

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



**UNIVERSITE DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE**

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

Titre du Sujet :
**L'influence du travail des vases d'expansion sur l'effet de
réfrigération**

Promoteur :

Pr. BENKHEDA YOUNES

Réalisé par :

SAIB OUALID
GUETTAS CHEMSEDDINE

Année : 2022/2023

REMERCIEMENT

Nous souhaitons exprimer nos sincères remerciements et notre profond respect à notre promoteur, le Professeur **YOUNES BENKHADA**, pour son encadrement et ses conseils inestimables tout au long de cette étude. Son soutien a été essentiel pour acquérir les sources de recherche pertinentes ainsi que les logiciels nécessaires aux simulations.

Nous sommes également reconnaissants envers tous **les enseignants** qui ont déployé tous leurs efforts pour faire de nous des futurs professionnels de l'énergie au cours de notre parcours académique. Leur engagement et leur dévouement ont été inspirants.

Enfin, nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude envers nos parents et nos proches pour leur soutien indéfectible. Nous sommes honorés d'avoir pu bénéficier de toutes ces aides et encouragements, sans lesquels ce travail n'aurait pas été possible.

Dédicace

Je dédie ce travail en signe de reconnaissance et de respect À mes chers parents, Hamid et Fatiha, qui ne cessent de donner avec amour et de fournir le nécessaire pour que je puisse arriver là où je suis aujourd'hui. Que Dieu vous protège et que la réussite soit toujours à ma porte, afin que je puisse vous combler de bonheur.

À ma chère sœur Ikram, pour son appui, ses encouragements et son soutien moral.

À mes frères, Elhachmi et Zinedinne À toute ma famille. et mon amis chérie Aya mon ami Raouf À mon copain, mon binôme Chemseddine , et à toute sa famille. À mes amis et à tous mes camarades de la classe de la promotion de Génie Mécanique (2022-2023).

À toutes les personnes qui m'ont soutenu dans ce travail.

Saib Oualid

Dédicace

Je dédie ce travail en signe de reconnaissance et de respect À mes chers parents, Abderahmane et Djamila, qui ne cessent de donner avec amour et de fournir le nécessaire pour que je puisse arriver là où je suis aujourd'hui. Que Dieu vous protège et que la réussite soit toujours à ma porte, afin que je puisse vous combler de bonheur.

À mes chères sœurs Asma et Affaf pour son appui, ses encouragements et son soutien moral.

À toute ma famille. À mon copain, mon binôme Oualid, et à toute sa famille.

À mes amis et à tous mes camarades de la classe de la promotion de Génie Mécanique (2022-2023). À toutes les personnes qui m'ont soutenu dans ce travail.

Chemseddine Guettas

Résumé

Notre travail concerne à l'influence de travail des vases d'expansion sur l'effet de la réfrigération. L'objectif de ce travail est d'étudier plusieurs vases d'expansion pour montrer l'efficacité et l'augmentation des paramètres performants tels que l'effet de réfrigération, le travail de réfrigération par unité de masse ainsi que le Figure of Merit (FOM).

Une comparaison entre les fluides cryogéniques l'azote et l'oxygène pour chaque vase d'expansion pour différents cycles : Claude, Collins et 3^{ème} vase.

Le logiciel REFPROP est utilisé pour nous donner les paramètres thermodynamiques tels que : l'enthalpie, l'entropie en fonction des conditions spécifiques : la température et la pression.

Mots clé : Cryogénie, Vase d'expansion cycle de Claude cycle de Collins.

Abstract

Our work concerns the working influence of expansion vessels on the effect of refrigeration. The objective of this work is to study several expansion tanks to show the efficiency and the increase in performance parameters such as the refrigeration effect, the refrigeration work per unit mass as well as the Figure of Merit (FOM).

A comparison between the cryogenic fluid's nitrogen and oxygen for each expansion tank for different cycles: Claude, Collins and 3rd tank.

The REFPROP software is used to give us the thermodynamic parameters such as: enthalpy, entropy according to specific conditions: temperature and pressure.

Key words: Cryogenics, Expansion vessel, Claude cycle, Collins cycle

ملخص

يتعلق عملنا بتأثير عمل أوعية التمدد على تأثير التبريد الهدف من هذا العمل هو دراسة العديد من أوعية التمدد لإظهار الكفاءة والزيادة في معايير الأداء مثل تأثير التبريد وعمل التبريد لكل وحدة كتلة بالإضافة إلى رقم الاستحقاق FOM. وتم إجراء مقارنة بين النيتروجين والأكسجين لكل وعاء تمدد كلود ودورة كولينز و3 أوعية و باستخدام برنامج ريفروب لتعطينا المعلمات الحرارية وفقا لظروف محددة مثل درجة الحرارة والضغط. الكلمات المفتاحية المبردة خزان التمدد دورة كلود دورة كولينز

Table des matières

REMERCIEMENT	2
LISTE DES FIGURES:.....	7
LISTE DES TABLES:	9
INTRODUCTION A LA CRYOGENIE :	1
CHAPITRE 1 : NOTIONS SUR LA CRYOGENIE.....	2
INTRODUCTION :	1
1.1 DEFINITION :	1
1.2 HISTORIQUE :	3
1.3 DOMAINE D'UTILISATION DE LA CRYOGENIE :	5
1.3.1 <i>Industrie médicale</i> :	5
1.3.2 <i>Recherche scientifique</i> :	5
1.3.3 <i>Industrie spatiale</i> :	5
1.3.4 <i>Industrie des semi-conducteurs</i> :	6
1.3.5 <i>Gaz naturel liquéfié (GNL)</i> :	6
1.3.6 <i>Givrage ou condensation cryogénique</i> :	6
1.4 TRANSFERTS THERMIQUES :	6
1.4.1 <i>Conduction</i> :	6
1.4.2 <i>Convection</i> :	7
1.4.3 <i>Le rayonnement</i> :	7
1.5 PROPRIETES PHYSIQUES AUX BASSES TEMPERATURES :	8
1.5.1 <i>Propriétés des fluides cryogéniques</i> :	8
1.5.2 <i>Propriétés des matériaux</i> :	9
1.5.3 <i>Propriétés thermiques</i> :	9
1.5.4 <i>Propriétés mécaniques</i> :	9
1.6 STOCKAGE ET TRANSFERT DES FLUIDES CRYOGENIQUES :	9
1.7 ISOLATION DES VASES DE STOCKAGE :	10
1.8 DIFFERENTS TYPES D'ISOLANT :	10
1.8.1 <i>Mousses</i> :	10
1.8.2 <i>Poudres</i> :	11
1.8.3 <i>Super isolant</i> :	11
1.9 IMPORTANCE ET UTILISATION DES GAZ LIQUEFIE :	11
1.9.1 <i>Obtention des gazes pure</i> :	11
1.9.2 <i>Facilité et économie du transport</i> :	12
1.9.3 <i>Usage des bases températures</i> :	12
CONCLUSION	13
CHAPITRE 2 :	14
LES FLUIDES CRYOGENIQUES.....	14
INTRODUCTION	15
1.1 DEFINITION DES FLUIDES CRYOGENIQUES :	16
1.2 PROPRIETES THERMODYNAMIQUES ET PHYSIQUES DES FLUIDES CRYOGENIQUES :	16
1.3 PROPRIETES DES FLUIDES CRYOGENIQUES :	17
1.3 DIFFERENTS TYPES DES FLUIDES CRYOGENIQUES :	17
1.3.1 <i>Gaz inertes</i> :	17
1.3.2 <i>Gaz inflammables</i> :	18
2.4 OXYGENE :	18
2.5 STOCKAGE ET TRANSPORT DE FLUIDES CRYOGENIQUES :	18

2.6 LES TRANSPORT DES FLUIDES CRYOGENIQUES :	18
2.7 AZOTE :	19
2.7.1 Définition :	19
2.7.2 Application de l'azote :	20
2.7.3 Propriétés :	20
2.8 HYDROGENE :	21
2.8.1 Définition :	21
2.8.2 Production de l'hydrogène :	21
2.8.3 Application de l'hydrogène :	22
CONCLUSION :	23
CHAPITRE 03 : VASES D'EXPANSION	24
INTRODUCTION :	25
3.1 ROLE DU VASE D'EXPANSION DANS LE SYSTEME DE REFROIDISSEMENT	26
3.2 TYPES DE VASES D'EXPANSION	27
3.2.1 Vase d'expansion à membrane :	27
3.2.2 Vase d'expansion à flotteur :	27
3.2.3 Vase d'expansion à pression fixe :	27
3.3 AVANTAGES ET LIMITATIONS DE VASE D'EXPANSION	28
3.4 CONCEPTION ET CARACTERISTIQUES DES VASES D'EXPANSION	28
CONCLUSION	29
CHAPITRE4 :	31
CYCLES DE REFRIGERATION CRYOGENIQUES	31
INTRODUCTION :	32
4.1 DETENTE DE JOULE THOMSON :	33
4.2 REFRIGERATEUR DE LINDE HAMPSON :	36
4.3 LE CYCLE DE REFRIGERATION DE CLAUDE	37
4.4 CYCLE DE COLLINS :	42
CHAPITRE 5 : DISCUSSION DES RESULTATS	60
.....	61
5.1 PRESENTATION DU LOGICIEL REFRPROP :	62
5.1.1 Définition de logiciel REFRPROP :	62
5.2 DIAGRAMMES DES PARAMETRES DE PERFORMANCE POUR L'AZOTE POUR DIFFERENTS VASES D'EXPANSION (CYCLE DE CLAUDE, COLLINS, 3 VASES D'EXPANSION) :	74
5.3 DIAGRAMMES DES PARAMETRES DE PERFORMANCE POUR L'OXYGENE POUR DIFFERENTS VASES D'EXPANSION (CYCLE DE CLAUDE, COLLINS, 3EME VASE D'EXPANSION)	76
CONCLUSION GENERALE :	78
REFERENCES ET BIBLIOGRAPH :	79

Liste des figures:

Figure 1: Echelle de température thermodynamique	2
Figure 2 : Différentes étapes vers les basses températures et leurs acteurs.....	4
Figure 3: Bonbonne contenant de l'azote liquide (en anglais, « nitrogène »	21
Figure 4 : Un vase d'expansion dans un circuit de chauffage	25
Figure 5: Vue intérieure du vase d'expansion, rempli d'eau et d'air.....	27
Figure 6: détente de Joule-Thomson7	33
Figure 7: Diagramme énergétique du réfrigérateur de Joule Thomson.....	36
Figure 8: Diagramme énergétique du réfrigérateur de Claude	37
Figure 9: Diagramme T-S de cycle de Claude.....	38
Figure 10: volume de contrôle C1	39
Figure 11: Volume de contrôle C2.....	40
Figure 12: Volume de contrôle C3	41
Figure 13: diagramme énergétique et diagramme T-S de cycle de Collins.....	42
Figure 14: volume de contrôle C4	43
Figure 15: Diagramme de cycles de réfrigération pour 3 ème vase.....	44
Figure 16: diagramme T-S pour cycle de Claude Pour Azote.....	46
Figure 17: Diagramme T-S de cycle de Collins Pour Azote	48
Figure 18: Diagramme T-S pour 3ème vase d'expansion Pour Azote.....	50
Figure 19: Diagramme T-S de cycle de Claude Pour Oxygène.....	53
Figure 20 : Diagramme T-S pour cycle de Collins Pour Oxygène	55
Figure 21: Diagramme T-S pour cycle a 3ème vase d'expansion Pour Oxygène.....	57
Figure 22 : Fenêtre de REFPROP.....	62
Figure 23:: Fenêtre pour choisir le fluide de travail	63
Figure 24 : tableau (Specified state points) pour Azote.....	64
Figure 25: exemple sur fenêtre de Matlab de calcule les paramètres de performance POUR L'azote	64
Figure 26 : diagramme de FOM en fonction de titre massique X1 pour cycle de Claude pour l'azote et l'oxygène	65
Figure 27 : Diagramme de FOM en fonction de Titre massique X2 cycle Collins pour l'azote et	

l'oxygène.....	66
Figure 28: Diagramme de (Figure of Merit) FOM en fonction de X3 pour 3 vases d'expansion pour l'azote et l'oxygène.....	66
Figure 29: diagramme de l'effet de réfrigération en fonction de X1 pour cycle de Claude pour l'azote et l'oxygène.....	67
Figure 30 : diagramme de l'effet de réfrigération en fonction de X2 cycle Collins pour l'azote et l'oxygène.....	68
Figure 31 : diagramme de l'effet de réfrigération en fonction de X3 pour 3 vases d'expansion pour l'azote et l'oxygène.....	68
Figure 32: diagramme de travail de réfrigération en fonction de X1 pour Claude pour l'azote et oxygène	70
Figure 33: diagramme de travail de réfrigération en fonction de X2 cycle de Collins pour l'azote et oxygène	70
Figure 34: diagramme de travail de réfrigération en fonction de X3 pour 3 vases d'expansion pour l'azote et oxygène	71
Figure 35: Diagramme de FOM fonction de titre massique Pour les 3 vases d'expansion (Claude colins et 3eme vases) pour l'azote	74
Figure 36: diagramme de l'effet de réfrigération en fonction de titre massique les 3 vases d'expansion (Claude Collins et 3eme vases) pour l'azote.....	75
Figure 37 : diagramme de travail de réfrigération en fonction de titre massique les 3 vases d'expansion (Claude Collins et 3eme vases) pour l'azote.....	75
Figure 38: diagramme de Figure of Merit en fonction de titre massique X les 3eme vases d'expansion (Claude Collins et 3 vases) pour l'oxygène	76
Figure 39: diagramme de l'effet de réfrigération en fonction de titre massique les 3 vases d'expansion (Claude Collins et 3 vases) pour l'oxygène	76
Figure 40: diagramme de Travail de réfrigération en fonction de titre massique les 3 vases d'expansion (Claude Collins et 3eme vases) pour l'oxygène.....	77

Liste des tables:

Tableau 1 : Propriétés physiques de certains liquides cryogéniques	17
Tableau 2: les paramètres (P, T, S, H) au chaque points figuratifs du cycle.....	46
Tableau 3: les paramètres (P, T, S, H) au chaque points figuratifs du cycle.....	48
Tableau 4: les paramètres (P, T, S, H) au chaque points figuratifs du cycle.....	51
Tableau 5: les paramètres (P, T, H, S) aux chaque points figuratifs du cycle.....	53
Tableau 6: les paramètres (P, T, S, H) au chaque points figuratifs du cycle.....	55
Tableau 7: les paramètres (P, T, S, H) au chaque points figuratifs du cycle.....	58
Tableau 8: tableau des résultats de Figure of Merit pour les trois cycles de réfrigération pour l'azote et l'oxygène.....	72
Tableau 9: tableau des résultats de l'effet de réfrigération et travail de réfrigération pour les trois cycles de réfrigération pour l'azote et l'oxygène.....	73

NOMENCLATURE

Symbole	Désignation	Unité
T	Température	K
H	Enthalpie	KJ/Kg
S	Entropie	KJ/Kg. K
E_c	Energie cinétique	KJ
E_p	Energie potentiel	KJ
Y	Taux de liquidité	%
Qa/m	L'effet de réfrigération	KJ/ Kg
W/m	Travail de réfrigération par unité de masse	KJ/Kg
FOM	Figure of Merit	%
COP	Coefficient de performance	/
We	Travail massique de la turbine	KJ/Kg
W_c	Travail massique de compresseur	KJ/Kg
\dot{m}	Débit massique du gaz	KW
\dot{m}_e	Débit massique traversant la turbine	Kg/s
X	Le titre massique	%
P	Pression	Bar
h_f	L'enthalpie de liquide	KJ/Kg
φ	Quantité de chaleur	KJ/Kg
μ_{J-T}	Coefficient de Joule-Thomson	Sans dimension

Introduction à la cryogénie :

La cryogénie est la science des basses températures se situant au-dessus de la barre de 120K (-153C). 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 alimentaire, médicale, industriel et physique. Ces éléments sont utilisés sous forme liquide Les études des basses températures, réalisées dans le but de comprendre les phénomènes Physiques qui s’y manifestent, ont développé de nombreuses possibilités, comme : La conservation des aliments à l’aide d’azote liquide, la supraconductivité, la superfluidité, le Cryo-broyage, givrage ou condensation cryogénique, la récupération de plus de 90 % des gaz destructeurs de la couche d’ozone et la création, à partir d’azote liquide.[1]

Parmi les secteurs qui passionnent le public, la conquête de l’espace représente une des grandes réalisations de ce siècle, ces développements ont été rendus possibles pour l’utilisation de l’oxygène et de l’hydrogène stockés sous forme liquide, pour alimenter les moteurs fusés Grâce à la cryogénie, on peut produire à grande échelle de l’oxygène et de l’azote à partir de l’air.

On peut utiliser l’oxygène de différentes façons, entre autres dans les moteurs de fusées, dans les chalumeaux pour couper et souder pour permettre la vie dans les vaisseaux spatiaux et la plongée sous- marine. L’azote est utilisé dans la fabrication de l’ammoniac contenu dans les engrais et dans le conditionnement des aliments congelés en les refroidissant rapidement afin d’éviter la destruction des tissus cellulaires.[2]

CHAPITRE 1 : Notions sur la cryogénie

Introduction :

La cryogénie est l'étude et l'utilisation des substances à de très basses températures. La limite supérieure des températures cryogéniques n'est pas fixée, mais l'institut national de la standardisation et de la technologie des Etats-Unis a suggéré que le terme cryogénie soit appliqué à toutes les températures en dessous de $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($123\text{ }^{\circ}\text{K}$). Certains scientifiques prennent le point d'ébullition normal de l'oxygène ($-183\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou $90\text{ }^{\circ}\text{K}$) comme limite supérieure

La cryogénie représente l'ensemble des techniques ayant trait à la production, au stockage et à l'utilisation des gaz liquéfiés, appelés encore fluides cryogéniques. Les températures cryogéniques sont atteintes soit par évaporation rapide des liquides volatils, soit par expansion des gaz confinés initialement à des pressions de 150 à 200 atm.

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 « permanents » ; hydrogène, azote, oxygène.[3]

1.1 Définition :

La cryogénie peut être définie comme la branche de la physique qui étudie les phénomènes et les applications liés aux températures extrêmement basses. Elle concerne l'étude des matériaux et des systèmes à des températures inférieures à -150°C (-238°F) ou 123 K . La cryogénie englobe les techniques de production, de stockage et d'utilisation des fluides cryogéniques tels que l'azote liquide, l'oxygène liquide, l'hydrogène liquide et l'hélium liquide.[4]

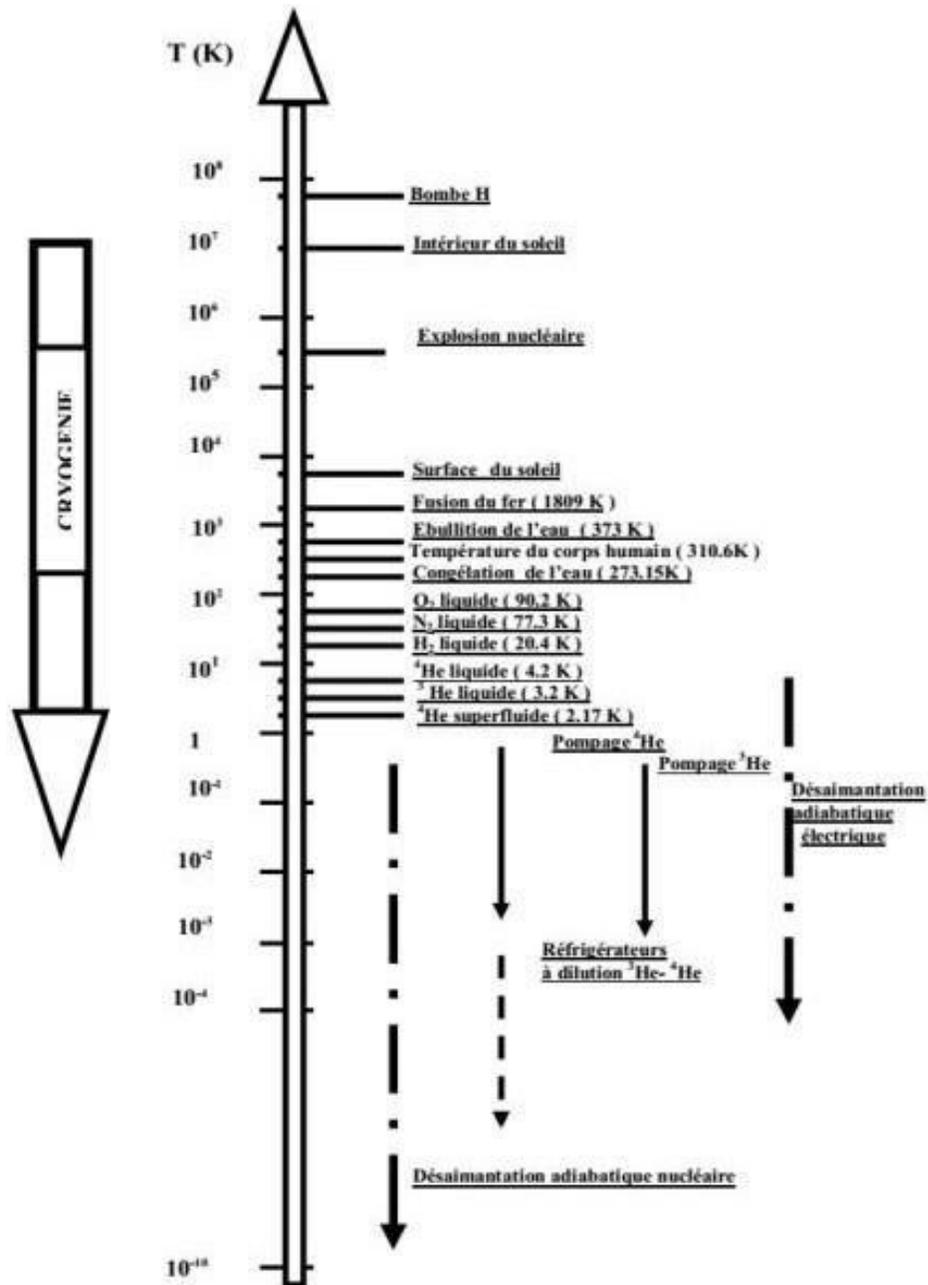


Figure 1: Echelle de température thermodynamique

1.2 Historique :

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.

