

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

MEMOIRE

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER

FILIÈRE : GÉNIE MÉCANIQUE

SPÉCIALITÉ : ENERGETIQUE

PAR :

CHELALOU NABILA

MAMACHE SAMIR

Thème

**ANALYSE THERMODYNAMIQUE D'UN
LIQUEFACTEUR DE GAZ DE TYPE LINDE**

Soutenu le 27/06/2019 devant le jury composé de:

Mr.A.Benslimane

Président

Mr.F.Mendil

Rapporteur

Mr.A.Sahi

Examineur

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2018-2019

REMERCIEMENT

REMERCIEMENTS

Au terme de ce modeste travail, nous tenons à remercier vivement Dieu qui nous a donné la force et le courage d'atteindre notre but et nos objectifs et nos très chères familles qui nous ont soutenues tout au long de notre parcours.

Nous tenons particulièrement à remercier notre encadreur monsieur Mendil pour son suivi et pour son énorme soutien, qu'il n'a cessé de nous prodiguer tout au long de la période de travail.

Nous adressons aussi nos vifs remerciements aux membres des jurys pour avoir bien voulu examiné et juger ce travail.

On ne laissera pas cette occasion passe, sans remercier tous les enseignants et le personnel de l'Université de Bejaia et particulièrement ceux de département génie mécanique.

Enfin, nous tenons à remercier vivement tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à la rédaction de ce document.

Dédicace

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à toute ma famille particulièrement

A mes grands parents pour leurs amours et soutien,

Que dieu leurs donnent une longue vie.

Djedi A3ziz je t'adore beaucoup

A mes très chers parents les deux personnes qui me sont très cher au monde,

*Qui m'ont soutenue durant toute ma formation et qui continue de
m'encourager,*

*A mes sœurs et frères qui n'ont jamais cessé de m'aider et
me donner des conseils et étaient toujours à mes côtés.*

Sans oublié mes anges Anis, Matt, Axsel, Nibel et Guirou

Que dieu les protègent.

*Et je ne pourrai jamais oublier mon binôme, mes amis et mes camarades de la
section énergétique.*

A toute la famille « CHELALOU »

Et enfin je le dédie

A tous les enseignants et toute la famille universitaire de Bejaia

Merci.

NABILA

[Tapez le titre du document]

Je dédie ce modeste travail à toute ma famille particulièrement

A mes très chers parents les deux personnes qui me sont très cher au monde,

*Qui m'ont soutenue durant toute ma formation et qui continue de
m'encourager,*

*A mes sœurs et frères qui n'ont jamais cessé de m'aider et
me donner des conseils et étaient toujours à mes côtés.*

*Et je ne pourrai jamais oublier mon binôme, mes amis et mes camarades de la
section énergétique.*

A toute la famille « MAMACHE »

Et enfin je le dédie

A tous les enseignants et toute la famille universitaire de Bejaia

Merci.

SAMIR

Sommaire

Sommaire

| | |
|----------------------------|---|
| Nomenclature | |
| Liste des figures | |
| Liste des tableaux | |
| Introduction générale..... | 1 |

Chapitre I : Notions sur la cryogénie

| | |
|--|----|
| I.1 Introduction..... | 3 |
| I.2 historique de la cryogénie..... | 3 |
| I.3 les propriétés physiques aux basses températures | 7 |
| I.3.1 les propriétés des fluides cryogéniques..... | 7 |
| I.3.2 les propriétés des matériaux | 7 |
| • Propriétés thermiques..... | 7 |
| • Propriétés mécaniques | 8 |
| I.4 stockage et transfert des fluides cryogéniques..... | 8 |
| I.4.1 Isolation des vases de stockage | 8 |
| I.4.2 Différents types d'isolant | 9 |
| • Mousses..... | 9 |
| • Poudres..... | 9 |
| • Les super isolants | 9 |
| I.4.3 lignes de transfert | 10 |
| • divers types d'isolation des lignes | 10 |
| • jonction entre tronçons de lignes de transfert | 10 |
| I.4.4 cryostats..... | 10 |
| I.5 domaine d'utilisation de la cryogénie | 11 |
| I.6 Importance et utilisation des gaz liquéfiés | 11 |
| • Obtention des gaz purs..... | 11 |
| • Facilité et économie du transport..... | 11 |
| • Usage des basses températures | 12 |

Chapitre II : Les cycles de liquéfaction

| | |
|---|----|
| II.1 Définition de la réfrigération et la liquéfaction..... | 13 |
| II.1.1 Définition de la réfrigération | 13 |
| II.1.2 Définition de la liquéfaction | 13 |
| II.2 propriétés de l'air | 14 |
| II.2.1 composition de l'air | 14 |
| II.2.2 points d'ébullition des composants de l'air | 16 |
| II.3 Comment réaliser la liquéfaction des gaz | 17 |
| • Par la compression | 17 |
| • Par l'abaissement de la température..... | 17 |
| II.4 Les différents types de systèmes de liquéfaction | 17 |
| II.4.1 Procédé à détente isenthalpique de Joule-Thomson | 18 |
| • Rappel sur l'effet de Joule-Thomson | 18 |
| • Cycle de Linde pour la liquéfaction | 21 |
| • Principe de fonctionnement | 22 |
| II.4.2 Procédé à détente isentropique..... | 23 |
| • Rappel | 23 |
| • Cycle de Brayton inverse | 23 |
| • Principe de fonctionnement..... | 23 |
| II.4.3 Procédé mixte (cycle de Claude) | 24 |
| • Fonctionnement..... | 25 |
| II.5 Equipements utilisés..... | 25 |
| II.5.1 Compresseur cryogénique..... | 25 |
| II.5.2 Les échangeurs de chaleurs..... | 26 |
| II.5.3 Les régénérateurs | 26 |
| II.5.4 les détendeurs cryogéniques | 26 |
| II.5.5 Autre composants..... | 27 |

Sommaire

| | |
|---|----|
| Chapitre III : Etude thermodynamique des cycles de liquéfaction de type Linde | |
| III.1 rappel thermodynamique..... | 28 |
| III.1.1Premier principe de la thermodynamique appliqué pour un système ouvert..... | 28 |
| III.1.2Application du premier principe de la thermodynamique pour un système ouvert en régime permanent | 28 |
| III.1.3Application pour quelques machines en régime permanent | 30 |
| • Compresseur | 30 |
| • Turbine..... | 30 |
| • Détendeur..... | 31 |
| III.1.4.bilan énergétique d'un cycle idéal de liquéfaction | 32 |
| • Principe de fonctionnement | 32 |
| III.2 Etude énergétique des cycles de liquéfaction de Linde | 33 |
| III.2.1 cycle de Linde à simple étranglement | 33 |
| III.2.2 cycle de Linde avec pré-refroidissement..... | 36 |
| III.3.3 cycle de Linde avec étranglement double..... | 39 |

Chapitre IV-Analyse et discussion

| | |
|---|----|
| IV.1.cycle de Linde simple: | 43 |
| IV.1.1 Influence du taux de compression sur les paramètres du cycle de Linde..... | 44 |
| • L'oxygène | 45 |
| • L'azote | 45 |
| • L'Argon..... | 45 |
| IV.1.2 L'influence de la température d'entrée du compresseur sur les paramètres du cycle de Linde | 48 |
| • L'oxygène..... | 48 |
| • L'Azote | 48 |
| • L'Argon..... | 48 |
| Discussion..... | 51 |
| IV.2 Analyse thermodynamique du cycle de Linde avec pré-refroidissement | 52 |
| • L'oxygène | 53 |
| • L'azote | 53 |

Sommaire

| | |
|---|----|
| • L'argon..... | 54 |
| Discussion..... | 56 |
| IV.3 Analyse thermodynamique du cycle de Linde avec un étranglement double..... | 57 |
| • L'oxygène | 58 |
| • L'azote | 58 |
| • L'argon..... | 59 |
| Discussion | 61 |
| IV.4 Comparaison des cycles..... | 62 |
| Conclusion..... | 62 |
| Conclusion générale..... | 63 |
| Références bibliographiques..... | 64 |
| Annexes..... | 65 |

Nomenclature

Nomenclature

| Lettres Latines non indicées | | |
|------------------------------|--|-----------|
| symbole | Désignation | Unité |
| T | Température | [K] |
| P | Pression | [bar] |
| h | Enthalpie massique | [kJ/kg] |
| S | Entropie massique | [kJ/kg.K] |
| m | Masse totale du gaz | [kg] |
| E_T | Energie totale | [kJ] |
| U | Energie interne | [kJ] |
| E_C | Energie cinétique | [kJ] |
| E_P | Energie potentielle | [kJ] |
| W | Travail massique | [kJ/kg] |
| Q | Chaleur massique | [kJ/kg] |
| \dot{W} | Puissance mécanique | [kW] |
| \dot{Q} | Puissance thermique | [kW] |
| \dot{m} | Débit massique du gaz | [kg/s] |
| \dot{m}_e | Débit massique traversant la turbine | [kg/s] |
| \dot{m}_l | Débit massique du gaz liquéfié | [kg/s] |
| \dot{m}_i | Débit massique du gaz non liquéfié | [kg/s] |
| i | Rapport des débits | / |
| r | Rapport des débits | / |
| h_l | Enthalpie massique de liquide | [kJ/kg] |
| h_g | Enthalpie massique de gaz | [kJ/kg] |
| S_l | Entropie massique du liquide | [kJ/kg.K] |
| W_e | Travail massique de la turbine | [kJ/kg] |
| W_c | Travail massique du compresseur | [kJ/kg] |
| (\dot{W}/\dot{m}) | Travail par unité de masse du gaz comprimé | [kJ/kg] |
| (\dot{W}/\dot{m}_l) | Travail par unité de masse liquéfiée | [kJ/kg] |
| FOM | Facteur de mérite | / |
| y | Le taux de liquéfaction | / |
| x | La fraction massique traversant la turbine | / |

| Lettres Grecs | | |
|---------------|-------------------------------------|-------|
| Symbole | Désignation | Unité |
| μ_{J-T} | Coefficient de Joule-Thomson | / |
| μ_S | Coefficient de détente isentropique | / |

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I

| | |
|--|----|
| Figure I-1 : différentes étapes vers les basses températures et leurs acteurs..... | 5 |
| Figure I-2 : Echelle de températures thermodynamique | 6 |
| Figure I-3 : schéma d'un super-isolant..... | 10 |

