

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Technologie

Département : Génie mécanique

Domaine : Sciences et techniques

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Energétique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

Analyse énergétique et exergetique d' une
installation cryogénique à refroidissement préalable

Présenté par : **OUAMANE SAMI MOHAMED SALAH**

Encadrant : Pr. **SARI MOHAMED RAFIK**

Université Badji Mokhtar Annaba

Jury de Soutenance :

DJEMILI ABDELOUAHEB	Professeur	UBMA	Président
SARI MOHAMED RAFIK	Professeur	UBMA	Encadrant
NEHAL ABDELAZIZ	Professeur	UBMA	Examineur

Année Universitaire : 2022/2023

Remerciements :

Après avoir accompli ce travail humble, je souhaite exprimer ma gratitude au Allah, le Créateur de l'univers, pour m'avoir doté d'intelligence et de bonne santé, ce qui m'a permis de mener à bien cette année d'étude.

Je tiens également à exprimer ma gratitude envers ma chère famille qui m'a soutenu tout au long de mon parcours universitaire.

*Je souhaite sincèrement remercier mon directeur de mémoire **Monsieur SARF Mohamed Rafik**, pour ses précieuses conseils et son soutien infailible durant mes études. En outre, je suis reconnaissant envers tous les enseignants qui ont partagé leur savoir et leur expérience avec moi.*

Je tiens à remercier également les membres du jury pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Je suis très reconnaissant à toutes les personnes qui ont participé à la réussite de ce travail.

Dédicace :

Je souhaite dédier humblement ce travail à mes chers parents, pour leur dévouement, leur affection, leur soutien et leurs prières qui ont été constants tout au long de ma formation.

A ma chère sœur et frère pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral, à toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

A tous mes chers amis et tous les étudiants de l'université de Badji Mokhtar. Je leur souhaite beaucoup de succès, de progrès et de bonheur dans la vie.

Et enfin je le dédie A tous les enseignants et toute la famille universitaire d'Annaba.

Merci d'être toujours là pour moi.

OUAMANE SAMI MOHAMMED SALAH

Sommaire

Nomenclature

Introduction générale.....1

Chapitre I

Les installations cryogéniques.

I.1.Introduction.....2

I.2 Définition et historique de la cryogénie.....2

I.2.1 Définition.....2

I.2.2 Histoire.....3

I.3 Les propriétés physiques aux basses températures.....5

I.3.1 Les propriétés des fluides cryogéniques.....5

I.3.2 Les propriétés des matériaux.....5

I.3.3 Propriétés thermiques.....5

I.3.3 Propriétés mécaniques.....6

I.4 Transfert thermique.....6

I.4.1Conduction.....6

I.4.2 Convection.....7

I.4.3Rayonnement.....7

I.5 Applications cryogéniques.....8

I.6 Domaine d'utilisation de la cryogénie.....10

I.7 Définitions et propriétés de quelques gaz permanents.....11

I.7.1 L'azote.....11

I.7.2 L'air.....12

I.7.3 L'argon.....15

I.8 Liquéfaction du gaz naturel.....16

1-Epuration.....16

2-Déshydratation.....16

3-Pré refroidissement.....16

4-Liquéfaction.....	16
I.9 Stockage du gaz naturel liquéfié (GNL).....	17

Chapitre II

Les cycles de liquéfaction.

II.1 Définition de la réfrigération et la liquéfaction.....	18
II.1.1. Définition de la réfrigération.....	18
II.1.2. Définition de la liquéfaction.....	18
II.2. Les cycles de base pour la liquéfaction des gaz.....	20
I.2.1 Cycle idéal de liquéfaction.....	20
I.2.2 Cycle théorique de Brayton inverse.....	21
II.2.3. Cycle à étranglement simple ou cycle de LINDE.....	23

Chapitre III

Analyse énergétique et exergetique du cycle de refroidissement préalable.

III.1.1 Introduction.....	25
III.1.2 Cycle à étranglement simple avec refroidissement préalable.....	25
III.3 Problématique (liquéfaction de l'air)	29
III.3.1 Démarche de calcul.....	30
III.3.1.1 Analyse énergétique.....	30
III.3.1.1.1 Effet de la variation de la pression de sortie P_2	30
a- Pour une pression $P_2=200$ bar.....	30
b- Pour une pression $P_2=100$ bar.....	34
c- Pour une pression $P_2=50$ bar.....	36
III.3.1.1.2 Effet de la variation de la température d'entrée T_0	39
a- Pour une température $T_0=280$ K.....	39

b- Pour une température $T_0=300\text{ K}$	42
c- Pour une température $T_0=320\text{ K}$	44
III.4 Analyse exergetique.....	47
III.5 Discussion des résultats.....	51
Conclusion générale.....	54
Références bibliographiques.....	55
Liste des figures.....	57
Liste des tableaux.....	58
Résumé.....	59

NOMENCLATURE

Nomenclature	
T : Température à laquelle se produit le frottement	K.
T_0 : Température de référence	K.
T_X : Température de condensation	K.
T_a : Température du milieu ambiant	K.
X : Coefficient de liquéfaction.	KJ/kgliq
Q_{in} : Imperfection de l'échangeur de chaleur	KJ/kg
Q_a : Apport de chaleur	KJ/kg
C_p : Chaleur spécifique à pression constante	KJ/kg
Q_0^L : Quantité de chaleur enlevée du gaz de travail par le liquide réfrigérant	KJ/kg. g. T
$Q_{x,supp}$: Puissance frigorifique supplémentaire nécessaire au refroidissement préalable	KJ/kg
h : Enthalpie massique	KJ/kg
S : Entropie	KJ/kg K
r : Constante spécifique des gaz	KJ/kg K.
W_0^L : Travail spécifique	KJ/Kg _{liq} .
$W_{supplimentaire}$: Travail supplémentaire	KJ/kg .
W_{totale} : Travail total	KJ/kg .
W_K : Travail du compresseur	KJ/kg .
β_0 : Coefficient correcteur.	-
η_K : Rendement du compresseur.	-
G_0 : Quantité du liquide réfrigérant.	Kg/Kg
h_0 : enthalpie de référence	KJ/kg .
S_0 : entropie de référence	KJ/kg .
Q_X : Puissance frigorifique du cycle.	KJ/kg
ε^L : Coefficient frigorifique.	-
W_r : Travail réel	KJ/kg .
η : Rendement thermodynamique.	-
\dot{m} : le débit masse	Kg/s.

Nomenclature.

E_X : Exergie	KW.
E_{Xd} : Exergie détruite	KW.
T_p : Température de la paroi	[K].
T_f : Température du fluide loin de la paroi	[K].
h_c : coefficient de convection	[W/m ² . K].
W_R : Énergie rayonnée exprimée	Watt.
\mathcal{E}_r : facteur qui tient compte des pouvoirs émissifs e_1 et e_2 des surfaces aux températures T_1 et T_2 .	

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

La cryogénie est un domaine scientifique qui se focalise sur les températures extrêmement basses. En effet, cette discipline se concentre sur la température critique à laquelle les gaz usuels, tels que le méthane, l'oxygène, l'azote, le néon, l'hydrogène et l'hélium, passent de l'état gazeux à l'état liquide.

La cryogénie est donc d'une importance capitale et offre une multitude d'applications, que ce soit dans les domaines alimentaires, médicaux, industriels et physiques.

Les installations de liquéfaction des gaz sont associées à une définition claire des paramètres de fonctionnement, ce qui permet d'optimiser les performances des cycles cryogéniques afin d'obtenir la plus grande quantité de gaz liquide avec des coûts de main-d'œuvre amoindrie.

Dans cette étude, nous nous sommes particulièrement intéressés à la recherche des paramètres opératoires appliqués sur le cycle de refroidissement préalable pour la liquéfaction de l'air et dont l'objectif principal est d'avoir une meilleure performance.

Le mémoire est structuré en trois chapitres, qui sont organisés de la manière suivante :

Le premier chapitre aborde les concepts fondamentaux de la cryogénie. Il se concentre principalement sur la définition de la cryogénie et les diverses techniques utilisées pour produire des températures basses.

Le deuxième chapitre est principalement concentré sur le principe de réfrigération et de liquéfaction. Une attention particulière a été également dédiée aux différents cycles cryogéniques,

Le troisième chapitre se focalise sur une analyse énergétique et exergetique du cycle cryogénique de liquéfaction à étranglement simple avec refroidissement préalable. L'objectif est d'évaluer les performances énergétiques et de mesurer la qualité thermodynamique de l'installation étudiée. Une évaluation des pertes exergetiques et du rendement exergetique a été réalisée. Enfin, nous terminons avec une conclusion générale.

CHAPITRE I

I.1.Introduction :

La cryogénie se concentre sur l'étude et la production de températures extrêmement basses, inférieures à -150°C ou 120 K, afin de mieux comprendre les phénomènes physiques qui s'y produisent. Cette discipline atteint sa limite à $-153,15^{\circ}\text{C}$, où les gaz de l'air se liquéfient. La cryogénie est utilisée dans de nombreux domaines, tels que l'alimentation, la médecine, l'industrie, la physique et l'élevage.[1]

I.2 Définition et historique de la cryogénie :

I.2.1 Définition :

La cryogénie fait référence aux techniques de refroidissement à très basse température (généralement inférieure à 125 K), qui diffèrent des systèmes de refroidissement conventionnels. De nombreux procédés de cryogénie impliquent la liquéfaction de gaz permanents tels que l'air, le gaz naturel, l'hydrogène ou l'hélium. Ces techniques sont couramment utilisées dans des domaines tels que la recherche scientifique, l'industrie spatiale et les technologies de pointe.

La cryogénie est un domaine de l'ingénierie qui se concentre sur les systèmes qui fonctionnent à des températures extrêmement basses, ce qui présente des défis uniques, notamment en ce qui concerne les fluides et les matériaux.

Les systèmes cryogéniques peuvent être utilisés pour la conservation ou la production de froid.

Pour conserver le froid, il est nécessaire d'isoler les gaz en créant un vide. Pour produire du froid, la température d'un gaz est abaissée pour extraire la chaleur et le liquéfier. Les liquides cryogéniques sont généralement désignés par leur symbole chimique précédé de la lettre "L", tels que LN₂, LO₂, LH₂ et Lar.

Les cycles de réfrigération et de liquéfaction cryogéniques impliquent une combinaison de compression, de refroidissement, de régénération thermique et de détente isenthalpique ou adiabatique des fluides. [2]

On peut distinguer quatre grandes familles de procédés thermodynamiques cryogéniques :

- Les procédés à détente isenthalpique de Joule-Thomson
- Les cycles inverses de Brayton à détente isentropique
- Les procédés mixtes associant une détente isenthalpique et une détente isentropique (cycle de Claude)

- Les cascades classiques ou intégrées

I.2.2 Histoire :

Les grandes dates de l'**histoire de la cryogénie** sont :

- 1789 : Martin van Marum liquéfie l'ammoniac par simple compression en voulant vérifier la loi de Boyle-Mariotte :
- 1823 : Michael Faraday liquéfie le chlore de la même façon mais échoue avec les gaz de l'air qu'il considère donc comme des « gaz permanents ». En 1845 : Michael Faraday était capable de liquéfier les gaz les plus connus alors. Six d'entre eux, cependant, résistaient encore, ils étaient désignés à l'époque gaz permanents : oxygène, hydrogène, azote, monoxyde de carbone, méthane, monoxyde d'azote.
- 1852 : James Prescott Joule et William Thomson montrent que la détente rapide d'un gaz peut conduire à un refroidissement sensible de celui-ci.
- 1863 : T. Andrews montre que : $T_{liq} = f(P) < T_{critique}$ du gaz.
- 1877 : Louis Paul Cailletet liquéfie l'oxygène et l'azote. Cela invalide l'appellation « gaz permanents ». Mais il rencontre des problèmes de stockage des gaz liquéfiés.
- 1892 : James Dewar résout le problème du stockage des gaz liquéfiés en créant le premier cryostat, puis liquéfie l'hydrogène.
- 1908 : H. K. Onnes liquéfie l'hélium dans le cadre de ses travaux sur la supraconductivité.[1]

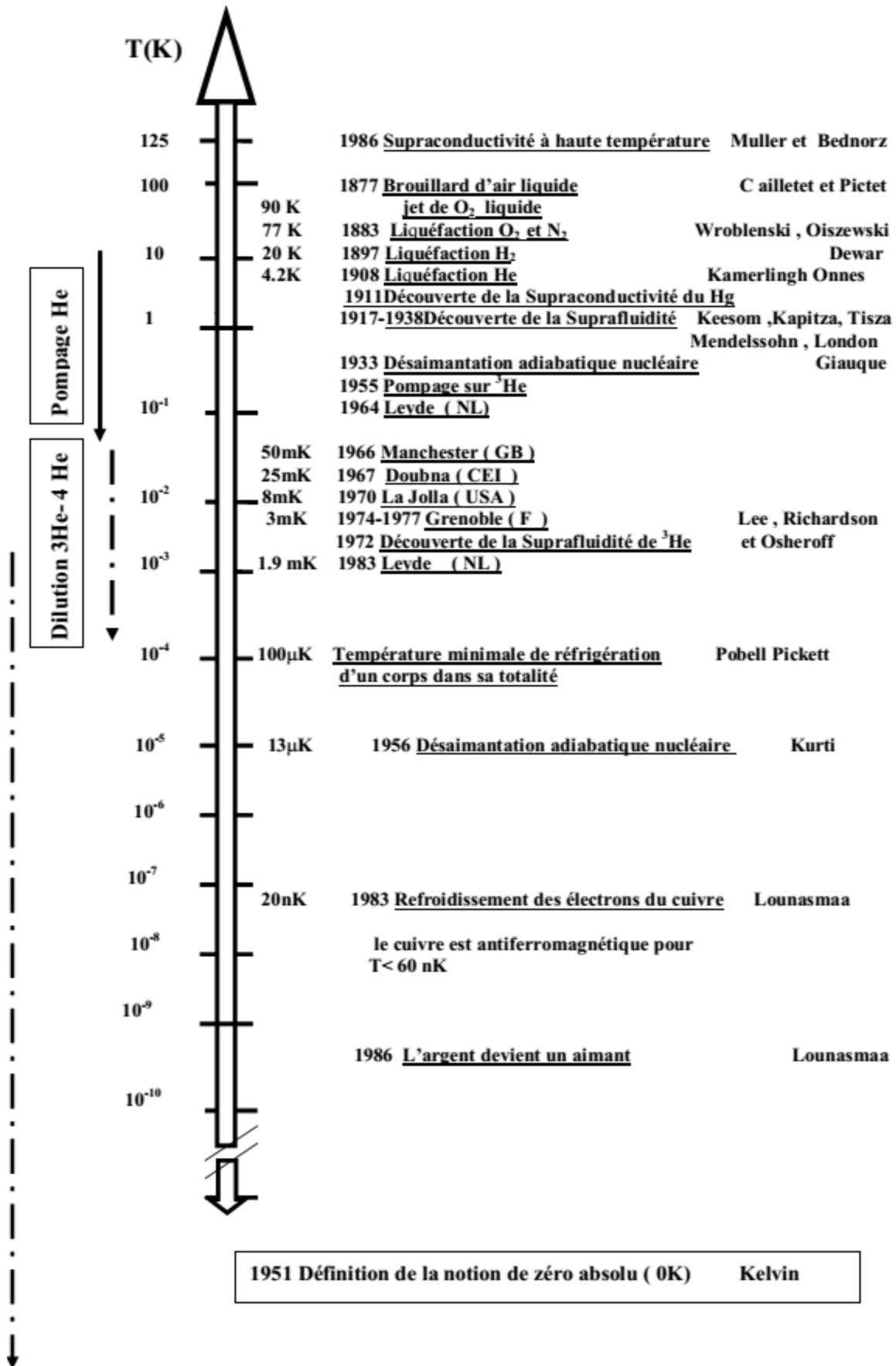


Figure 1 : Différentes étapes vers les basses températures et leurs acteurs.[1]