Cependant , ce fut la première liquéfaction de l'hélium (H.Kamerlingh onnes ,1908) qui ouvrit la voie de la recherche sur la matière condensée aux basses températures, un domaine qui est aujourd'hui encore un aspect majeur de la recherche et qui engendra la découverte de nouveaux phénomènes tels que la supraconductivité (H.Kamerlihg Onnes ,1911) et la superfluidité (W.Hkeesom,1928) qui ne furent expliqués qu'au cours de la deuxième moitié du XXe siècle, avec l'émergence de la mécanique quantique

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 He3-He4 a été développé. En 1975, la température de transition super élevée record (23K) a été atteinte pour la première fois.[5]

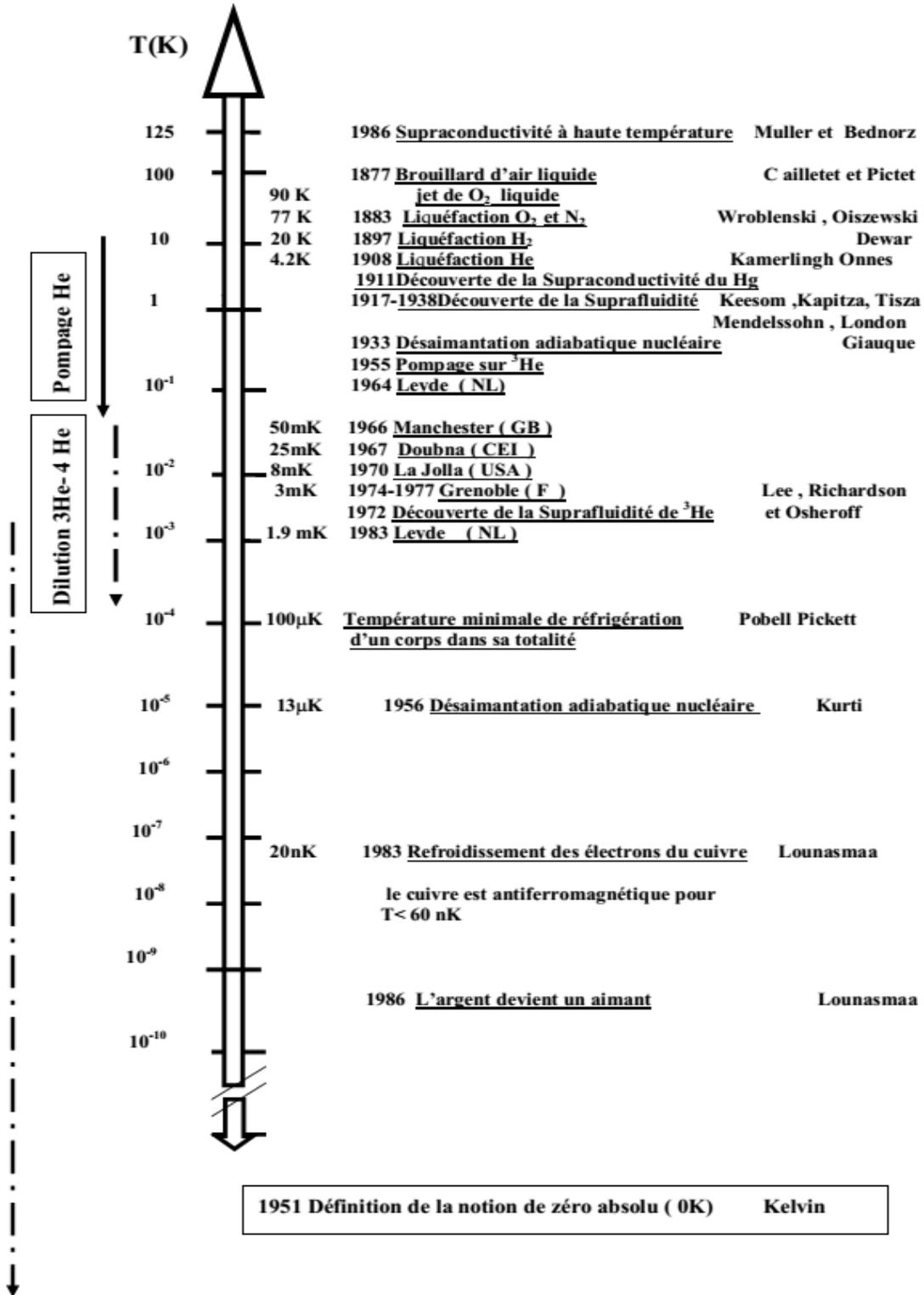


Figure 2 : Différentes étapes vers les basses températures et leurs acteurs

1.3 Domaine d'utilisation de la cryogénie :

La cryogénie, qui concerne l'étude des températures extrêmement basses et des techniques pour manipuler la matière à ces températures, offre une gamme d'applications dans différents domaines. Ce mémoire de master explore les différents domaines d'utilisation de la cryogénie, mettant en évidence les avantages, les défis et les perspectives futures.[6]

1.3.1 Industrie médicale :

La cryogénie joue un rôle crucial dans la préservation des tissus biologiques, les traitements de Cryo ablation pour les tumeurs et le stockage à long terme d'échantillons biologiques. Les avantages incluent la préservation des propriétés biologiques des échantillons et la possibilité de développer de nouvelles thérapies innovantes.

1.3.2 Recherche scientifique :

Les scientifiques utilisent la cryogénie pour étudier des matériaux et des phénomènes à des températures extrêmement basses. Les domaines de recherche comprennent la physique des particules, l'astrophysique, la physique des matériaux et la chimie quantique. Les défis impliquent la manipulation et la mesure précises à des températures cryogéniques, ainsi que la limitation des perturbations thermiques.[7]

1.3.3 Industrie spatiale :

La cryogénie est essentielle dans les applications aérospatiales, en particulier pour les moteurs-fusées à propergol cryogénique. Les carburants cryogéniques, tels que l'hydrogène liquide, offrent une meilleure performance et une plus grande efficacité pour

les lancements spatiaux. Cependant, le stockage, la manipulation et l'isolation thermique sont des défis majeurs.

1.3.4 Industrie des semi-conducteurs :

Les dispositifs électroniques avancés, tels que les supraconducteurs et les qubits quantiques, bénéficient de la cryogénie pour des températures de fonctionnement extrêmement basses. Cela permet d'améliorer les performances, la vitesse et la fiabilité des composants électroniques, mais nécessite des technologies de refroidissement sophistiquées.

1.3.5 Gaz naturel liquéfié (GNL) :

La cryogénie est utilisée dans l'industrie du GNL pour le stockage, le transport et la regazéification du gaz naturel. La liquéfaction du gaz à des températures cryogéniques permet de réduire considérablement son volume, facilitant ainsi le transport à longue distance.

1.3.6 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 solvants

1.4 Transferts thermiques :

L'enthalpie de formation des fluides cryogéniques est faible la capacité thermique des matériaux tend vers zéro, la conséquence immédiate est que Toute entrée de chaleur va entraîner une évaporation notable des fluides cryogéniques et des échauffements importants

1.4.1 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

$$\phi' = -ks \frac{dt}{dx}$$

Avec ϕ' : flux de chaleur en W passant à travers la section S en m^2 au gradient de température $\frac{dt}{dx}$

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) [8]

1.4.2 Convection :

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

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

Avec:

- h_c : coefficient de convection en W/m. K
- S surface d'échange en m^2
- T_p température de la paroi en K
- T_f température du fluide loin de la paroi en K

1.4.3 Le 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 μm à température ordinaire à 725 μm à 4 K.

L'énergie W_R émise par rayonnement d'une surface A est donnée par l'équation de STEFAN BOLTZMANN

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

W_R : énergie rayonnée exprimée en Watts.

e : pouvoir émissif de la surface A .

- σ : Constante de S. B : $5.67 \cdot 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ K}^{-4}$

- T : température en K
- L'énergie rayonnée entre deux surfaces de températures T1 et T2 (T2 >T1) s'écrit :

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

A₁ : aire en cm² de la surface qui reçoit l'énergie à température T1. [9]

E : Facteur qui tient compte des pouvoirs émissifs e₁ et e₂ des surfaces aux températures T1 et T2. [9]

1.5 Propriétés physiques aux basses températures :

1.5.1 Propriétés des fluides cryogéniques :

Les fluides cryogéniques ont des caractéristiques spécifiques, qui nécessitent une attention toute particulière mais qui offrent également de nouvelles possibilités d'utilisation. Aux vues de leur faibles températures critiques et de leur 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 [10]

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 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 l'outil essentiel 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 Rayleigh en utilisant l'hélium cryogénique. [11]

1.5.2 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 structures...et on distingue :

1.5.3 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 comme les caractéristiques magnétiques, état supraconducteur, etc. Parmi ces propriétés thermiques, on définit la capacité thermique massique, la conductivité thermique et la dilatation thermique.

1.5.4 Propriétés mécaniques :

Lorsqu'on construit une structure cryogénique, il est essentiel de prendre en compte les propriétés mécaniques des matériaux utilisés à certaines températures de fonctionnement. La plupart des matériaux ductiles à température ordinaire deviennent fragiles à basses températures. Le comportement aux basses temp (C.F.C) on peut citer le cuivre, le nickel et ces alliages, l'aluminium et ces alliages, les aciers inoxydables, l'argent, le plomb, le laiton, l'or, le platine, en générale ils restent ductiles jusqu'aux très basses températures. Dans les structures hexagonales compactes, on peut citer le zinc, le béryllium, le titane, le cobalt, le magnésium. Ils sont parfois fragiles (zinc), parfois ductiles (titane), leur ductilité étant toutefois diminuée par la présence d'impuretés et principalement par l'O₂, N₂, H₂...ératures des différents matériaux et alliages dépend de leur structure cristalline. Parmi les systèmes cubiques à face centrées [12]

1.6 Stockage et transfert des fluides cryogéniques :

Après le processus de liquéfaction, les liquides sont stockés dans des réservoirs à basse pression suivant la température du produit. Ces réservoirs sont généralement installés tout près de leur unité de production et sont dotés de pompe pour le remplissage des citernes

cryogéniques. La complexité due aux différents processus de transfert thermique, aux contraintes mécaniques et

Aux contraintes physiques impose un grand nombre d'essais en laboratoire afin d'en améliorer le potentiel de stockage de ces fluides cryogéniques et d'en améliorer les performances d'isolation de ces entrepôts en termes de durabilité.

1.7 Isolation des vases de stockage :

L'isolation thermique des vases ou réservoirs de stockage est d'autant plus importante que l'enthalpie de vaporisation des fluides cryogéniques soit faible. Ce problème d'isolation est gouverné par la maîtrise des mécanismes de transfert de Chaleur. Cependant, les contraintes dues au froid, à la sécurité et aux performances nécessaires limitent l'application de certains matériaux. La conductivité thermique du matériau étant un facteur prépondérant ainsi que d'autres critères doivent aussi être examinés pour le choix d'un isolant comme la facilité de mise en œuvre, la durée de vie, la fiabilité de l'isolation réalisée, le prix, l'inflammabilité, la masse, les caractéristiques mécaniques, les caractéristiques physiques, etc.

Pour l'isolation cryogénique, le choix de l'isolant dépend souvent de la taille du réservoir. En effet, pour les récipients de grande taille, il est possible

D'admettre des isolants moins performants ; par contre, plus le réservoir est petit, plus les caractéristiques thermiques doivent être bonnes. En fait, le super isolant est toujours retenu pour les réservoirs de moins de 1000 L de capacité ; destinés pour le stockage des fluides tels que l'azote, l'oxygène et l'argon.

1.8 Différents types d'isolant :

1.8.1 Mousses :

L'espoir des mousses a été considérable depuis 1980. Elles sont régulièrement utilisées pour les gros stockages cryogéniques (azote, méthane, etc.) malgré une conductivité thermique relativement élevée.

Les mousses, en général à base de plastique, se classent dans la catégorie des matériaux cellulaires ; elles présentent les avantages suivants : faible masse volumique, fabrication aisée, coût relativement bas. Elles peuvent parfois s'utiliser en structure autoportante. Les

principales mousses utilisées sont à base de résines polystyréniques, de résines polyvinyliques, de polyuréthane ; les mousses de verre sont aussi fréquemment rencontrées.

1.8.2 Poudres :

Si l'on se réfère aux caractéristiques thermiques des poudres sous vide, on s'aperçoit que celle-ci se placent entre les mousses et les super-isolants. De ce fait, les poudres entrent fréquemment dans l'isolation thermique des fluides cryogéniques, tout particulièrement pour les réservoirs de taille moyenne type basse pression, ou les évaporateurs, et pour certaines lignes de transfert. On peut utiliser ces poudres sous pression atmosphérique mais, pour les applications cryogéniques, elles sont pratiquement toujours maintenues sous une pression comprise entre 0,1 et 10 Pa selon la granulométrie. On peut citer quelques types de poudre tel que : la perlite, l'aluminium, le carbone, le silicate de calcium, la silice et le dioxyde de titane.

1.8.3 Super isolant :

Les super-isolants sont de très loin les dispositifs qui offrent les meilleures caractéristiques thermiques et ils sont très utilisés pour tous les réservoirs de stockage de fluides cryogéniques de petites dimensions dont le principe est de réduire les échanges de chaleur par rayonnement sans augmenter les échanges par conduction solide, tout en s'affranchissant de la conduction gazeuse.

Les super-isolants ont pour rôle d'assurer le meilleur compromis pour réduire les principaux flux de chaleur. Ils se composent d'une succession d'écrans réflecteurs entre lesquels sont interposées des feuilles intercalaires peu conductrices. Les écrans réflecteurs sont constitués d'un métal réfléchissant [13]

1.9 Importance et utilisation des gaz liquéfiés :

L'obtention et l'utilisation des gaz liquéfiés permettant de :

1.9.1 Obtention des gaz purs :

Le processus de la liquéfaction assure que le produit liquéfié est pur en conséquence n'a pas

besoin d'être purifié davantage par la suite parmi les particularités de ces gaz réside dans leur évaporation et condensation à pression et à température constante.

1.9.2 Facilité et économie du transport :

Le gaz est liquéfié afin de pouvoir réduire son volume, ainsi Transport par bateau sur de longues distances ou en mer profond.

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 regazéifiés puis distribué par canalisations. L'oxygène et l'azote atteignent le centre sous forme liquide Conditionnés ou regazéifiés et embouteillés pour la distribution courte portée. [13]

1.9.3 Usage des basses températures :

Dans certains condition la plupart des gaz ont des températures de condensation Inférieures à la température ambiante et même inférieur à 0°. Les gaz liquéfiés se trouvent à 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.

Conclusion

En conclusion, ce chapitre sur les notions de base de la cryogénie a permis de comprendre les principes fondamentaux de cette discipline. Nous avons exploré les effets de la température extrêmement basse sur la matière, ainsi que les applications pratiques de la cryogénie dans divers domaines.

Nous avons appris que la cryogénie implique le refroidissement des substances à des Températures inférieures à -150°C , voire beaucoup plus basses, utilisant des techniques telles que la liquéfaction des gaz et la production d'azote liquide. Les effets de la cryogénie comprennent la réduction de la température moléculaire, la contraction de la matière et la suppression des réactions chimiques.

De plus, nous avons examiné les applications de la cryogénie dans des domaines tels que la Recherche scientifique, la médecine ; industrie et l'espace. Ces applications incluent la conservation des échantillons biologiques, la production de super conducteurs, la fabrication de produits alimentaires surgelés et la propulsion des fusées.

Il est important de souligner que la cryogénie présente à la fois des avantages et des défis. Les avantages incluent la préservation des propriétés des matériaux, la création de conditions expérimentales uniques et l'amélioration des performances de certains dispositifs.

Cependant les défis associés à la cryogénie résident dans la gestion de l'isolation thermique, la manipulation en toute sécurité des substances cryogéniques et les coûts élevés liés aux équipements spécialisés.

En somme, la cryogénie est une discipline fascinante qui joue un rôle essentiel dans de Nombreux domaines. En comprenant ses principes de base, nous sommes mieux préparés à Exploiter les avantages offerts par les températures extrêmement basses tout en surmontant Les défis associés. Ce chapitre a posé les bases nécessaires pour poursuivre notre exploration de la cryogénie et de ses applications plus avancées.

Chapitre 2 :

Les fluides cryogéniques

Introduction

Les fluides cryogéniques sont des substances utilisées pour atteindre et maintenir des températures extrêmement basses. Ces températures sont bien en dessous de celles que nous rencontrons généralement dans notre vie quotidienne. Les fluides cryogéniques jouent un rôle essentiel dans de nombreuses applications industrielles, scientifiques et médicales qui nécessitent des températures extrêmement froides.

L'utilisation des fluides cryogéniques remonte à plusieurs décennies. Au fil du temps, les avancées technologiques ont permis de produire, de stocker et de manipuler ces fluides de manière plus sûre et plus efficace. Les principaux fluides cryogéniques utilisés sont l'azote, l'hydrogène, l'hélium et l'argon.

Ces fluides ont des propriétés physiques et thermodynamiques uniques à des températures cryogéniques. Par exemple, ils peuvent exister sous forme de liquides à des températures très basses, où leur densité et leur viscosité peuvent être très différentes de celles à température ambiante. Les fluides cryogéniques présentent également des propriétés de refroidissement et de conduction thermique exceptionnelles, ce qui les rend idéaux pour de nombreuses applications de refroidissement.

Les applications des fluides cryogéniques sont vastes et diverses. Ils sont utilisés dans des domaines tels que la recherche scientifique, la cryochirurgie, la cryoconservation, l'industrie spatiale, l'imagerie médicale, la production d'énergie, la métallurgie, l'électronique et bien d'autres. Leur utilisation peut permettre des avancées significatives dans ces domaines et ouvrir de nouvelles perspectives technologiques.

Cependant, l'utilisation des fluides cryogéniques n'est pas sans défis. La manipulation et le stockage de ces substances à très basse température nécessitent des équipements spécialisés et des mesures de sécurité appropriées pour prévenir les accidents et les dangers potentiels.

Dans cette perspective, ce mémoire se propose d'examiner les propriétés, les applications, les avantages et les défis associés aux fluides cryogéniques, en se concentrant sur des exemples spécifiques tels que l'azote, l'hydrogène, l'hélium et l'argon. L'objectif est de mieux comprendre l'importance de ces fluides dans divers domaines et d'explorer les perspectives futures de leur utilisation.

1.1 Définition des fluides cryogéniques :

Les fluides cryogéniques sont des gazes liquéfiés conservés à l'état liquide à basse température. Le terme cryogénique signifie produisant du froid ou en rapport avec les basses températures. Tous les liquides cryogéniques sont extrêmement froids. Les points d'ébullition des liquides cryogéniques sont inférieurs à -150°C . Tous les liquides cryogéniques sont des gazes aux températures et pressions normales. Il faut les refroidir sous la température ambiante avant de pouvoir les liquéfier par compression. Les divers gazes cryogéniques se liquéfient dans différentes conditions de température et de pression mais tous ont les deux propriétés suivantes : ils sont extrêmement froids et de petites quantités de liquide peuvent occuper de très grands volumes en passant à l'état gazeux. [14]

1.2 Propriétés thermodynamiques et physiques des fluides cryogéniques :

Les fluides cryogéniques sont des liquides qui ont une température très basse, généralement inférieure à -150°C . Ces liquides ont des propriétés thermodynamiques et physiques uniques qui les rendent utiles dans de nombreux domaines, tels que la recherche, l'industrie et la médecine.

Voici quelques propriétés thermodynamiques et physiques importantes des fluides cryogéniques :

- **Température d'ébullition** : Les fluides cryogéniques ont des températures d'ébullition très basses. Par exemple, l'azote liquide a une température d'ébullition de $-195,8^{\circ}\text{C}$, l'hélium liquide a une température d'ébullition de $-268,9^{\circ}\text{C}$ et l'hydrogène liquide a une température d'ébullition de $-252,8^{\circ}\text{C}$.
- **Chaleur latente de vaporisation** : Les fluides cryogéniques ont une chaleur latente de vaporisation élevée, ce qui signifie qu'ils ont besoin d'une grande quantité d'énergie pour passer de l'état liquide à l'état gazeux. Cela les rend utiles pour la réfrigération et la cryogénie.
- **Conductivité thermique** : Les fluides cryogéniques ont une conductivité thermique élevée, ce qui signifie qu'ils transfèrent rapidement la chaleur. Cela peut être bénéfique pour certaines applications, telles que le refroidissement des aimants supraconducteurs.
- **Densité** : Les fluides cryogéniques ont une densité relativement élevée par rapport

à leur température, ce qui peut poser des défis pour le stockage et la manipulation.

- **Pression de vapeur saturante :** Les fluides cryogéniques ont une pression de vapeur saturante très basse, ce qui signifie qu'ils ont tendance à s'évaporer rapidement. Cela peut être un problème lors de la manipulation de liquides cryogéniques. [15]

1.3 Propriétés des fluides cryogéniques :

GAZ	Point d'ébullition (°C)	Volume d'expansion de gaz pour 1 L de liquide
Azote	-195	696 à 1
Hydrogène	-252	851 à 1
Argon	-185	847 à 1
Oxygène	-183	860 à 1
Hélium 3	-269	757 à 1
Hélium 4	-268	757 à 1
Acide chlorhydrique	-85	-
Acétylène	-84	-
Monoxyde de carbone	-192	
Tri fluorure de bord	-100	
Méthane	-161	578 à 1
Dioxyde de Carbon	-178	553 à 1

Tableau 1 : Propriétés physiques de certains liquides cryogéniques

1.3 Différents types des fluides cryogéniques :

Chacun des fluides cryogéniques est caractérisé par des propriétés spécifiques mais on peut classer la plupart d'entre eux dans l'une des trois catégories ci-dessous :

1.3.1 Gaz inertes :

Ces gaz ne réagissent pas chimiquement de façon appréciable, et ils n'entretiennent pas non

plus la combustion exemples : l'**azote**, l'**hélium**, le **néon** l'**argon** et le **krypton**.

1.3.2 Gaz inflammables :

Certains liquides cryogéniques libèrent un gaz qui peut brûler dans l'Air comme l'hydrogène, le méthane et les gaz naturel liquides.

2.4 Oxygène :

De nombreuses matières considérées comme non combustibles peuvent brûler en présence d'oxygène liquide ; par exemple, il peut y avoir une réaction explosive entre ce dernier et des matières organiques.

Mais les fluides cryogéniques les plus fréquemment utilisés sont :

L'azote liquide (N_2) entre 30 et 65 K,

L'hydrogène liquide (H_2) entre 30 et 15 K,

L'hélium liquide entre 5 et 1 K,

Ainsi que le néon, le xénon et l'hélium liquides, Fluides présentant des propriétés intéressantes pour certaines applications spécifiques. [16]

2.5 Stockage et transport de fluides cryogéniques :

Le stockage et le transport des fluides cryogéniques sont des aspects essentiels dans de nombreux domaines tels que la recherche scientifique, l'industrie des gaz, la médecine et la production d'énergie. Les fluides cryogéniques, tels que l'azote liquide, l'oxygène liquide, l'argon liquide et l'hydrogène liquide, sont caractérisés par des températures extrêmement basses, généralement inférieures à $-150^\circ C$. Ces températures extrêmes nécessitent des techniques spécifiques pour leur stockage et leur transport en toute sécurité et efficacement. Le stockage des fluides cryogéniques est généralement réalisé dans des réservoirs spéciaux, appelés Cryo tanks ou Dewar. Ces réservoirs sont conçus pour minimiser les pertes de chaleur et maintenir les fluides à des températures très basses. Ils sont souvent construits avec des matériaux à faible conductivité thermique et sont équipés d'une isolation multicouche pour réduire les transferts de chaleur. Des systèmes de contrôle de la pression et de sécurité sont également intégrés pour assurer des conditions optimales de stockage. [17]

2.6 Les transport des fluides cryogéniques :

Les fluides cryogéniques présentent des défis supplémentaires en raison des conditions

ambiantes variables et des risques potentiels associés aux fuites ou aux accidents. Différents modes de transport sont utilisés, tels que les conteneurs cryogéniques, les camions-citernes et les pipelines. Ces modes de transport doivent être conçus pour maintenir les températures basses, éviter les fuites et garantir la sécurité des travailleurs et du public.