Chapitre II

| | |
|---|----|
| Figure II-1 : Schéma d'une machine de liquéfaction et une machine de réfrigération..... | 13 |
| Figure II-2 : composition de l'air | 15 |
| Figure II-3 : points d'ébullition des composants de l'air | 16 |
| Figure II-4 : détente de Joule-Thomson | 19 |
| Figure II-5 : les lignes isenthalpiques et les points d'inversion dans le diagramme (T-P) | 21 |
| Figure II-6 : Système de liquéfaction Linde-Hampson et son diagramme T-S | 22 |
| Figure II-7 : cycle de Brayton et son diagramme (T-S)..... | 24 |
| Figure II-8 : cycle de Claude et son diagramme (T-S)..... | 25 |

Chapitre III

| | |
|--|----|
| Figure III-1 : système ouvert à plusieurs entrées (i) et sorties (j)..... | 28 |
| Figure III-2 : schéma représentatif d'un compresseur | 30 |
| Figure III-3 : schéma représentatif d'une turbine..... | 30 |
| Figure III-4 : schéma représentatif d'une vanne de détente. | 31 |
| Figure III-5 : Schéma d'un cycle idéal et son diagramme (T-S)..... | 32 |
| Figure III-6 : cycle de Linde à détente isenthalpique..... | 33 |
| Figure III-7 : Diagramme (T-S) du cycle de Linde..... | 34 |
| Figure III-8 : cycle de Linde avec un pré-refroidissement..... | 36 |
| Figure III-9 : diagramme (T-S) de la machine frigorifique et la machine de liquéfaction..... | 36 |
| Figure III-10 : cycle de Linde avec étranglement double..... | 39 |
| Figure III-11 : diagramme (T-S) du cycle de linde avec étranglement double..... | 40 |

Chapitre IV

| | |
|---|----|
| Figure IV-1 : profil d'évolution des fractions liquides produites en fonction du taux de compression..... | 46 |
| Figure IV-2 : profil d'évolution du facteur de mérite en fonction du taux de compression. ... | 46 |
| Figure IV-3 : profil de variation du travail par unité de masse de gaz comprimée en fonction du taux de compression. | 47 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure IV-4 : profil de variation du travail par unité de masse de gaz liquéfiée en fonction du taux de compression. | 47 |
| Figure IV-5 : profil d'évolution des fractions liquides produites en fonction de la Température de compression..... | 49 |
| Figure IV-6 : profil d'évolution du facteur de mérite en fonction de la Température d'entrée du compresseur..... | 49 |
| Figure IV-7 : profil de variation du travail par unité de masse de gaz comprimée en fonction de la Température d'entrée du compresseur..... | 50 |
| Figure IV-8 : profil de variation du travail par unité de masse liquéfiée en fonction de la Température d'entrée du compresseur. | 50 |
| Figure IV-9 : profil d'évolution de la fraction y en fonction de la variation du rapport des débits | 54 |
| Figure IV-10 : profil d'évolution du rendement thermodynamique en fonction de la variation du rapport des débits | 55 |
| Figure IV-11 : profil d'évolution du travail par unité de masse de gaz comprimée en fonction de la variation du rapport des débits..... | 55 |
| Figure IV-12 : profil d'évolution du travail par unité de masse liquéfiée en fonction de la variation du rapport des débits | 56 |
| Figure IV-13 : évolution de la fraction en liquide de chaque fluide de travail en fonction de la pression intermédiaire | 59 |
| Figure IV-14 : profil de variation du facteur de mérite en fonction de la pression intermédiaire | 60 |
| Figure IV-15 : profil de variation du travail par unité de masse de gaz comprimée en fonction de la pression intermédiaire..... | 60 |
| Figure IV-16 : profil de variation du travail par unité de masse liquéfiée en fonction de la pression intermédiaire..... | 61 |

Liste des tableaux

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau IV-1: les différents paramètres de performance du cycle d'oxygène en fonction du taux de compression | 45 |
| Tableau IV-2: les différents paramètres de performance du cycle d'Azote en fonction du taux de compression | 45 |
| Tableau IV-3: les différents paramètres de performance du cycle en fonction du taux de compression..... | 45 |
| Tableau IV-4 : Paramètres de performance en fonction de la température d'entrée du compresseur..... | 48 |
| Tableau IV-5 : Paramètres de performance en fonction de la température d'entrée du compresseur..... | 48 |
| Tableau IV-6: Paramètres de performance en fonction de la température d'entrée du compresseur..... | 48 |
| Tableau IV-7:les différents paramètres de performance en fonction des rapports des débits.. | 53 |
| Tableau IV-8 : les différents paramètres de performance en fonction des rapports des débits | 53 |
| Tableau IV-9: les différents paramètres de performance en fonction de rapport des débits.... | 54 |
| Tableau IV-10 : les paramètres du cycle en fonction de la pression intermédiaire..... | 58 |
| Tableau IV-11 : les paramètres du cycle en fonction de la pression intermédiaire..... | 58 |
| Tableau IV-12 : les paramètres du cycle en fonction de la pression intermédiaire..... | 59 |

Introduction générale

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

Les études des basses températures sont réalisées dans le but de comprendre les phénomènes physiques qui se manifestent au sein de la matière, conduisant au développement de nombreux procédés comme : la conservation des aliments à l'aide de l'azote liquide, la supraconductivité, la superfluidité, le cryobroyage, givrage ou condensation cryogénique et récupération de plus de 90% des gaz destructeurs de la couche d'ozone [1].

Le monde actuel connaît depuis plus d'un siècle un important développement économique. La multiplication de denrées alimentaires, le développement chimique et pharmaceutique, la commercialisation des gaz liquéfiés et la climatisation ont provoqué une croissance importante de la production du froid glacial [2]. Les développements simultanés de la technologie et de la physique aux basses températures sont intimement liés à la course à la liquéfaction des gaz appelés gaz permanents, tel que : l'hélium ($TL_{He} = -269^\circ C$), l'hydrogène ($TL_{H_2} = -253^\circ C$), l'azote ($TL_{N_2} = -196^\circ C$), l'argon ($TL_{Ar} = -187^\circ C$), l'oxygène ($TL_{O_2} = -183^\circ C$) et le GNL ($TL_{GN} = -161^\circ C$) [3].

On distingue par les gaz industriels les gaz présents dans l'air : oxygène, azote, argon, xénon, néon, krypton, dioxyde de carbone, hélium ainsi que l'acétylène, l'hydrogène et les mélanges de ces gaz. Ces derniers sont produits à grande échelle industrielle et deviennent essentiels dans beaucoup de procédés dans la fabrication des produits de la vie quotidienne. De large quantité de produits de l'air avec une grande pureté sont employées dans plusieurs industries comme les produits de raffinage, produits chimiques et les semi-conducteurs et aussi dans l'aéronautique, traitement de produits alimentaires, ainsi que l'industrie médicale.

Dans la composition de l'air, l'oxygène et l'azote sont parmi les gaz qui prédominent vue à leur diversité des domaines d'applications, notre présente étude est concentrée sur l'analyse thermodynamique de différents cycles de Linde pour l'obtention de ces liquides cryogéniques. La question repose sur la pénalité d'efficacité de ces installations que l'on doit subir pour avoir une grande quantité de gaz liquéfié consommant le minimum d'énergie [4].

Introduction générale

Dans notre présente étude nous allons traiter la liquéfaction des gaz, l'objectif de cette étude coïncide parfaitement avec la recherche des paramètres appliqués sur les cycles de Linde. L'un des problèmes majeurs rencontrés dans les systèmes de liquéfaction des gaz, réside dans l'énergie dépensée durant cette opération. Il devient impératif d'analyser s'il existe un potentiel de diminution des coûts d'investissement et d'exploitation. Il existe cependant des questions sur la pénalité d'efficacité des installations qu'on doit subir en manipulant certains paramètres pour conserver une meilleure efficacité énergétique et d'en améliorer les performances de ces cycles thermodynamique dont le but d'avoir un maximum de gaz liquéfié en fournissant un minimum d'énergie (travail dépensé).

Un bref aperçu sur notre travail, on a entamé quatre chapitres. Le premier chapitre est consacré pour les notions sur la cryogénie et leurs utilisations.

Le deuxième est une étude bibliographique sur les techniques de production des basses températures et les différents cycles de liquéfaction des gaz.

La troisième parties est une étude thermodynamique et énergétique sur les cycles de liquéfaction de Linde et l'influence de différents paramètres sur le rendement du cycle.

Et le quatrième chapitre est consacré à un calcul thermodynamique pour les différents paramètres de performance des cycles de Linde.

Chapitre I

Notion sur la cryogénie

I.1 Introduction

Le mot cryogénie signifie la production du froid glacial, mais aujourd'hui, il est synonyme de basses températures. Sur l'échelle de température, il n'y a pas de distinction claire lorsque la plage de réfrigération ordinaire se termine et que la cryogénie commence. Cependant, le National Bureau of Standards de Boulder (Colorado) considère que la température est inférieure à 123K en tant que température de fonctionnement cryogénique. Cela peut être accepté car la température d'ébullition des gaz permanents comme l'hélium (He), l'hydrogène (H), le néon (Ne), etc. sont inférieures à 123K. L'ingénierie cryogénique traite le développement et l'amélioration des techniques, procédés et équipements à basse température. Il traite l'utilisation des phénomènes à basse température. En général, le système cryogénique se réfère à un groupe de composants interagissant impliquant une température basse. [5]

Le cryogénique à son origine dans la langue grecque où « cryos » signifie « froid » et « gen » est une racine commune que le verbe anglais génère. Cependant, le terme est utilisé aujourd'hui comme synonyme pour la production du froid glacial qu'a donné naissance à une technologie permettant de produire un environnement à basse température.

La cryogénie est définie comme cette branche de la physique qui traite de la production des basses températures et de leurs effets sur la matière d'une formulation qui aborde à la fois les objectifs pour atteindre ces basses températures qui n'existent pas naturellement sur terre et de manière plus opérationnelle. [6]

I.2 historique de la cryogénie

Avoir de très basses températures, c'était l'objectif d'un grand nombre de chercheurs et de physiciens. Jusqu'en 1870, aucun développement significatif n'a été fait dans le domaine de la cryogénie. C'était en 1877 quand Louis Paul Cailletet, un ingénieur minier français a produit des brouillards de gouttelettes d'oxygène liquide, mais il a rencontré des problèmes de stockage de ces gaz liquéfiés. En avril 1883, Walery Wroblewski et Olszewski obtinrent de l'azote liquéfié et de l'oxygène au laboratoire de l'université de Cracovie en Pologne.