I.3 Les propriétés physiques aux basses températures

I.3.1 Les propriétés des fluides cryogéniques :

Les liquides cryogéniques sont largement utilisés pour atteindre et maintenir des températures basses, étant produits industriellement. Un bain cryogénique offre une source de froid constante grâce à l'équilibre entre le liquide et sa vapeur. La chaleur latente contenue dans le cryogène dans un cryostat fournit la réserve de frigories nécessaire. La vapeur peut également être utilisée pour fournir du froid dans une plage de températures allant de la température ambiante à celle du bain. L'enthalpie sensible, qui représente la quantité de chaleur nécessaire pour chauffer les vapeurs émises par le bain en ébullition jusqu'à la température ambiante, est souvent utilisée pour décrire la variation d'enthalpie du fluide entre ces deux températures.

Dans certaines applications spécifiques en laboratoire, ainsi que dans des applications industrielles ou spatiales, d'autres fluides tels que le méthane, l'argon, l'oxygène, le néon, le deutérium et l'hélium 3 ont également été utilisés en raison de leur intérêt. En général, leurs caractéristiques ne montrent pas de comportement inattendu, mais les propriétés uniques de l'hélium, de l'hydrogène et dans une moindre mesure du néon à basses températures justifient une attention particulière. [3]

I.3.2 Les propriétés des matériaux :

La fabrication de matériels cryogéniques et la préparation d'ensembles expérimentaux à basses températures impliquent l'utilisation de divers matériaux tels que des matériaux isolants, conducteurs et supraconducteurs électriques, ainsi que des matériaux de structure. Cependant, contrairement aux conditions d'utilisation à température ambiante, l'ingénieur doit faire face à une forte dépendance des propriétés des matériaux à la température. Il est donc essentiel de comprendre ces comportements pour une utilisation efficace. Bien que certaines propriétés puissent sembler peu favorables à une application technique, les ingénieurs et les physiciens peuvent les exploiter pour suggérer de nouvelles applications, dont la supraconductivité est l'une des plus spectaculaires. [3]

I.3.3 Propriétés thermiques :

Les propriétés thermiques d'un matériau sont liées aux vibrations des atomes autour de leur position d'équilibre, aux mouvements des électrons, et d'autres facteurs tels que les caractéristiques magnétiques et l'état supraconducteur. La diminution de l'amplitude des vibrations atomiques est observée avec l'augmentation de la température, et la propagation de ces vibrations est traitée comme celle d'ondes planes appelées phonons. Les matériaux

isolants sont décrits à partir de ces propriétés. Les matériaux conducteurs, quant à eux, impliquent également les mouvements des électrons chargés négativement ou des charges positives, également connues sous le nom de trous. Dans la suite, la capacité thermique massique de divers matériaux couramment utilisés est présentée jusqu'à une température de 300 K. [3]

I.3.3 Propriétés mécaniques :

Les propriétés mécaniques d'un matériau sont affectées par la température. En général, les matériaux deviennent fragiles à basse température et ductiles à haute température. Cette fragilité est un critère important dans la sélection des matériaux pour les équipements cryogéniques. Le comportement des métaux et alliages à basse température dépend de leur structure cristalline. Les matériaux à structures cubiques à faces centrées sont généralement ductiles à très basses températures, tandis que les matériaux à structures hexagonales compactes connaissent souvent une transition ductile-fragile. Les matériaux à réseaux cubiques centrés présentent également une transition ductile-fragile à basse température, ce qui les rend inadaptés aux applications structurelles.

Le fluage des matériaux soumis à un effort permanent est également un phénomène à basse température, en particulier pour les aciers inoxydables utilisés dans la boulonnerie de serrage. [4]

I.4 Transfert thermique :

Les fluides cryogéniques ont une faible enthalpie de formation et les matériaux ont une capacité thermique massique qui tend vers zéro. Cela signifie que toute entrée de chaleur entraînera une évaporation significative des fluides cryogéniques et/ou des échauffements importants. En conséquence, il est important d'avoir une approche spécifique pour comprendre les caractéristiques des processus de transfert thermique à basse température. [5]

I.4.1 Conduction :

La loi de Fourier décrit le transfert de chaleur à l'intérieur d'un matériau sans transfert de masse, également connu sous le nom de conduction thermique. [6]

La loi de Fourier :

$$Q' = -KS \frac{dt}{dx}$$

Avec :

Q' : flux de chaleur en [W] passant à travers la section S en [m^2] au Gradient de température
La conductivité thermique, mesurée en [W/m.K], est une caractéristique essentielle en cryogénie. Dans certains cas, une conductivité thermique élevée est nécessaire pour assurer un bon contact thermique, tandis que dans d'autres cas, une faible conductivité thermique est préférable pour éviter les transferts de chaleur indésirables et isoler les cryostats.

I.4.2 Convection :

Le transport de chaleur se fait par le déplacement de matière à l'échelle macroscopique de matière on peut écrire [5] :

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

Avec :

h_c : coefficient de convection en [W/m². K].

S : surface d'échange en [m²].

T_p : Température de la paroi en [K].

T_f : Température du fluide loin de la paroi en [K].

I.4.3 Rayonnement :

Le rayonnement émis à basse température est principalement composé de longueurs d'onde très élevées, c'est-à-dire dans l'infrarouge lointain. La plus grande quantité d'énergie émise correspond à des longueurs d'onde allant de 9,65 nm à température ambiante à 725 nm à 4 K. L'équation de Stefan-Boltzmann permet de calculer l'énergie émise par rayonnement d'une surface A , notée, et est donnée par [7] :

$$W_r = \sigma \cdot \epsilon \cdot A \cdot T^4$$

Avec :

W_r : Énergie rayonnée exprimée en Watts.

ϵ : pouvoir émissif de la surface [A].

σ : Constante de S. B : 5,67. 10¹² W. cm⁻².K⁻⁴.

T : température en [K].

L'énergie rayonnée entre deux surfaces de températures T_1 et T_2 ($T_2 > T_1$) s'écrit :

$$W_r = \sigma \cdot \epsilon \cdot A_1 (T_2^4 - T_1^4)$$

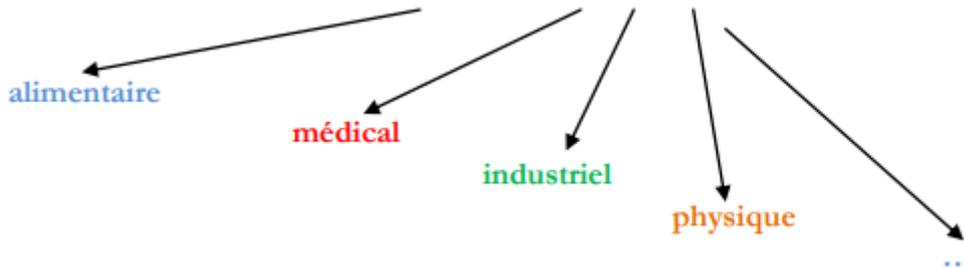
Avec :

E : facteur qui tient compte des pouvoirs émissifs e_2 et e_1 des surfaces aux températures T_2 et T_1 .

A_1 : air en cm^2 de la surface qui reçoit l'énergie à température T_1 .

I.5 Applications cryogéniques

La cryogénie possède de très nombreuses applications, notamment dans le secteur :



- **La cryogénie alimentaire** est une méthode de conservation d'aliments qui implique une surgélation ultra-rapide pour figer l'aliment dans son état actuel. Cette technique utilise de l'azote liquide pour plonger l'aliment et le conserver.
- **La cryoconservation** est un processus également connu sous les noms de Cryo suspension, Cryo fixation ou cryopréservation. Cette méthode implique la conservation de cellules ou de tissus entiers en les refroidissant à une température très basse, généralement de 77 K ou -196 °C (le point d'ébullition de l'azote liquide). L'objectif est de suspendre l'évolution des cellules afin de les remettre en mouvement ultérieurement. La cryoconservation est utilisée pour conserver le sperme, les tissus et constitue un dernier recours pour les personnes atteintes de maladies graves qui n'ont plus d'espoir de guérison avec les techniques médicales actuelles. Comparée à la cryogénie alimentaire, la cryoconservation est plus complexe à appliquer car les très basses températures peuvent causer des dommages qui doivent être évités à tout prix.
- **La supraconductivité** est un phénomène qui se produit dans certains matériaux à des températures extrêmement basses. Elle se caractérise par l'absence totale de résistance électrique et l'annulation du champ magnétique à l'intérieur du matériau. Cette propriété est utilisée dans divers domaines tels que l'imagerie médicale et les accélérateurs de particules. En outre, la supraconductivité permet de stocker de l'énergie et de réaliser la fusion thermonucléaire contrôlée. [8]
- **La superfluidité** est une phase de la matière qui se distingue par l'absence absolue de viscosité. Les superfluides peuvent ainsi circuler à l'infini dans une boucle fermée sans rencontrer de résistance. La science qui se consacre à l'étude de la superfluidité est

appelée "hydrodynamique quantique". Cette particularité est utilisée dans les réfrigérateurs cryogéniques et dans les techniques spectroscopiques en tant que "solvant quantique".[8]

- **Le procédé de Cryo-broyage** consiste à utiliser de l'azote liquide, un liquide cryogénique, pour refroidir de manière précise les matériaux jusqu'à leur point de fragilisation, ce qui permet de les réduire mécaniquement plus facilement.
- **Le procédé de givrage** est un système cryogénique qui permet de récupérer les composés organiques volatils (COV) présents dans les flux gazeux. Ce processus utilise de l'azote liquide pour refroidir le flux de gaz contenant les solvants. [8]
- **Le givrage** est une technique cryogénique permettant de récupérer les composés organiques volatils (COV) présents dans les flux gazeux. Cette méthode consiste à refroidir le flux de gaz contenant les solvants à l'aide d'azote liquide. Les COV se condensent et se solidifient sous forme de neige qui est ensuite éliminée à l'aide de filtres en acier inoxydable. [8]

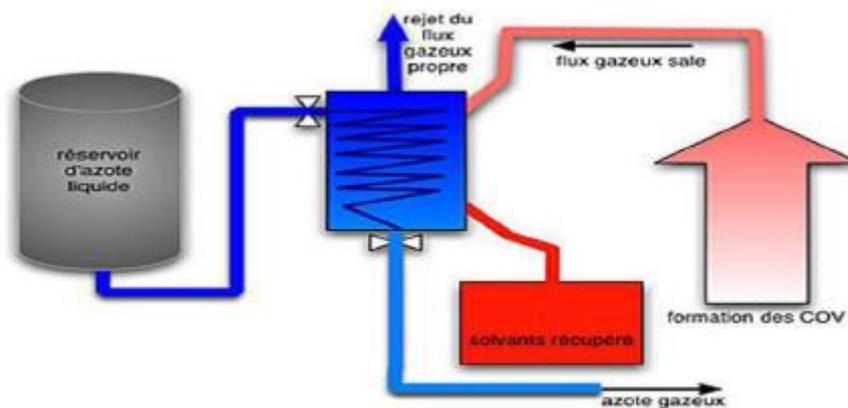


Figure 2 : Givrage ou condensation cryogénique

- **Le nettoyage** par cryogénie est une méthode de nettoyage qui consiste à projeter des micro pellets de glace carbonique sur une surface à nettoyer, sans produire d'effluents. Cette technique repose sur trois effets simultanés qui se produisent lorsque la glace carbonique entre en contact avec la surface contaminée, trois effets sont à l'origine du nettoyage par cryogénie :

- L'effet thermique est dû à la différence de température entre la glace carbonique (-78,2 °C) et la surface à nettoyer. Cette différence crée un choc thermique qui fissure et rétracte la pollution, la détachant ainsi de la surface. [8]

- L'effet cinétique ou mécanique est causé par l'impact de la glace carbonique sur la pollution, qui la fragilise mécaniquement. [8]

- L'effet physique de sublimation est dû aux propriétés physiques du CO₂. Le passage du CO₂ de l'état solide à l'état gazeux à une température normale de 20°C se fait sans passer par l'état liquide, c'est ce qu'on appelle la sublimation.

Cette méthode est hautement efficace et ne produit aucun déchet secondaire, car elle est réalisée à sec. De plus, grâce à son action mécanique très délicate, elle préserve la surface des supports. [8]

I.6 Domaine d'utilisation de la cryogénie

La cryogénie est une discipline qui se concentre sur l'étude des températures extrêmement basses : comment les créer, les maintenir et les utiliser dans des conditions particulières. Cette branche de la science est actuellement utilisée dans de nombreuses applications, car elle a permis [9] :

- Le domaine de l'astrophysique a connu d'importantes avancées dans la compréhension de l'univers.
- Le développement d'aimants supraconducteurs pour les grands instruments de physique des particules (grands accélérateurs, Tokamak ITER, JT-60 SA), IRM ou RMN), et dans le domaine de l'imagerie médicale (IRM ou RMN),
- Des progrès significatifs ont été réalisés dans le développement des moteurs pour la propulsion spatiale ainsi que dans l'étude de la turbulence, qui est impliquée dans les phénomènes météorologiques et la traînée des avions, entre autres.
- Des recherches ont été menées pour étudier des phénomènes physiques tels que la supraconductivité et la superfluidité.