Pour assurer le stockage et le transport sûrs des fluides cryogéniques, plusieurs considérations importantes doivent être prises en compte, notamment :

- **Isolation thermique** : Utilisation de matériaux isolants efficaces pour minimiser les pertes de chaleur et maintenir les températures basses.
- **Systèmes de régulation de la pression** : Contrôle et maintien des niveaux de pression appropriés pour éviter les surpressions ou les sous-pressions dans les réservoirs.
- **Sécurité** : Mise en place de systèmes de sécurité pour détecter les fuites, les ruptures ou les accidents potentiels, ainsi que des mesures de protection pour les travailleurs et l'environnement.
- **Manutention adéquate** : Utilisation d'équipements spécifiques pour la manipulation des réservoirs et des conteneurs cryogéniques afin de prévenir les blessures et les dommages matériels.
- **Surveillance continue** : Utilisation de capteurs et de systèmes de surveillance pour suivre en temps réel les températures, les pressions et les niveaux de liquide.
- **Formation et sensibilisation** : Fournir une formation adéquate aux travailleurs sur les procédures de sécurité et les risques associés aux fluides

2.7 Azote :

2.7.1 Définition :

L'azote liquide est de loin le liquide cryogénique le plus utilisé. Ce gaz incolore, inodore ; insipide et inerte et inflammable, a un point d'ébullition de -196 et est produit à grande échelle dans les usines de séparation de l'air. L'azote liquide pouvant être extrait de l'air ambiant il s'agit d'un gaz relativement écologique et abordable.

2.7.2 Application de l'azote :

L'application de l'azote liquide est vaste. Ce liquide cryogénique est utilisé pour :

Industrielle :

- Rétracter des composants dans l'industrie automobile, tester ou inerte des produits dans l'industrie électronique, refroidir des aliments dans l'industrie alimentaire et préserver des médicaments ou des matériaux biologiques dans l'industrie pharmaceutique et médicale.
- Traitement thermique de divers métaux
- Transport pneumatique de Carbon ou d'autres matériaux pulvérulents inflammables

Médicale :

- Conservation à basse température de tissus vivants et de cellules
- N_2 est utilisé pour ajuster la composition des mélanges respiratoires dans les caissons de décompression ou les bouteilles de plongée sous-marine

2.7.3 Propriétés :

- L'azote est un gaz incolore, inodore, insipide et ininflammable.

Aux conditions "normales" de pression, c'est un gaz un peu plus lourd que l'air : 1,185 kg/m³ (1013,25 hPa et 15 °C), (1013,25 hPa et au point d'ébullition : 4,614 kg/m³).

- Il se liquéfie à $T = -196^\circ \text{C}$ [77 K] ($P = 1 \text{atm}$). C'est aussi le point d'ébullition de l'azote liquide.
- Le point de fusion de N_2 solide (azote congelé) est à -210°C (63 K), et donc c'est aussi le point de solidification de l'azote liquide.
- Le point triple se situe à $T = -210,1^\circ \text{C}$ (63,05 K) et Pression = 125,3 hPa (0,1253 bar), et se trouve bien inférieur à la pression atmosphérique ("normale" à 1013,25 hPa ou 1013 mbar), donc l'azote liquide et solide ne peuvent exister à cette pression et températures classiques sur Terre.

Le Point Critique se situe à $P_c = 3,4 \text{MPa}$ (34 bar) et $T_c = -147^\circ \text{C}$ [126 K] [18]

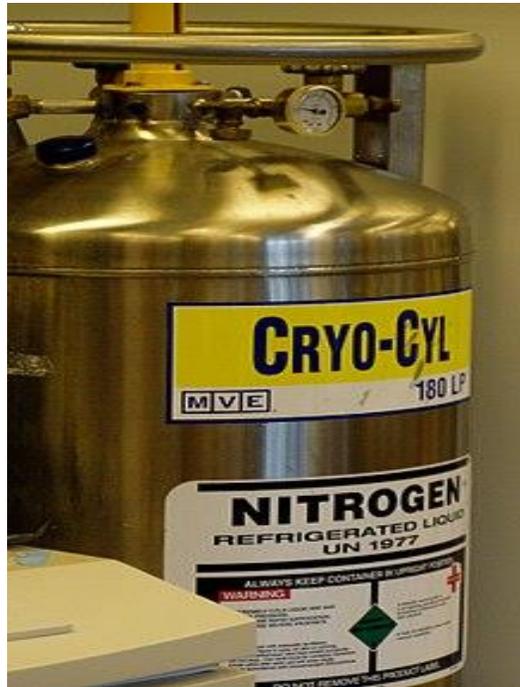


Figure 3: Bonbonne contenant de l'azote liquide (en anglais, « nitrogène »)

2.8 Hydrogène :

2.8.1 Définition :

L'hydrogène est l'élément chimique le plus simple, le plus léger et le plus abondant de l'univers. Il est composé de deux atomes d'hydrogène (H_2). Très rare à l'état naturel, la molécule H_2 se trouve le plus souvent associé à d'autres éléments. Ainsi, l'hydrogène n'est pas une source d'énergie directement disponible comme le charbon ou le pétrole, mais un vecteur d'énergie tel que l'électricité ou la chaleur. Pour récupérer l'hydrogène pur, il faut l'isoler à travers un processus chimique. Ce gaz assez cher est inodore, incolore et inflammable et son point d'ébullition est de $-252,9$ °C. Sur Terre, l'hydrogène n'existe pas à l'état pur. Il est ainsi produit à partir d'eau (électrolyse) ou de gaz naturel (vaporeformage).

2.8.2 Production de l'hydrogène :

Différentes techniques de production existent

L'hydrogène produit à partir d'eau et d'électricité, c'est l'électrolyse de l'eau l'électrolyse sépare une molécule d'eau en hydrogène et en oxygène cette voie est encore peu répandue car nettement plus coûteuse (2 à 3 fois plus cher que le reformage du gaz naturel) et réservée aujourd'hui à des usages spécifiques comme l'électronique qui requièrent un niveau élevé

du pureté.

Le reformage du gaz naturel à la vapeur d'eau est la technique la plus répandue il s'agit de faire réagir du méthane avec de l'eau pour obtenir un mélange contenant de l'hydrogène et de CO₂ le CO₂ émis par ce procédé pourrait éventuellement être capté et stocké pour produire un hydrogène décarboné en lieu et place du gaz naturel,

La gazéification permet de produire par combustion, un mélange de CO et H₂ à partir de charbon (solution qui émet beaucoup de CO₂) ou de biomasse [19]

2.8.3 Application de l'hydrogène :

L'hydrogène liquide, en tant que fluide cryogénique, trouve de nombreuses applications dans divers domaines industriels et scientifiques. Voici quelques-unes des principales applications de l'hydrogène liquide :

Recherche en physique des hautes énergies :

L'hydrogène liquide est utilisé comme fluide cryogénique dans les expériences de structure de la matière. Par exemple, il est utilisé pour refroidir les détecteurs de particules tels que les calorimètres et les aimants supraconducteurs.

Propulsion spatiale :

L'hydrogène liquide est utilisé comme combustible dans les moteurs de fusées. Les moteurs à hydrogène liquide fournissent une impulsion spécifique élevée, ce qui signifie qu'ils peuvent générer une poussée plus efficace par unité de carburant. Cela les rend adaptés aux missions spatiales nécessitant une grande quantité de carburant.

Stockage d'énergie :

L'hydrogène liquide est utilisé pour le stockage d'énergie à grande échelle. Il peut être produit en utilisant de l'électricité excédentaire produite par des sources renouvelables, puis stocké sous forme liquide. Lorsque l'électricité est nécessaire, l'hydrogène liquide peut être converti en électricité via une pile à combustible.

Réfrigération :

L'hydrogène liquide est utilisé dans les applications de réfrigération et de congélation à très basse température. Il est utilisé pour refroidir les aimants supraconducteurs, les appareils de refroidissement cryogénique et les systèmes de refroidissement pour les applications industrielles spéciales.

Il convient de noter que l'hydrogène liquide présente également des défis en termes de

stockage et de manipulation en raison de sa basse température et de ses propriétés volatiles.

[19]

Conclusion :

Les fluides cryogéniques tels que l'azote, l'hydrogène, l'hélium et l'argon jouent un rôle crucial dans diverses applications industrielles, scientifiques et médicales. Leur capacité à atteindre et à maintenir des températures extrêmement basses ouvre la voie à des avancées technologiques et à des découvertes scientifiques importantes.

Ces fluides présentent des propriétés thermodynamiques uniques à des températures cryogéniques, ce qui les rend précieux pour des applications telles que la propulsion spatiale, le stockage d'énergie, la recherche scientifique, la production industrielle et médicale, entre autres. Leur utilisation permet des avancées significatives dans des domaines tels que l'aérospatiale, la médecine, la métallurgie, la recherche nucléaire et bien d'autres.

Pendant, l'utilisation des fluides cryogéniques n'est pas sans défis. La manipulation et le stockage de ces substances à très basse température nécessitent des équipements spécialisés, des mesures de sécurité rigoureuses et une gestion appropriée des risques associés.

Il est essentiel de continuer à améliorer les technologies et les procédures liées aux fluides cryogéniques pour garantir leur utilisation sûre et efficace. Des recherches continues sont nécessaires pour optimiser les performances, la durabilité et la rentabilité de ces applications. En somme, les fluides cryogéniques jouent un rôle essentiel dans de nombreux domaines de la science et de l'industrie, ouvrant la voie à des avancées technologiques et à de nouvelles découvertes. Leur utilisation continue à l'avenir promet de nouvelles applications et opportunités dans divers domaines, contribuant ainsi au progrès scientifique et technologique.

Chapitre 03 : Vases d'expansion

Introduction :

Le vase d'expansion est un composant essentiel dans de nombreux systèmes de chauffage, de refroidissement et de plomberie. Son rôle principal est de compenser les variations de volume d'un fluide causées par les changements de température, tout en maintenant une pression adéquate dans le système. Cette fonction permet d'éviter les surpressions et les dépressions qui pourraient endommager les composants du système.

Dans de nombreux domaines industriels, tels que l'automobile, l'industrie HVAC (Chauffage, Ventilation et Climatisation) et les installations de plomberie, le vase d'expansion est utilisé pour garantir un fonctionnement optimal du système et assurer sa durabilité. Il contribue à maintenir une circulation fluide du fluide caloporteur et à éviter les problèmes liés à l'expansion thermique, tels que les fuites, les surchauffes ou les ruptures de tuyauterie.

Enfin, nous discuterons des facteurs qui peuvent influencer les performances du vase d'expansion, tels que les variations de température et de pression, la dilatation thermique du fluide et les propriétés du fluide utilisé. Nous présenterons des exemples d'études expérimentales et de simulations numériques réalisées dans le domaine, afin de mieux comprendre les performances réelles du vase d'expansion.



Figure 4 : Un vase d'expansion dans un circuit de chauffage

3.1 Rôle du vase d'expansion dans le système de refroidissement

Le vase d'expansion joue un rôle crucial dans les systèmes de refroidissement, en particulier dans les systèmes de refroidissement liquide. Son rôle principal est de compenser les variations de volume du fluide de refroidissement causées par les changements de température, tout en maintenant une pression stable dans le système. Cela garantit un fonctionnement efficace et sécurisé du système de refroidissement.

Le fonctionnement du vase d'expansion repose sur le principe de l'expansion thermique des fluides. Lorsque la température du fluide de refroidissement augmente, il se dilate, augmentant ainsi son volume. Sans vase d'expansion, cette expansion pourrait provoquer une augmentation excessive de la pression dans le système. Le vase d'expansion permet de compenser cette expansion en fournissant un espace supplémentaire pour stocker le fluide en expansion.

Le vase d'expansion est généralement constitué d'un réservoir divisé en deux compartiments par une membrane ou un flotteur. Le compartiment inférieur est en contact avec le fluide de refroidissement, tandis que le compartiment supérieur contient de l'air ou un gaz inerte. Lorsque le fluide de refroidissement se dilate, une partie du fluide s'écoule dans le compartiment inférieur du vase d'expansion, comprimant l'air ou le gaz présent dans le compartiment supérieur. Cela permet de maintenir une pression stable dans le système.

Lorsque la température du fluide de refroidissement diminue, il se contracte, entraînant une réduction de volume. Le fluide de refroidissement est alors aspiré du vase d'expansion pour compenser cette contraction. L'air ou le gaz comprimé se détend à nouveau pour maintenir la pression stable.

Le choix du type de vase d'expansion (à pression fixe ou à pression constante) dépend du système de refroidissement spécifique et de ses exigences. Les caractéristiques du fluide de refroidissement, les conditions de fonctionnement et d'autres facteurs doivent être pris en compte lors de la sélection du vase d'expansion approprié.

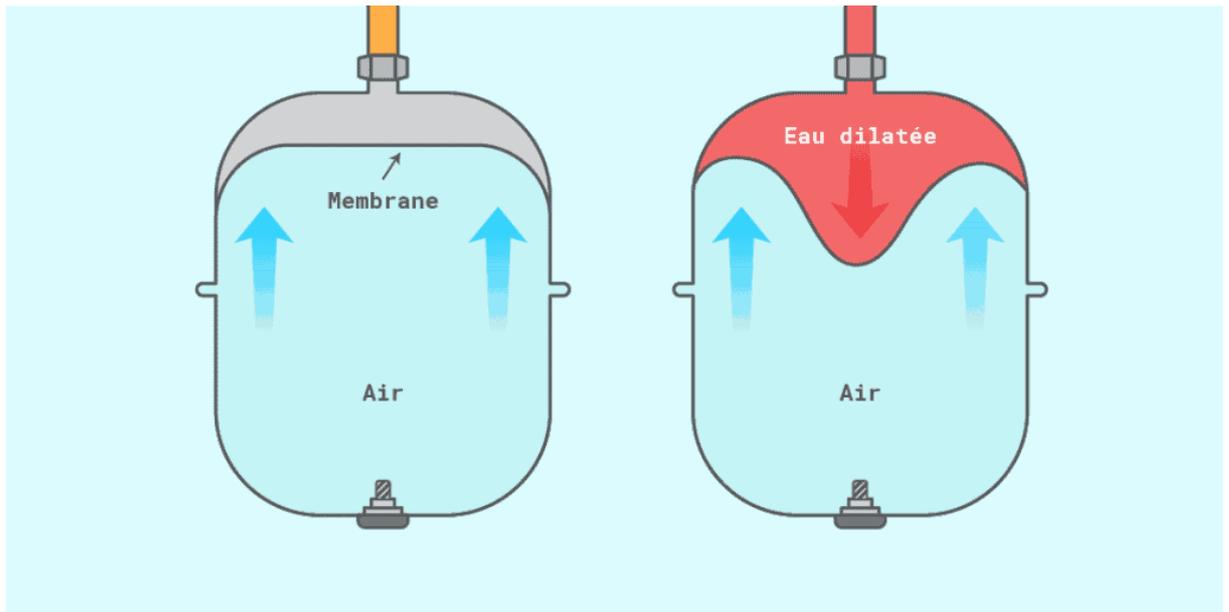


Figure 5: Vue intérieure du vase d'expansion, rempli d'eau et d'air

3.2 Types de vases d'expansion

Il existe différents types de vases d'expansion utilisés dans les systèmes de refroidissement et de chauffage. Voici quelques types courants de vases d'expansion :

3.2.1 Vase d'expansion à membrane :

- Ce type de vase d'expansion utilise une membrane élastique pour séparer le fluide de refroidissement de l'air ou du gaz comprimé. Lorsque le fluide se dilate, la membrane se déforme pour permettre l'expansion du fluide. Lorsque le fluide se contracte, la membrane reprend sa forme initiale, poussant l'excès de fluide dans le système. Cela permet de maintenir une pression constante. [20]

3.2.2 Vase d'expansion à flotteur :

- Ce type de vase d'expansion utilise un flotteur pour réguler le volume du fluide de refroidissement. Lorsque le fluide se dilate, le flotteur monte, permettant à l'excès de fluide d'entrer dans le vase. Lorsque le fluide se contracte, le flotteur descend, poussant le fluide de retour dans le système. [21]

3.2.3 Vase d'expansion à pression fixe :

- Ce type de vase d'expansion est conçu pour maintenir une pression spécifique constante dans le système de refroidissement. Il est souvent utilisé dans les systèmes de

climatisation à grande échelle. Lorsque la pression dépasse la valeur prédéfinie, le vase d'expansion libère l'excès de fluide. Lorsque la pression est inférieure à la valeur prédéfinie, le vase d'expansion permet à un fluide de compensation d'entrer dans le système. [22]

3.3 Avantages et limitations de vase d'expansion

Avantages :

Compensation des variations de volume :

Le vase d'expansion permet de compenser les variations de volume du fluide de refroidissement, assurant ainsi un fonctionnement stable du système de refroidissement.

Maintien de la pression constante :

Le vase d'expansion aide à maintenir une pression constante dans le système de refroidissement, évitant les variations excessives de pression.

Protection contre les dommages :

Le vase d'expansion contribue à protéger les composants du système de refroidissement en évitant les dommages causés par les variations de pression.

Limitations :

Capacité limitée :

Les vases d'expansion ont une capacité limitée pour absorber les variations de volume du fluide de refroidissement. Si la dilatation dépasse la capacité du vase d'expansion, cela peut entraîner une augmentation de la pression dans le système.

Maintenance requise :

Les vases d'expansion nécessitent une surveillance régulière et une maintenance appropriée pour assurer leur bon fonctionnement et prévenir les problèmes potentiels.

Il est important de noter que les avantages et les limitations du vase d'expansion peuvent varier en fonction du type spécifique de vase d'expansion utilisé et des caractéristiques du système de refroidissement. Il est recommandé de consulter des sources spécifiques, telles que des manuels d'ingénierie thermique ou des publications spécialisées sur les systèmes de refroidissement, pour obtenir des informations plus détaillées sur ce sujet.

3.4 Conception et caractéristiques des vases d'expansion

La conception et les caractéristiques des vases d'expansion peuvent varier en fonction du type de système de refroidissement et des spécifications du fabricant. Cependant, voici quelques aspects clés de la conception et des caractéristiques des vases d'expansion :

- **Capacité** : Les vases d'expansion ont une capacité spécifique qui détermine la quantité de fluide de refroidissement supplémentaire qu'ils peuvent accueillir lors de l'expansion. La capacité est généralement indiquée en litres ou en gallons.
- **Matériaux** : Les vases d'expansion sont généralement fabriqués à partir de matériaux résistants à la corrosion et compatibles avec le fluide de refroidissement, tels que l'acier inoxydable, l'aluminium ou le plastique renforcé.
- **Membrane ou flotteur** : Les vases d'expansion peuvent utiliser soit une membrane élastique, soit un flotteur pour contrôler le niveau du liquide. La membrane élastique se déforme avec l'expansion du fluide, tandis que le flotteur monte ou descend en fonction du niveau de liquide.
- **Soupape de pression** : Certains vases d'expansion sont équipés d'une soupape de pression intégrée qui permet la libération de l'excès de pression pour éviter toute surpression dans le système de refroidissement.
- **Connexions** : Les vases d'expansion sont dotés de connexions d'entrée et de sortie permettant de les connecter au circuit du liquide de refroidissement. Les connexions peuvent être filetées, à bride ou à enficher, en fonction des spécifications du système.
- **Indicateur de niveau** : Certains vases d'expansion sont équipés d'un indicateur de niveau pour permettre une surveillance visuelle du niveau du liquide de refroidissement à l'intérieur du vase.
- **Pression de précharge** : Avant l'installation, certains vases d'expansion nécessitent une précharge initiale pour maintenir une pression appropriée dans le système de refroidissement. La pression de précharge est généralement indiquée par le fabricant.

Il est important de noter que les spécifications exactes des vases d'expansion peuvent varier en fonction des besoins et des exigences du système de refroidissement spécifique. Les fabricants de vases d'expansion fournissent généralement des informations détaillées sur la conception, les caractéristiques et les recommandations d'utilisation dans leurs documents techniques et manuels d'installation. [22]

Conclusion

En conclusion, les vases d'expansion sont des composants essentiels dans les systèmes de Refroidissement, offrant plusieurs avantages clés. Ils régulent la pression, protègent contre la

Surpression, compensent les variations de volume du liquide de refroidissement et
Maintiennent un niveau de liquide approprié. Grâce à leur fonctionnement efficace, les vases
D'expansion contribuent au bon fonctionnement et à la sécurité des systèmes de
Refroidissement.

Il est important de noter que les caractéristiques et les spécifications des vases d'expansion
Peuvent varier en fonction du type de système de refroidissement utilisé. Il est donc essentiel
De se référer aux recommandations du fabricant et de suivre les normes et les bonnes pratiques
Pour garantir une utilisation adéquate des vases d'expansion.

En résumé, les vases d'expansion jouent un rôle clé dans la régulation de la pression et du
Volume du liquide de refroidissement, assurant ainsi le bon fonctionnement et la sécurité des
Systèmes de refroidissement

Chapitre4 :
Cycles de réfrigération
cryogéniques

Introduction :

La réfrigération est un processus technique qui vise à abaisser la température d'un espace, d'un objet ou d'un matériau en extrayant la chaleur de celui-ci. L'objectif principal de la réfrigération est de maintenir un environnement froid ou de créer un effet de refroidissement dans le but de conserver des aliments, de préserver des substances sensibles à la chaleur, de refroidir des espaces de vie ou de faciliter des processus industriels.

Les cycles de réfrigération sont des processus essentiels qui permettent de produire du froid artificiellement. Ils jouent un rôle crucial dans de nombreux secteurs, tels que l'industrie alimentaire, la climatisation, la médecine et la recherche scientifique. Ces cycles reposent sur les principes fondamentaux de la thermodynamique et permettent de transférer la chaleur d'une zone à basse température vers une zone à température plus élevée, en utilisant des fluides frigorigènes

Le cycle de réfrigération de Claude et Collins est un autre cycle important dans le domaine de la réfrigération. Inventé par Georges Claude et William T. Collins au début du XXe siècle, ce cycle repose sur l'utilisation d'un fluide frigorigène liquide qui se vaporise à basse pression et absorbe ainsi la chaleur de l'environnement à refroidir. Dans ce cycle, le fluide est d'abord comprimé pour augmenter sa température et sa pression, puis il passe à travers un condenseur où il se liquéfie en libérant de la chaleur. Ensuite, le fluide liquide est détendu, ce qui abaisse sa pression et sa température, lui permettant ainsi d'absorber la chaleur de la zone à refroidir. Le cycle de Claude et Collins est utilisé dans les systèmes de réfrigération commerciaux et domestiques, et a contribué à la démocratisation de l'accès au froid.