En 1892, James Dewar a développé un récipient isolé sous vide pour le stockage de fluide cryogénique et il a résolu le problème de stockage des gaz liquéfiés en créant le premier cryostat, puis il a liquéfié l'hydrogène. En 1907, Linde a installé la première usine de liquéfaction d'air en Amérique. En 1908, Heike Kamerlingh Onnes a liquéfié l'hélium dans le cadre de ces travaux sur la supraconductivité. En 1916, la première production d'argon a été faite. En 1917 et 1922, la première production commerciale d'hélium et de néon a été faite

Notions sur la cryogénie

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 $H_{e3} - H_{e4}$ a été développé. En 1975, la température de transition super élevée record (23K) a été atteinte pour la première fois [7].

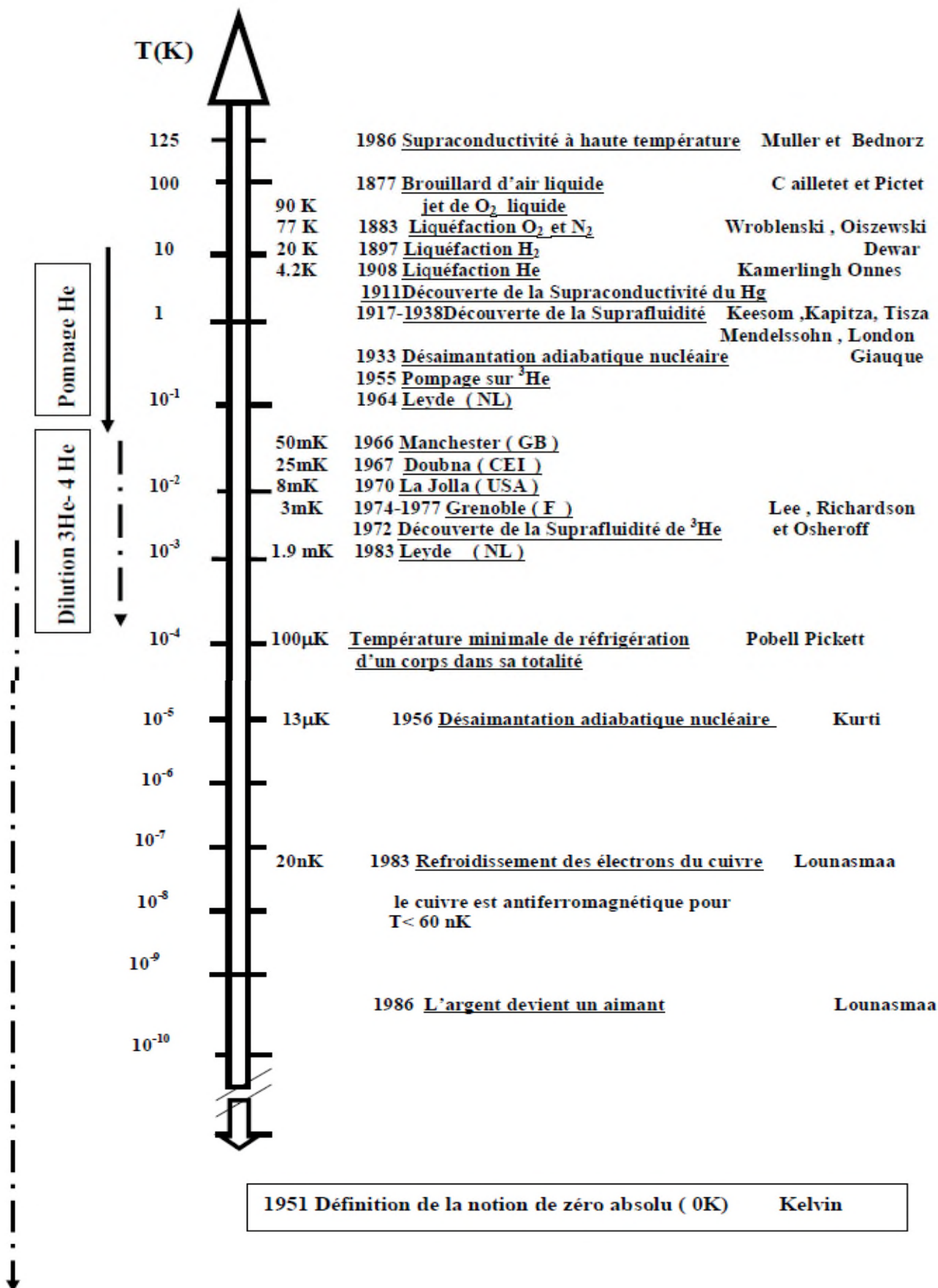


Figure I-1 : Différentes étapes vers les basses températures et leurs acteurs [8]

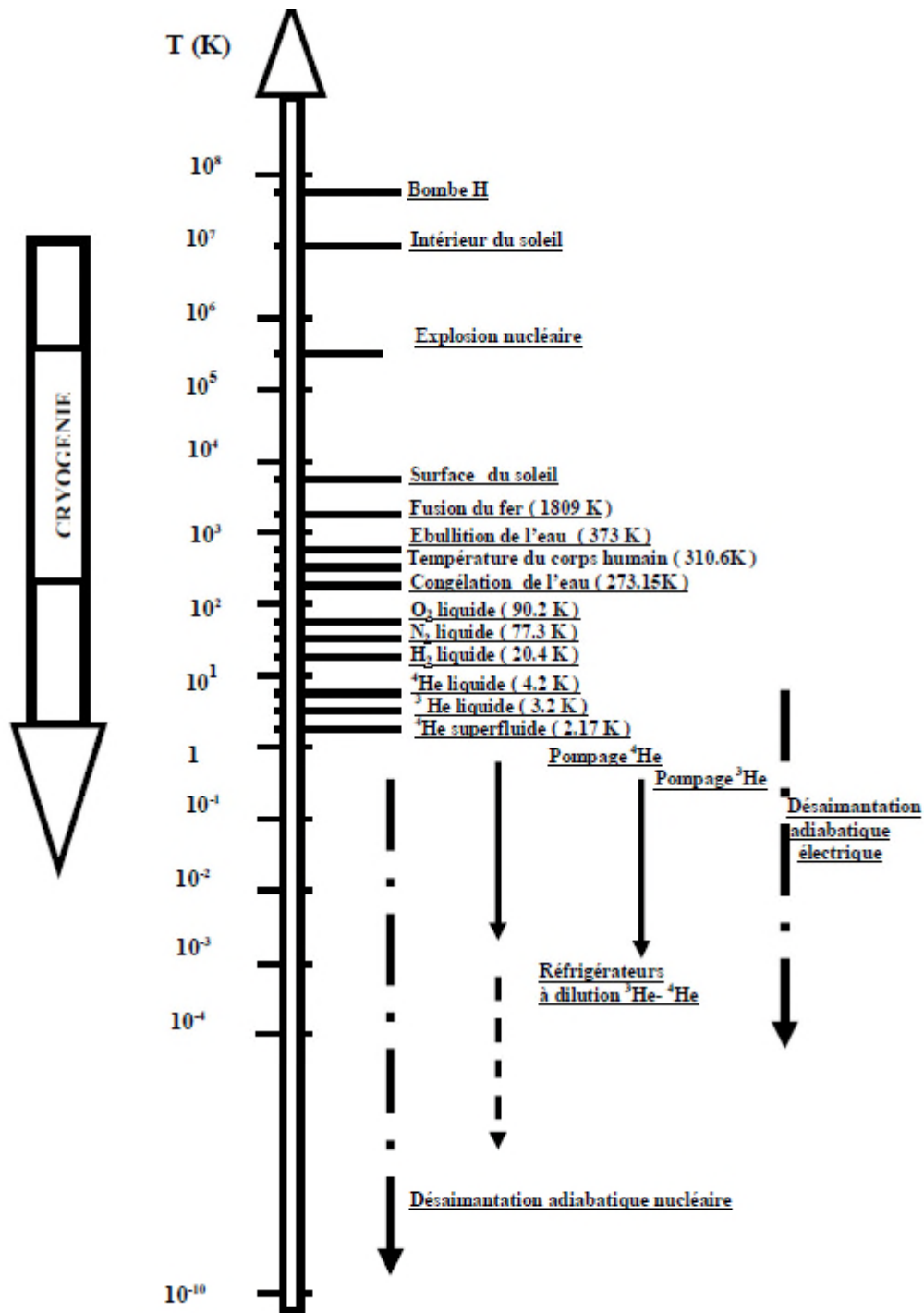


Figure I-2 : Echelle de températures thermodynamique [8]

I.3 Propriétés physiques aux basses températures

I.3.1 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. Au vue 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 [8].

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.

I.3.2 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 :

I-3.2.1 Propriétés thermiques

Les propriétés thermiques sont associées aux vibrations des atomes autour de leur position d'équilibre, aux mouvements des électrons, etc. l'amplitude des vibrations diminue avec la température, d'autres effets peuvent aussi contribuer aux propriétés thermiques comme les caractéristiques magnétiques, état supraconducteur, etc. Parmi ces propriétés thermiques, on définit la capacité thermique massique, la conductivité thermique et la dilatation thermique.

I.3.2.2 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 températures des différents matériaux et alliages dépend de leur structure cristalline. Parmi les systèmes cubiques à face centrées (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 ...[9]

I.4 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 terme de durabilité.[10]

I.4.1 Isolation des vases de stockage

L'isolation thermique des vases ou réservoirs de stockage est d'autant plus important 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.

I.4.2 Différents types d'isolant

- **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 polyuréthaniques, de résines polyvinylées, de polyuréthane ; les mousses de verre sont aussi fréquemment rencontrées.

- **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 ont pratiquement toujours été maintenues sous une pression comprise entre 0,1 et 10 Pa selon la granulométrie. On peut citer quelques types de poudre tels que : la perlite, l'aluminium, le carbone, le silicate de calcium, la silice et le dioxyde de titane.

- **Super isolants**

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. Les intercalaires sont toujours constitués de matériaux peu

conducteurs tels que films plastiques, matelas de fibres de verre (ou autres produits fibreux) ou papier.