I.7 Définitions et propriétés de quelques gaz permanents

I.7.1 L'azote :

L'azote est un élément chimique essentiel, de symbole N et de numéro atomique 7. Il appartient au groupe des pnictogènes. Dans le langage courant, on utilise le terme "azote" pour désigner le diazote (N₂), qui est le composant principal de l'atmosphère terrestre, représentant près de 80% de l'air. L'azote occupe la 34e place en termes d'abondance dans la croûte terrestre.

Les minéraux contenant de l'azote sont principalement des nitrates, tels que le nitrate de potassium, également appelé salpêtre, qui était utilisé jusqu'à la fin du XIXe siècle dans la fabrication de poudres explosives (comme la poudre noire), et le nitrate de sodium, utilisé dans le salpêtre du Chili.

L'azote est largement utilisé dans diverses industries. Il est notamment utilisé en grande quantité comme engrais dans l'agriculture industrielle, principalement sous forme de composés d'ammonium. Cependant, cette utilisation intensive a entraîné une pollution généralisée de l'environnement.[10]

Tableau 1 : Propriétés physiques de l'azote [10]

Numéro atomique	7
Masse molaire (g/mol)	14.0067
Masse volumique (kg/m ³)	0.001251
Température de fusion (K)	63.25
Température d'ébullition (K)	77.35
Structure électronique	K ² L ⁵
Configuration électronique	12
Rayon atomique	92pm
Charge de l'ion	N ³⁻
Température critique (°C)	-146.95
Pression critique (bar)	34.00
Température du point triple (°C)	-210.00
Pression du point triple (bar)	0.125

I.7.2 L'air :

L'air est l'un des éléments fondamentaux de notre monde, aux côtés de la terre, du feu et de l'eau. Il est constitué d'un mélange de gaz, d'humidité et de particules polluantes telles que les bactéries et les poussières. L'air forme l'atmosphère de la Terre et est à la fois invisible et inodore. Cependant, il est possible d'obtenir de l'air filtré et sec, dépourvu d'humidité et d'impuretés, qui peut être utilisé dans divers domaines. [11]

Tableau 2 : Principaux constituants de l'air sec [11]

Gaz constituants l'air sec	Pourcentage % en volume
Azote	78,09
Dioxygène	20,95
Argon	0,93
Dioxyde de carbone	0,035
Néon	$1,8 \cdot 10^{-3}$
Hélium	$5,24 \cdot 10^{-4}$
Krypton	$1,0 \cdot 10^{-4}$

Dans le Tableau 2 sont regroupés les principaux constituants de l'air sec. Le Tableau 3 présente les températures de saturation des principaux composants de l'air, tandis que ses propriétés physiques sont données par le Tableau 4.

Tableau 3 : Température de saturation des principaux composants de l'air [11]

Gaz	N2	O2	Ar	Ne	He	H2
Température d'ébullition (°C)	-195,79	-183 -	-185,85	-246,05 -	-268,93	-252,76

Tableau 4 : Propriétés physiques de l'air sec [11]

Masse molaire (g/mol)	28,9653
Masse volumique (kg/ M ³)	1,293
Température de fusion (K)	56.95=-216,2°C
Température d'ébullitions (K)	78.85=-194,3 °C
Température critique (°C)	-140.73
Pression critique (bar)	37.74

Aussi :

- ❖ Chaleur latente de vaporisation (air) : = **204.1 kJ/kg**
- ❖ Conductivité thermique (air) : 0.0234 W/m. K

* Il est possible de séparer les principaux constituants de l'air (l'azote, l'oxygène et l'argon) en les liquéfiant et en passant par différentes étapes. [12]

Etape 1 : Préparation de l'air

Voici les différentes étapes (Fig. 3) pour séparer les principaux constituants de l'air :

- L'air est aspiré et filtré.
- Ensuite, il est comprimé jusqu'à atteindre une pression de 5 à 6 bars. [12]
- Après la compression, l'air est refroidi dans des tours de refroidissement et de lavage.
- Enfin, toutes les traces d'hydrocarbures et d'humidité sont éliminées à l'aide de tamis moléculaires.

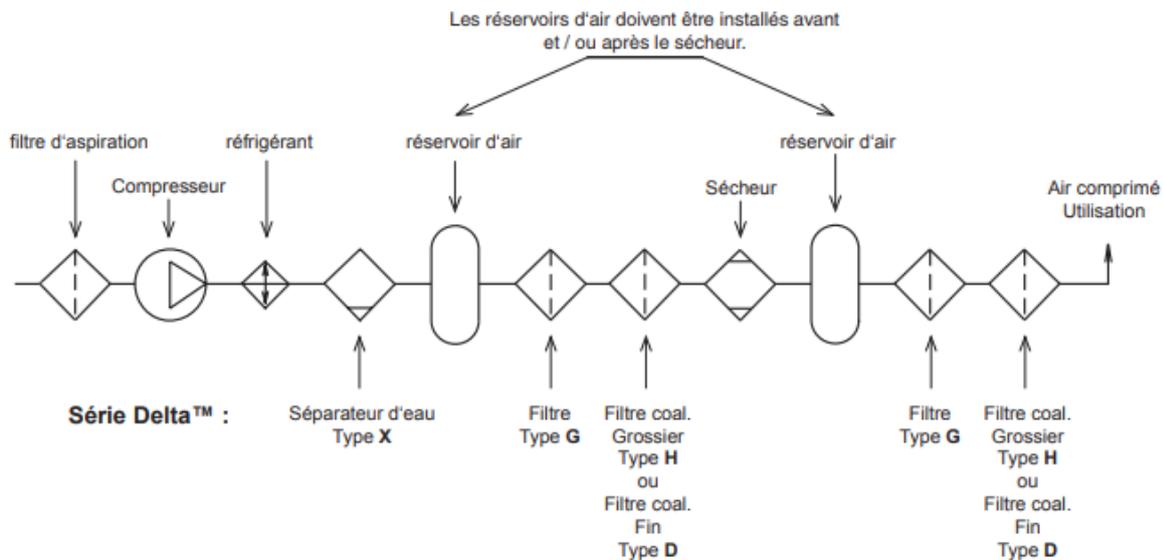


Figure 3: la préparation de l'air. [12]

Etape 2 : refroidissement cryogénique et séparation des gaz de l'air

- L'air préparé est conduit à travers des échangeurs de chaleur et des turbines pour atteindre des températures très froides d'environ -130°C .
- Les gaz refroidis, y compris l'air, sont liquéfiés et séparés dans des colonnes de séparation désignées comme colonnes de séparation.
- L'oxygène est extrait sous forme liquide à une température de -183°C , l'argon à -186°C et l'azote à -196°C .
- Les liquides obtenus peuvent ensuite être stockés et/ou distribués. [12]

I.7.3 L'argon :

L'argon est un élément chimique qui est représenté par le symbole Ar et a un numéro atomique de 18.

Il fait partie du groupe des gaz rares, également connus sous le nom de "gaz nobles" ou "gaz inertes", aux côtés de l'hélium, du néon, du krypton, du xénon et potentiellement du radon. Un élément plus récemment découvert, l'ununocium, peut également faire partie de ce groupe. Bien que le terme "gaz rares" soit utilisé pour cette famille, l'argon n'est pas véritablement un gaz "rare" sur Terre. Il occupe en réalité la troisième place, derrière le diazote et le dioxygène, en termes d'importance dans la composition de l'atmosphère terrestre (représentant 0,933 % en volume). Par conséquent, il est l'un des gaz nobles les plus largement utilisés. [13]

L'argon est utilisé dans divers domaines, notamment :

- Dans l'industrie agro-alimentaire, pour la conservation de la viande.
- -Dans l'éclairage, car il ne réagit pas avec le filament d'une lampe à incandescence, même à des températures élevées. Il est utilisé lorsque le diazote n'est pas adapté en tant que gaz semi-inerte. [14]
- Comme gaz inerte de protection pour la soudure à l'arc et le découpage (en utilisant un mélange Ar+O₂ selon la convention).
- Comme gaz inerte en chimie fine, permettant de réaliser des manipulations en l'absence d'oxygène. [14]
- Comme gaz inerte dans les vitrages isolants à faible émission, formant une lame d'air protectrice.
- Dans les réservoirs d'extinction d'incendie, en association avec 50 % d'azote.
- Comme atmosphère protectrice dans la fabrication de cristaux de silicium et de germanium ultra-pur pour l'industrie électronique. [14]

1.8 Liquéfaction du gaz naturel

Le gaz naturel est transporté via des gazoducs depuis le site d'extraction jusqu'à une usine de liquéfaction située sur la côte et dotée d'infrastructures portuaires. À l'usine, le gaz naturel est soumis à différents traitements successifs pour être liquéfié.

1-Epuration :

L'épuration du gaz naturel vise à éliminer le dioxyde de carbone, qui peut causer des dommages en se solidifiant dans les unités de liquéfaction. Elle vise également à extraire le sulfure d'hydrogène et d'autres composés soufrés. [15]

2-Déshydratation :

Pour éviter la formation d'hydrates de méthane qui pourraient obstruer les échangeurs cryogéniques, on retire l'eau du gaz naturel. Une fois cette étape de déshydratation terminée, le gaz devient presque exclusivement du méthane. De plus, on élimine toute trace de mercure qui peut être nocif pour les alliages utilisés dans les étapes suivantes du processus. [15]

3-Pré refroidissement :

Le gaz naturel est refroidi à une température avoisinant les -30°C , puis soumis à une série de distillations dans des colonnes d'épuration. Cette procédure permet de séparer les hydrocarbures plus lourds ainsi que les GPL (propane et butane), qui peuvent être utilisés comme matière première dans l'industrie pétrochimique ou comme combustible. [15]

4-Liquéfaction :

Le gaz est soumis à une série d'étapes, notamment la compression, le refroidissement à pression constante, puis la détente. Ce processus est répété deux ou trois fois dans des colonnes frigorifiques, également appelées pompes à chaleur. À la sortie de ces colonnes, le gaz est entièrement liquide et sa température est proche de -160°C à pression atmosphérique.

Cependant, le processus de liquéfaction nécessite une quantité importante d'énergie. En effet, l'usine de liquéfaction utilise en moyenne environ 10% du gaz qui lui est livré pour son propre fonctionnement, notamment pour alimenter les pompes à chaleur. [15]

I.9 Stockage du gaz naturel liquéfié (GNL) :

Avant d'être chargé, le gaz naturel liquéfié est conservé dans de grands réservoirs cylindriques verticaux situés à proximité de l'usine de liquéfaction. Ces réservoirs agissent comme des bouteilles thermos, avec une double paroi et une isolation thermique avancée pour maintenir le gaz à l'état liquide à une température de -160°C , tout en minimisant l'évaporation. Les réservoirs peuvent être en métal ou en béton.

Il est important de noter que 600 m^3 de gaz naturel ne prennent qu'à l'état liquide (à pression atmosphérique). Ainsi, les réservoirs de GNL, qui ont une capacité de stockage allant de 65 000 à $150\,000\text{ m}^3$ de GNL, peuvent stocker d'énormes quantités d'énergie. [10]

CHAPITRE II

II.1 Définition de la réfrigération et la liquéfaction

II.1.1. Définition de la réfrigération

La réfrigération d'un système implique de retirer de l'énergie, qui peut être soit reçue de l'extérieur, soit dissipée à l'intérieur du système. Dans ce cas, il est souvent nécessaire de maintenir une température constante. Lorsque l'extraction d'énergie entraîne une diminution de l'énergie interne du système, sa température est généralement réduite. Lorsqu'un objet refroidi est plongé dans un liquide, il libère de l'énergie à une température constante, ce qui provoque la vaporisation du liquide. En revanche, la liquéfaction consiste à retirer de l'énergie à un objet afin de le refroidir depuis sa température ambiante jusqu'à son point de rosée, puis à condenser la vapeur saturée. [16]

II.1.2. Définition de la liquéfaction

La liquéfaction est le processus de transformation d'un gaz en liquide. C'est l'étape inverse de la vaporisation. Bien que le terme "condensation (liquide)" soit utilisé de manière courante, il est incorrect du point de vue de la terminologie thermodynamique. La liquéfaction peut se produire en comprimant ou en refroidissant un gaz. Carl von Linde est à l'origine de la première industrialisation de ce procédé grâce à la détente de Joule-Thomson. La température de liquéfaction varie considérablement en fonction du type de gaz ou de vapeur. Par exemple, l'hélium liquide se trouve à $-268,93\text{ °C}$, l'hydrogène liquide à $-252,76\text{ °C}$, le néon liquide à $-246,053\text{ °C}$, l'azote liquide à $-195,79\text{ °C}$, l'oxygène liquide à $-182,96\text{ °C}$,

Le gaz naturel liquéfié principalement composé de méthane à $-161,52\text{ °C}$, et le gaz de pétrole liquéfié principalement composé de propane à $-42,1\text{ °C}$ et de butane à $-0,5\text{ °C}$. La liquéfaction des gaz est utilisée pour réduire leur volume afin de faciliter leur stockage et leur transport, ainsi que pour leur utilisation dans divers domaines de la cryogénie.

L'oxygène est un gaz incolore et inodore présent dans l'atmosphère, représentant environ un cinquième de son volume, et essentiel à la plupart des formes de vie. Il soutient la combustion et n'est pas toxique. Son symbole chimique est O_2 . [16]

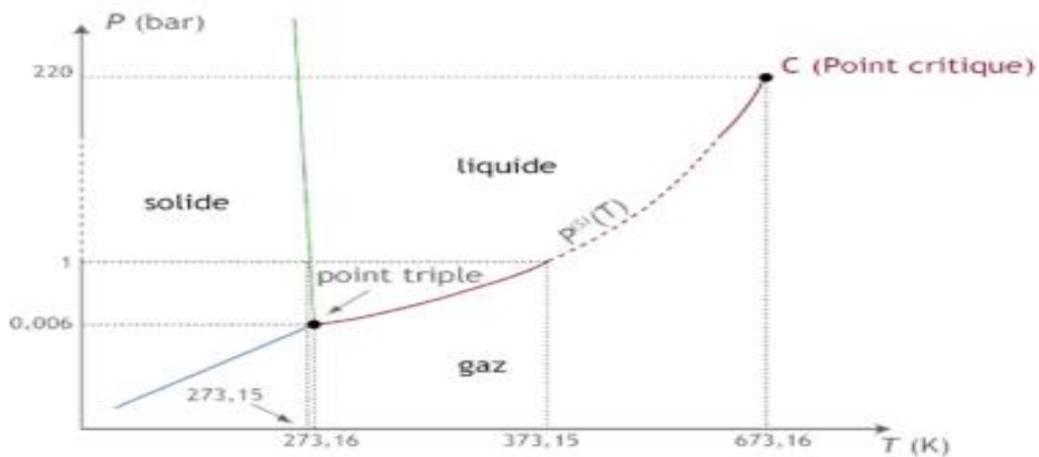


Figure 4 : Diagramme Pression-Température de l'eau.[17]

Chaque substance peut adopter différents états (Figure 4) (solide, liquide, gaz) en fonction de la température et de la pression auxquelles elle est soumise. Ces paramètres influencent la forme physique dans laquelle la substance se manifeste.