4.1 Détente de Joule Thomson :

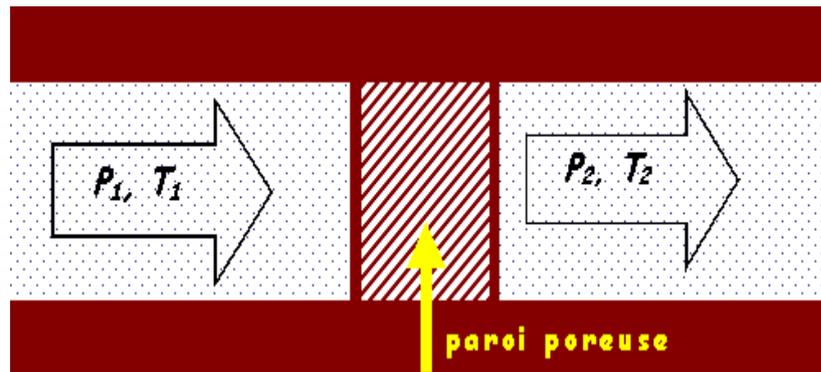


Figure 6: détente de Joule-Thomson

Dans cette expérience schématisée à la figure 6, 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 :

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

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 :

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

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

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

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

L'abaissement de la température en fonction de la pression peut être caractérisé par un

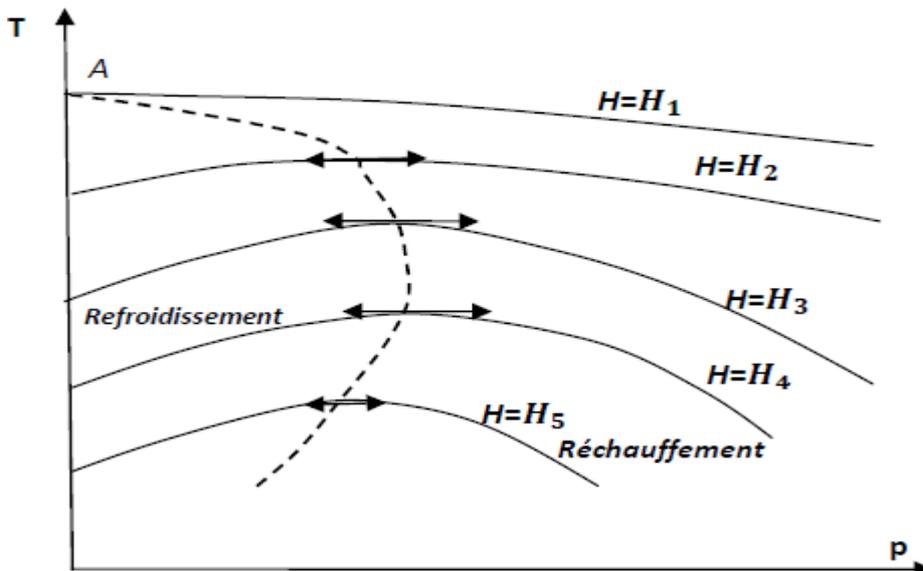
Coefficient μ_{J-T} tel que :

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

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).

Liquéfaction basée sur l'effet de joule Thomson :



Les courbes $T=f(P)$ passent par un maximum nommé point d'inversion.

Et la courbe enpointille réunissant les points de pente est appelée la courbe d'inversion, elle est donc

Donne par la relation : $\mu_{J-T} = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_H = 0$

A partir de la figure nous constatons que

$\mu_{J-T} < 0$ Détente avec augmentation de la température $T_2 > T_1$

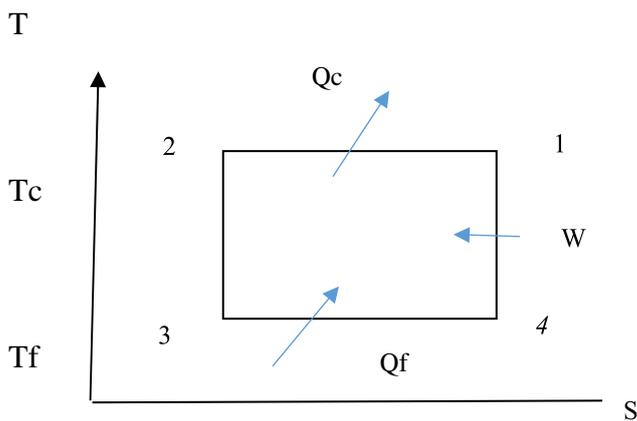
$\mu_{J-T} = 0$ Détente sans variation de température $T_2 = T_1$

$\mu_{J-T} > 0$ Détente avec diminution de la température $T_2 < T_1$

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).

Système thermodynamique idéal :



$Q_c = \int mT_c ds = mT_c (S_1 - S_2)$

$Q_f = \int mT_f ds = mT_f (S_4 - S_3)$

Avec $S_1 = S_4$ Et $S_2 = S_3$

Système fermé $\Delta U = 0$ et $\Delta S = 0$ ce qui entraîne :

$\sum Q + \sum W = 0 ; \quad Q_c + Q_f + W = 0$

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

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

4.2 Réfrigérateur de Linde Hampson :

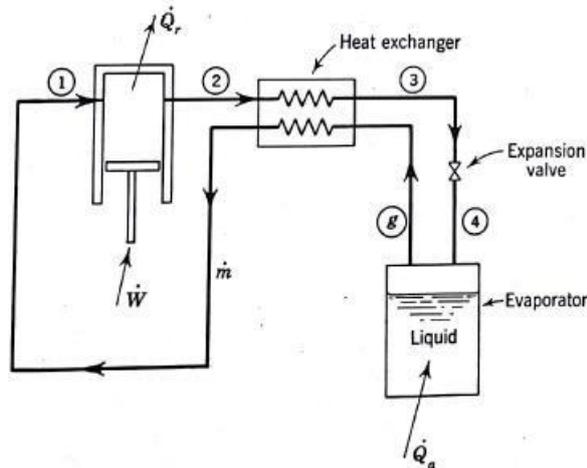


Figure 7: Diagramme énergétique du réfrigérateur de Joule Thomson

Paramètres d'un réfrigérateur :

L'effet frigorifique $\frac{Q_a}{m}$

Le travail de réfrigération $\frac{W}{m}$

$$\text{COP} = \frac{\frac{Q_a}{m}}{\frac{W}{m}}$$

$$\text{FOM (Figure of Merit)} = \frac{\text{COP}}{\text{COP}_{\text{idéal}}}$$

Calcul de l'effet de réfrigération :

L'équation du premier principe en système ouvert s'écrit :

$$\sum_{\text{sortie}} m (h + Ec + Ep) - \sum_{\text{entrée}} m (h + Ec + Ep) = \sum Q + \sum W$$

Choisissons le volume de contrôle en éliminant le compresseur ; on obtient :

L'effet de réfrigération :

$$Q_a + 0 = m(h_1 - h_2) \quad \frac{Q_a}{m} = h_1 - h_2$$

$$\text{Le travail de réfrigération est : } \frac{W}{m} = [T (s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)]$$

4.3 Le cycle de réfrigération de Claude

Principe de cycle de Claude

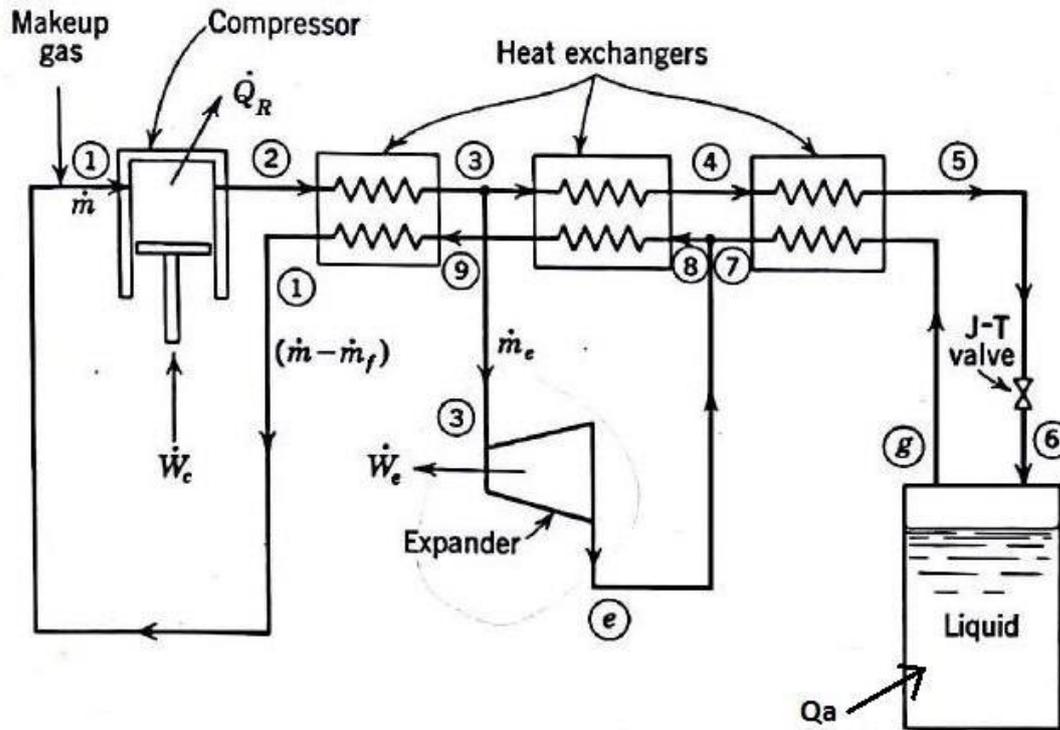


Figure 8: Diagramme énergétique du réfrigérateur de Claude

Ce cycle comprend comme illustre la figure :

- 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 haute 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 9) :

Le gaz est d'abord comprimé de P_1 à P_2 à température constante, il est refroidi de 2 en 3 dans le premier échangeur. Une partie \dot{m}_e est détendue dans la turbine par

Bilan énergétique du cycle de réfrigération :

Cycle de Claude :

1-compresseur :

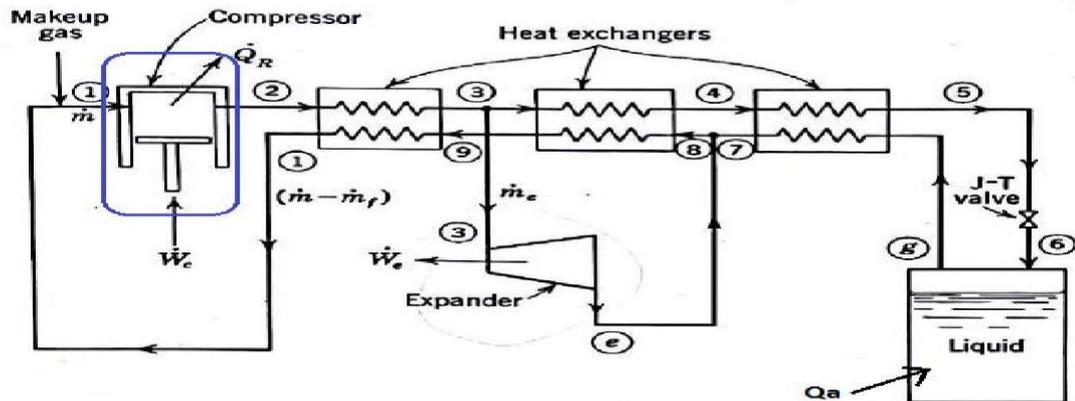


Figure 10: Volume de contrôle C1

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 $\dot{W}_t = \dot{W}_c$

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

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

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

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

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

$$\frac{W_c}{m} = T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2) \quad (1)$$

1-Expander :

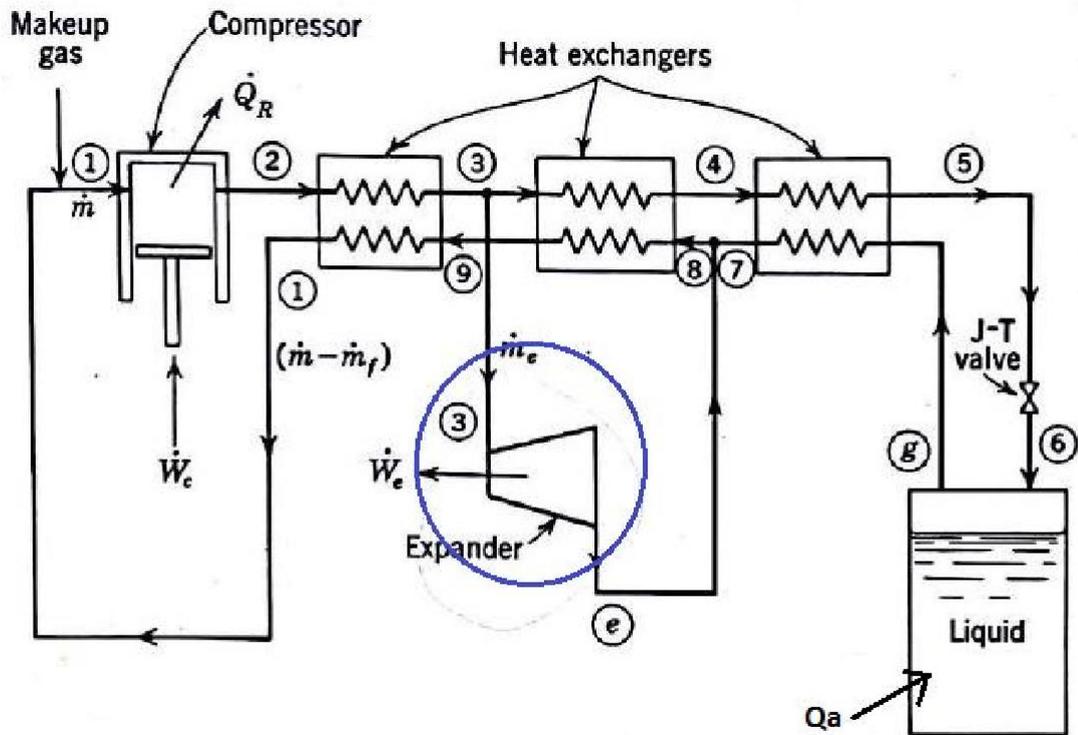


Figure 11: volume de contrôle C2.

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

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

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

Donc : avec $\dot{\varphi} = 0$ 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 : $X = \frac{\dot{m}_e}{\dot{m}}$

$$\frac{\dot{W}_e}{\dot{m}} = X(h_e - h_3) \quad (2)$$

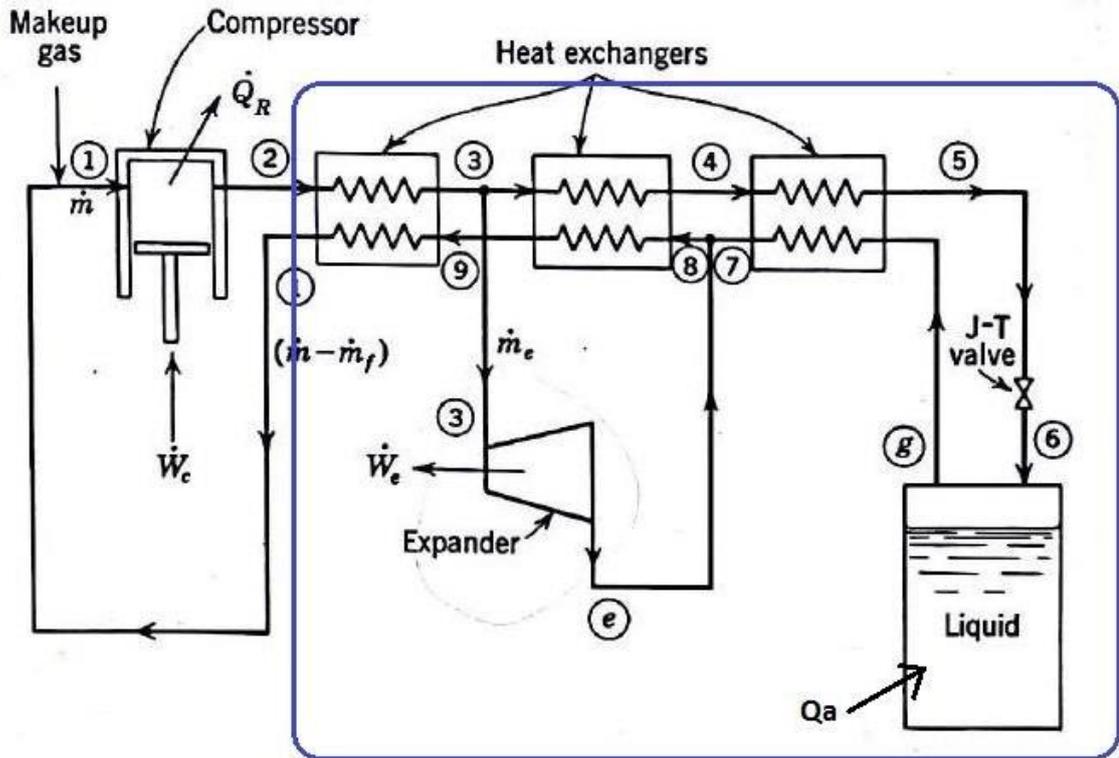


Figure 12: Volume de contrôle C3

3-Expression de l'effet de réfrigération :

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

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

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

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

Le travail net :

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

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

$$\frac{w_{net}}{\dot{m}} = T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2) + X(h_e - h_3) \quad (3)$$

4.4 Cycle de Collins :

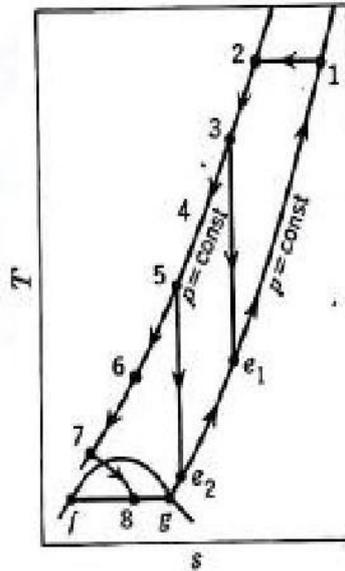
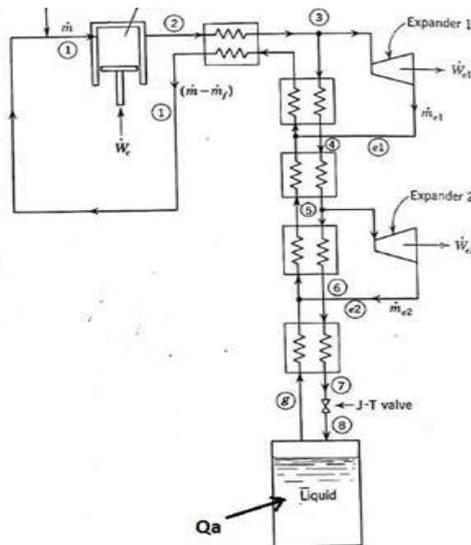


Figure 13: Diagramme énergétique et diagramme T-S de cycle de Collins



Le coefficient de performance COP :

Le coefficient de performance COP est définie comme étant la quantité de chaleur cède par la source froide et par unité de travail consommé

$$COP = \frac{\dot{\phi}_a}{\frac{\dot{m}}{w_{net}}}$$

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

Figure of Merit FOM:

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

Expression de l'effet de réfrigération

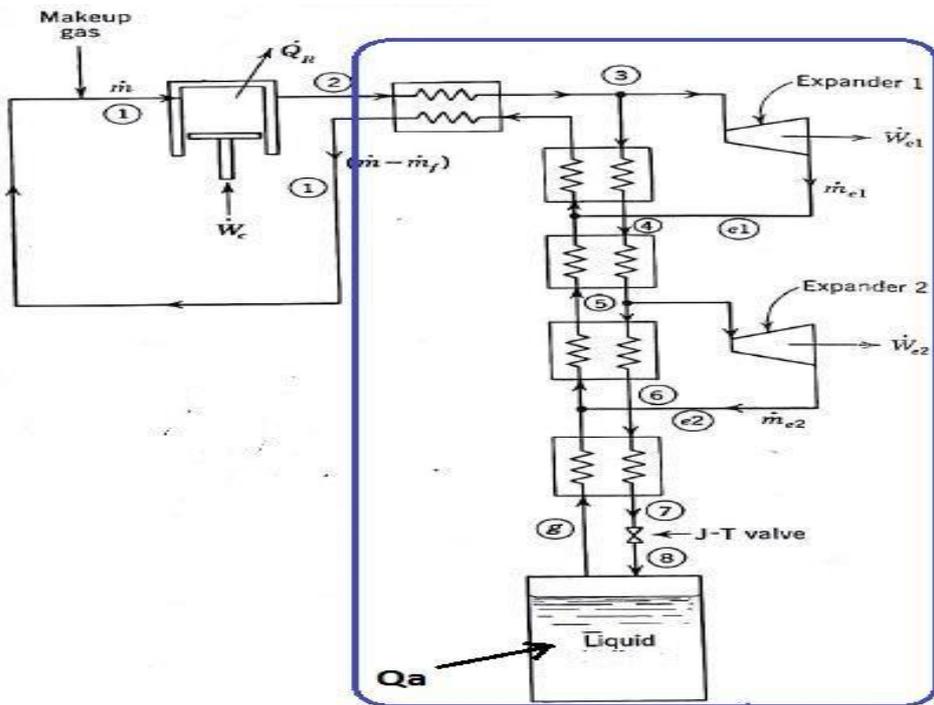


Figure 14: volume de contrôle C4

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

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

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

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

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

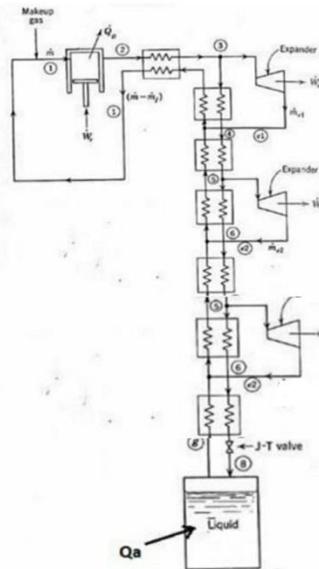


Figure 15: Diagramme de cycles de réfrigération pour 3ème vase

Pour 3eme vase d'expansion :

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

$$w_{net} = \sum \dot{w} = \dot{w}_c + \dot{w}_{e1} + \dot{w}_{e2} + \dot{w}_{e3}$$

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

$$\frac{w_{net}}{\dot{m}} = T(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2) + \sum_j^n X_j (h_{ej} - h_{2j+1}) \quad (2) [3]$$

Problématique :

Un système de réfrigération cryogénique a 3 vases d'expansion (CLAUDE COLLINS ET 3^{eme} Vase d'expansion) en utilisant l'azote et l'oxygène comme gazes de travail

Les conditions de fonctionnement sont les suivants :

Pour L'azote N_2 :