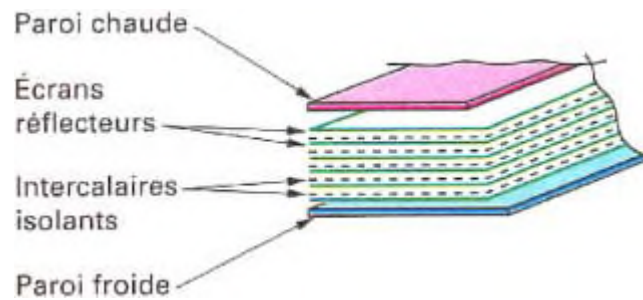


Figure I-3 : Schéma d'un super-isolant [10]

I.4.3 Lignes de transfert

Lignes de transfert, sont un élément essentiel dans la distribution des fluides cryogéniques. Elles existent sous forme rigide ou souple.

- **Divers types d'isolation des lignes**

La qualité de l'isolant utilisé est essentielle dans la performance de la ligne, les différents types sont : Mousse de polyuréthane, Perlite sous vide, Alumine sous vide, lignes super isolées.

- **Jonction entre tronçons de lignes de transfert**

Seule la ligne polyuréthane peut être conçue en un seul tronçon à condition de prévoir des lyes de dilatation suffisantes. Tous les autres types de lignes fabriquées en atelier sont livrés en tronçons de quelques mètres (6 à 10 m selon le cas). Pour ces lignes, il est nécessaire de joindre les tronçons sans créer de fuites thermiques importantes.

I.4.4 Cryostats

Les réservoirs cryogéniques destinés à conserver les fluides cryogéniques sont appelés quelquefois cryostat ; un système à double paroi dont entre elle est réalisé un vide d'isolement thermique poussé à environ (10^{-4} Pa). Un cryostat abrite un ensemble opérationnel autonome qui doit être maintenu à basse température.

Un cryostat rassemble en général un réservoir de stockage de fluides cryogéniques et un dispositif expérimental. Il peut aussi comprendre un ou plusieurs systèmes de réfrigération – liquéfaction (appareil à dilution). Les cryostats réalisés actuellement sont en général métalliques (acier inoxydable le plus souvent) et dans quelques cas particuliers, on utilise des cryostats en verre.

I.5 Domaine d'utilisation de la cryogénie

De très nombreuses branches d'activité scientifiques et technique utilisent actuellement la cryogénie de manière plus opérationnelle.

- les sciences physique étudient des phénomènes spécifiques des basses températures ou qui exigent d'y travailler : supraconductivité, physique nucléaire magnétisme, technique des gyroscopes de haute précision, électronique appliquée, etc.

-l'industrie chimique fait un usage croissant de l'oxygène pour les réactions et surtout de l'azote pour l'inertage des atmosphères .la production en quantité massive de l'éthylène ne peut se faire qu'à l'aide des basses températures pour sa séparation et sa purification finale.

-la biologie utilise le froid pour conserver divers produits (par lyophilisation), pour la préparation de produits pharmaceutiques et pour nombreuses autres opérations.

-la médecine et la chirurgie emploient depuis longtemps des produits de base préparés grâce à la cryogénie : oxygène, protoxyde d'azote, plasma sanguin, etc.

-les liquides cryogéniques usuels tels que l'oxygène et l'azote et les gaz rares de l'air sont employés en quantités massives dans la sidérurgie et la métallurgie (notamment argon/hélium pour la soudure).

-quant aux industries spatiales, on sait que l'oxygène, l'azote et l'hélium liquide sont à la base même de leur existence. L'oxygène et l'hydrogène liquide assurent la propulsion des fusées, l'azote et l'hélium sont indispensables pour assurer l'inertage, et le bon fonctionnement notamment des pompes d'alimentation à grand débit des moteurs de fusées.

L'utilisation du froid pour le traitement, la production ou la transformation des gaz constitue donc actuellement un des fondements essentiels de l'industrie moderne [11].

I.6 Importance et utilisation des gaz liquéfiés

L'obtention et l'utilisation des gaz liquéfiés, permettent:

- **Obtention des gaz purs**

Le processus de la liquéfaction assure que le produit liquéfié est pur et, en conséquence, n'a pas besoin d'être purifié d'avantage par la suite. Parmi les particularités de ces gaz réside dans leur évaporation et condensation à pression et à température constantes.

- **Facilité et économie du transport**

On liquéfie les gaz pour pouvoir réduire leur volume et ainsi que pouvoir les transporter par bateaux sur de très grandes distances ou à travers des mers profondes (lorsque le transport par gazoduc n'est pas économique)

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

Au point d'arrivée, les gaz sont regazéifiés pour être distribués à la consommation. Le gaz naturel, par exemple, est regazéifié puis distribué par canalisations. L'oxygène et l'azote arrivent à l'état liquide aux centres de conditionnement où ils sont regazéifiés et mis en bouteilles pour la distribution à courte distance.[12]

- **Usage des basses températures**

Sous certaines conditions, la plupart des gaz ont des températures de condensation inférieures à la température ambiante et même inférieure à 0°. Les gaz liquéfiés peuvent donc se trouver 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 et dans les laboratoires de recherche où on a besoin d'effectuer des opérations et des expériences diverses à très basse température.

Chapitre II :
Les cycles de liquéfaction

II.1 Définition de la réfrigération et la liquéfaction :

II.1.1 Définition de la réfrigération :

Toute transformation endothermique telle que la vaporisation d'un liquide, la détente d'un gaz, la fusion et sublimation d'un solide peut constituer un procédé capable de produire du froid. La réfrigération c'est le terme générique pour désigner l'ensemble des procédés permettant d'obtenir et de maintenir un système (local, produit, etc.) à une température inférieure à celle de l'environnement.

Le principe repose sur l'évacuation à une température froide T_F d'une quantité de chaleur Q_F . Cette opération nécessite la fourniture d'un travail W à un fluide frigorigène évoluant suivant un cycle au cours duquel la charge thermique Q_F est évacuée à T_F et une quantité de chaleur ($Q_C = W + Q_F$) est rejetée à une source chaude, le coût de cette opération est mesuré par un paramètre appelé coefficient de performance ($COP = Q_F/W$). [11]

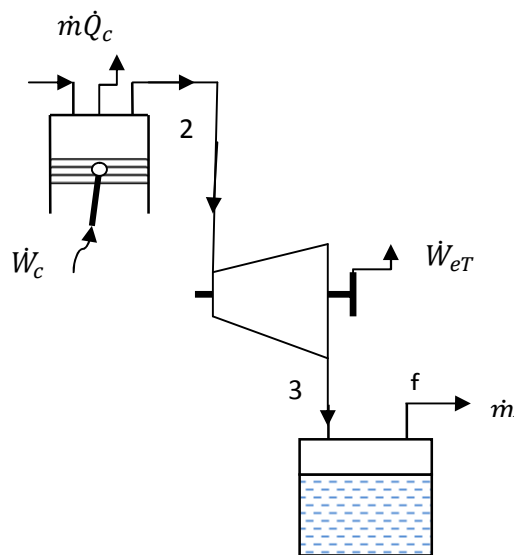


Figure II.1 : Schéma d'une machine de liquéfaction

III.1.2 Définition de la liquéfaction

La liquéfaction est un phénomène de condensation qui peut se produire par compression ou refroidissement d'un gaz, il consiste à lui retirer de l'énergie afin de le refroidir depuis la température ambiante jusqu'à son point de rosée, puis à condenser la vapeur saturée. La première industrialisation de ce procédé est due à **Carl Van Linde**. La condition essentielle pour liquéfier un gaz quelconque consiste à abaisser sa température au-dessous de la

Les cycles de liquéfaction

température critique qui lui est propre. Tant que cette condition n'est pas réalisée, aucune pression si grande soit-elle, ne peut amener la liquéfaction.

La liquéfaction d'un gaz permet de l'emmagasiner, de le transporter...l'opération la plus simple à réaliser pour liquéfier un gaz est la compression isotherme. Cette opération ne peut être réalisée que si la température initiale du gaz est inférieure à la température critique. [11]

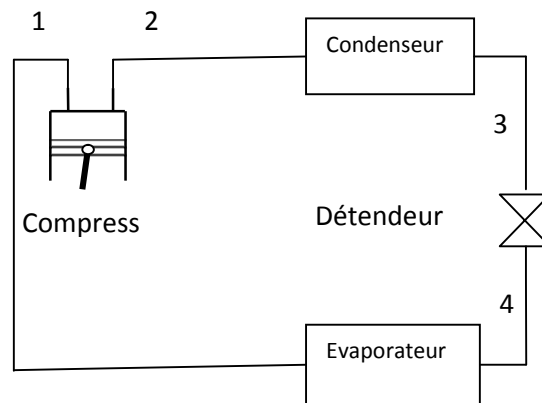


Figure II.1 : Schéma d'une machine de réfrigération

II.2 Propriétés de l'air

II.2.1 Composition de l'air

L'air est un mélange des gaz, constitue principalement d'environ (78%) d'azote, (21%) d'oxygène et de gaz inerte l'argon (0,9%), le reste (0,1%) se compose la plus part du temps de l'anhydride carbonique (CO_2) et d'autres gaz inertes comme le néon, hélium, krypton et le xénon. L'air sec avec ces constituants primaires est relativement uniforme est relativement uniforme (aucune variation ou fluctuation) avec des propriétés ramenées à une moyenne des propriétés de ces différents composants. L'air ambiant, peut avoir la teneur en eau jusqu'à d'environ 5% (par volume) et peut contenir un certain nombre d'autres gaz, habituellement des traces qui seront enlevées dans la séparation d'air et dans les systèmes de purification des produits.