La liquéfaction est le procédé par lequel une substance passe de l'état gazeux à l'état liquide, généralement en utilisant des techniques cryogéniques. Lorsqu'un gaz possède une température critique supérieure à la température ambiante, il est nécessaire d'augmenter sa pression jusqu'à ce qu'il atteigne les conditions de saturation pour devenir liquide.

Cependant, de nombreux gaz ayant une température critique inférieure à la température ambiante ne peuvent pas être liquéfiés en augmentant simplement la pression à des niveaux extrêmes. Même avec une pression élevée, ces gaz ne se condensent pas tant que leur température n'est pas réduite en dessous de leur température critique. Dans de tels cas, des méthodes industrielles doivent être mises en place pour abaisser la température en utilisant à la fois la compression et l'expansion.

Les procédés thermodynamiques cryogéniques, tels que les cycles de réfrigération et de liquéfaction, se composent de différentes combinaisons de compressions isothermes, de refroidissements, de détente isenthalpique et adiabatique des fluides. On peut classer ces procédés en quatre grandes catégories. [17]

- ✓ Les procédés à détente isenthalpique de Joule-Thomson.
- ✓ Les cycles inverses de Brayton à détente isentropique.
- ✓ Les procédés mixtes associant une détente isenthalpique et une détente isentropique (cycle de Claude).
- ✓ Les cycles en cascades.

II.2. Les cycles de base pour la liquéfaction des gaz

I.2.1 Cycle idéal de liquéfaction

C'est un cycle parfait (Figure 5) pour transformer une quantité de gaz entièrement en liquide

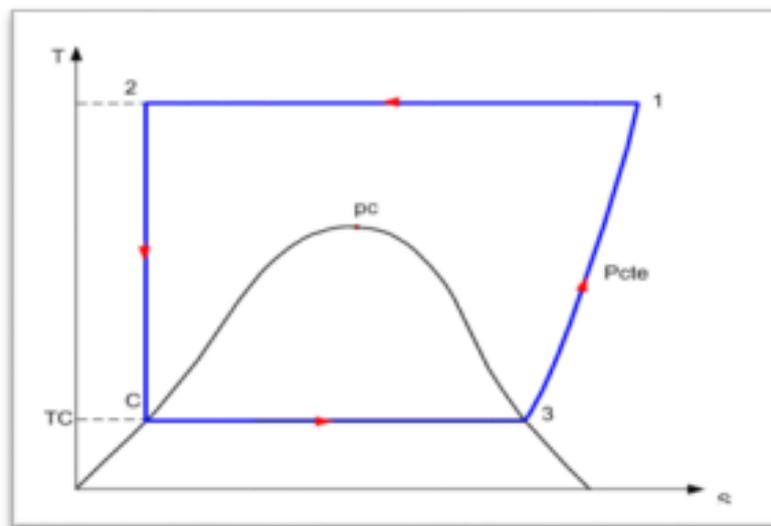


Figure 5 : Cycle idéal pour la liquéfaction d'un gaz.[17]

Les évolutions thermodynamiques du cycle idéal sont les suivantes :

1-2 : Compression isotherme

2-C : Détente isentropique

C-3 : Evaporation isotherme et isobare

3-1 : Chauffage isobare

La liquéfaction peut être imaginée en inversant le sens des transformations thermodynamiques du cycle

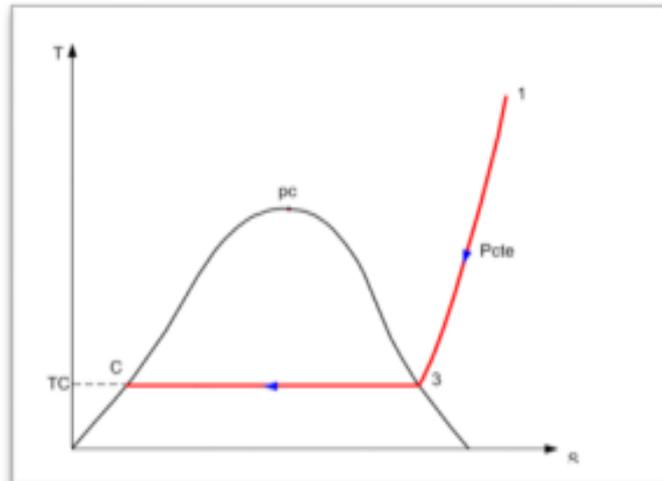


Figure 6 : Transformations thermodynamiques inverses de liquéfaction d'un gaz. [17]

Les évolutions thermodynamiques inverses (Figure 6) sont :

1-3 : Refroidissement isobare

3-C Condensation isotherme et isobare

1.2.2 Cycle théorique de Brayton inverse

Le cycle inverse de Brayton (Figure 7) permet d'obtenir à la fois un effet frigorifique et un travail produit. Dans ce cycle, un gaz subit les étapes suivantes :

Compression (1-2),

Refroidissement (2-3),

Détente (3-4), et réchauffement lors de son retour dans l'échangeur (4-1).

Étant donné que la température à la fin de la détente est basse, ce gaz peut être utilisé pour refroidir une enceinte, que ce soit par contact direct ou à travers un échangeur. [18]

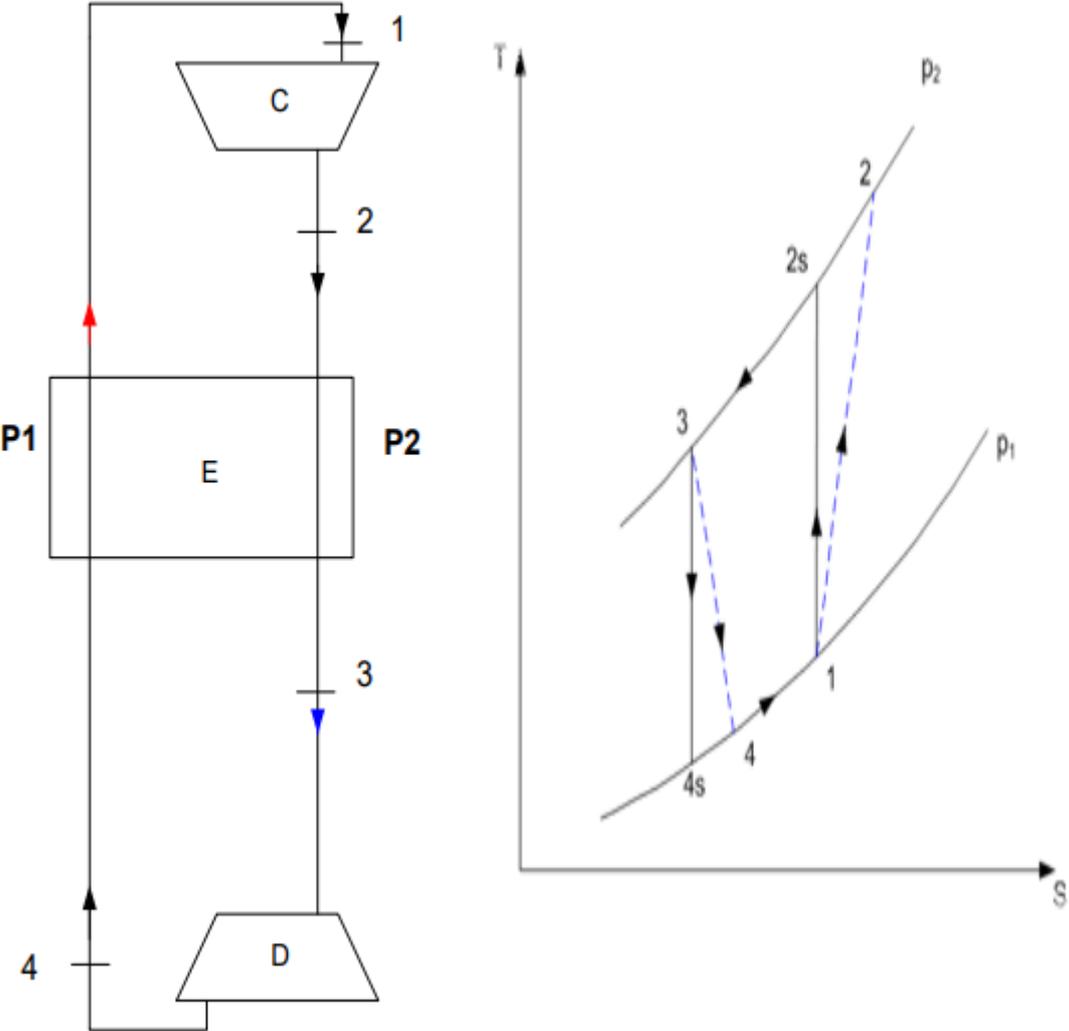


Figure 7 : Schéma du procédé et cycle de Brayton inverse. [18]

II.2.3. Cycle à étranglement simple ou cycle de LINDE

Ce cycle réel a été inventé par l'allemand LINDE à la fin du 19ème siècle (Figure 8). Il est basé sur le principe de diminuer la température d'un gaz en utilisant un échangeur de chaleur et une vanne d'étranglement après une compression isotherme. [18]

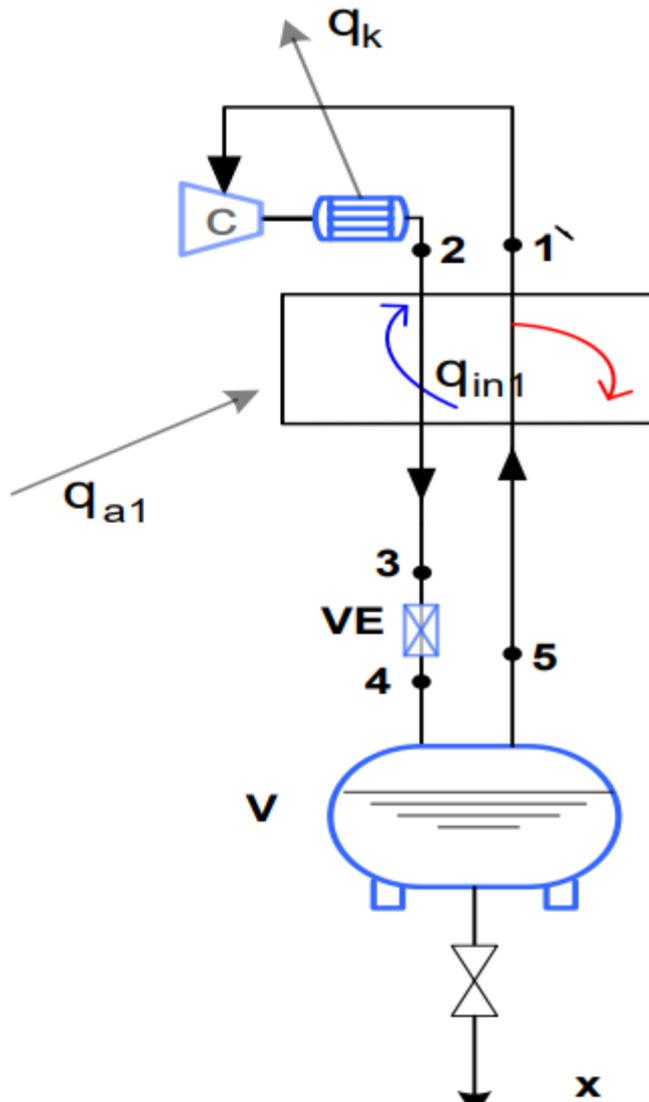


Figure 8 : Schéma du cycle à étranglement simple de Linde1 étranglement simple. [18]

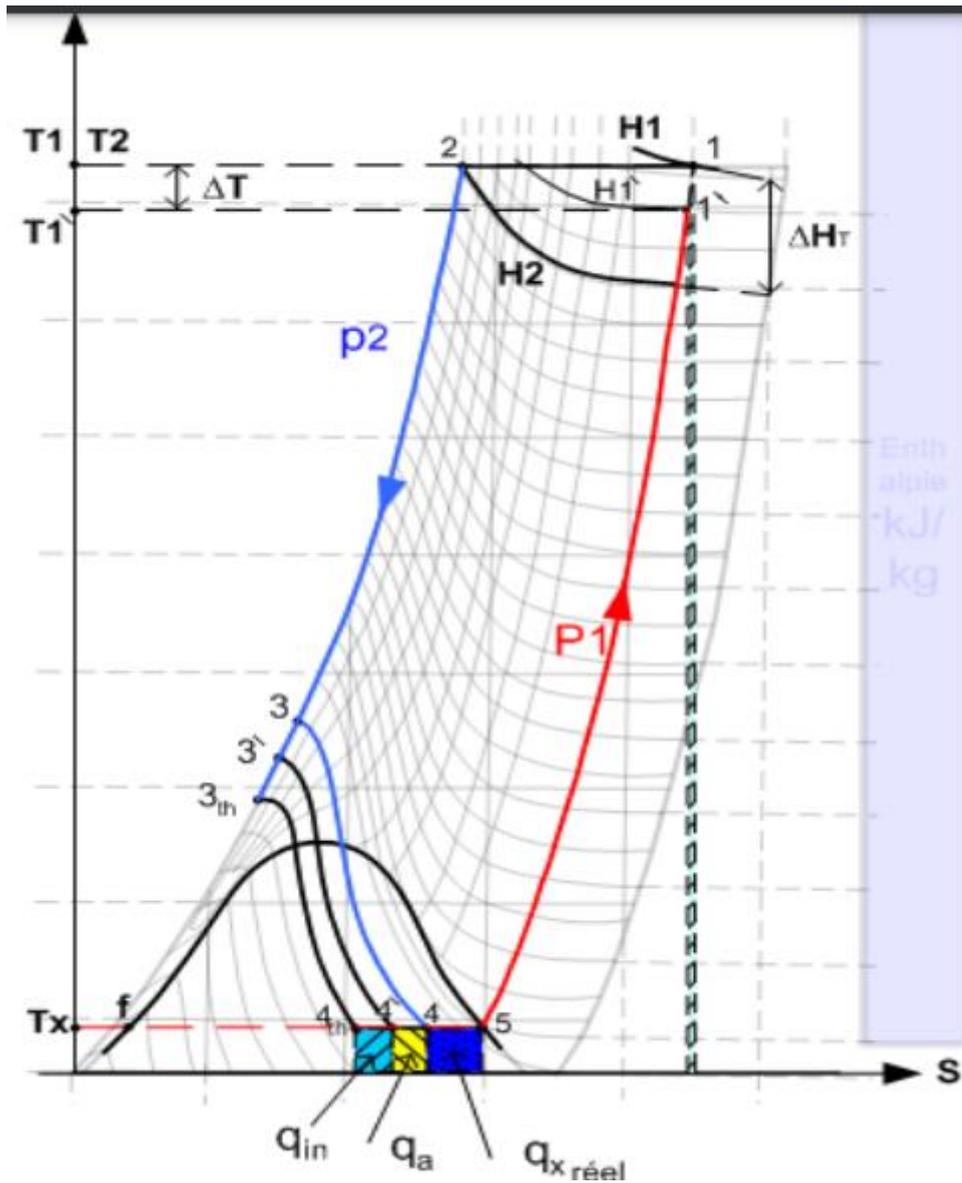


Figure 9 : Diagramme du cycle à étranglement simple (E.S) de Linde. [18]

Evolutions thermodynamiques du cycle à E.S (Figure 9I sont :

- 1-2 : Compression isotherme du gaz de travail.
- 2-3 : Refroidissement isobare.
- 3-4 : Détente isenthalpique.
- 5-1 : Réchauffement isobare d'une quantité (1-x) du gaz de travail. [18]

CHAPITRE III

III.1 Introduction :

Par définition, la liquéfaction est un changement d'état faisant passer un corps d'un état gazeux à un état liquide. Autrement dit ; la liquéfaction est une transformation inverse de l'évaporation.

