanny CLAVEL Modélisation et contrôle d'un réfrigérateur cryogénique : Application à la station 800W à 4.5K du CEA Grenoble , DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE
- [18] J. C. Boissin et al. Cryogénie : mise en œuvre des basses températures, Techniques de l'ingénieur, traité Génie énergétique
- [19] cours cryogénie M. benkedda
- [20] AMIRAT MOHAMED CHERIF ; ETUDE THERMODYNAMIQUE ET SIMULATION DU CYCLE DE LIQUEFACTION D'AZOTE ; UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA ; ANNEE 2017/2018
- [21] R.R. Conte, Eléments de cryogénie, Masson et cie, (1970).
- [23] K.D. Williamson, F.J. EDESKUTY, Liquid Cryogens. Vol I: Theory and Equipment Vol III

Annexe

Annexe 1

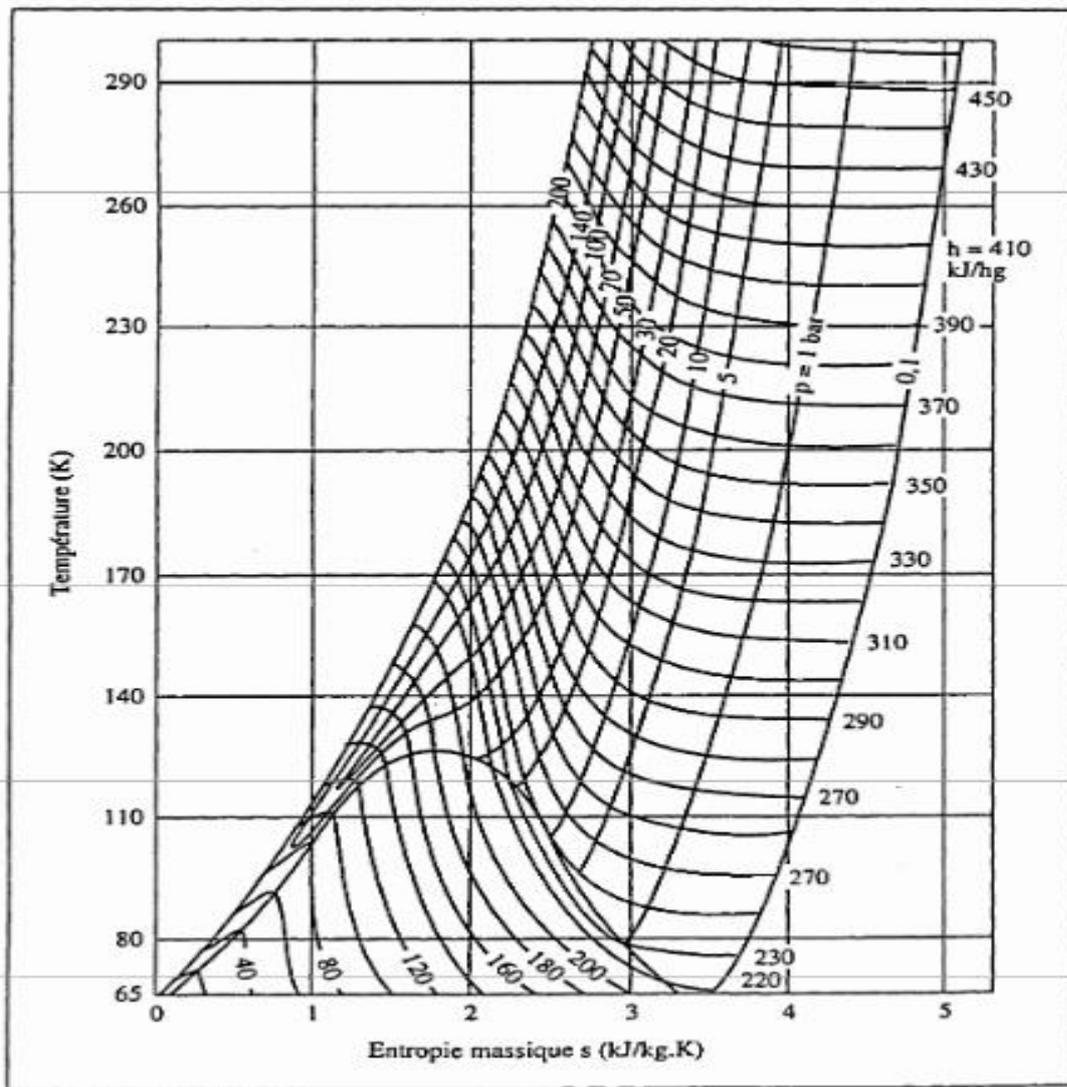


Diagramme de l'azote.

Annexe 2