Les cycles de liquéfaction

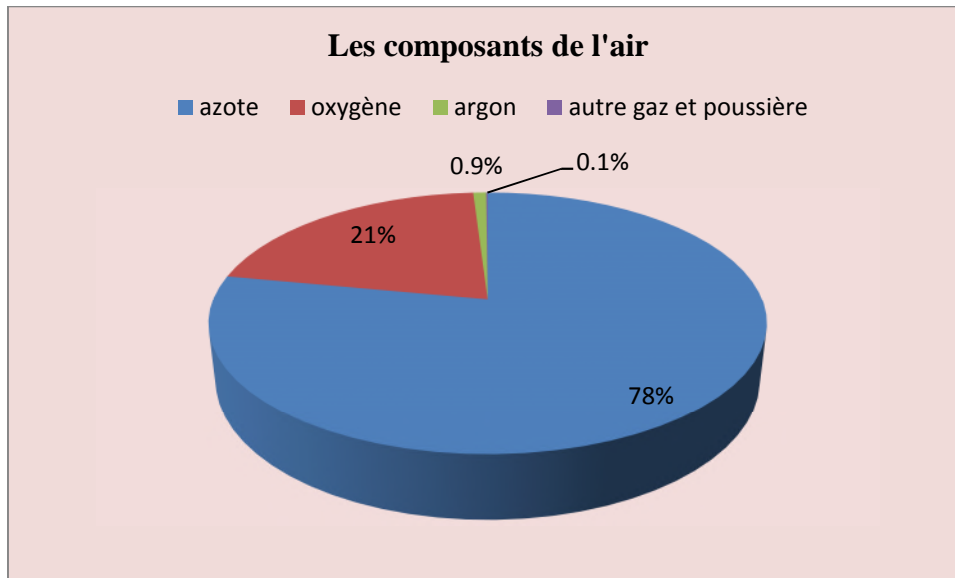


Figure II-2 : Composition de l'air [12]

Ces constituants primaires de l'air appelés « gaz industriels » font partie de notre vie quotidienne et concernent une variété d'application industrielle.

Tout a commencé avec l'électrolyse de l'eau afin d'en extraire l'oxygène pour une utilisation médicale et alors la première clientèle était donc constituée de pharmaciens et cela s'est passé dans les années 1890. Peu de temps après 1895, deux méthodes développées en parallèle par CARLVAN LINDE et GEORGES CLAUDE, ils ont abouti à la production industrielle d'air liquide puis des gaz qui le constitue (d'azote et d'oxygène...). [12].

En plus des constituants déjà cités, l'air se compose de différents impuretés et contaminants tel que :

- **Vapeur d'eau**

Qui se trouve à une teneur variable suivant les conditions météorologiques, sous plusieurs formes ; vapeur, gouttelettes en suspension et aussi sous forme de particules de glace.

- **Polluants**

Tels que les hydrocarbures (méthane, éthane, éthylène, propane...)

- **Gaz acides**

Tels que : H_2 , S_2 , SO_2 , HCl , SO_3 , CO_2 ...qui sont des agents corrosifs.

- **Bactéries et poussières.**

II.2.2 Points d'ébullition des composants de l'air

La figure ci-dessous montre les points d'ébullition des composants de l'air, sachant qu'ils sont mesurés à la pression atmosphérique.

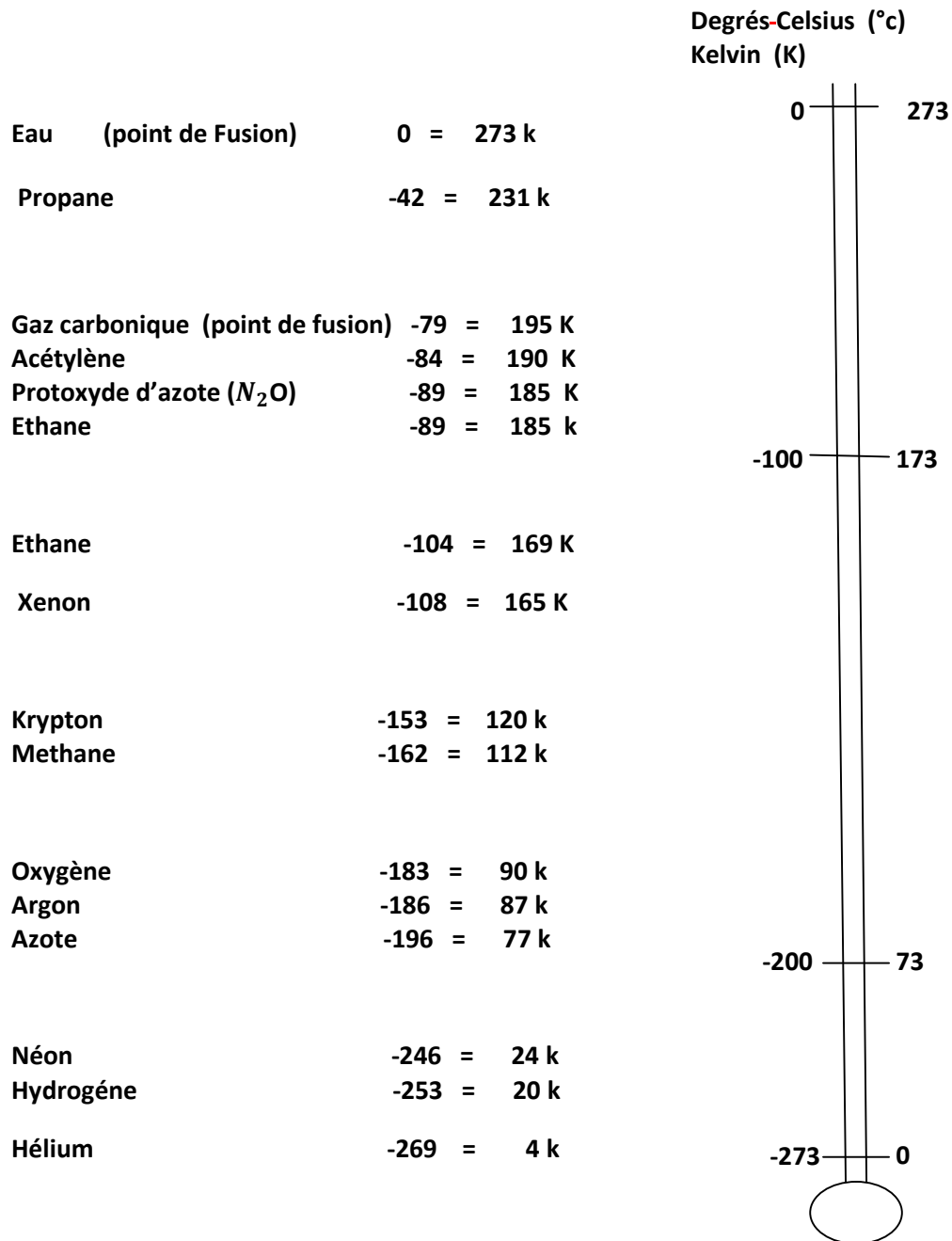


Figure II-3 : Points d'ébullition des composants de l'air [12]

II.3 Comment réaliser la liquéfaction des gaz

D'une manière générale, la matière se présente sous trois états ; liquide, solide et gazeux. La distinction entre ces états étant basée sur :

- La distance entre les particules (atomes, molécules, ions) qui constitue la matière.
- L'agitation de ces particules.

Les particules à l'état gazeux sont très éloignées les unes par rapport aux autres avec une agitation rapide et désordonnée. On observe également de nombreux chocs entre elles.

Pour l'état liquide, les particules sont beaucoup plus rapprochées entre elles, elles se déplacent à faible vitesse donnant lieu à des associations temporaires (liaisons faibles).

A l'état solide, les particules sont empilées dans un ordre régulier, elles sont très rapprochées les unes aux autres.

Sur ces bases, on peut constater que le passage de l'état gazeux à un état liquide, pourra s'effectuer par la diminution de la distance entre les particules (rapprochement) et par le ralentissement du déplacement de ces particules et on peut réaliser cela :

- **Par la compression**

L'augmentation de la pression exercée sur le gaz entraîne la diminution de son volume et engendre le rapprochement de ses particules entre elles. Cependant, l'agitation des particules demeure importante et la température s'élève à cause des chocs. Il faudra donc abaisser la température.

- **Par l'abaissement de la température**

La diminution de la température extrait de l'énergie calorifique du milieu et ainsi de l'énergie cinétique des particules, ce qui donne un déplacement moins vite de celles-ci. Le rapprochement conjugué au ralentissement permet l'établissement de liaisons entre les particules, ce qui provoque la formation du liquide. Et d'après ce qui précède, on voit qu'un gaz peut être liquéfié si on comprime tout en abaissant sa température.

II.4 Différents types de systèmes de liquéfaction

L'opération la plus simple à réaliser pour liquéfier un gaz est la compression isotherme cette opération ne peut être réalisée que si la température initiale est inférieure à la température critique, pour les gaz dont la température critique est inférieure à la température ambiante, les

Les cycles de liquéfaction

procèdes thermodynamique de liquéfaction utilisent des cycles à détente .on peut distinguer trois grandes familles de procèdes thermodynamique.

- ❖ 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)

II.4.1 Procédé à détente isenthalpique de Joule-Thomson

La détente d'un gaz sous pression au travers d'un orifice ou d'une vanne, sans échange de travail ni de chaleur avec le milieu extérieur est un processus à enthalpie constante ($dh=0$) représenté sur le diagramme (T-S) par une évolution intermédiaire entre l'isotherme et l'isotrope. Si la détente s'effectue au-dessous de la température d'inversion, cette dernière s'accompagne d'un refroidissement du gaz.

II.4.1.1 Rappel sur l'effet de Joule-Thomson

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

Pour comprendre cet effet, il faut tenir compte du comportement non idéal des gaz en introduisant des paramètres comme les interactions intermoléculaires et le volume des particules. Ce non idéalité se traduit par un coefficient Joule-Thomson propre à chaque gaz.[13]

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

Les cycles de liquéfaction

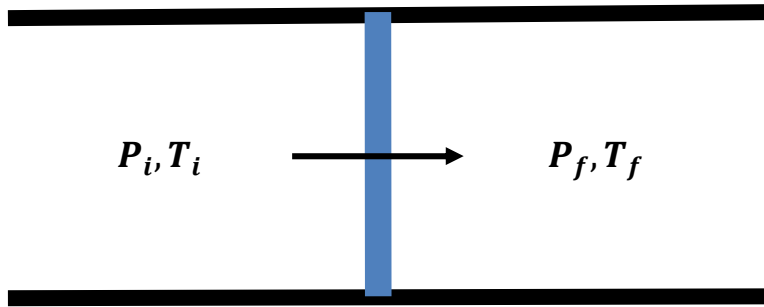


Figure II-4 : détente de Joule-Thomson [13]

Dans cette expérience schématisée à la figure II-4, un gaz subit une détente à travers un disque poreux et passe d'une pression et d'une température initiale (P_i, T_i) à une pression et température finale (P_f, T_f) . 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 :

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

$$H_f = H_i$$

Les cycles de liquéfaction

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 :

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T dP + \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P dT &= 0 \\ \Rightarrow \left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T dP &= - \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P dT \\ \Rightarrow \left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T &= - \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_H \\ \Rightarrow \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_H &= - \left[\frac{(\partial H / \partial P)_T}{(\partial H / \partial T)_P} \right] \end{aligned}$$

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

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

Appelé coefficient de Joule-Thomson.