La liquéfaction a pour objectif :

- La réduction de l'air évoluant et par conséquent assurer un bon stockage et un bon transport
- Pour une utilisation des gaz liquéfiés dans le domaine de la cryogénie.

III.2 Cycle à étranglement simple avec refroidissement préalable

Considérons le cycle à étranglement simple avec refroidissement préalable

Le refroidissement préalable réalisé par un cycle extérieur (le plus souvent on utilise un liquide réfrigérant)

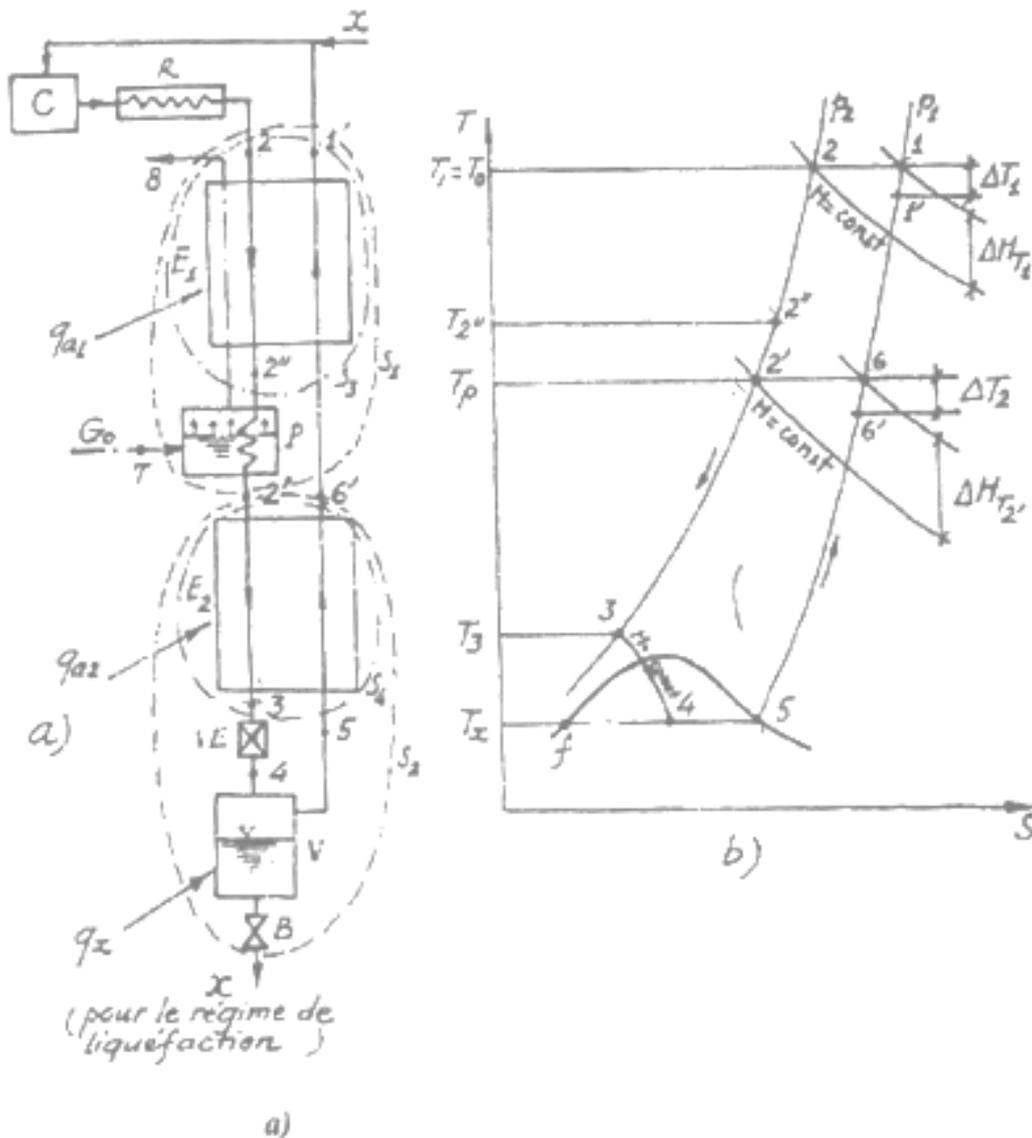
Le cycle est à deux cas (avec 02 processus de basses T°) : - étranglement.

- refroidissement préalable.

La figure (10) représente le schéma de principe du système étudié dans les deux régimes de fonctionnement :

→ Réfrigérateur

→ Liquéfacteur



a) Schéma du système

b) représentation dans le diagramme T-S

Figure 10 : Cycle à étranglement avec refroidissement préalable pour les deux régimes de fonctionnement (réfrigérateur et de liquéfaction).

Déroulement du cycle :

- (C+R) : 1 (P₁)-----» 2(P₂) T₁=T₂

Compression isotherme du gaz de travail (1Kg)

La chaleur (q_K) produite par la compression est évacuée vers l'extérieur par le refroidisseur.

- Echangeur (E₁) : 2(P₂)-----» 2''(P₂)

Refroidissement du gaz de travail

Chapitre III Analyse énergétique et exergetique du cycle de refroidissement préalable.

- Cuve (P) de refroidissement préalable : $2''(P_2) \rightarrow 2'(P_2)$
 Refroidissement du gaz de travail à pression constante de $T_{2''}$ à $T_{2'}$
 $T_{2'} = T_P$ (Température de la cuve P)
- Échangeur (E_2) : $2'(P_2) \rightarrow 3(P_2)$
 Refroidissement isobare du gaz de travail de $T_{2'}$ à T_3
- VE : $3(P_2) \rightarrow 4(P_1)$
 Détente isenthalpique ($H_3 = H_4$) des gaz de P_2 jusqu'à P_1
- $5(P_5) \rightarrow 1(P_1)$ $P_5 = P_1$
 Échauffement isobare

Au niveau de l'échangeur 2 :

Sortie= Entrée

$$H_{2'} + q_{a2} + q_X = H_{6'}$$

$$q_X = H_{6'} - H_{2'} - q_{a2}$$

$$H_6 - H_{6'} = C_P T_6 - C_P T_{6'} = C_P (T_6 - T_{6'}) = C_P \Delta T_2 = q_{in2}$$

$$H_6 - H_{6'} = q_{in2} \rightarrow H_{6'} = H_6 - q_{in2}$$

$$q_X = H_6 - q_{in2} - H_{2'} - q_{a2}$$

$$q_X = H_6 - H_{2'} - q_{in2} - q_{a2}$$

$$\underbrace{\hspace{1.5cm}}_{\Delta H_{T_{2'}}}$$

$$q_X = \Delta H_{T_2} - \sum q_2 \quad (\sum q_2 = q_{in2} + q_{a2})$$

$$q_0 = G_0 H_8 - G_0 H_7 = G_0 (H_8 - H_7)$$

Détermination de $H_{2''}$:

Contour S_3 :

$$H_2 + q_{a1} + H_{6'} = H_{2''} + H_{1'}$$

Chapitre III Analyse énergétique et exergetique du cycle de refroidissement préalable.

$$H_{2''} = H_2 - H_{1'} + q_{a1} + H_{6'}$$

$$H_1 - H_{1'} = C_P T_1 - C_P T_{1'} = C_P (T_1 - T_{1'}) = C_P \Delta T_1 = q_{in1}$$

$$H_{2''} = H_2 - H_1 + q_{in1} + q_{a1} + H_{6'}$$

$$H_6 - H_{6'} = C_P \underbrace{(T_6 - T_{6'})}_{\Delta T_2} = q_{in2}$$

$$H_{6'} = H_6 - q_{in2}$$

$$H_{2''} = H_2 - H_1 + q_{in1} + q_{a1} + H_6 - q_{in2}$$

$$H_{2''} = H_6 - C_P \Delta T_2 - (H_1 - H_2 - q_{in1}) + q_{a1}$$

$$H_{2''} = H_6 - (\Delta T_1 - \sum q_1) - C_P \Delta T_1$$

$$\sum q_1 = q_{in1} + q_{a1}$$

Détermination de H_3 :

Contour S_4 :

$$S=E$$

$$H_{2'} + q_{a2} + H_5 = H_3 + H_{6'}$$

$$H_{6'} = H_6 - C_P \Delta T_2$$

$$H_3 = H_5 - (\Delta H_{T_{2'}} - \sum q_2)$$

Régime de liquéfaction :

$$S=E$$

$$H_{2'} + q_{a2} = (1 - X)H_{6'} + X \cdot H_f$$

$$H_{2'} + q_{a2} = H_{6'} - X(H_{6'} - H_f)$$

$$X(H_{6'} - H_f) = H_{6'} - H_{2'} - q_{a2}$$

$$X = \frac{H_{6'} - H_{2'} - q_{a2}}{H_{6'} - H_f}$$

$$H_6 - H_{6'} = C_p \Delta T_2$$

$$H_{6'} = H_6 - q_{in2}$$

$$X = \frac{H_6 - q_{in2} - H_{2'} - q_{a2}}{H_6 - H_f - q_{in2}}$$

$$\Delta H_{2'} > \Delta H_T$$

$$H_6 - H_f < H_1 - H_f$$

III.3 Problématique (liquéfaction de l'air) :

On désire étudier une installation cryogénique à étranglement simple avec refroidissement préalable utilisant de l'air comme gaz de travail. Le refroidissement préalable est assuré par une solution d'ammoniac NH_3 .

Les conditions de fonctionnement sont les suivantes :

$$P_1 = 1 \text{ bar}$$

$$T_0 = 300 \text{ K} \quad ; \quad T_X = 78,85 \text{ K}$$

$$r = 0,287 \text{ Kj/Kg.K} \quad ; \quad C_p = 1,005 \text{ Kj/Kg.K}$$

La perte due à l'imperfection de récupération thermique dans les échangeurs E_1 et E_2 est de l'ordre de 5 K.

L'apport de chaleur du milieu ambiant vaut 3 Kj/Kg ($q_{a1} = q_{a2} = 3 \text{ Kj/Kg}$)

La puissance du compresseur est $P_K = 72,63 \text{ KW}$ (travail par unité de temps de compression isotherme).

Le rendement du compresseur est $\eta_K = 0,65$

On donne également :

$$\dot{m} = 360 \text{ Kg.h}^{-1} : \text{Débit masse du gaz de travail.}$$

$$T_p = 230 \text{ K (Due à la cuve de R.P)}$$

$$\beta_0 = 1,25$$

Chapitre III Analyse énergétique et exergetique du cycle de refroidissement préalable.

Masse molaire de l'ordre de 28,965 g/mole.

$$q_{x\text{ sup}} = 1,05 \text{ KJ/Kg}$$

Dans ce travail, on désire donc:

1. Déterminer l'ensemble des paramètres (P, T, H et S) aux points figuratifs du cycle.
2. Calculer les caractéristiques thermodynamiques : X, W_0^L , ε^L , η , de l'installation envisagée pour le régime de liquéfaction (L).

III.3.1 Démarche de calcul :

III.3.1.1 Analyse énergétique :

Le schéma de principe de l'installation étudié et l'évolution du cycle de refroidissement préalable dans le diagramme (T-S) sont représentés par la Figure 10.

III.3.1.1.1 Effet de la variation de la pression de sortie P_2

a- Pour une pression $P_2=200$ bar

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

L'ensemble des paramètres (P, T, H et S) sont déterminés par calcul et graphiquement à l'aide du diagramme entropique de l'air (Figure 11) et les résultats obtenus sont représentés le Tableau 5.