$P_1=1$ bar et $P_2= 10$ bar

$T=294$ k $TF_{N_2} = 77.36$ K

$X_1=0.2$, $X_2=0.1$, $X_3=0.12$

L'enthalpie h à $T= 140$ k h= 24,29 KJ/Kg

Pour Oxygène O_2 :

$P_1=1$ bar $P_2=10$ bar

$T_1=294$ K $TF_{O_2} = 90.18$ K

$X_1=0.2$, $X_2=0.1$, $X_3=0.12$

L'enthalpie h à $T= 140$ k h= -39,94 KJ/Kg

Travail demandé :

Utiliser les diagrammes T-S de pour les deux fluides cryogéniques L'azote et l'oxygène

- Tracer les cycles de réfrigération dans les diagrammes T-S pour chaque fluide
- Calculer les paramètres performants pour chaque fluide
- Tracer les courbes des paramètres performants en fonction de X_1 , X_2 , X_3 donné pour l'azote et l'oxygène

Pour l'azote

L'influence du travail des vases d'expansion sur l'effet de réfrigérateur cryogénique :

Pour cycle de Claude :

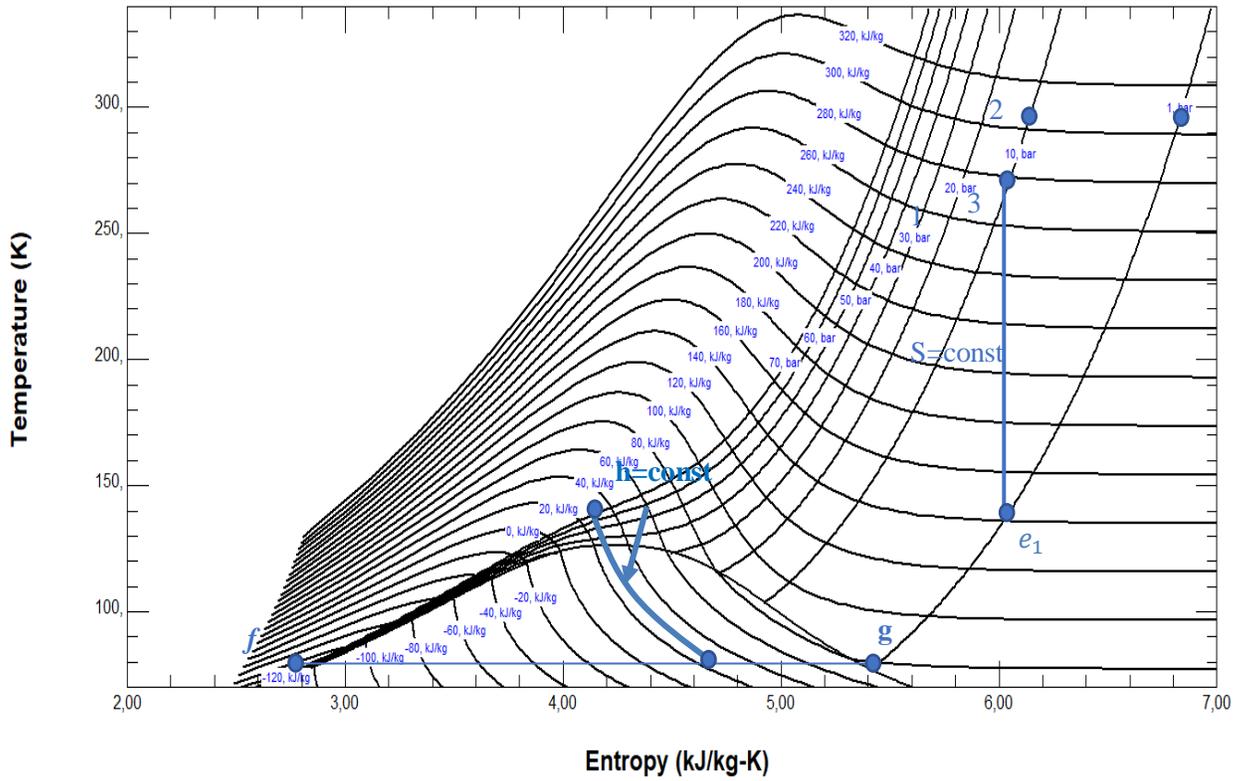


Figure 16:diagramme T-S pour cycle de Claude Pour Azote

Les paramètres du cycle (P, T, S, H) :

- Pour P1=10 bar et T=270K :

Points	T(k)	P(bar)	H(kJ/kg)	S (KJ/kg. K)
1	294	1	304 .95	6.8246
2	294	10	302 .89	6.1348
3	270	10	277.49	6.0447
e ₁	139.30	1	143.50	6.0447

Tableau 2: les paramètres (P, T, S, H) au chaque points figuratifs du cycle

- L'effet de réfrigération :

$$\frac{Q_a}{m} = (H_1 - H_2) + X1(H_3 - H_{e1})$$

- **Travail de réfrigération :**

$$\frac{W}{m} = T(S_1 - S_2) - (H_1 - H_2) + X1(H_{e1} - H_3)$$

$$\frac{W}{m} = 294(6.8246 - 6.1348) - (304.95 - 302.89) + 0.2(143.50 - 277.49)$$

- **Le Coefficient de performance :**

$$COP = \frac{\frac{Qa}{m}}{\frac{W}{m}}$$

$$COP = \frac{28.85}{173.94} = 0.16$$

- **Le COP idéal :**

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

$$COP_{ideal} = \frac{77.36}{294 - 77.36}$$

$$COP_{ideal} = 0.35$$

- **Figure of Merit FOM:**

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

$$FOM = \frac{0.16}{0.35}$$

$$FOM = 0.46 = 46\%$$

- **Le taux de liquidité Y :**

$$Y = \frac{\frac{Qa}{m}}{H_1 - H_F}$$

$$Y = \frac{28.85}{427.43}$$

$$Y = 0.06 = 6\%$$

$$Y = \frac{H_1 - H_2}{H_1 - H_F} + X1 \frac{(H_3 - H_{e1})}{(H_1 - H_F)}$$

$$Y = \frac{304.95 - 302.89}{304.95 + 122.48} + 0.2 \frac{(277.49 - 143.50)}{(304.95 + 122.48)}$$

$$Y=0.06=6\%$$

Pour cycle de Collins :

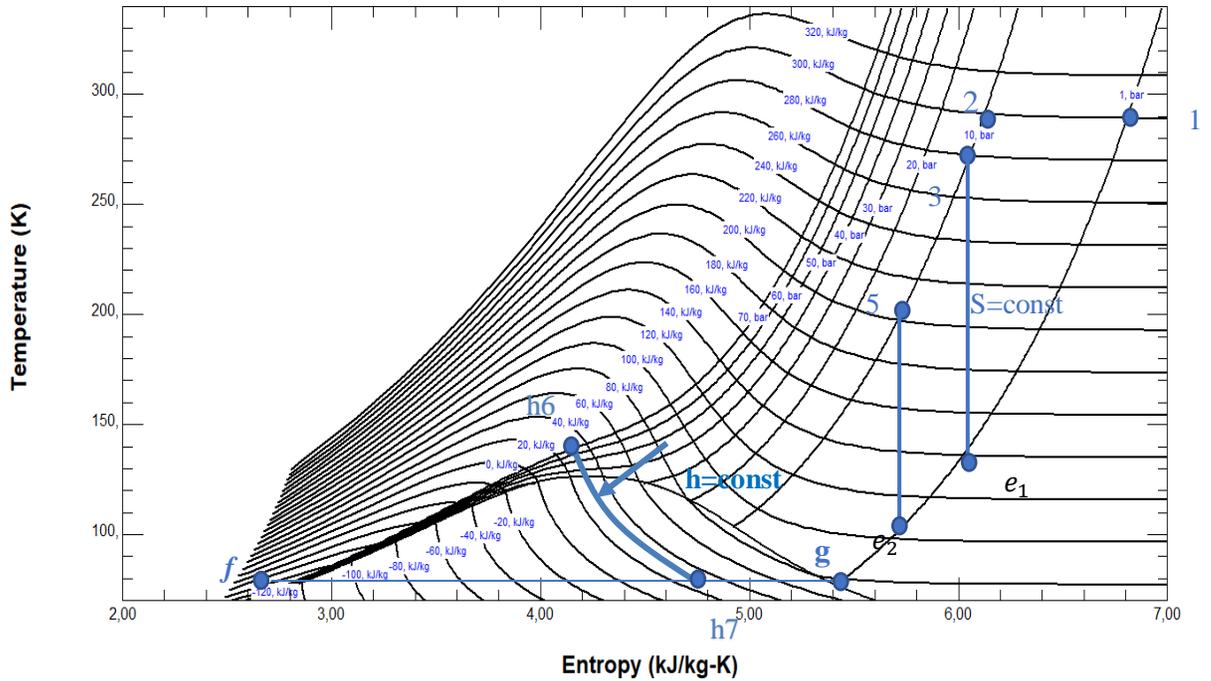


Figure 17: Diagramme T-S de cycle de Collins Pour Azote

Les paramètres du cycle (P, T, S, H) :

- Pour P=10 bar et T=200K :

Points	T(k)	P(bar)	H(kJ/kg)	S (KJ/kg. K)
1	294	1	304.95	6.8246
2	294	10	302.89	6.1348
3	270	10	277.49	6.0447
e1	139.30	1	143.50	6.0447
5	200	10	202.58	5.7233
e ₂	102.81	1	104.91	5.7233

Tableau 3: Les paramètres (P, T, S, H) au chaque points figuratifs du cycle

- **L'effet de réfrigération :**

$$\frac{Q_a}{m} = H_1 - H_2 + X1(H_3 - H_{e1}) + X2(H_5 - H_{e2})$$

$$\frac{Q_a}{m} = (304.95 - 302.89) + 0.2(277.49 - 143.50) + 0.1(202.58 - 104.91)$$

- **Travail de réfrigération :**

$$\frac{W}{m} = T(S_1 - S_2) - (H_1 - H_2) + X1(H_{e1} - H_3) + X2(H_{e2} - H_5)$$

$$\frac{W}{m} = 294(6.8146 - 6.1348) - (304.95 - 302.89) + 0.2(143.50 - 277.49) + 0.1(104.91 - 202.58)$$

- **Le coefficient de performance COP :**

$$COP = \frac{\frac{Q_a}{m}}{\frac{W}{m}}$$

$$COP = \frac{38.62}{164.18}$$

$$COP = 0.23$$

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

$$COP_{ideal} = \frac{77.36}{294 - 77.36}$$

$$COP_{ideal} = 0.35$$

- **Figure of Merit FOM :**

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

$$FOM = \frac{0.23}{0.35}$$

$$FOM = 0.65 = 65\%$$

• Taux de liquidité Y :

$$Y = \frac{Q_a}{m} \frac{1}{H_1 - H_F}$$

$$Y = \frac{38.62}{426.96}$$

$$Y = 0.09 = 9\%$$

$$Y = \frac{H_1 - H_2}{H_1 - H_F} + X1 \frac{(H_3 - H_{e1})}{(H_1 - H_F)} + X2 \frac{(H_5 - H_{e2})}{H_1 - H_F}$$

$$Y = \frac{304.95 - 302.89}{304.95 + 122.48} + 0.2 \frac{(277.49 - 143.50)}{(304.95 + 122.48)} + 0.1 \frac{202.58 - 104.91}{426.95}$$

$$Y = 0.09 = 9\%$$

Pour 3eme vase d'expansion :

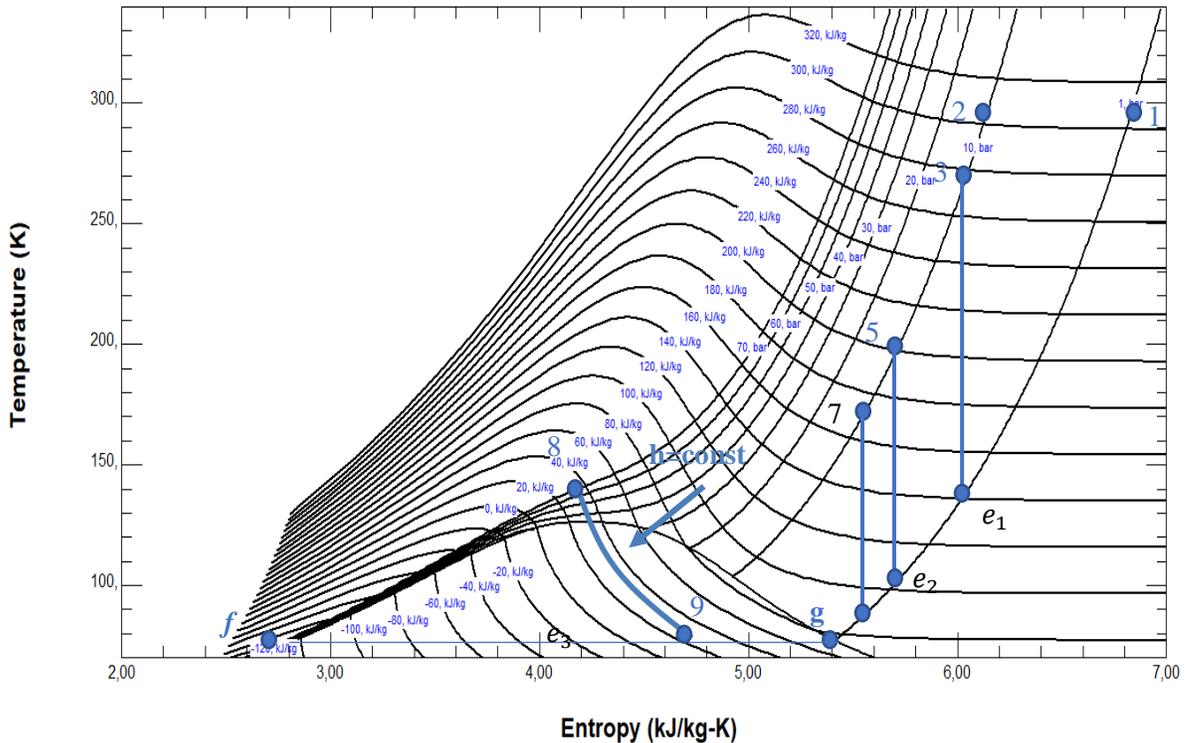


Figure 18: Diagramme T-S pour 3ème vases d'expansion Pour Azote

❖ Les paramètres du cycle (P, T, S, H) pour n vase d'expansion :

- Pour P=10bar et T=180K

Points	T(k)	P(bar)	H(kJ/kg)	S (KJ/kg. K)
1	294	1	304.95	6.8246
2	294	10	302.89	6.1348
7	180	10	180.73	5.6082
e ₃	92.36	1	93.68	5.6082

Tableau 4: les paramètres (P, T, S, H) au chaque points figuratifs du cycle

- L'effet de réfrigération :

$$\frac{Q_a}{m} = (H_1 - H_2) + \sum_j^n X_j(H_{2j+1} - H_{e_j})$$

Donc on obtient :

$$\frac{Q_a}{m} = H_1 - H_2 + X_1(H_3 - H_{e_1}) + X_2(H_5 - H_{e_2}) + X_3(H_7 - H_{e_3})$$

$$\frac{Q_a}{m} = (304.95 - 302.89) + 0.2(277.49 - 102.67) + 0.1(202.58 - 104.91) + 0.12(180.73 - 93.68)$$

- Travail de réfrigération :

$$\frac{W}{m} = T(S_1 - S_2) - (H_1 - H_2) + \sum_j^n X_j(H_{e_j} - H_{2j+1})$$

Donc on obtient :

$$\frac{W}{m} = T(S_1 - S_2) - (H_1 - H_2) + X_1(H_{e_1} - H_3) + X_2(H_{e_2} - H_5) + X_3(H_{e_3} - H_7)$$

$$\frac{W}{m} = 294(6.8246 - 6.1348) - (304.95 - 298.45) + 0.2(102.67 - 272.13) + 0.1(104.91 - 202.58) + 0.12(93.68 - 180.73)$$

- Le coefficient de performance :

$$COP = \frac{\frac{Q_a}{m}}{\frac{W}{m}}$$

$$COP = \frac{49.06}{153.49}$$

$$COP = 0.31$$

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

$$COP_{ideal} = \frac{77.36}{294 - 77.36}$$

$$COP_{ideal} = 0.35$$

- **Figure of Merit FOM :**

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

$$FOM = \frac{0.31}{0.35}$$

$$FOM = 0.89 = 89\%$$

- **Taux de liquidité Y :**

$$Y = \frac{\frac{Q_a}{m}}{H_1 - H_f}$$

$$Y = \frac{49.06}{(304.95 + 122.01)}$$

$$Y = 0.11 = 11\%$$

$$Y = \frac{H_1 - H_2}{H_1 - H_F} + X1 \frac{(H_3 - H_{e1})}{(H_1 - H_F)} + X2 \frac{(H_5 - H_{e2})}{H_1 - H_F} + X3 \frac{(H_7 - H_{e3})}{H_1 - H_F}$$

$$Y = \frac{304.95 - 302.89}{304.95 + 122.48} + 0.2 \frac{(277.49 - 143.50)}{(304.95 + 122.48)} + 0.1 \frac{202.58 - 104.91}{426.95} + 0.12 \frac{180.73 - 93.68}{426.95}$$

$$Y = 0.11 = 11\%$$

Pour Oxygène :

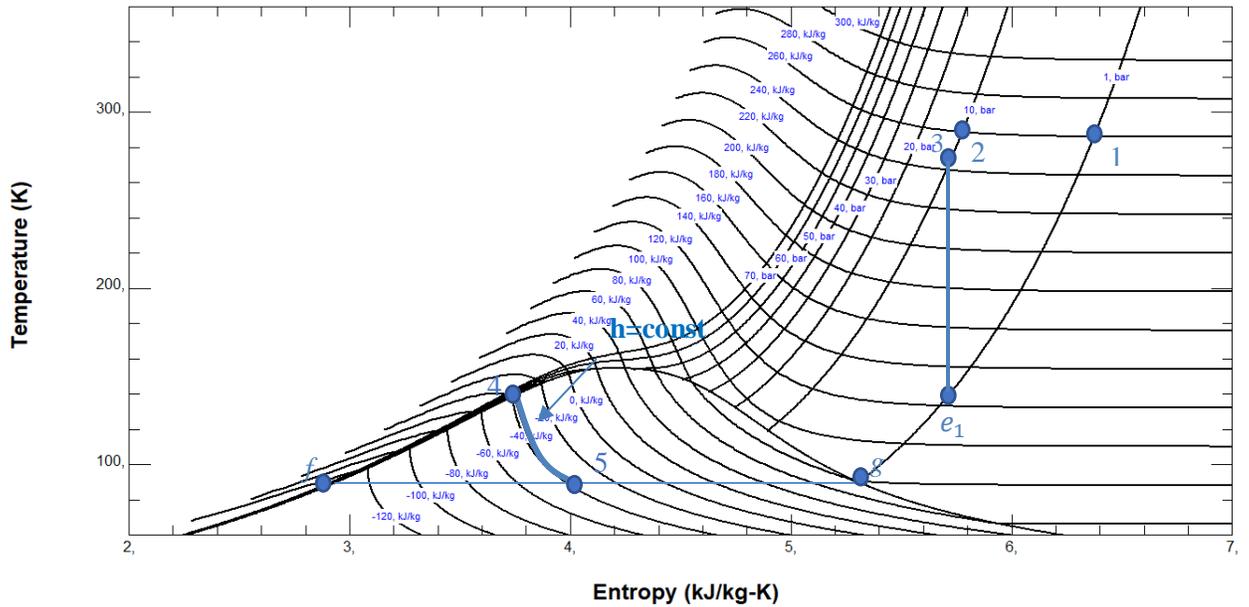


Figure 19: Diagramme T-S de cycle de Claude Pour Oxygène

❖ Les paramètres du cycle (P, T, S, H) :

- Pour P=10bar et T=270 K :

Points	T(k)	P(bar)	H(kJ/kg)	S (KJ/kg. K)
1	294	1	267.20	6.3977
2	294	10	264.92	5.7932
3	270	10	242.50	5.7137
e1	139.37	1	125.53	5.7137

Tableau 5: les paramètres (P, T, H, S) aux chaque points figuratifs du cycle

- L'effet de réfrigération :

$$\frac{Q_a}{m} = H_1 - H_2 + X1(H_3 - H_{e1})$$

$$\frac{Q_a}{m} = (267.20 - 264.92) + 0.2(242.50 - 125.53)$$

$$\frac{Q_a}{m} = 25.67 \text{ KJ/Kg}$$

- **Travail de réfrigération :**

$$\frac{W}{m} = T(S_1 - S_2) - (H_1 - H_2) + X1(H_{e1} - H_3)$$

$$\frac{W}{m} = 294(6.3977 - 5.7932) - (267.20 - 264.92) + 0.2(125.53 - 242.50)$$

$$\frac{W}{m} = 152.04 \text{ KJ/Kg}$$

- **Le coefficient de performance :**

$$COP = \frac{\frac{Q_a}{m}}{\frac{W}{m}}$$

$$COP = \frac{25.67}{152.04}$$

$$COP = 0.16$$

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

$$COP_{ideal} = \frac{90.18}{294 - 90.18}$$

$$COP_{ideal} = 0.44$$

- **Figure of Merit FOM :**

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

$$FOM = \frac{0.16}{0.44}$$

$$FOM = 38\%$$

- **Taux de liquidité :**

$$Y = \frac{\frac{Q_a}{m}}{H_1 - H_f}$$

$$Y = \frac{25.67}{267.20 - (-133.38)}$$

$$Y = 0.06 = 6\%$$

$$Y = \frac{H1 - H2}{H1 - Hf} + X1 \frac{(H3 - He1)}{(H1 - Hf)}$$

$$Y = \frac{267 - 264.92}{267 - (-133.38)} + 0.2 \frac{(242.5 - 125.53)}{(267.20 - (-133.38))}$$

$$Y = 0.6 = 6\%$$

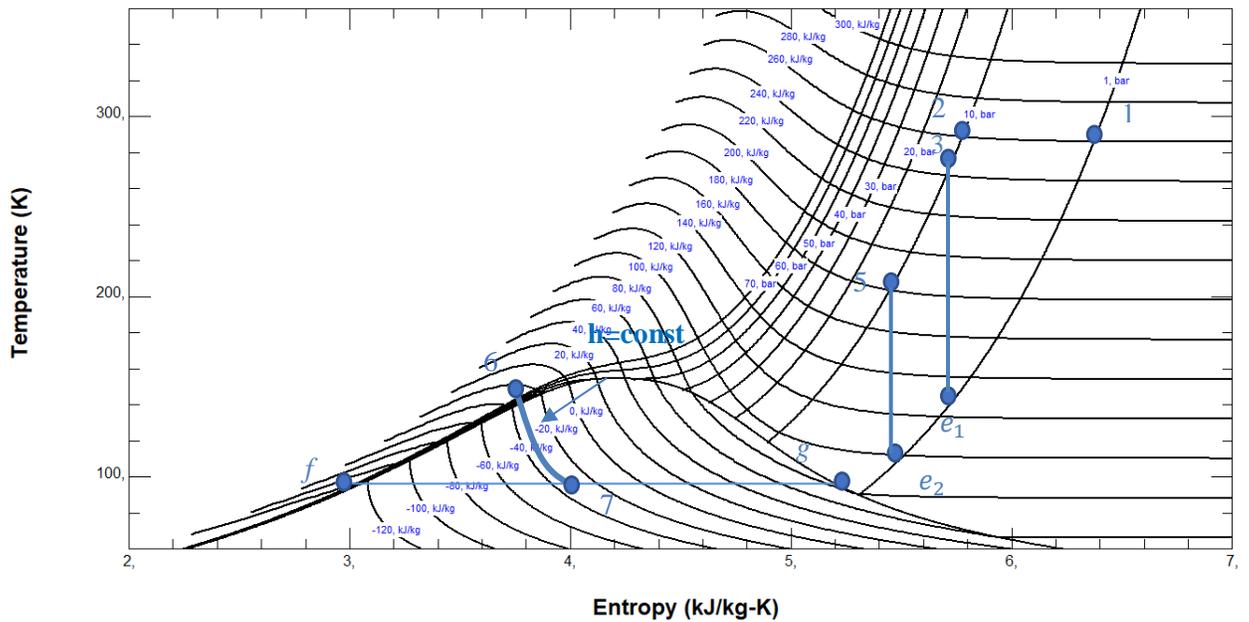


Figure 20 : Diagramme T-S pour cycle de Collins Pour Oxygène

❖ Les paramètres du cycle (P, T, S, H) :