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

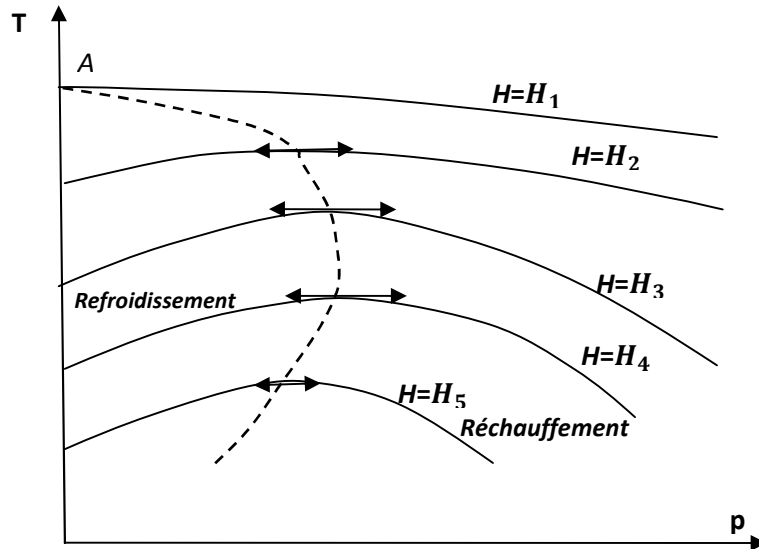


Figure II-5 : Les lignes isenthalpiques et les points d'inversion dans le diagramme (T-P) [13]

Les courbes $T=f(P)$ passent par un maximum nommé point d'inversion. Et la courbe en pointille réunissant les points de pente est appelée la courbe d'inversion, elle est donc donnée

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

A partir de la figure (II-5), nous constatons que :

$$\begin{cases} \mu_{J-T} < 0. \text{ Détente avec augmentation de la température } (T_2 > T_1) \\ \mu_{J-T} = 0. \text{ Détentesansvariationdetempérature } (T_2 = T_1) \\ \mu_{J-T} > 0. \text{ Détente avec diminution de la température } (T_2 < T_1) \end{cases}$$

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

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

II.4.1.2 Cycle de Linde pour la liquéfaction

Le système Linde-Hampson a été le deuxième système utilisé pour la liquéfaction des gaz (le système en cascade était le premier), bien qu'il soit le plus simple de tous les systèmes de liquéfaction illustrés à la figure (II-6).

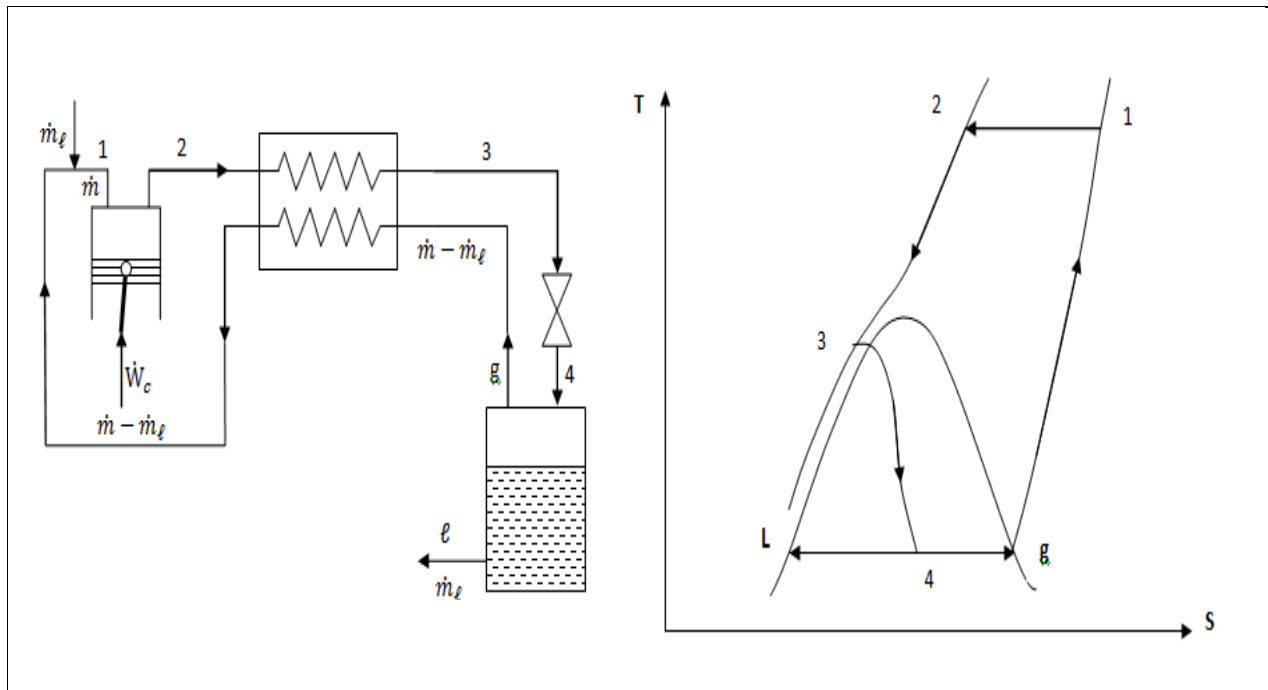


Figure II-6 : Système de liquéfaction Linde-Hampson et son diagramme T-S [13]

La différence entre les cycles de réfrigération réside dans le dispositif de détente. Cela peut être un moteur à expansion tel qu'une turbine ou un moteur à expansion à mouvement alternatif ou une vanne d'étranglement. Le moteur de détente se rapproche d'un processus isentropique et la vanne d'un processus isenthalpique. L'expansion isentropique implique un processus réversible adiabatique tandis que les expansions isenthalpiques sont irréversibles.[13]

- **Principe de fonctionnement**

Le gaz pénètre dans le compresseur sous des conditions ambiantes, ce qui entraîne l'augmentation de sa température. Cette chaleur est par la suite évacuée dans un appareil de refroidissement jusqu'à l'atteinte de la température ambiante ; le gaz subit une compression isotherme réversible. Ensuite, il passe dans un échangeur de chaleur à contre-courant où sa température diminue en dessous de la température d'inversion du fluide de travail. Le gaz se détend isenthalpiquement à travers la vanne J-T, de sorte qu'il diminue constamment jusqu'à qu'elle atteigne la température critique correspondant à la même pression d'entrée du compresseur. Et en fin, le liquide commence à s'accumuler dans la chambre.

II.4.2 Procédé à détente isentropique

II.4.2.1 Rappel

Une autre méthode thermodynamique plus efficace pour refroidir un système qui consiste à faire en sorte que le fluide se dilate. S'elle est faite avec soin, ce type d'expansion peut être presque adiabatique et réversible en se rapprochant d'un processus isentropique ($\Delta S = 0$). Donc l'expansion par l'exécution du travail est une bonne méthode conduisant à la production des basses températures et cela par la détente du gaz à travers une machine d'expansion.

Pour déterminer l'efficacité d'un processus d'expansion pour la production du froid, il est utile de définir un paramètre similaire au coefficient de Joule-Thomson. Ce paramètre appelé coefficient de dilatation isentropique qui représente la pente d'une ligne à entropie constante dans un diagramme (P-T).

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

La détente isentropique, pour une même température de départ et entre deux pressions données, elle provoque un abaissement de température plus important que la détente isenthalpique. Elle est donc plus intéressante, mais elle admet la présence de liquide dans les machines de détente, ce qui n'est pas possible d'un point de vu technologique.[13]

II.4.2.2 Cycle de Brayton inverse

Dans le cycle de Linde, le refroidissement isenthalpique est obtenu au Cours d'une détente sans production de travail. On peut imaginer de refroidir le gaz en actionnant une turbine qui provoque un refroidissement important du gaz, qui permettra par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur de refroidir le gaz issu de la compression isotherme réversible et elle produit du travail mécanique vers le milieu extérieur.

Si l'on veut se rapprocher d'un cycle idéal (amélioration du rendement), le gaz doit être détendu dans une turbine idéalement réversible.

La substitution de la vanne de laminage par une turbine reviendrait à faire fonctionner la turbine en milieu humide, ce qui est d'un point de vue technologique impossible. Donc, on ne peut utiliser la turbine que dans une zone de température plus élevée (détente sèche). On obtient alors le cycle de Brayton qui fournit du Travail mais ne génère pas de liquide.

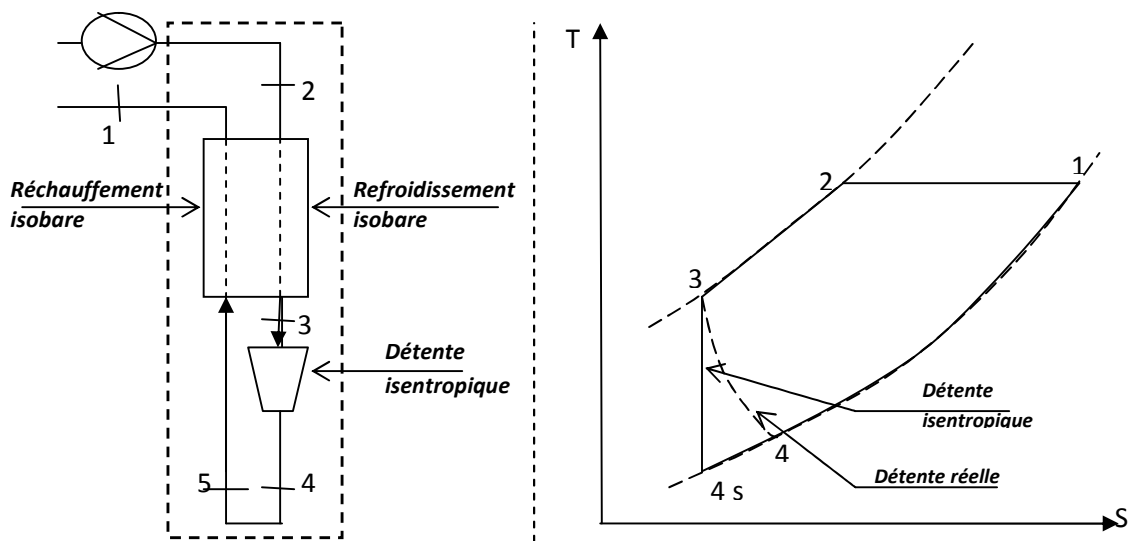


Figure II-7 : Cycle de Brayton inverse et son diagramme (T-S) [13]

II.4.3 Procédé mixte (cycle de Claude)

Claude cherchant à perfectionner le procédé de liquéfaction de l'air imaginé par Carl Von Linde, décida en 1905 de combiner le cycle de Linde et le cycle de Baryton inverse. Le cycle de Claude est l'assemblage d'un cycle de Brayton à un ou plusieurs étages et d'un cycle de Joule Thomson, le cycle de Brayton refroidit le cycle de Joule Thomson. Et il est ainsi possible de liquéfier n'importe quel gaz sans faire appel à un pré-refroidissement extérieur.[13]

Le début du cycle est le même que celui de Linde, compression du gaz à liquéfier, premier refroidissement isobare. Puis, le flux est divisé en deux :

- 15% est détendu dans la turbine.
- 85% du fluide subit un second refroidissement, puis envoyé pour une détente isenthalpique.