Tableau 5 : Les paramètres (P, T, H et S) aux points figuratifs du cycle pour $P_2=200$ bar

Point	P(bar)	T(K°)	h (KJ/Kg)	S (KJ/Kg.K)
1	1	300	28,274	-0,04185
2	200	300	-7,9515	-1,63215
2''	200	256	-67,60	-1,7577
2'	200	230	-107,973	-1,88325
3	200	162	-55,30	-2,55285
4	1	78,85	-55,30	-1,71585
5	1	78,85	-200,043	-1,29735
6	1	230	-45,198	-0,2511
6'	1	226	-49,8015	-0,29295
1'	1	296	24,438	-0,0837
f	1	78,85	-405,84	-3,7665

❖ **Calcul de la quantité X :**

$$X = \frac{H_6 - H'_2 - (q_{a2} + q_{in2})}{H_6 - H_f - q_{in2}} = \frac{-45,198 + 107,973 - (3 + 4,02)}{-45,198 + 405,84 - 4,02}$$

$$q_{in2} = C_p \cdot \Delta T = 1,005 \cdot 4 = 4,02 \text{ Kj/kg.}$$

$$X = 0,156$$

$$X = 15,6 \text{ \%}.$$

❖ **Calcul de $H_{2''}^L$:**

Régime L : Contour S_3 :

$$S = E$$

$$H_2 + q_{a1} + (1 - X)H'_6 = (1 - X)H'_1 + H_2''$$

$$H_{2''}^L = H_2 + q_{a1} + (1 - X)(H'_6 - H'_1)$$

Alor :

$$H_{2''}^L = -7,9515 + 3 + (1 - 0,156)(-49,8015 - 24,438)$$

$$H_{2''}^L = -67,60 \text{ Kj/Kg.}$$

❖ **Calcul de H_3^L :**

Contour S_4 :

$$H_3^L = H'_2 + q_{a2} + (1 - X)(H_5 - H'_6)$$

$$H_3^L = -107,973 + 3 + (1 - 0,156)(-200,043 + 49,8015)$$

$$H_3^L = -55,30 \text{ Kj/Kg.}$$

➤ Calcul des caractéristiques thermodynamiques de l'installation cryogénique :

❖ Travail spécifique :

$$W_0^L = \frac{W_r}{X} + \frac{\beta_0 q_0^L}{X \cdot q_{X \text{ sup}}}$$

Contour S_1 :

$$q_0^L = G_0(H_8 - H_7) = H_2 + q_a - H'_2 + (1 - X)(H'_6 - H'_1)$$

$$q_0^L = -7,9515 + 3 + 107,973 + (1 - 0,156)(-49,8015 - 24,438)$$

$$q_0^L = 40 \text{ Kj/Kg. gT}$$

$$W_r = \frac{P_K}{\dot{m}} = \frac{72,63}{0,1} = 726,3 \text{ Kj/Kg.}$$

Alors :

$$W_0^L = \frac{726,3}{0,156} + \frac{1,25 \cdot 40}{0,156 \cdot 1,05} = 4961,0195 \text{ Kj/Kg}_{\text{liq}}$$

❖ Le coefficient frigorifique réel :

$$\varepsilon^L = \frac{q_x}{W}$$

$$\varepsilon^L = \frac{q_x}{W} = \frac{X(H_6 - H_f - q_{in2})}{W_r + \beta_0 \cdot \frac{q_0^L}{q_{X \text{ sup}}}}$$

Alors :

$$\varepsilon^L = \frac{0,156(-45,198 + 405,84 - 4,02)}{726,3 + 1,25 \cdot \frac{40}{1,05}}$$

$$\varepsilon^L = 0,071$$

❖ **Calcul du rendement thermodynamique :**

$$\eta = \varepsilon^L \left[\frac{T_1(S_1 - S_f) - (H_1 - H_f)}{H_1 - H_f} \right]$$

$$\eta = 0,071 \left[\frac{300(-0,04185 + 3,7665) - (28,458 + 405,84)}{28,458 + 405,84} \right]$$

$$\eta = 0,11.$$

$$\eta = 11 \%$$

b- Pour une pression $P_2=100$ bar

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

L'ensemble des paramètres (P, T, H et S) sont déterminés par calcul et graphiquement à l'aide du diagramme entropique de l'air et les résultats obtenus sont représentés le Tableau 6.

Tableau 6 : Les paramètres (P, T, H et S) aux points figuratifs du cycle pour $P_2=100$ bar

Point	P(bar)	T(K°)	h (KJ/Kg)	S (KJ/Kg.K)
1	1	300	28,274	-0,04185
2	100	300	7,9515	-1,29735
2''	100	254	-57,34	-1,5903
2'	100	230	-82,813	-1,63215
3	100	158	-218,035	-2,38545
4	1	78,85	-218,035	-1,54845
5	1	78,85	-200,043	-1,29735
6	1	230	-45,198	-0,2511
6'	1	226	-49,8015	-0,29295
1'	1	296	24,438	-0,0837
F	1	78,85	-405,84	-3,7665

❖ **Calcul de la quantité X :**

$$X = \frac{H_6 - H_2' - (q_{a2} + q_{in2})}{H_6 - H_f - q_{in2}} = \frac{-45,198 + 82,831 - (3 + 4,02)}{-45,198 + 405,84 - 4,02}$$

$$X = 0,085$$

$$X = 8,5 \%$$

❖ **Calcul de $H_{2''}^L$:**

Régime L : Contour S_3 :

$$S = E$$

$$H_2 + q_{a1} + (1 - X)H'_6 = (1 - X)H'_1 + H_{2''}$$

$$H_{2''}^L = H_2 + q_{a1} + (1 - X)(H'_6 - H'_1)$$

Alor :

$$H_{2''}^L = 7,9515 + 3 + (1 - 0,085)(-49,8015 - 24,438)$$

$$H_{2''}^L = -57,34 \text{ Kj/Kg .}$$

❖ **Calcul de H_3^L :**

Contour S_4 :

$$H_3^L = H'_2 + q_{a2} + (1 - X)(H_5 - H'_6)$$

$$H_3^L = -82,813 + 3 + (1 - 0,085)(-200,043 - 49,8015)$$

$$H_3^L = -218,035 \text{ Kj/Kg .}$$

➤ **Calcul des caractéristiques thermodynamiques de l'installation cryogénique :**

❖ **Travail spécifique :**

$$W_0^L = \frac{W_r}{X} + \frac{\beta_0 q_0^L}{X \cdot q_{X \text{ sup}}}$$

Contour S_1 :

$$q_0^L = G_0(H_8 - H_7) = H_2 + q_a - H'_2 + (1 - X)(H'_6 - H'_1)$$

$$q_0^L = 7,9515 + 3 + 82,831 + (1 - 0,085)(-49,8015 - 24,438)$$

$$q_0^L = 25,85 \text{ Kj/Kg. gT.}$$

Alors :

$$W_0^L = \frac{726,3}{0,085} + \frac{1,25 \cdot 25,85}{0,085 \cdot 1,05} = 8906,7507 \text{ Kj/Kg}_{\text{liq}}.$$

❖ **Le coefficient frigorifique réel :**

$$\varepsilon^L = \frac{q_x}{W}$$

$$\varepsilon^L = \frac{q_x}{W} = \frac{X(H_6 - H_f - q_{\text{in}2})}{W_r + \beta_0 \cdot \frac{q_0^L}{q_{x \text{ sup}}}}$$

Alors :

$$\varepsilon^L = \frac{0,085(-45,198 + 405,84 - 4,02)}{726,3 + 1,25 \cdot \frac{40}{1,05}}$$

$$\varepsilon^L = 0,04$$

❖ **Calcul du rendement thermodynamique :**

$$\eta = \varepsilon^L \left[\frac{T_1(S_1 - S_f) - (H_1 - H_f)}{H_1 - H_f} \right]$$

$$\eta = 0,04 \left[\frac{300(-0,04185 + 3,7665) - (28,458 + 405,84)}{28,458 + 405,84} \right]$$

$$\eta = 0,062.$$

$$\eta = 6,2 \%$$

c- Pour une pression P₂=50 bar

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

L'ensemble des paramètres (P, T, H et S) sont déterminés par calcul et graphiquement à l'aide du diagramme entropique de l'air et les résultats obtenus sont représentés le Tableau 7.

Tableau 7 : Les paramètres (P, T, H et S) aux points figuratifs du cycle pour P₂=50 bar

Point	P(bar)	T(K°)	h (KJ/Kg)	S (KJ/Kg.K)
1	1	300	28,274	-0,04185
2	50	300	16,74	-1,1718
2''	50	240	-51,6429	-1,3392
2'	50	230	-66,123	-1,4229
3	50	144	-207,65	-2,1762
4	1	78,85	-207,65	-1,4229
5	1	78,85	-200,043	-1,29735
6	1	230	-45,198	-0,2511
6'	1	226	-49,8015	-0,29295
1'	1	296	24,438	-0,0837
F	1	78,85	-405,84	-3,7665

❖ **Calcul de la quantité X :**

$$X = \frac{H_6 - H'_2 - (q_{a2} + q_{in2})}{H_6 - H_f - q_{in2}} = \frac{-45,198 + 66,123 - (3 + 4,02)}{-45,198 + 405,84 - 4,02}$$

$$X = 0,038$$

$$X = 3,8 \%$$

❖ **Calcul de H_{2''}^L:**

Régime L : Contour S₃ :

$$S = E$$

$$H_2 + q_{a1} + (1 - X)H'_6 = (1 - X)H'_1 + H_{2''}^L$$

$$H_{2''}^L = H_2 + q_{a1} + (1 - X)(H'_6 - H'_1)$$

$$H_{2''}^L = 16,74 + 3 + (1 - 0,038)(-49,8015 - 24,438)$$

$$H_{2''}^L = -51,64 \text{ Kj/Kg.}$$

❖ **Calcul de H_3^L :**

Contour S_4 :

$$H_3^L = H_2' + q_{a2} + (1 - X)(H_5 - H_6')$$

$$H_3^L = -66,123 + 3 + (1 - 0,038)(-200,043 + 49,8015)$$

$$H_3^L = -207,65 \text{ Kj/Kg.}$$

➤ **Calcul des caractéristiques thermodynamiques de l'installation cryogénique :**

❖ **Travail spécifique :**

$$W_0^L = \frac{W_r}{X} + \frac{\beta_0 q_0^L}{X \cdot q_{X \text{ sup}}}$$

Contour S_1 :

$$q_0^L = G_0(H_8 - H_7) = H_2 + q_a - H_2' + (1 - X)(H_6' - H_1')$$

$$q_0^L = 16,74 + 3 + 66,123 + (1 - 0,038)(-49,8015 - 24,438)$$

$$q_0^L = 14,44 \text{ Kj/Kg. gT.}$$

Alors :

$$W_0^L = \frac{726,3}{0,038} + \frac{1,25 \cdot 14,44}{0,038 \cdot 1,05} = 19565,53 \text{ Kj/Kg}_{\text{liq.}}$$

❖ **Le coefficient frigorifique réel :**

$$\varepsilon^L = \frac{q_x}{W}$$

$$\varepsilon^L = \frac{q_x}{W} = \frac{X(H_6 - H_f - q_{in2})}{W_r + \beta_0 \cdot \frac{q_0^L}{q_{X \text{ sup}}}}$$

Alors :

$$\varepsilon^L = \frac{0,038(-45,198+405,84-4,02)}{726,3+1,25 \cdot \frac{14,44}{1,05}}$$

$$\varepsilon^L = 0,018$$

$$\varepsilon^L = 1,8 \%$$

❖ **Calcul du rendement thermodynamique :**

$$\eta = \varepsilon^L \left[\frac{T_1(S_1 - S_f) - (H_1 - H_f)}{H_1 - H_f} \right]$$

$$\eta = 0,018 \left[\frac{300(-0,04185 + 3,7665) - (28,458 + 405,84)}{28,458 + 405,84} \right]$$

$$\eta = 0,028.$$

$$\eta = 2,8 \%$$

III.3.1.1.2 Effet de la variation de la température d'entrée T_0

a- **Pour une température $T_0=280$ K**

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

L'ensemble des paramètres (P, T, H et S) sont déterminés par calcul et graphiquement à l'aide du diagramme entropique de l'air et les résultats obtenus sont représentés le Tableau 8.

Tableau 8 : Les paramètres (P, T, H et S) aux points figuratifs du cycle pour $T_0=280$ K

Point	P(bar)	T(K°)	h (KJ/Kg)	S (KJ/Kg.K)
1	1	280	5,022	-0,04185
2	200	280	-33,48	-1,63215
2''	200	254	-73,25	-1,79955
2'	200	230	-108,81	-1,96695
3	200	160	-232,31	-2,5947
4	1	78,85	-232,31	-1,71585
5	1	78,85	-200,043	-1,29735
6	1	230	-45,198	-0,2511

6'	1	226	-49,8015	-0,29295
1'	1	276	1	-0,0837
f	1	78,85	-405,84	-3,7665

❖ **Calcul de la quantité X :**

$$X = \frac{H_6 - H_2' - (q_{a2} + q_{in2})}{H_6 - H_f - q_{in2}} = \frac{-45,198 + 108,81 - (3 + 4,02)}{-45,198 + 405,84 - 4,02}$$

$$X = 0,158$$

$$X = 0,158 \%$$

❖ **Calcul de H_2'' :**

Régime L : Contour S_3 :

$$S = E$$

$$H_2 + q_{a1} + (1 - X)H_6' = (1 - X)H_1' + H_{2''}^L$$

$$H_{2''}^L = H_2 + q_{a1} + (1 - X)(H_6' - H_1')$$

$$H_{2''}^L = -33,48 + 3 + (1 - 0,158)(-49,8015 - 1)$$

$$H_{2''}^L = -73,25 \text{ Kj/Kg.}$$

❖ **Calcul de H_3^L :**

Contour S_4 :

$$H_3^L = H_2' + q_{a2} + (1 - X)(H_5 - H_6')$$

$$H_3^L = -108,81 + 3 + (1 - 0,158)(-200,043 + 49,8015)$$

$$H_3^L = -232,31 \text{ Kj/Kg.}$$

➤ **Calcul des caractéristiques thermodynamiques de l'installation cryogénique :**

❖ **Travail spécifique :**

$$W_0^L = \frac{W_r}{X} + \frac{\beta_0 q_0^L}{X \cdot q_{X \text{ sup}}}$$

Contour S_1 :

$$q_0^L = G_0(H_8 - H_7) = H_2 + q_a - H'_2 + (1 - X)(H'_6 - H'_1)$$

$$q_0^L = -33,48 + 3 + 108,81 + (1 - 0,158)(-49,8015 - 1)$$

$$q_0^L = 35,55 \text{ Kj/Kg. gT.}$$

Alor :

$$W_0^L = \frac{726,3}{0,158} + \frac{1,25 \cdot 35,55}{0,158 \cdot 1,05} = 4864,69 \text{ Kj/Kg}_{\text{liq.}}$$

❖ **Le coefficient frigorifique réel :**

$$\varepsilon^L = \frac{q_x}{W}$$

$$\varepsilon^L = \frac{q_x}{W} = \frac{X(H_6 - H_f - q_{in2})}{W_r + \beta_0 \cdot \frac{q_0^L}{q_{x \text{ sup}}}}$$

Alors :

$$\varepsilon^L = \frac{0,158(-45,198 + 405,84 - 4,02)}{726,3 + 1,25 \cdot \frac{35,55}{1,05}}$$

$$\varepsilon^L = 0,073$$

$$\varepsilon^L = 7,3 \%$$

❖ **Calcul du rendement thermodynamique :**

$$\eta = \varepsilon^L \left[\frac{T_1(S_1 - S_f) - (H_1 - H_f)}{H_1 - H_f} \right]$$

$$\eta = 0,073 \left[\frac{280(-0,04185 + 3,7665) - (5,022 + 405,84)}{5,022 + 405,84} \right]$$

$$\eta = 0,11.$$

$$\eta = 11 \%$$

b- Pour une température $T_0=300\text{ K}$

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

L'ensemble des paramètres (P, T, H et S) sont déterminés par calcul et graphiquement à l'aide du diagramme entropique de l'air et les résultats obtenus sont représentés le Tableau 9.