- Pour P=10 bar et T=200K

Points	T(k)	P(bar)	H(kJ/kg)	S (KJ/kg. K)
1	294	1	267.20	6.3977
2	294	10	264.92	5.7932
3	270	10	242.50	5.7137
e1	139.30	1	125.53	5.7137
5	200	10	176.52	5.4307
e2	102.81	1	91.54	5.4307

Tableau 6: les paramètres (P, T, S, H) au chaque points figuratifs du cycle

- **L'effet de réfrigération :**

$$\frac{Q_a}{m} = H_1 - H_2 + X1(H_3 - H_{e1}) + X2(H_5 - H_{e2})$$

$$\frac{Q_a}{m} = 267.20 - 264.92 + 0.2(242.5 - 125.53) + 0.1(176.52 - 91.54)$$

$$\frac{Q_a}{m} = 34.17 \text{KJ/Kg}$$

- **Travail de réfrigération :**

$$\frac{W}{m} = T(S_1 - S_2) - (H_1 - H_2) + X1(H_{e1} - H_3) + X2(H_{e2} - H_5)$$

$$\frac{W}{m} = 294(6.39 - 5.79) - (267.20 - 264.92) + 0.2(125.53 - 242.50) + 0.1(91.54 - 176.52)$$

$$\frac{W}{m} = 143.55 \text{KJ/Kg}$$

- **Le coefficient de performance :**

$$COP = \frac{\frac{Q_a}{m}}{\frac{W}{m}}$$

$$COP = \frac{34.17}{143.55}$$

$$COP = 0.23$$

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

$$COP_{ideal} = \frac{90.18}{294 - 90.18}$$

$$COP_{ideal} = 0.44$$

- **Figure of Merit :**

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

$$FOM = \frac{0.23}{0.44}$$

$$FOM = 0.53 = 53\%$$

- **Taux de liquidité Y :**

$$Y = \frac{\frac{Q_a}{m}}{H_1 - H_f}$$

$$Y = \frac{34.17}{267.20 - (-133.38)}$$

$$Y = 0.08 = 8\%$$

$$Y = \frac{H_1 - H_2}{H_1 - H_F} + X1 \frac{(H_3 - H_{e1})}{(H_1 - H_F)} + X2 \frac{(H_5 - H_{e2})}{H_1 - H_F}$$

$$Y = \frac{267.20 - 264.92}{267.20 - (-133.38)} + 0.2 \frac{(242.50 - 125.53)}{(267.20 - (-133.38))} + 0.1 \frac{(176.52 - 91.54)}{267.20 - (-133.38)}$$

$$Y = 0.08 = 8\%$$

$$Y = 0.6 = 6\%$$

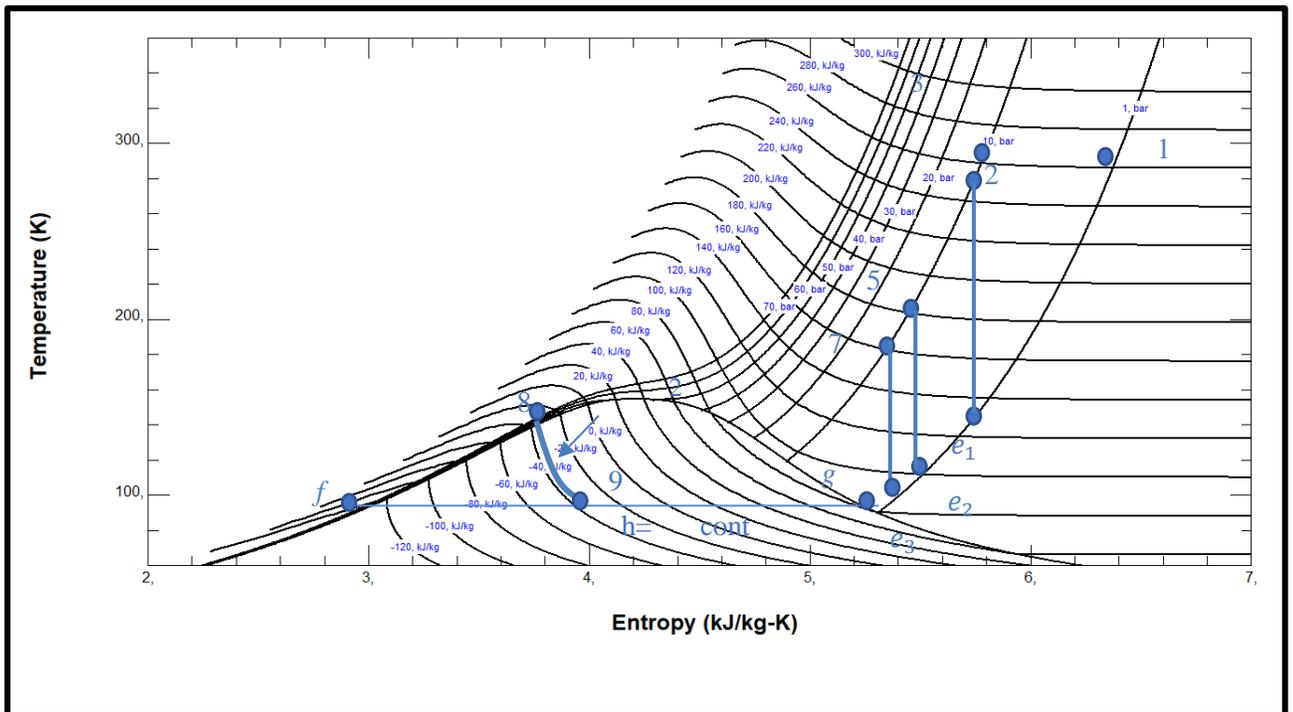


Figure 21: Diagramme T-S pour cycle a 3ème vase d'expansion Pour Oxygène

❖ Les paramètres du cycle (P, T, S, H) :

- Pour P=10bar et T= 180K :

Points	T(k)	P(bar)	H(kJ/kg)	S (KJ/kg. K)
1	294	1	267.20	6.3977
2	294	10	264.92	5.7932
7	180	10	157.22	5.3290
e3	92.19	1	81.64	5.3290

Tableau 7: les paramètres (P, T, S, H) au chaque points figuratifs du cycle

- L'effet de réfrigération :

$$\frac{Q_a}{m} = H_1 - H_2 + \sum_j^n X_j(H_{2j+1} - H_{e_j})$$

On obtient :

$$\frac{Q_a}{m} = H_1 - H_2 + X_1(H_3 - H_{e1}) + X_2(H_5 - H_{e2}) + X_3(H_7 - H_{e3})$$

$$\frac{Q_a}{m} = 267.20 - 264.92 + 0.2(242.5 - 125.53) + 0.1(176.52 - 91.54) + 0.12(157.22 - 81.64)$$

$$\frac{Q_a}{m} = 43.25 \text{ KJ/Kg}$$

- Travail de réfrigération :

$$\frac{W}{m} = T(S_1 - S_2) - (H_1 - H_2) + \sum_j^n X_j(H_{e_j} - H_{2j+1})$$

Donc on obtient :

$$\frac{W}{m} = T(S_1 - S_2) - (H_1 - H_2) + X_1(H_{e1} - H_3) + X_2(H_{e2} - H_5) + X_3(H_{e3} - H_7)$$

$$\begin{aligned} \frac{W}{m} &= 294(6.39 - 5.79) - (267.20 - 264.92) + 0.2(125.53 - 242.50) \\ &\quad + 0.1(91.54 - 176.52) + 0.12(81.64 - 157.22) \end{aligned}$$

$$\frac{W}{m} = 134.48 \text{ KJ/Kg}$$

- **Le coefficient de performance :**

$$COP = \frac{\frac{Q_a}{m}}{\frac{W}{m}}$$

$$COP = \frac{43.24}{134.48}$$

$$COP = 0.32$$

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

$$COP_{ideal} = \frac{90.18}{294 - 90.18}$$

$$COP_{ideal} = 0.44$$

- **Figure of Merit FOM :**

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

$$FOM = \frac{0.32}{0.44}$$

$$FOM = 0.72 = 72\%$$

- **Taux de liquidité Y :**

$$Y = \frac{\frac{Q_a}{m}}{H_1 - H_f}$$

$$Y = \frac{43.24}{267.20 - (-133.38)}$$

$$Y = 0.10 = \%10$$

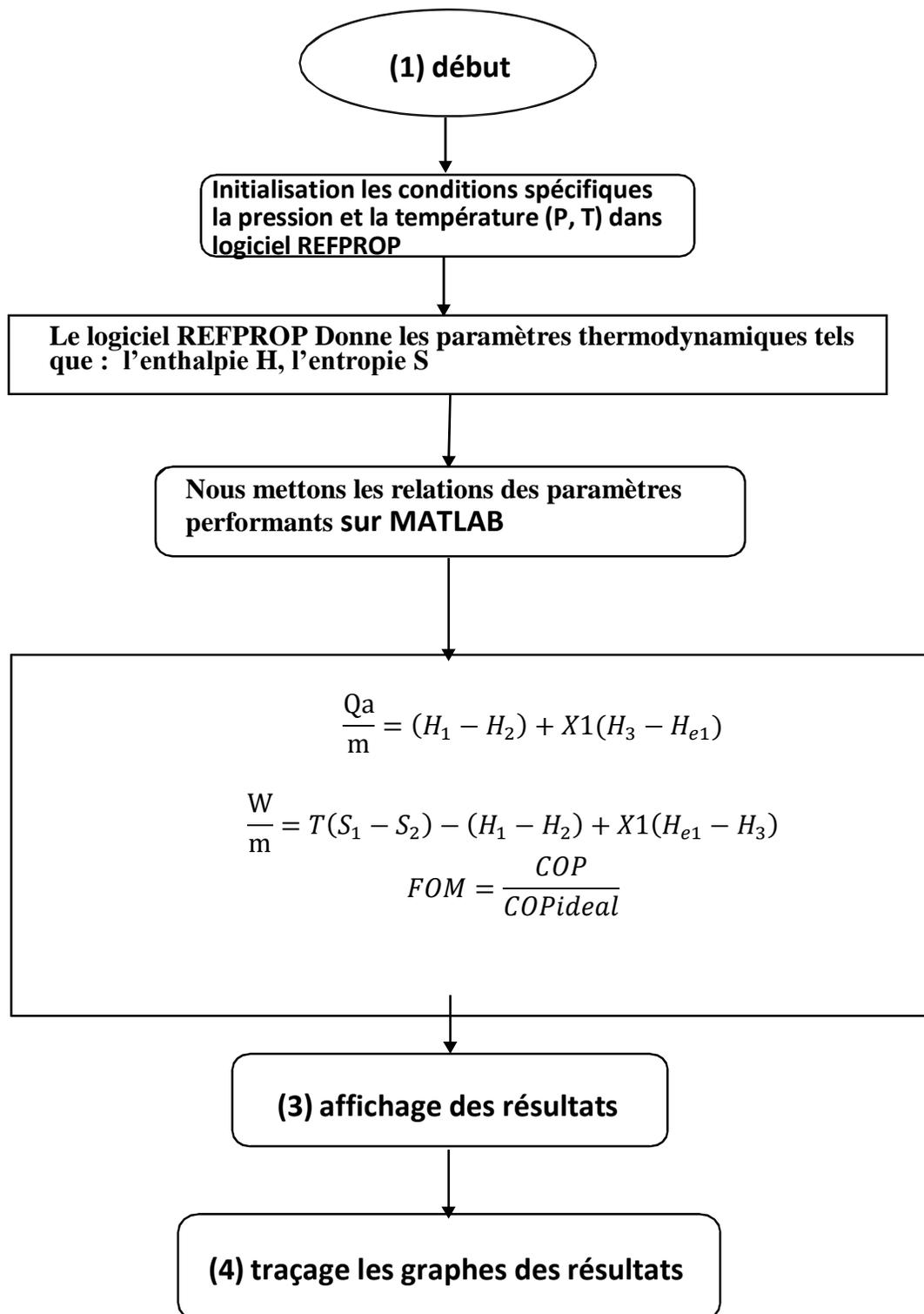
$$Y = \frac{H_1 - H_2}{H_1 - H_F} + X1 \frac{(H_3 - H_{e1})}{(H_1 - H_F)} + X2 \frac{(H_5 - H_{e2})}{H_1 - H_F} + X3 \frac{(H_7 - H_{e3})}{H_1 - H_F}$$

$$Y = \frac{267.20 - 264.92}{267.20 - (-133.38)} + 0.2 \frac{(242.50 - 125.53)}{(267.20 - (-133.38))} + 0.1 \frac{(176.52 - 91.54)}{267.20 - (-133.38)} +$$

$$0.12 \frac{(157.22 - 81.64)}{267.20 - (-133.38)}$$

$$Y = 0.10 = \%10$$

Chapitre 5 : Discussion des résultats



Introduction :

Ce chapitre se concentre sur la discussion des résultats obtenus à partir des diagrammes de l'effet de réfrigération et du travail de réfrigération, ainsi que FOM (figure de mérite). Ces diagrammes et mesures sont essentiels pour évaluer les performances d'un système de réfrigération.

5.1 Présentation du logiciel REFPROP :

Le logiciel REFPROP est conçu pour fournir des données thermodynamiques fiables et précises, telles que la densité, l'enthalpie, l'entropie, la viscosité, la conductivité thermique et d'autres propriétés importantes, en fonction des conditions spécifiques, telles que la température, la pression et la composition chimique du fluide.

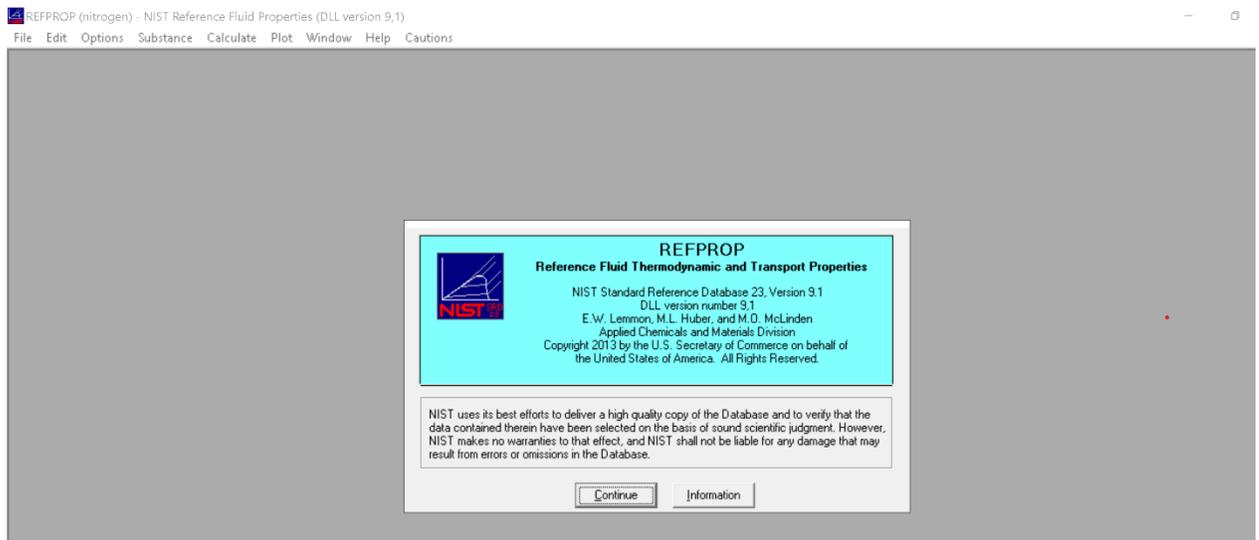


Figure 22 : Fenêtre de REFPROP

5.1.1 Définition de logiciel REFPROP :

Refprop est un logiciel largement utilisé dans le domaine de la thermodynamique et de la propriété des fluides. Il est développé par le National Institute of Standards and Technology (NIST) des États-Unis et est utilisé pour effectuer des calculs précis des propriétés thermodynamiques de divers fluides.

Exemple d'utilisation de REFRPROP

Choix de composé

Dans notre exemple on va choisir L'azote comme gaz de travail.

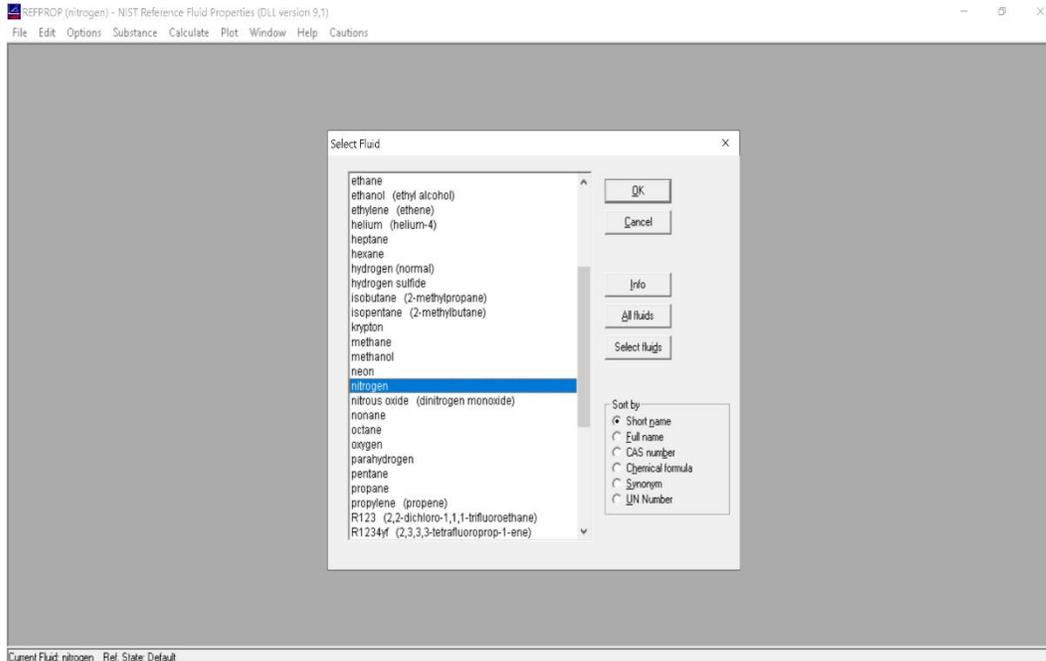


Figure 23:: Fenêtre pour choisir le fluide de travail

Sélection de tableau (Specified state points) :

Dans ce tableau il faut donner une température et pression pour déterminer les propriétés thermodynamiques tels que l'enthalpie, l'entropie et la viscosité.