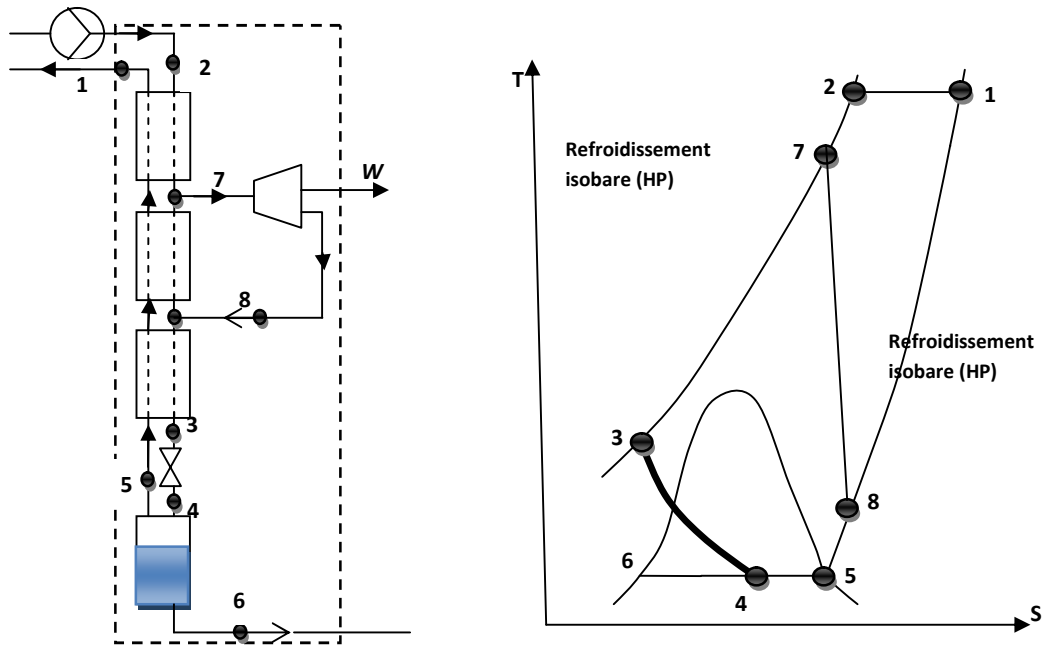


Figure II-8 : Cycle de Claude et son diagramme (T-S) [13]

Dans cette installation, l'objectif de la turbine est de provoquer un refroidissement important du gaz, qui permettra par l'intermédiaire d'un échangeur de refroidir le gaz issu de la compression isotherme (1-2).

II.4.3.1 Fonctionnement

La totalité du gaz issu de la compression, est refroidit dans un premier échangeur. Et puis, le gaz est séparé en deux fractions. Une fraction (x) est envoyée dans la turbine, et en sortie de celle-ci, le gaz refroidit et détendu rejoint l'étage BP de l'échangeur pour refroidir la fraction (1-x) dirigée vers le liquéfacteur.

II.5 Equipements utilisés [9]

II.5.1 Compresseur cryogénique

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

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

Les compresseur alternatifs secs ; sont chers et peu fiables, et les compresseurs lubrifiés ont une grande fiabilité, mais polluent les gaz par l'huile. Le développement des systèmes de

séparation d'huile a permis d'utiliser le compresseur à vis lubrifié, dans lequel la grande quantité d'huile injectée permet d'obtenir une compression isotherme.

II.5.2 Echangeurs de chaleurs

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

II.5.3 Régénérateurs

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

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

II.5.4 Détendeurs cryogéniques

- **Détendeur alternatif**

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

- **Les turbines à paliers à gaz hydrostatique ou hydrodynamique**

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

Les cycles de liquéfaction

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

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

II.5.5 Autre composants

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

-Les vannes cryogéniques.

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

Chapitre III :
Résultats et discussion

III.1 Rappel thermodynamique :

III.1.1 Premier principe de la thermodynamique appliqué pour un système ouvert :

La variation d'énergie totale d'un système ouvert résulte dans les échanges d'énergie (sous forme du travail et chaleur) avec le milieu extérieur [14].

$$\Delta E_T = \Delta U + \Delta E_C + \Delta E_P = Q + W + \Delta U_{ij} + \Delta E_{Cij} + \Delta E_{Pij} + \Delta W_{tij} \quad (\text{III} - 1)$$

$$\text{Énergie interne : } \Delta U_{ij} = \sum_i U_i - \sum_j U_j \quad (\text{III} - 2)$$

$$\text{Énergie cinétique : } \Delta E_{Cij} = \sum_i \frac{1}{2} m_i C_i^2 - \sum_j \frac{1}{2} m_j C_j^2 \quad (\text{III} - 3)$$

$$\text{Énergie potentielle : } \Delta E_{Pij} = \sum_i m_i g z_i - \sum_j m_j g z_j \quad (\text{III} - 4)$$

$$\text{Travail des forces de pressions : } \Delta W_{tij} = \sum_i P_i V_i - \sum_j P_j V_j \quad (\text{III} - 5)$$

III.1.2 Application du premier principe de la thermodynamique pour un système ouvert en régime permanent :

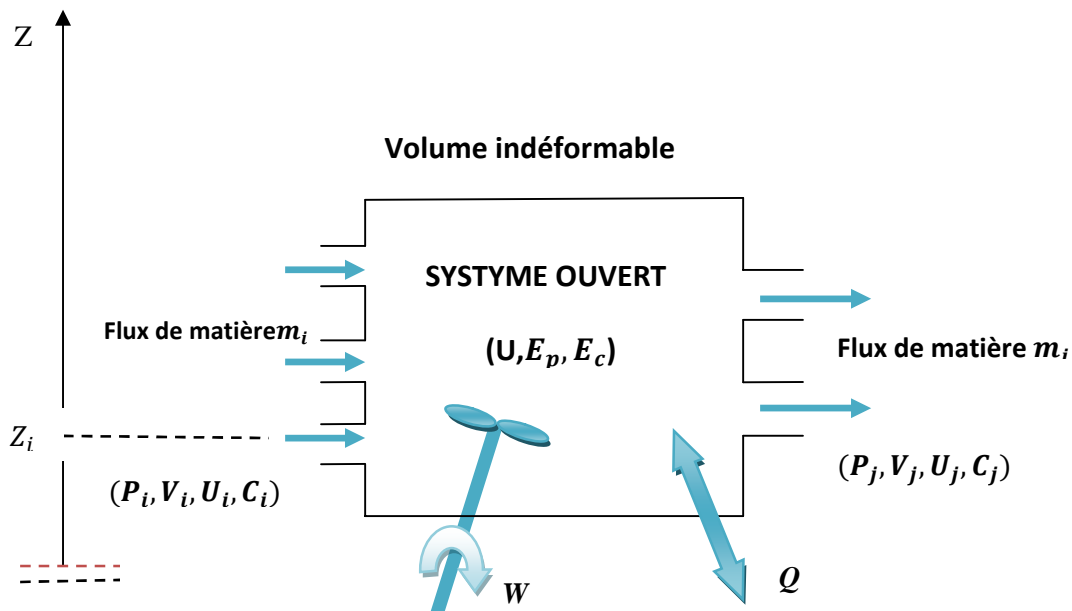


Figure III-1 : Système ouvert à plusieurs entrées (i) et sorties (j) [14]

$$\Delta E_T = \Delta U + \Delta E_C + \Delta E_P = Q + W + \Delta U_{ij} + \Delta E_{C_{ij}} + \Delta E_{P_{ij}} + \Delta W_{t_{ij}}$$

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

Si on introduit le terme de l'enthalpie, qui est défini comme étant : « c'est une mesure thermodynamique de la variation de quantité de chaleur contenue dans un système physique ou chimique. » tel que :

$$H = U + PV \quad \text{(III - 7)}$$

$$\Delta E_T = Q + W + \sum_i (H_i + \frac{1}{2} m_i C_i^2 + m_i g z_i) - \sum_j (H_j + \frac{1}{2} m_j C_j^2 + m_j g z_j) \quad \text{(III - 8)}$$

De plus, si on note par:

$$h_T = h + C^2 + gZ \quad \text{(III - 9)}$$

Qui définit l'enthalpie totale par unité de masse.

$$\Delta E_T = Q + W_t + \sum_i m_i (h_T)_i - \sum_j m_j (h_T)_j \quad \text{(III - 10)}$$

En divisant l'équation (III-10) sur 'dt' on aura :

$$\frac{dE_T}{dt} = \dot{E}_T = \dot{Q} + \dot{W} + \sum_i \dot{m}_i (h_T)_i - \sum_j \dot{m}_j (h_T)_j \quad \text{(III - 11)}$$

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

\dot{Q} : Puissance thermique échangée avec le milieu extérieur.