Tableau 9 : Les paramètres (P, T, H et S) aux points figuratifs du cycle pour $T_0=300\text{ K}$

Point	P(bar)	T(K°)	h (KJ/Kg)	S (KJ/Kg.K)
1	1	300	28,274	-0,04185
2	200	300	-7,9515	-1,63215
2''	200	256	-67,60	-1,7577
2'	200	230	-107,973	-1,88325
3	200	162	-55,30	-2,55285
4	1	78,85	-55,30	-1,771585
5	1	78,85	-200,043	-1,29735
6	1	230	-45,198	-0,2511
6'	1	226	-49,8015	-0,29295
1'	1	296	24,438	-0,0837
f	1	78,85	-405,84	-3,7665

❖ **Calcul de H'_1 :**

$$H_1 - H'_1 = C_p \Delta T$$

$$H'_1 = 28,274 - 1,005 \cdot 4$$

$$H'_1 = 24,438 \text{ KJ/Kg}.$$

❖ **Calcul de la quantité X :**

$$X = \frac{H_6 - H'_2 - (q_{a2} + q_{in2})}{H_6 - H_f - q_{in2}} = \frac{-45,198 + 107,973 - (3 + 4,02)}{-45,198 + 405,84 - 4,02}$$

$$q_{in2} = C_p \cdot \Delta T = 1,005 \cdot 4 = 4,02 \text{ Kj/kg}.$$

$$X = 0,156$$

$$X = 15,6 \%$$

❖ **Calcul de $H_{2''}^L$:**

Régime L : Contour S_3 :

$$S = E$$

$$H_2 + q_{a1} + (1 - X)H'_6 = (1 - X)H'_1 + H_2''$$

$$H_{2''}^L = H_2 + q_{a1} + (1 - X)(H'_6 - H'_1)$$

Alor :

$$H_{2''}^L = -7,9515 + 3 + (1 - 0,156)(-49,8015 - 24,438)$$

$$H_{2''}^L = -67,60 \text{ Kj/Kg.}$$

❖ **Calcul de H_3^L :**

Contour S_4 :

$$H_3^L = H'_2 + q_{a2} + (1 - X)(H_5 - H'_6)$$

$$H_3^L = -107,973 + 3 + (1 - 0,156)(-200,043 + 49,8015)$$

$$H_3^L = -55,30 \text{ Kj/Kg.}$$

➤ **Calcul des caractéristiques thermodynamiques de l'installation cryogénique :**

❖ **Travail spécifique :**

$$W_0^L = \frac{W_r}{X} + \frac{\beta_0 q_0^L}{X \cdot q_{X \text{ sup}}}$$

Contour S_1 :

$$q_0^L = G_0(H_8 - H_7) = H_2 + q_a - H'_2 + (1 - X)(H'_6 - H'_1)$$

$$q_0^L = -7,9515 + 3 + 107,973 + (1 - 0,156)(-49,8015 - 24,438)$$

$$q_0^L = 40 \text{ Kj/Kg. gT}$$

$$W_r = \frac{P_K}{\dot{m}} = \frac{72,63}{0,1} = 726,3 \text{ Kj/Kg.}$$

Alors :

$$W_0^L = \frac{726,3}{0,156} + \frac{1,25 \cdot 40}{0,156 \cdot 1,05} = 4961,0195 \text{ Kj/Kg}_{\text{liq}}$$

❖ **Le coefficient frigorifique réel :**

$$\varepsilon^L = \frac{q_x}{W}$$

$$\varepsilon^L = \frac{q_x}{W} = \frac{X(H_6 - H_f - q_{in2})}{W_r + \beta_0 \cdot \frac{q_0^L}{q_{x \text{ sup}}}}$$

Alors :

$$\varepsilon^L = \frac{0,156(-45,198 + 405,84 - 4,02)}{726,3 + 1,25 \cdot \frac{40}{1,05}}$$

$$\varepsilon^L = 0,071$$

❖ **Calcul du rendement thermodynamique :**

$$\eta = \varepsilon^L \left[\frac{T_1(S_1 - S_f) - (H_1 - H_f)}{H_1 - H_f} \right]$$

$$\eta = 0,071 \left[\frac{300(-0,04185 + 3,7665) - (28,458 + 405,84)}{28,458 + 405,84} \right]$$

$$\eta = 0,11.$$

$$\eta = 11 \%$$

c- Pour une température $T_0=320 \text{ K}$

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

Chapitre III Analyse énergétique et exergetique du cycle de refroidissement préalable.

L'ensemble des paramètres (P, T, H et S) sont déterminés par calcul et graphiquement à l'aide du diagramme entropique de l'air et les résultats obtenus sont représentés le Tableau 10.

Tableau 10 : Les paramètres (P, T, H et S) aux points figuratifs du cycle pour $T_0=320$ K

Point	P(bar)	T(K°)	h (KJ/Kg)	S (KJ/Kg.K)
1	1	320	49,8015	0,04185
2	200	320	16,74	-0,35
2''	200	258	-60,66	-0,41
2'	200	230	-108,3915	-0,46
3	200	161	-232,045	-0,61
4	1	78,85	-232,045	-0,41
5	1	78,85	-200,043	-0,31
6	1	230	-45,198	-0,06
6'	1	226	-49,8015	-0,07
1'	1	316	45,5815	-0,01
f	1	78,85	-405,84	-3,7665

❖ **Calcul de la quantité X :**

$$X = \frac{H_6 - H'_2 - (q_{a2} + q_{in2})}{H_6 - H_f - q_{in2}}$$

$$X = \frac{-45,198 + 108,3915 - (3 + 4,02)}{-45,198 + 405,84 - 4,02} = 0,157$$

$$X = 0,157 \%$$

❖ **Calcul de $H_{2''}^L$:**

Régime L : Contour S_3 :

$$S = E$$

$$H_2 + q_{a1} + (1 - X)H'_6 = (1 - X)H'_1 + H_{2''}^L$$

$$H_{2''}^L = H_2 + q_{a1} + (1 - X)(H'_6 - H'_1)$$

$$H_{2''}^L = 16,74 + 3 + (1 - 0,157)(-49,8015 - 45,5815)$$

$$H_{2''}^L = -60,66 \text{ Kj/Kg.}$$

❖ **Calcul de H_3^L**

Contour S_4 :

$$H_3^L = H'_2 + q_{a2} + (1 - X)(H_5 - H'_6)$$

$$H_3^L = -108,3915 + 3 + (1 - 0,157)(-200,043 + 49,8015)$$

$$H_3^L = -232,045 \text{ Kj/Kg.}$$

➤ **Calcul des caractéristiques thermodynamiques de l'installation cryogénique :**

❖ **Travail spécifique :**

$$W_0^L = \frac{W_r}{X} + \frac{\beta_0 q_0^L}{X \cdot q_{X \text{ sup}}}$$

Contour S_1 :

$$q_0^L = G_0(H_8 - H_7) = H_2 + q_a - H'_2 + (1 - X)(H'_6 - H'_1)$$

$$q_0^L = 16,74 + 3 + 108,3915 + (1 - 0,157)(-49,8015 - 45,5815)$$

$$q_0^L = 47,72 \text{ Kj/Kg. gT.}$$

Alors :

$$W_0^L = \frac{726,3}{0,157} + \frac{1,25 \cdot 47,72}{0,157 \cdot 1,05} = 4987,95 \text{ Kj/Kg}_{\text{liq}}.$$

❖ **Le coefficient frigorifique réel :**

$$\varepsilon^L = \frac{q_x}{W}$$

$$\varepsilon^L = \frac{q_x}{W} = \frac{X(H_6 - H_f - q_{in2})}{W_r + \beta_0 \cdot \frac{q_0^L}{q_{x \text{ sup}}}}$$

Alors :

$$\varepsilon^L = \frac{0,157(-45,198 + 405,84 - 4,02)}{726,3 + 1,25 \cdot \frac{47,72}{1,05}}$$

$$\varepsilon^L = 0,071$$

$$\varepsilon^L = 7,1 \%$$

❖ **Calcul du rendement thermodynamique :**

$$\eta = \varepsilon^L \left[\frac{T_1(S_1 - S_f) - (H_1 - H_f)}{H_1 - H_f} \right]$$

$$\eta = 0,071 \left[\frac{320(0,04185 + 3,7665) - (49,8015 + 405,84)}{49,8015 + 405,84} \right]$$

$$\eta = 0,12.$$

$$\eta = 12 \%$$

III.4 Analyse exergetique :

Le bilan exergetique est defini à partir des equations de bilan d'énergie et d'entropie.

Bilan d'exergie = bilan d'énergie - T_0 x bilan d'entropie

Selon la théorie exergetique, les expressions suivantes définissent la fonction exergie et l'exergie détruite

$$E_X = (h - h_0) - T_0(S - S_0)$$

$$E_{Xd} = \sum (1 - \frac{T_0}{T_i}) \dot{Q}_i - \dot{W} + \sum \dot{m}_{in} E_{Xin} - \sum \dot{m}_{out} E_{Xout}$$

h : enthalpie

S : entropie

Chapitre III Analyse énergétique et exergetique du cycle de refroidissement préalable.

h_0 et S_0 sont les valeurs d'enthalpie et d'entropie du fluide de travail à la température de référence T_0

\dot{Q}_i : Taux de transfert de chaleur

T_i : Température à laquelle le transfert de chaleur se produit

\dot{W} : Travail (puissance)

\dot{m} : Débit masse

Pour effectuer une analyse exergetique, chaque composant de l'installation est considéré comme un volume de contrôle. Les équations suivantes sont obtenues en appliquant la conservation de l'énergie et l'équilibre exergetique à chaque composant comme suite :

- **Compresseur :**

$$E_{Xd} = \dot{m}[(H_1 - H_2) * \left(1 - \frac{1}{\eta_{comp}}\right) + (S_1 - S_2) * \left(\frac{T_1}{\eta_{comp}} - T_0\right)]$$

$$E_{Xd} = 1[(28,274 + 7,9515)] * \left(1 - \frac{1}{0,65}\right) + (-0,04185 + 1,63215) * \left(\frac{300}{0,65} - 300\right)$$

$$E_{Xd} = 243,26 \text{ KW.}$$

- **Echangeur E1 :**

$$E_{Xd1} = 1[(h_2 - h_0) - T_0(S_2 - S_0) + (1 - X)[(h_{6'} - h_0) - T_0(S_{6'} - S_0)]]$$

$$-1[(h_{2''} - h_0) - T_0(S_{2''} - S_0)] - (1 - X)[(h_{1'} - h_0) - T_0(S_{1'} - S_0)]$$

$$E_{Xd1} = h_2 - T_0 S_2 + (1 - X)h_{6'} - (1 - X)T_0 h_{6'} + h_{2''} + T_0 S_{2''}$$

$$-(1 - X)h_{1'} + (1 - X)T_0 S_{1'}$$

$$E_{Xd1} = (h_2 - h_{2''}) + (1 - X)(h_{6'} - h_{1'}) + T_0(S_{2''} - S_2) +$$

$$(1 - X)T_0(S_{1'} - S_{6'})$$

$$E_{Xd1} = T_0(S_{2''} - S_2) + (1 - X)T_0(S_{1'} - S_{6'})$$

$$E_{Xd1} = 300(-1,71585 + 1,63215) + (1 - 0,156)300(-0,0837 + 0,292995)$$

$$E_{Xd1} = 27,883 \text{ KW.}$$

• **Echangeur E2 :**

$$E_{Xd2} = 1[(h_{2'} - h_0) - T_0(S_{2'} - S_0) + (1 - X)[(h_5 - h_0) - T_0(S_5 - S_0)]] \\ - 1[(h_3 - h_0) - T_0(S_3 - S_0)] - (1 - X)[(h_{6'} - h_0) - T_0(S_{6'} - S_0)]$$

$$E_{Xd2} = (h_{2'} - h_3) + (1 - X)(h_5 - h_{6'}) + T_0(S_3 - S_{2'}) + T_0(S_{6'} - S_5)$$

$$E_{Xd2} = T_0(S_3 - S_{2'}) + T_0(S_{6'} - S_5)$$

$$E_{Xd2} = 300(-2,55285 + 1,88325) + 300(-0,292995 + 1,29735)$$

$$E_{Xd2} = 100,426 \text{ KW.}$$

• **VE :**

$$E_{Xdve} = 1[(h_3 - h_0) - T_0(S_3 - S_0)] - 1[(h_4 - h_0) - T_0(S_4 - S_0)]$$

$$E_{Xdve} = 1T_0(S_4 - S_3) + 1(h_3 - h_4)$$

$$E_{Xdve} = 1T_0(S_4 - S_3)$$

$$E_{Xdve} = 1 \cdot 300(-1,7577 + 2,55285)$$

$$E_{Xdve} = 238,545 \text{ KW.}$$

• **Cuve :**

$$E_{Xd} = XT_0(S_f - S_4) + (1 - X)T_0(S_5 - S_4)$$

$$E_{Xd} = 0,156 \cdot 300(-3,7665 + 1,7577) + (1 - 0,156)300(-1,29735 + 1,7577)$$

$$E_{Xd} = 22,548 \text{ KW.}$$

• **Cuve P :**

$$E_{Xd} = G_0[(h_7 - h_0) - T_0(S_7 - S_0)] - G_0[(h_8 - h_0) - T_0(S_8 - S_0)]$$

Chapitre III Analyse énergétique et exergetique du cycle de refroidissement préalable.