REFPROP (nitrogen) - NIST Reference Fluid Properties (DLL version 9,1)
 File Edit Options Substance Calculate Plot Window Help Cautions

	Temperature (K)	Pressure (bar)	Density (kg/m ³)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)
1	294,00	1,0000	1,1463	304,95	6,8246
2	294,00	10,0000	11,484	302,89	6,1348
3	270,00	10,0000	12,537	277,49	6,0447
4	139,30	1,0000	2,4364	143,50	6,0447
5					

Figure 24 : Tableau (Specified state points) pour Azote

MATLAB R2014a

Workspace

Name	Value	Min	Max
COP	0.1659	0.1659	0.1659
COPideal	0.3571	0.3571	0.3571
FOM	0.4645	0.4645	0.4645
h1	304.9500	304.95...	304.95...
h2	302.8900	302.89...	302.89...
h3	277.4700	277.47...	277.47...
he	143.5000	143.50...	143.50...
hf	-122.0100	-122.0...	-122.0...
Qa	28.8540	28.8540	28.8540
S1	6.8246	6.8246	6.8246
S2	6.1348	6.1348	6.1348
T	294	294	294
Tc	294	294	294
Tf	77.3600	77.3600	77.3600
W	173.9472	173.94...	173.94...
X	0.2000	0.2000	0.2000
Y	0.0676	0.0676	0.0676

Editor - C:\Users\TechBox\OneDrive\Documents\MATLAB\Claudem

```

1 - h1=304.95;
2 - h2=302.89;
3 - h3=277.47;
4 - he=143.5;
5 - S1=6.8246;
6 - S2=6.1348;
7 - hf=-122.01;
8 - Tf=77.36;
9 - Tc=294;
10 - X=0.2;
11 - T=294;
12 - Qa=(h1-h2)+X*(h3-he);
13 - W=T*(S1-S2)-(h1-h2)+X*(he-h3);
14 - COPideal=Tf/(Tc-Tf);
15 - COP=Qa/W;
16 - Y=Qa/(h1-hf);
17 - FOM=COP/COPideal;
  
```

Command Window

```

>> Claude
>> FOM
FOM =
    0.4645
>> Qa
Qa =
    28.8540
>> W
W =
    173.9472
>> Y
Y =
    0.0676
  
```

Figure 25: Exemple sur fenêtre de Matlab de calculer les paramètres de performance POUR L'azote

Discussion des résultats :

Les courbes ci-dessous représentent la variation de Figure of Merit (FOM) en fonction de titre massique X pour chaque cycle de réfrigération

Chaque diagramme montre deux courbes le FOM pour l'azote et l'autre FOM pour l'oxygène

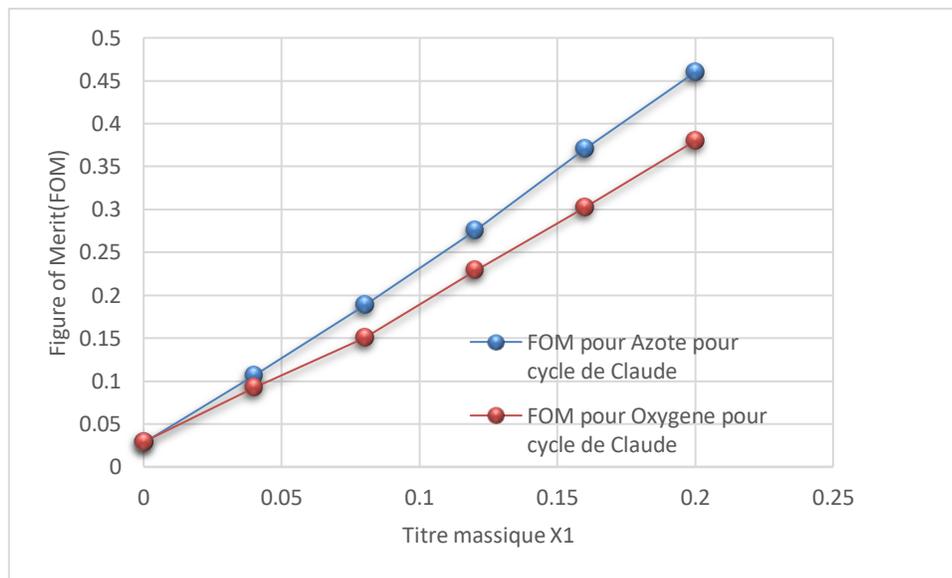


Figure 26 : diagramme de FOM en fonction de titre massique X1 pour cycle de Claude pour l'azote et l'oxygène

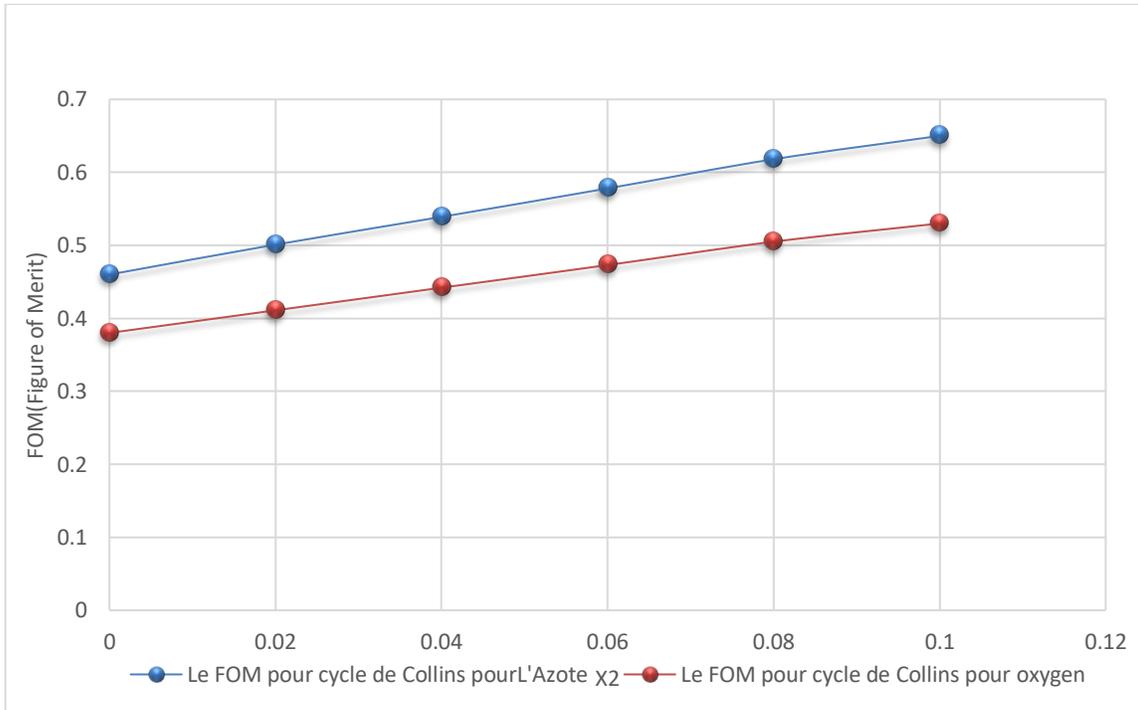


Figure 27 : Diagramme de FOM en fonction de Titre massique X_2 cycle Collins pour l'azote et l'oxygène

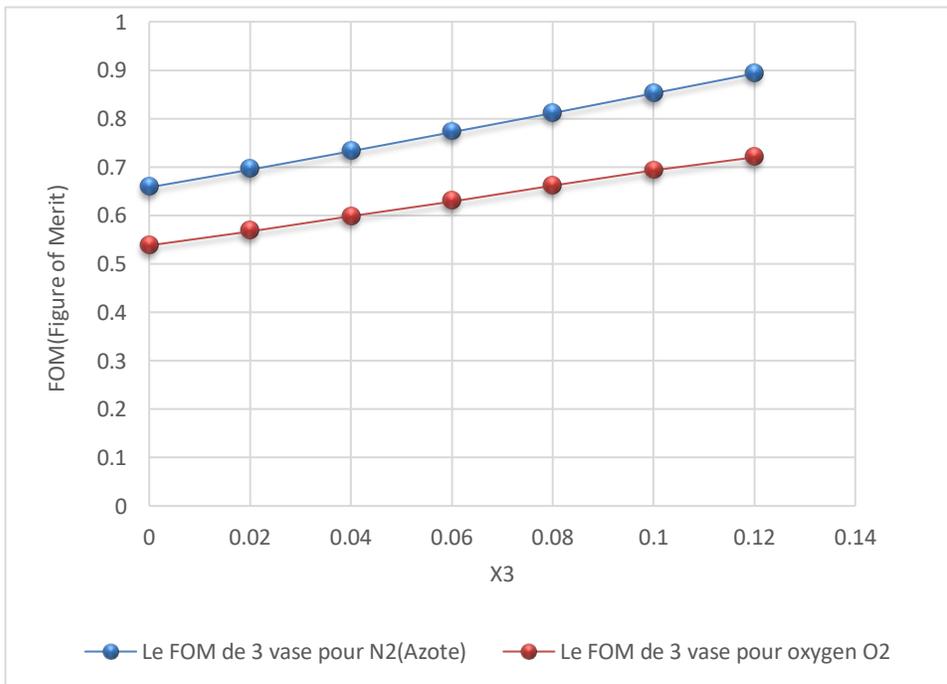


Figure 28: Diagramme de (Figure of Merit) FOM en fonction de X_3 pour le 3^{ème} vase d'expansion pour l'azote et l'oxygène

Discussion de résultats :

D'après les résultats obtenus par la figure 26 on constate que le Figure of Merit (FOM) augmente pour les deux fluides Azote et l'oxygène avec la croissance de titre massique (X1) pour cycle de Claude

Pour les mêmes deux fluides de travail considérés Azote et oxygène, on remarque que les valeurs de (Figure of Merit) FOM pour la figure 27 de cycle de Collins sont plus importantes que (Figure of Merit) FOM de cycle de Claude de la figure 26

Selon les résultats interprétés par la figure 28, On peut constater que l'augmentation du titre massique X3 entraîne une augmentation des valeurs de (Figure of Merit) FOM pour 3^{ème} vase d'expansion pour chaque fluide de travail

Et on voit bien que La valeur de FOM pour l'azote et oxygène de cycle de Collins est plus élevée que celle de cycle de Claude et a3^{ème} vase est beaucoup plus élevée que Claude et Collins

Les courbes ci-dessous représentent la variation de l'effet de réfrigération (Qa/m) en fonction de titre massique X pour chaque cycle de réfrigération

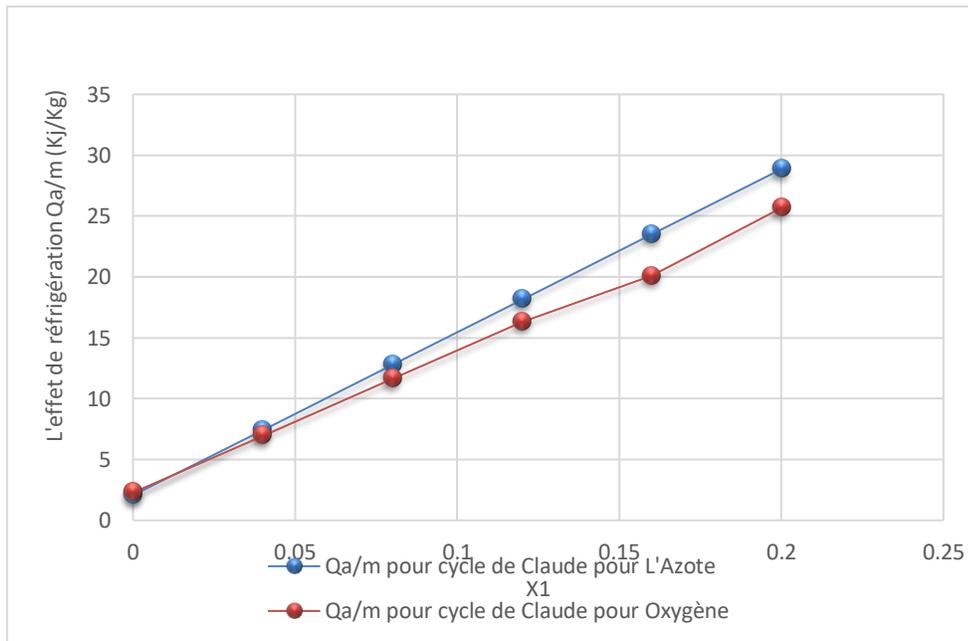


Figure 29:diagramme de l'effet de réfrigération en fonction de X1 pour cycle de Claude pour l'azote et l'oxygène

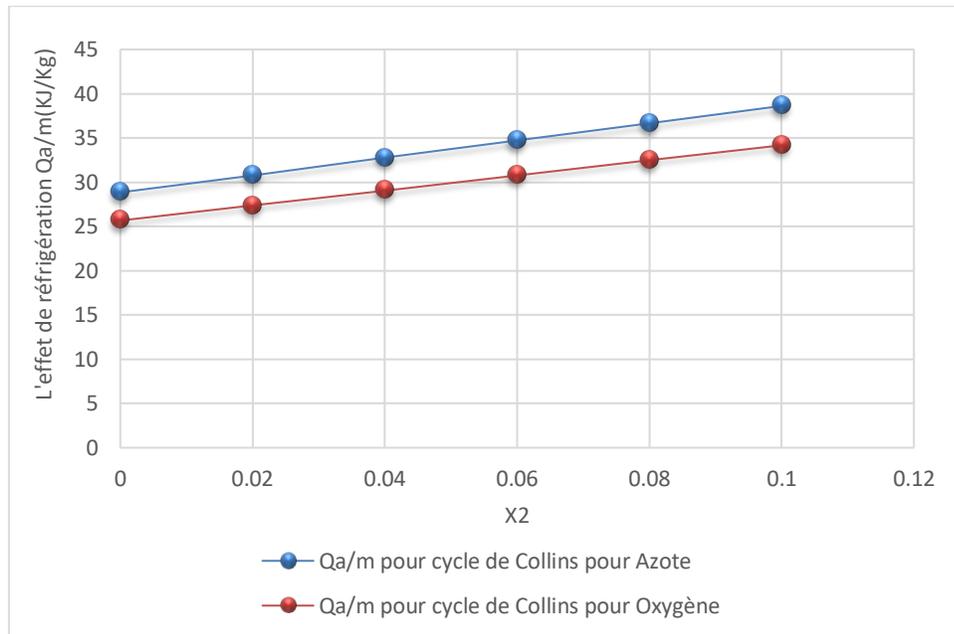


Figure 30 : diagramme de l'effet de réfrigération en fonction de X2 cycle Collins pour l'azote et l'oxygène

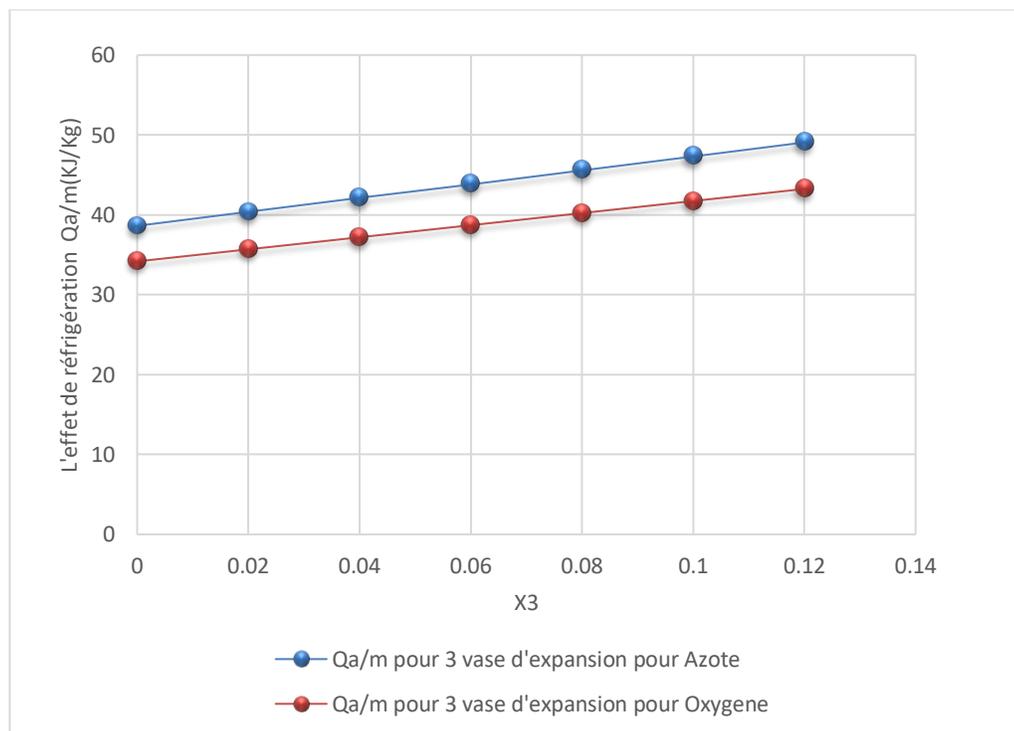


Figure 31 : diagramme de l'effet de réfrigération en fonction de X3 pour 3^{ème} vase d'expansion pour l'azote et l'oxygène

Selon les résultats interprétés par la figure **29**,

Le graphique montre que l'effet de réfrigération pour azote est généralement supérieur à celui pour l'oxygène pour chaque valeur de titre massique X_1 pour le cycle de Claude. Cela indique que l'azote a un effet de réfrigération plus important que l'oxygène.

De plus, on peut observer une augmentation générale de l'effet de réfrigération à mesure que le titre massique X_1 augmente pour les deux gaz dans le cycle de Claude. Cela suggère qu'une augmentation du titre massique entraîne une augmentation correspondante de l'effet de réfrigération, à la fois pour l'azote et l'oxygène, dans le cycle de Claude.

Dans le cycle de Collins, on peut également constater que l'effet de réfrigération pour l'azote est généralement supérieur à celui pour l'oxygène pour chaque valeur de titre massique X_2 . De plus, on observe une augmentation de l'effet de réfrigération avec l'augmentation du titre massique X_2 pour les deux fluides dans le cycle de Collins, Figure **30**.

D'après la figure**31**, L'effet de réfrigération pour l'azote est généralement supérieur à celui pour l'oxygène, et une augmentation de l'effet de réfrigération est observée avec l'augmentation du titre massique X_3 pour les deux fluides pour cycle à 3ème vase d'expansion.

Discussion des résultats :

Les courbes ci-dessous représentent la variation de travail de réfrigération en fonction de titre massique X pour chaque cycle de réfrigération.

Chaque diagramme montre deux courbes le travail de réfrigération pour l'azote et l'autre pour l'oxygène.

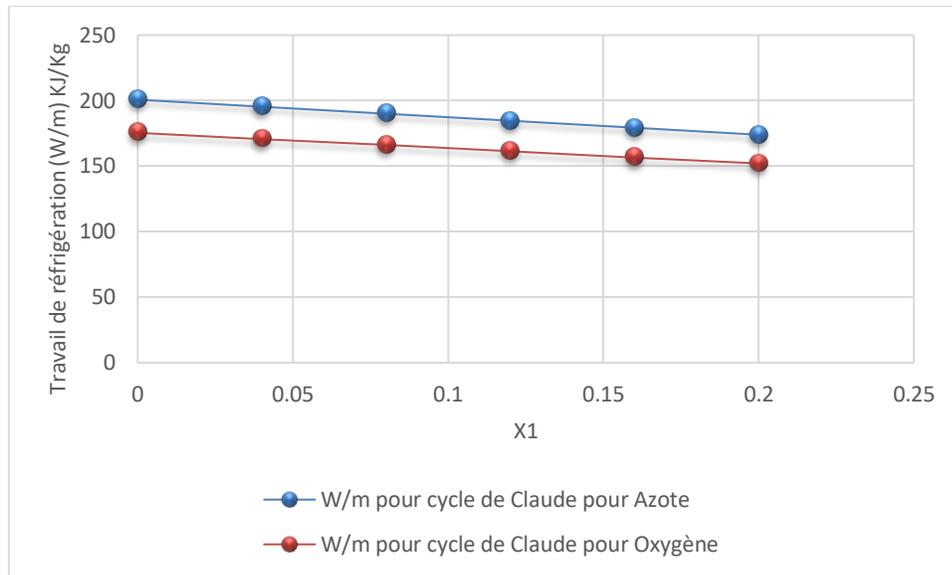


Figure 32:diagramme de travail de réfrigération en fonction de X1 pour Claude pour l'azote et oxygène

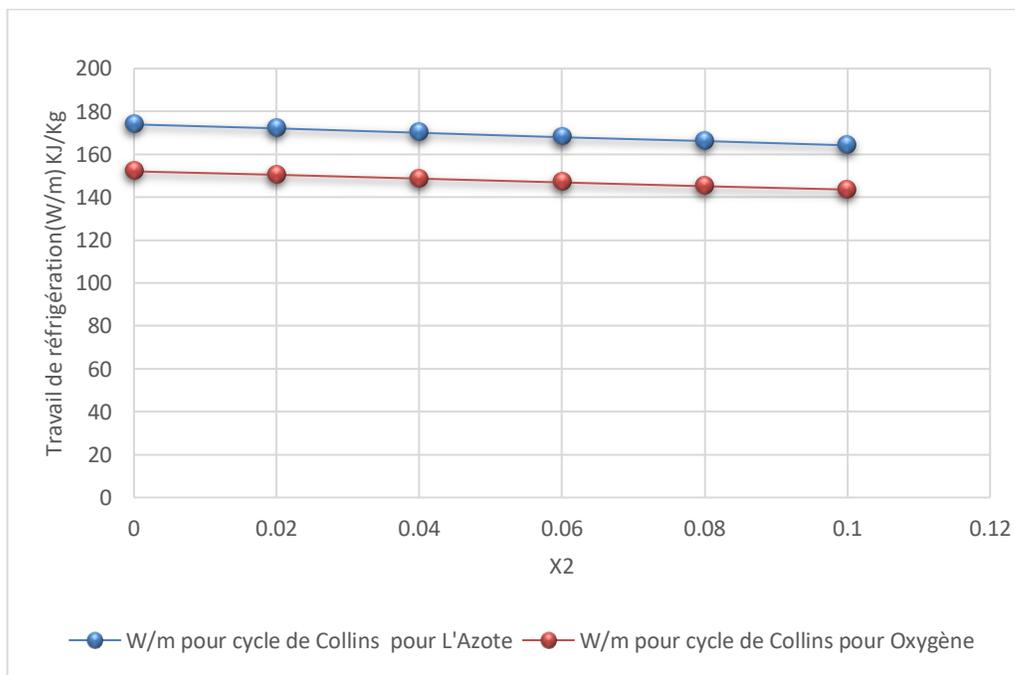


Figure 33:diagramme de travail de réfrigération en fonction de X2 cycle de Collins pour l'azote et oxygène

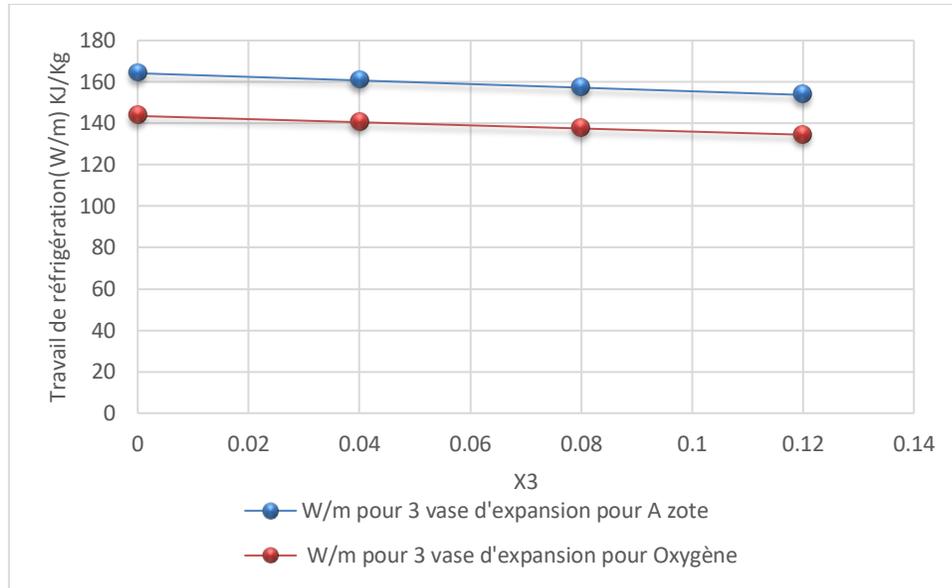


Figure 34: diagramme de travail de réfrigération en fonction de X3 pour 3^{ème} vase d'expansion pour l'azote et l'oxygène

Discussion de résultats :

La figure 32 montre que le travail de réfrigération de l'azote est généralement supérieur à celui réalisé avec l'oxygène pour chaque valeur de titre massique X1 pour cycle de Claude. Cela suggère que l'azote contribue davantage au travail réalisé par rapport à l'oxygène. De plus, on peut observer une diminution générale du travail à mesure que le titre massique X1 augmente pour les deux gaz dans le cycle de Claude. Cela indique une relation inverse entre le travail et le titre massique X1, ce qui signifie qu'une augmentation du titre massique X1 entraîne une diminution du travail de réfrigération, à la fois pour l'azote et l'oxygène, pour cycle de Claude.

D'après la figure 33, on peut également constater que le travail de réfrigération réalisé avec l'azote est généralement supérieur à celui réalisé avec l'oxygène pour chaque valeur de titre massique X2. De plus, on observe une diminution du travail à mesure que le titre massique X2 augmente pour les deux gaz dans le cycle de Collins.

D'après la figure 34, les tendances observées sont similaires aux figures de cycles de Claude et Collins. Le travail réalisé avec l'azote est généralement supérieur à celui réalisé avec l'oxygène, et une diminution du travail est observée avec l'augmentation du titre massique X3 pour les deux gaz dans le cycle à 3^{ème} vase d'expansion.