$$E_{Xd} = G_0 T_0 (S_8 - S_7) + G_0 (h_7 - h_8)$$

$$E_{Xd} = 0,18 \cdot 300(0,92310 - 0,15504) + 0,18(38,55 - 260,77)$$

$$E_{Xd} = 1,47564 \text{ KW.}$$

- Exergie détruite totale :

$$E_{Xd \text{ totale}} = E_{Xd \text{ compresseur}} + E_{Xd \text{ echangeur1}} + E_{Xd \text{ echangeur2}} + E_{Xd \text{ Ve}} + E_{Xd \text{ Cuve}} + E_{Xd \text{ Cuve P}}$$

$$E_{Xd \text{ totale}} = 243,26 + 27,883 + 100,426 + 238,545 + 22,548 + 1,47564$$

$$E_{Xd \text{ totale}} = 634,13764 \text{ KW.}$$

Rendement exergetique de l'installation :

Il est défini comme suit :

$$\eta_{ex} = 1 - \frac{E_{Xd \text{ totale}}}{\dot{W}_{\text{totale}}}$$

$$\dot{W}_{\text{totale}} = \dot{W}_{\text{Comp}} + \dot{W}_{\text{Sup}}$$

$$\dot{W}_{\text{Comp}} = \frac{rT_1 \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)}{\eta_{\text{Comp}}}$$

$$\dot{W}_{\text{Comp}} = \frac{0,287 \cdot 300 \ln\left(\frac{200}{1}\right)}{0,65}$$

$$\dot{W}_{\text{Comp}} = 701,823 \text{ KJ/Kg.}$$

$$\dot{W}_{\text{Sup}}^L = \frac{W}{q_x} + \frac{\beta_0}{q_x} \frac{q_0^L}{q_x}$$

$$q_x = H_{6'} - H_{2'} - q_{a2} = -49,8015 + 107,973 - 3$$

$$q_x = 55 \text{ KJ/Kg.}$$

$$\dot{W}_{\text{Sup}}^L = \frac{726,3}{55} + \frac{1,25}{55} \frac{40}{1,05}$$

$$\dot{W}_{\text{Supp}}^L = 14,071 \text{ Kj/Kg.}$$

$$\dot{W}_{\text{totale}} = 701,823 + 14,071 = 715,894 \text{ Kj/Kg.}$$

Alors :

$$\eta_{\text{ex}} = 1 - \frac{634,13764}{687,7752} = 0,11$$

$$\eta_{\text{ex}} = 11\%.$$

Dans le Tableau 11 sont regroupés l'ensemble des parametres calculés (P, T, H, S, \dot{m} et E_x) aux points figuratifs du cycle.

Tableau 11 : Les paramètres (P, T, H, S, \dot{m} et E_x) aux points figuratifs du cycle pour $P_2=200$ bar

Point	P(bar)	T(K°)	h (KJ/Kg)	S (KJ/Kg.K)	\dot{m} (Kg/s)	E_x
1	1	300	28,274	-0,04185	1	0
2	200	300	-7,9515	-1,63215	1	497
2''	200	256	-67,60	-1,71585	1	406
2'	200	230	-107,973	-1,88325	1	416
3	200	162	-55,30	-2,55285	1	669
4	1	78,85	-55,30	-1,7577	0,156	431
5	1	78,85	-200,043	-1,29735	0,844	148
6	1	230	-45,198	-0,2511	0,844	10
6'	1	226	-49,8015	-0,292995	0,844	2
1'	1	296	24,438	-0,0837	0,844	8
f	1	78,85	-405,84	-3,7665	0,156	683

III.5 Discussion des résultats :

Des analyses énergétique et exergetique du cycle de liquéfaction de l'air utilisé comme gaz de travail ont été étudiés dans ce travail de mémoire. La température de référence T_0 utilisée était de 300 K, tandis que la pression maximale pour ce cycle était d'environ 200 bar. Le rendement de compression isotherme pour ce cycle est de 0.65.

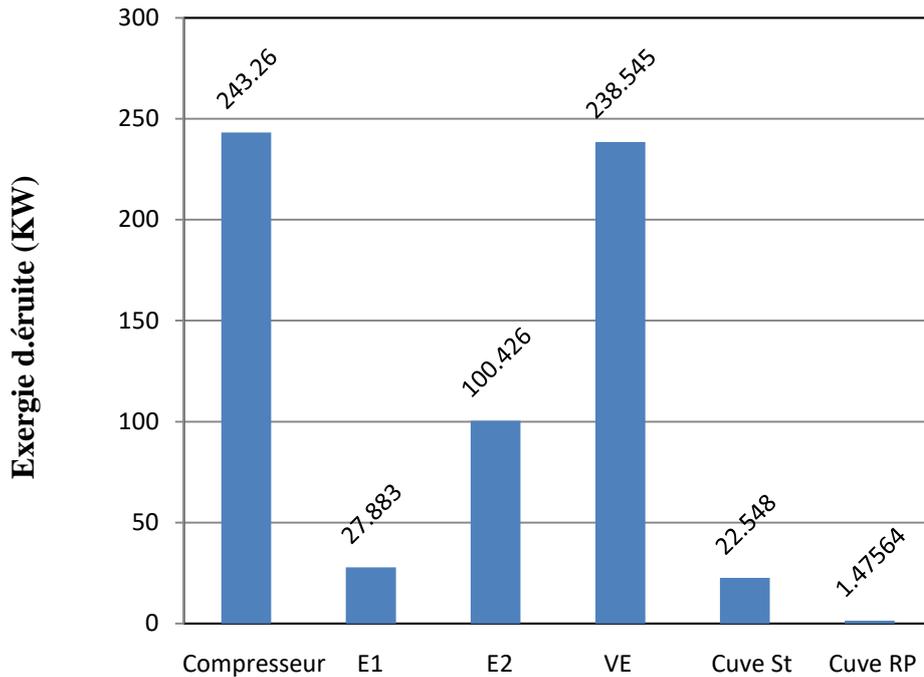


Figure 12 : Exergie détruite des composants du cycle de refroidissement préalable.

Les résultats des analyses énergétique et exergetique sont présentés par les différents tableaux 5-11. Ces derniers contiennent des informations sur les pressions, les températures, le débit massique, les enthalpies, les entropies et l'exergie aux points clés du cycle de Linde avec refroidissement préalable.

D'après les résultats obtenus, on constate que l'augmentation de la pression de sortie au niveau du compresseur (taux de compression élevé) fait nettement améliorer les caractéristiques thermodynamiques du cycle de Linde avec refroidissement préalable. En effet, les meilleurs valeurs du rendement thermodynamique η et de la quantité du liquide produite X sont obtenus pour une pression de sortie de l'ordre de 200 bar. Dans ces conditions, le rendement thermodynamique s'élève à 11%, tandis que la quantité X est de l'ordre de 15,6 %. En outre, la consommation spécifique se trouve nettement diminué avec l'augmentation de la pression de sortie du compresseur. D'autre part, les résultats de l'analyse énergétique obtenus montrent que la variation de la température ambiante a peu d'effet (voire négligeable) sur l'évolution des performances thermodynamiques de l'installation de refroidissement préalable étudié.

Chapitre III Analyse énergétique et exergetique du cycle de refroidissement préalable.

Au cours de l'analyse exergetique, la contribution de chaque élément dans l'augmentation de l'exergie détruite totale de l'installation de refroidissement préalable a été évaluée. Il est clairement observé que le compresseur est responsable d'une grande partie de l'exergie détruite. Cette situation est due au rendement relativement faible du compresseur ($\eta = 65\%$).

Par ailleurs, d'après la Figure 12, il apparait clairement que le compresseur et la valve d'expansion présentent la plus grande contribution dans l'évolution de l'exergie détruite totale, suivis de l'échangeur E_2 . De plus, il est évident que la cuve de refroidissement préalable contribue que très peu aux pertes d'exergie.

Il est bien clair, que l'approche exergetique permet de mesurer avec précision les pertes résultant des irréversibilités dans l'installation analysée, le cycle de refroidissement préalable nécessite peu de travail pour produire 1 kg de gaz de travail circulant. Enfin, le rendement exergetique du cycle de refroidissement préalable est relativement faible ($\eta_{ex} = 11\%$).

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

L'objectif de cette étude était d'évaluer la qualité thermodynamique de l'installation à étraglement simple avec refroidissement préalable en calculant l'exergie détruite pour chaque composant de l'installation, ainsi que le rendement exergetique global. Une étude énergetique détaillée de l'installation considéré a été également réalisée par évaluation de ses performances énergetiques telles que : la quantité du gaz liquide produite, le coefficient frigorifique, la consommation spécifique et le rendement thermodynamique.

L'analyse exergetique est un moyen de travail pratique et fiable. Elle permet de démontrer la qualité thermodynamique de tout système, indépendamment de sa nature.

De plus, il est facile d'effectuer un véritable "diagnostic" de l'état thermodynamique des systèmes énergetiques en identifiant toutes les imperfections.

En examinant l'installation cryogénique objet d'étude, nous avons réussi à utiliser avec succès les approches énergetiques et exergetiques et à comprendre leur importance. En effet, l'étude énergetique réalisée a permis pour sa part de montrer qu'un taux de compression élevée donne les meilleures performances énergetiques en termes de consommation spécifique, de quantité de gaz liquide produite et du rendement thermodynamique. Par ailleurs, nous avons également pu évaluer avec précision les pertes thermodynamiques de chaque composant et calculer le rendement exergetique de l'installation étudiée. En effet, l'installation de refroidissement préalable présente un rendement exergetique faible à cause des pertes dans chaque organe de l'installation.

Finalement, pour envisager l'avenir, il est primordial de limiter autant que possible les opérations irréversibles, en commençant par éliminer les irréversibilités les plus évidentes dans les équipements cryogéniques.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1] Philippe Lebrun, 2003, La cryogénie clé de la science et de la technologie avancées., Bulletin de l'institut international du froid, volume IXXXIII
- [2] Cours liquéfaction des gaz dits permanents, comme l'air, le gaz université de relizane Dr ZAÏTER KHALED LICENCE 3 GP année 2021 /2022
- [3] Ai BUI : Directeur de Recherche au CNRS, Laboratoire de Génie Électrique à l'Université Paul Sabatier de Toulouse
- [4] Bertrand BAUDOUY : Docteur, Ingénieur chercheur au Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA) de Saclay au Sein du service des accélérateurs de cryogénie et de magnétisme, France
- [5] Cours de transferts thermiques, Yves Jannot, 2005.
- [6] Transfert de chaleur par conduction, Chevrier J- C Ecole des Mines, Nancy, 1979.
- [7] Transfert de chaleur par rayonnement, Chevrier J- C .Ecole des Mines, Nancy, 1979.
- [8] Ref : Julien Lefèvre, 'Encyclopédie scientifique des Aide-mémoire : La liquéfaction des gaz et ses applications' (1899), Iris - Lilliad - Université Lille 1 - Gauthier –Villars & Masson et Cie, Éditeurs.
- [9] DOSSIER DE PRESSE 26 mars 2014 Les basses températures, de la fusion aux mystères de l'Univers
- [10] Reich P.B & al. (2006) Nitrogen limitation constrains sustainability of ecosystem response to CO². Nature 440, 922–925. (en)
- [11] Robert H. Perry et Donald W. Green, *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, États-Unis, McGraw-Hill, 1997, 7^e éd., 2400 p.(ISBN 0-07-049841-5), p. 2-50.
- [12] Extrait de « Techniques expérimentales en chimie », Bernard A.S., Clède S., Emond M., Monin-Soyer H., Quérard J., Dunod, 2014.
- [13] Beatriz Cordero, Verónica Gómez, Ana E. Platero-Prats, Marc Revés, Jorge Echeverría, Eduard Cremades, Flavia Barragán et Santiago Alvarez, « *Covalent radii revisited* », Dalton Transactions, 2008, p. 2832 - 2838
- [14] Annales de Toxicologie Analytique 2012; 24(4): 185-192

- [15] « Le gaz naturel liquéfié, un intérêt stratégique majeur, limité par des contraintes économiques », Commissariat général au développement durable, avril 2011
- [16] Catherine Hildbrand, Olivier Cherbuin et Julien Mayor, La Réfrigération solaire à adsorption, Hes.so, 17 octobre 2005, consulté le 27 juillet 2010
- [17] "Méthodologie d'analyse et de rétro-conception pour l'amélioration énergétique des procédés industriels"
- [18] ASHRAE, Cryogenics, ch. 38, Fundamentals Handbook (SI), 2002.

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

Liste des figures

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

Figure 2 : Givrage ou condensation cryogénique

Figure 3 : la préparation de l'air

Figure 4 : Diagramme Pression-Température de l'eau

Figure 5 : Cycle idéal pour la liquéfaction d'un gaz

Figure 6 : Transformations thermodynamiques inverses de liquéfaction d'un gaz

Figure 7 : Schéma du procédé et cycle de Brayton inverse associé au processus

Figure 8 : Schéma du cycle à étranglement simple de Linde1 étranglement simple

Figure 9 : Diagramme du cycle à étranglement simple (E.S) de Linde

Figure 10 : Cycle à étranglement avec refroidissement préalable pour les deux régimes de fonctionnement (réfrigérateur et de liquéfaction)

Figure 11 : Cycle à étranglement avec refroidissement préalable dans un diagramme (T-S) pour le régime de liquéfaction de l'air.

Figure 12 : Exergie détruite des composants du cycle de refroidissement préalable.

Liste des tableaux

Tableau 1 : Propriétés physiques de l'azote

Tableau 2 : Principaux constituants de l'air sec

Tableau 3 : Température de saturation des principaux composants de l'air

Tableau 4 : Propriétés physiques de l'air sec

Tableau 5 : Les paramètres (P, T, H et S) aux points figuratifs du cycle pour P=200

Tableau 6 : Les paramètres (P, T, H et S) aux points figuratifs du cycle pour P=100

Tableau 7 : Les paramètres (P, T, H et S) aux points figuratifs du cycle pour P=50

Tableau 8 : Les paramètres (P, T, H et S) aux points figuratifs du cycle pour T=280°K

Tableau 9 : Les paramètres (P, T, H et S) aux points figuratifs du cycle pour T=300

Tableau 10 : Les paramètres (P, T, H et S) aux points figuratifs du cycle pour T=320°K

Résumé

Cette étude se concentre sur l'utilisation du cycle de refroidissement préalable pour la liquéfaction de l'air. L'objectif principal est d'obtenir un régime de fonctionnement qui permettra d'obtenir une quantité de gaz liquide significative. Les effets du taux de compression et de la température d'entrée du compresseur sur les performances des cycles de refroidissement préalable sont examinés et discutés. Par ailleurs, une analyse exergetique intéressante a été menée afin d'évaluer la qualité thermodynamique de l'installation étudiée.

Mot clés : thermodynamique, cryogénie, énergie détruite, cycle de refroidissement préalable.