Conclusion de résultats :

	FOM Pour Azote	FOM Pour Oxygène
Cycle de Claude	46%	38%
Cycle de Collins	65%	53%
Cycle a 3 ^{ème} vase d'expansion	89%	72%

Tableau 8: tableau des résultats de Figure of Merit pour les trois cycles de réfrigération pour l'azote et l'oxygène

Figure of Merit (FOM) pour l'azote et l'oxygène :

- Dans le Cycle de Claude, le FOM pour l'azote est de 46 %, tandis que pour l'oxygène, il est de 38 %.
- Dans le Cycle de Collins, la FOM pour l'azote est de 65 %, tandis que pour l'oxygène, il est de 53 %.
- Dans le Cycle à 3^{ème} vase d'expansion, le FOM pour l'azote est de 89 %, tandis que pour l'oxygène, il est de 72 %.

On peut observer que le FOM est généralement plus élevée pour l'azote que pour l'oxygène dans tous les cycles de réfrigération. Cela indique que l'azote présente une meilleure performance par rapport à l'oxygène. Un FOM plus élevé implique une meilleure capacité de réfrigération

De plus, on peut noter que le FOM augmente généralement d'un cycle de réfrigération à l'autre pour les deux fluides, indiquant une amélioration de l'efficacité de refroidissement

	L'effet de réfrigération (KJ/Kg) pour Azote	L'effet de réfrigération (KJ/Kg) pour oxygène	Travail de réfrigération (KJ/Kg) pour Azote	Travail de réfrigération (KJ/Kg) pour oxygène
Cycle de Claude	28.85	25.67	173.94	152.04
Cycle de Collins	38.16	34.17	164.18	143.55
Cycle de 3 ^{ème} vase d'expansion	49.06	43.24	153.74	134.48

Tableau 9: tableau des résultats de l'effet de réfrigération et travail de réfrigération pour les trois cycles de réfrigération pour l'azote et l'oxygène

Effet de réfrigération pour l'azote et l'oxygène :

Dans le Cycle de Claude, l'effet de réfrigération pour l'azote est de 28,85 KJ/Kg, tandis que pour l'oxygène, il est de 25,67 KJ/Kg.

Dans le Cycle de Collins, l'effet de réfrigération pour l'azote est de 38,16 KJ/Kg, tandis que pour l'oxygène, il est de 34,17 KJ/Kg.

Dans le Cycle à 3^{ème} d'expansion, l'effet de réfrigération pour l'azote est de 49,06 KJ/Kg, tandis que pour l'oxygène, il est de 43,24 KJ/Kg.

On peut observer que l'effet de réfrigération est généralement plus élevé pour l'azote que pour l'oxygène dans tous les cycles de réfrigération. Cela indique que l'azote est plus efficace pour produire un effet de refroidissement par rapport à l'oxygène.

Travail de réfrigération pour l'azote et l'oxygène :

Dans le Cycle de Claude, le travail de réfrigération pour l'azote est de 173,94 KJ/Kg, tandis que pour l'oxygène, il est de 152,04 KJ/Kg.

Dans le Cycle de Collins, le travail de réfrigération pour l'azote est de 164,18 KJ/Kg, tandis que pour l'oxygène, il est de 143,55 KJ/Kg.

Dans le Cycle à 3^{ème} vase d'expansion, le travail de réfrigération pour l'azote est de 153,74 KJ/Kg, tandis que pour l'oxygène, il est de 134,48 KJ/Kg.

De manière similaire à l'effet de réfrigération, le travail de réfrigération est également plus élevé pour l'azote que pour l'oxygène dans tous les cycles de réfrigération. Cela suggère que l'utilisation de l'azote nécessite plus de travail pour obtenir l'effet de refroidissement souhaité par rapport à l'oxygène.

5.2 Diagrammes des paramètres de performance pour l'azote pour différents vases d'expansion (cycle de Claude, Collins, 3 vases d'expansion) :

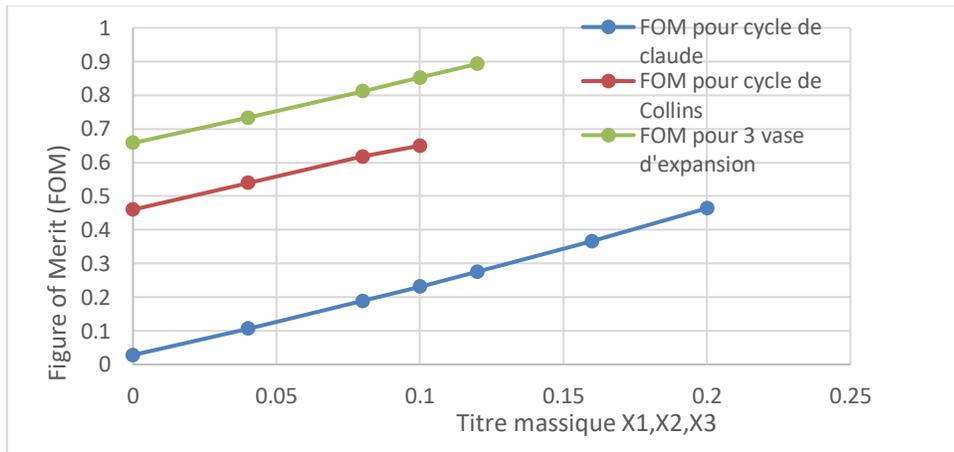


Figure 35: Diagramme de FOM fonction de titre massique Pour les 3 vases d'expansion (Claude colins et 3^{ème} vase) pour l'azote

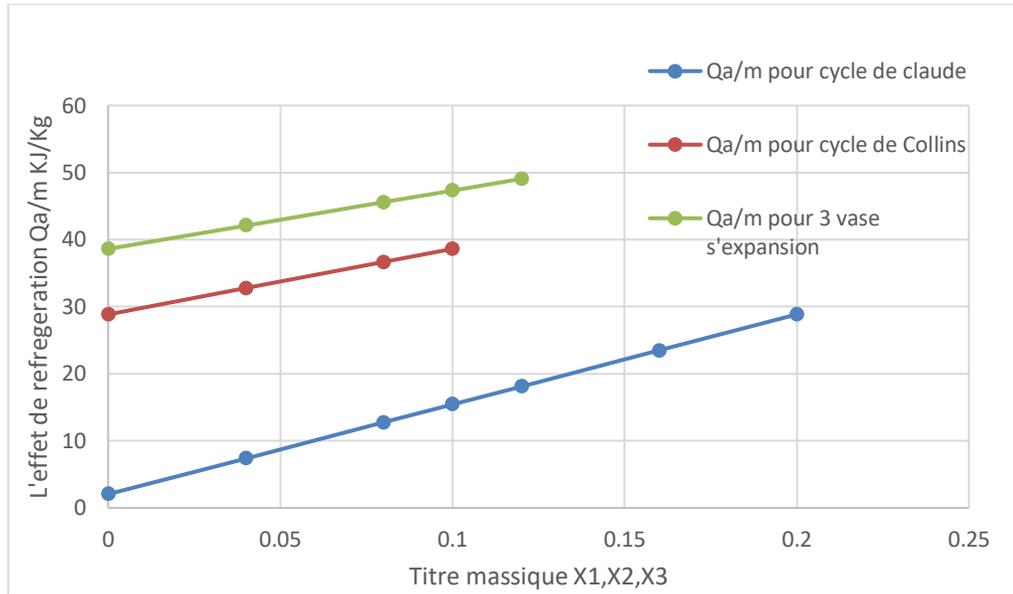


Figure 36: diagramme de l'effet de réfrigération en fonction de titre massique les 3 vases d'expansion (Claude Collins et 3^{ème} vase) pour l'azote

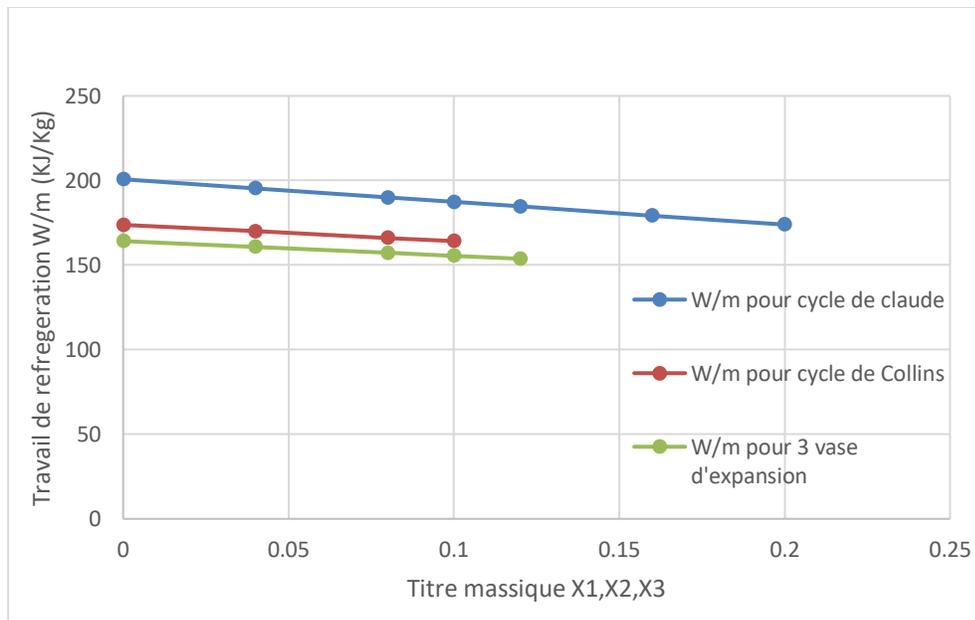


Figure 37 : diagramme de travail de réfrigération en fonction de titre massique les 3 vases d'expansion (Claude Collins et 3^{ème} vase) pour l'azote

5.3 Diagrammes des paramètres de performance pour l'oxygène pour différents vases d'expansion (cycle de Claude, Collins, 3eme vase d'expansion)

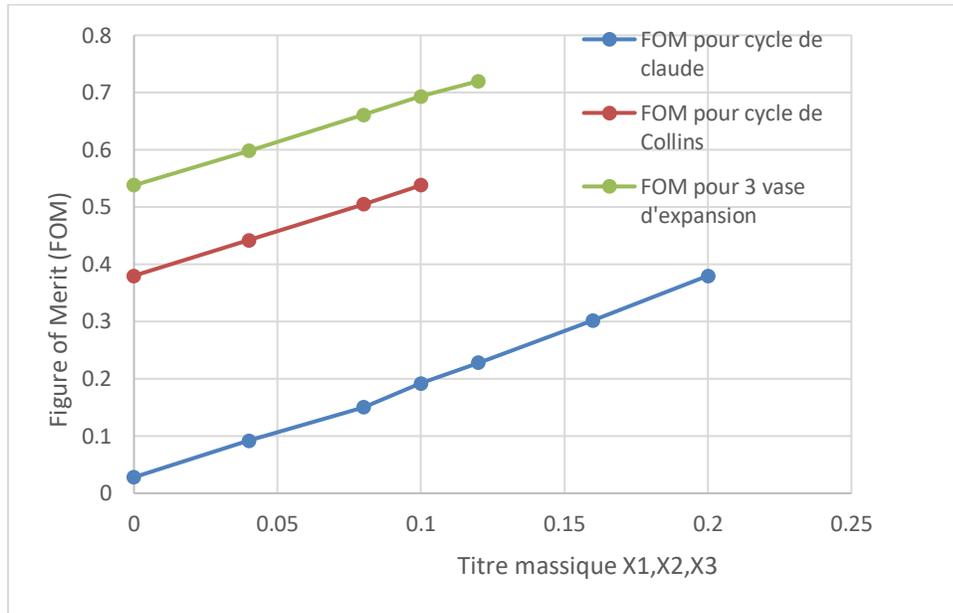


Figure 38: diagramme de Figure of Merit en fonction de titre massique X les 3 vases d'expansion (Claude Collins et 3eme vase) pour l'oxygène

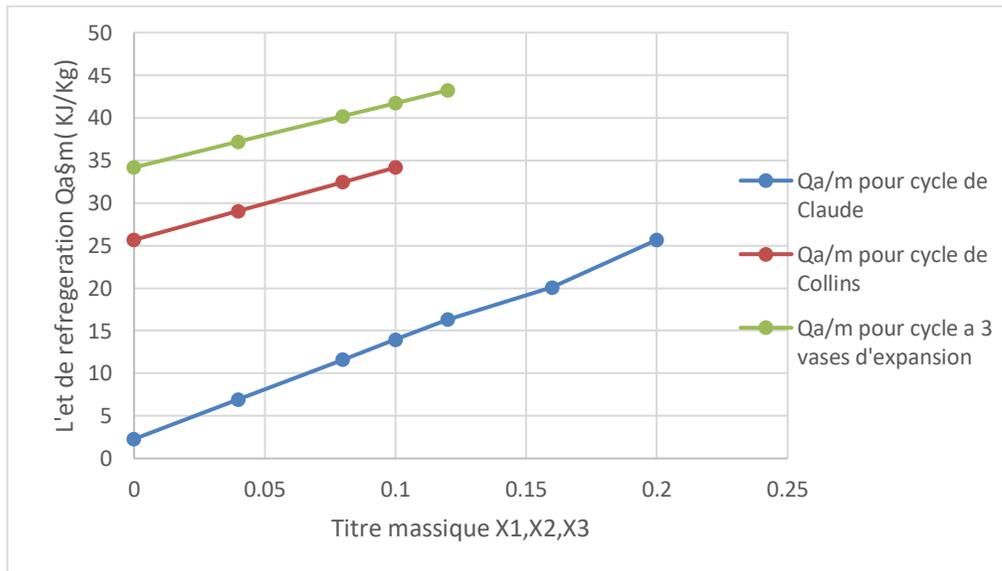


Figure 39: diagramme de l'effet de réfrigération en fonction de titre massique les 3 vases d'expansion (Claude Collins et 3^{ème} vase) pour l'oxygène

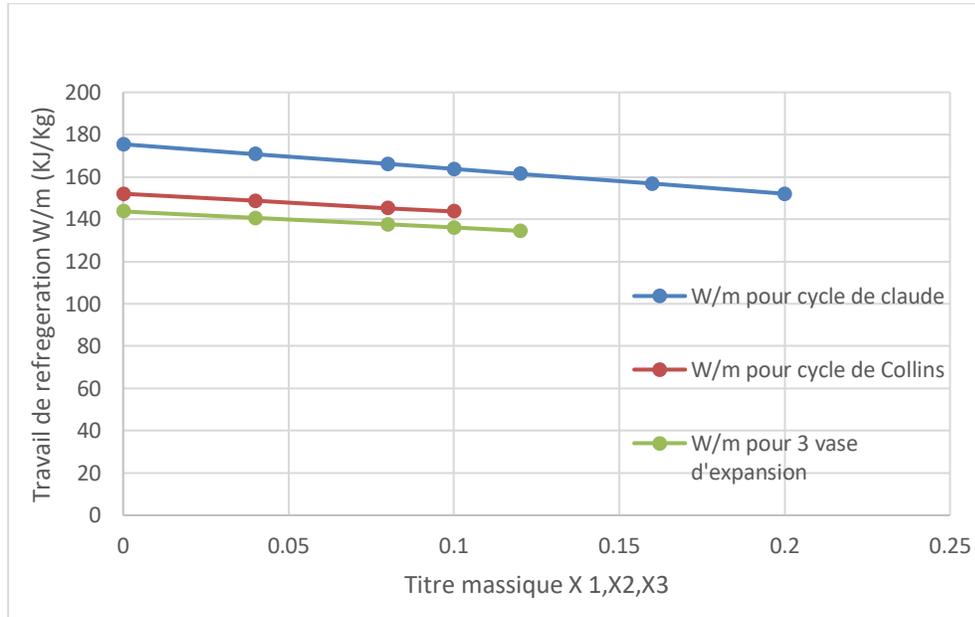


Figure 40:diagramme de Travail de réfrigération en fonction de titre massique les 3 vases d'expansion (Claude Collins et 3^{ème} vase) pour l'oxygène

Conclusion :

Ce chapitre est concentré sur l'évaluation des performances de trois cycles de réfrigération : le cycle de Claude, le cycle de Collins et le cycle à trois vases d'expansion. Nous avons comparé l'utilisation des fluides réfrigérants azote et oxygène dans ces cycles. Les résultats ont clairement démontré que l'azote surpassait l'oxygène en termes de performance de réfrigération. Ainsi, nous pouvons conclure que l'utilisation de l'azote comme fluide réfrigérant dans les cycles de réfrigération étudiés (Claude, Collins et trois vases d'expansion) offre des performances supérieures par rapport à l'oxygène. Les paramètres thermodynamiques, tels que l'enthalpie et l'entropie, ont été obtenus à l'aide du logiciel REFPROP en fonction des conditions spécifiques de température et de pression.

Conclusion générale :

L'objectif de ce travail est l'étude de plusieurs vases d'expansion (cycle de Claude, COLLINS et 3eme vase d'expansion) pour montrer que les paramètres de performances tel que l'effet de réfrigération, travail et le figure of Merit augmente d'un cycle à l'autre.

En conclusion, notre étude a porté sur trois cycles de réfrigération : le cycle de Claude, le cycle de Collins et le cycle a 3^{ème} vase d'expansion Nous avons utilisé les fluides réfrigérants azote et oxygène pour évaluer les performances de ces cycles.

Nos résultats ont clairement démontré que l'azote présente une meilleure performance de réfrigération que l'oxygène, Sur la base de ces résultats, nous pouvons conclure que l'utilisation de l'azote comme fluide réfrigérant dans les cycles de réfrigération étudiés (Claude, Collins et trois vases) offre des performances supérieures par rapport à l'oxygène. Cela signifie que l'utilisation de l'azote Permet d'obtenir une bonne réfrigération, un meilleur travail de réfrigération para port à l'oxygène, et un meilleur Figure of Merit

Cependant, nous avons également constaté que le cycle de Claude est le plus couramment utilisé dans la pratique. Cette préférence peut expliquer par le fait que le cycle de Claude est moins coûteux à mettre en œuvre par rapport au cycle de Collins et cycle a 3^{ème} vase. De plus, malgré des performances légèrement inférieures à celles des autres cycles, le cycle de Claude offre une bonne performance de réfrigération tout en nécessitant moins de travail.

REFERENCES ET BIBLIOGRAPH :

- [1] (AIR LIQUIDE ADVANCED TECHNOLOGIES L'INGENIERIE DE LA CRYOGENIE ET DES GAZ)
- [2] WILLIAMSON (K.D) et EDESKUTY (F,J) – Liquid Cryogens. Vol I : Theory and equipment
Vol III Properties and Applications CRC Press.Inc (1983)
- [3] cours de MR Benkhada liquéfaction et réfrigération cryogénique.
- [4] Flynn, D., "Cryogenics: A Textbook" (2nd edition), Springer, 2015.
- [5] CRYOGENIC SYSTEMS (second edition) by RANDALL F. BARRON
- [6] "Cryogenic Engineering" par Thomas Flynn et Paul McMullen
- [7] "Advances in Cryogenic Engineering" (série de livres) édité par R.W. Fast et W.I. Fickett
- [8] Technique De l'ingénieur.
- [9] HASELDEN G.G. Cryogenic Fundamentals (1971).
- [10] PHILIPPE LEBRUN, Cryophysique et Cryo-ingénierie .CERN, Organisation européenne pour la Recherche Nucléaire, Bulletin de l'IIF (2003).
- [11] Djelloul Amel, 'simulation de cycle de Claude pour la liquéfaction de l'air, de l'azote et de l'oxygène', mémoire magister, Alger2006, Constantine.
- [12] MEMOIRE MASTER ANALYSE THERMODYNAMIQUE D'UN LIQUEFACTEUR DE GAZ DE TYPE LINDE
- [13] Mémoire de fin d'étude « séparation cryogénique de l'air » réalisé par : Medjdoul hamza et Chekroune Sofiane 2015
- [14] A.ARKHAROV Theory and design of Cryogenic Systems (September 1, 1981).
- [15] A.ARKHAROV Theory and design of Cryogenic Systems (September 1, 1981).
- [16] Flynn, D., "Cryogenics: A Textbook" (2nd edition), Springer, 2015
- [17] "Cryogenic Fluids" par le National Institute of Standards and Technology (NIST)
- [18] G. Levy, "Cryogenic Fluids," in Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology, Springer, 2012. (DOI: 10.1007/978-1-4614-4259-7_13)
- [19] W. F. Hofmeister, "Cryogenic Fluid Properties and Applications," NIST Technical Note 1334, National Institute of Standards and Technology, 1999
- [20] Bannister, A. J., & Raymond, C. (2008). Refrigeration and Air-Conditioning (4th Ed.). Butterworth-Heinemann.

[21] Stoecker, W. F., & Jones, J. W. (2017). Refrigeration and Air Conditioning (4th Ed.). McGraw-Hill Education.

[22] Arora, S. C. (2014). Refrigeration and Air Conditioning. PHI Learning.

Annexes

Diagramme T-S de l'oxygène

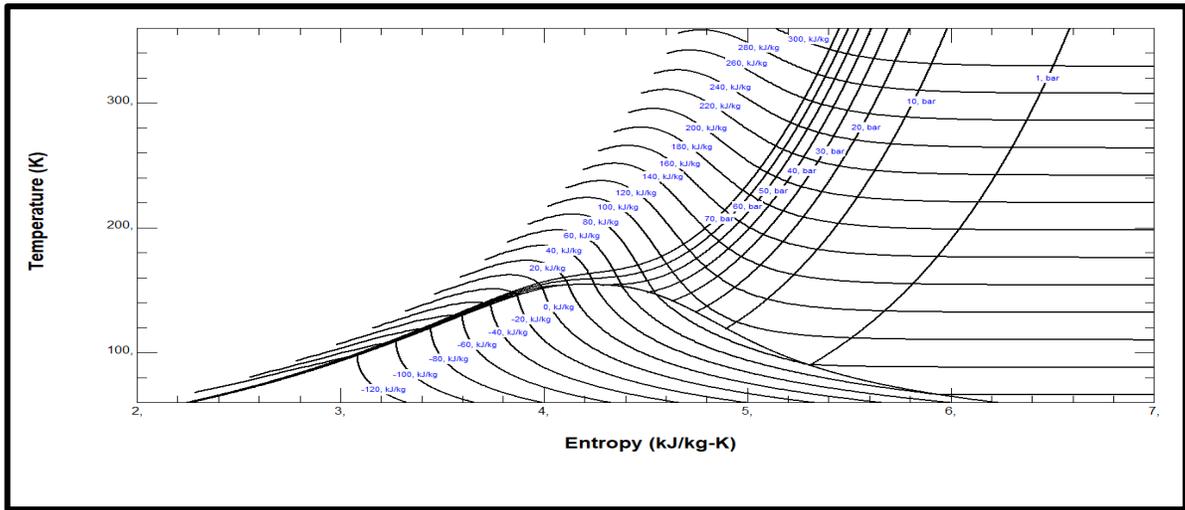


Diagramme T-S de l'azote