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

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

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

On aura donc :

$$\dot{W} + \dot{Q} = \dot{m}(h_{T_s} - h_{T_e}) = \dot{m} \Delta h_T \quad \text{(III - 12)}$$

III-1-3 Application pour quelques machines en régime permanent :

- Compresseur :

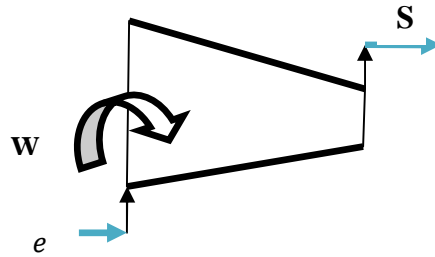


Figure III-2 : Schéma représentatif d'un compresseur

En appliquant le premier principe de la Thermodynamique pour ce système ouvert, on aura :

$$\frac{dE_T}{dt} = \dot{E}_T = \dot{\phi} + \dot{W}_c + \sum_i \dot{m}_i (h_T)_i - \sum_j \dot{m}_j (h_T)_j$$

Pour un régime permanent :

$$\frac{dE_T}{dt} = \dot{E}_T = 0$$

Adiabatique : $\dot{\phi} = 0$.

$$\text{On aura donc : } \dot{W} + \sum_i \dot{m}_i (h_T)_i - \sum_j \dot{m}_j (h_T)_j = 0$$

Conservation d'énergie totale d'un système (énergie entrante = énergie sortante) nous conduit :

$$\begin{aligned} \dot{W}_c + \dot{m}h_e &= \dot{m}h_s \\ \Rightarrow \dot{W}_c &= \dot{m}(h_{T_s} - h_{T_e}) \end{aligned}$$

- Turbine :

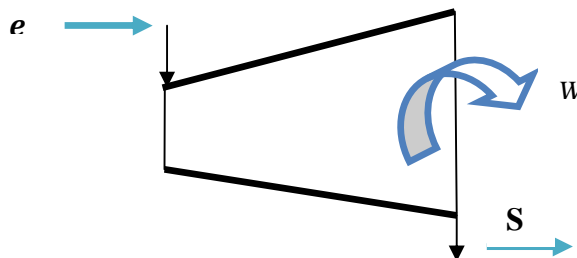


Figure III-3 : Schéma représentatif d'une turbine

$$\frac{dE_T}{dt} = \dot{E}_T = \dot{\phi} + \dot{W}_{eT} = \sum_i \dot{m}_i (h_T)_i - \sum_j \dot{m}_j (h_T)_j$$

$$\text{Régime permanent} \Rightarrow \frac{dE_T}{dt} = \dot{E}_T = 0$$

$$\text{Adiabatique : } \dot{\phi} = 0$$

Sous le principe de conservation de l'énergie totale d'un système :

Energie entrante = énergie sortante.

$$\Rightarrow \dot{m}h_e = \dot{m}h_s + \dot{W}_{eT} \Rightarrow \dot{W}_{eT} = \dot{m} (h_e - h_s)$$

- **Détendeur :**

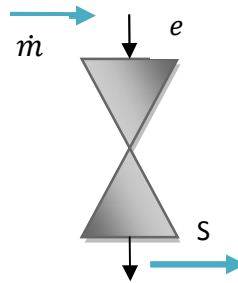


Figure III-4 : Schéma représentatif d'une vanne de détente

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

$$\text{Régime permanent} \Rightarrow \frac{dE_T}{dt} = \dot{E}_T = 0$$

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

Adiabatique : $\dot{\phi} = 0$ et $\dot{W} = 0$: canal fixe.

$$\sum_i \dot{m}_i (h_T)_i - \sum_j \dot{m}_j (h_T)_j = 0$$

Sous le principe de conservation de l'énergie totale d'un système : Energie entrante = énergie sortante.

III.1.4. Bilan énergétique d'un cycle idéal de liquéfaction

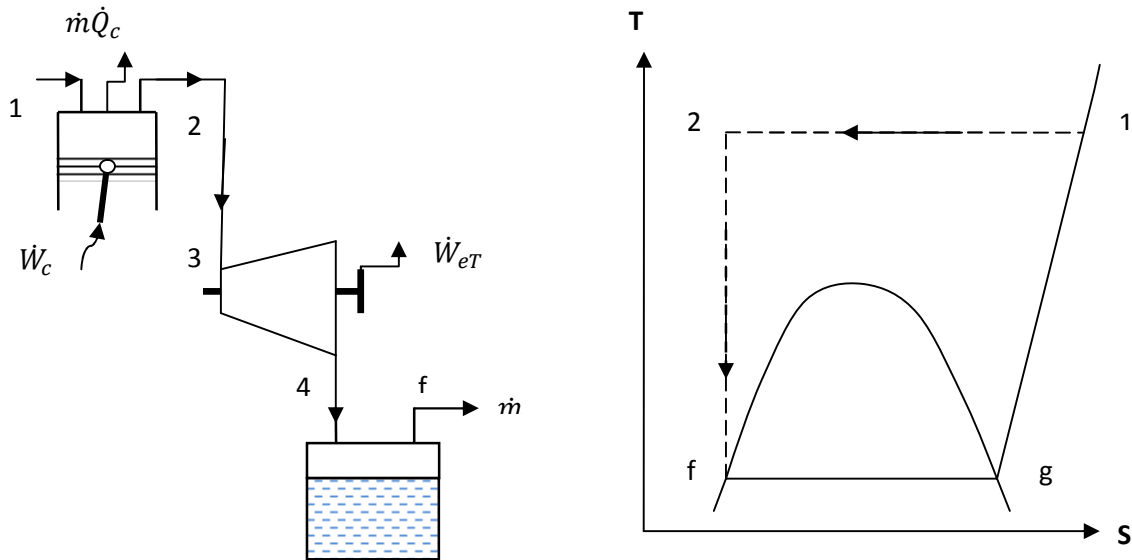


Figure III-5 : Schéma d'une installation idéale et son diagramme (T-S)

- **Principe de fonctionnement**

Le principe de fonctionnement dans ce processus idéal, repose sur deux phases :

- Une compression isotherme réversible (1 → 2).
- Une détente isentropique (2 → f).

tel que le point 2 sera choisi de telle sorte qu'en f le palier de liquéfaction correspondant à la pression la plus basse possible (celle du point 1) soit atteint et le gaz comprimé en (1 → 2) sera totalement liquéfier.

- **Travail par unité de masse de gaz comprimé pour cette installation** $[\dot{W}_{net}/\dot{m}]$

Sachant que, dans le cycle idéal : $\dot{m}_g = \dot{m}_f = \dot{m}$

$$\dot{W}_C = \dot{W}_{C'} - \dot{W}_D$$

\dot{W}_C : puissance fourni pour la compression isotherme réversible.

\dot{W}_D : la puissance consommée par la turbine au cours de la détente du gaz.

$$\dot{W}_C + \dot{Q} = \dot{m}\Delta h = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad \Rightarrow \quad \dot{W}_C = \dot{m}(h_2 - h_1) - \dot{Q}$$

D'après la formule de Gibbs : $\delta Q = TdS + \delta q$

Pour une transformation réversible (sans frottement) :

$$\Rightarrow \delta q = 0. \quad \text{D'où : } \delta Q = TdS$$

Pour une transformation isotherme : $T = \text{cste.} \Rightarrow \int \delta Q = \int T dS$

$$\Rightarrow Q = T \int_{S_1}^{S_2} dS = T[S] \Big|_{S_1}^{S_2} \Rightarrow Q = T(S_2 - S_1)$$

$$\text{On aura donc : } \dot{Q} = \dot{m}[(S_2 - S_1)]$$

$$\dot{W}_C = \dot{m}(h_2 - h_1) - \dot{Q} \Rightarrow \dot{W}_C = \dot{m}(h_2 - h_1) - \dot{m}[(S_2 - S_1)T]$$

$$\dot{W}_C = \dot{m}[(h_2 - h_1) - T(S_2 - S_1)]$$

$$\dot{W}_D = \dot{m}(h_2 - h_1) \text{ Avec : } \dot{W}_{net} = \dot{W}_C - \dot{W}_D$$

$$\dot{W}_C = \dot{m}(h_2 - h_1) - \dot{m}[T(S_2 - S_1)] - \dot{m}(h_2 - h_1)$$

$$\Rightarrow \dot{W}_C = \dot{m}[(h_2 - h_1) - T(S_2 - S_1) - (h_2 - h_1)]$$

$$\text{D'où : } \dot{W}_C = \dot{m}[(h_l - h_1) - T(S_2 - S_1)]$$

$$[\dot{W}_C/\dot{m}] = [(h_l - h_1) - T(S_2 - S_1)]$$

Avec : $S_2 = S_1$. Dans un cycle idéal, on peut écrire : $\frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}} = \frac{\dot{W}_i}{\dot{m}}$

$$\Rightarrow \frac{\dot{W}_i}{\dot{m}} = [(h_l - h_1) - T(S_l - S_1)] \tag{III - 13}$$

III.2 Etude énergétique des cycles de liquéfaction de Linde

III.2.1 Cycle de Linde simple

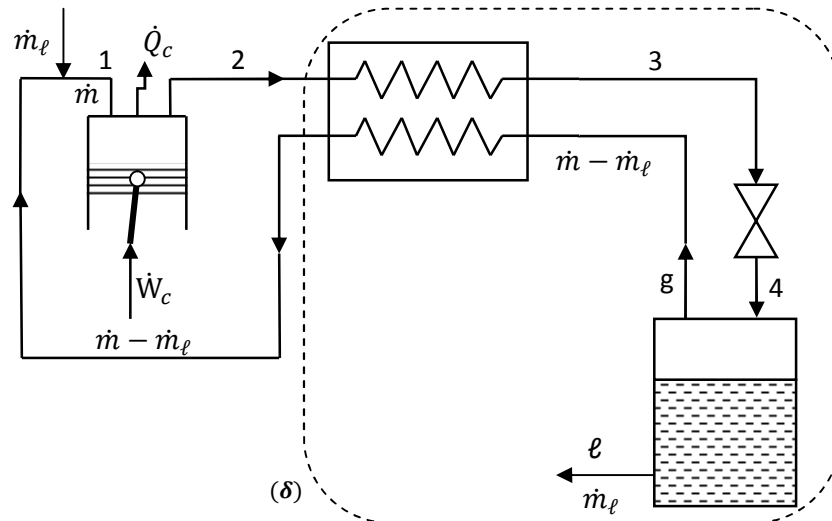


Figure III-6 : Cycle de Linde à détente isenthalpique

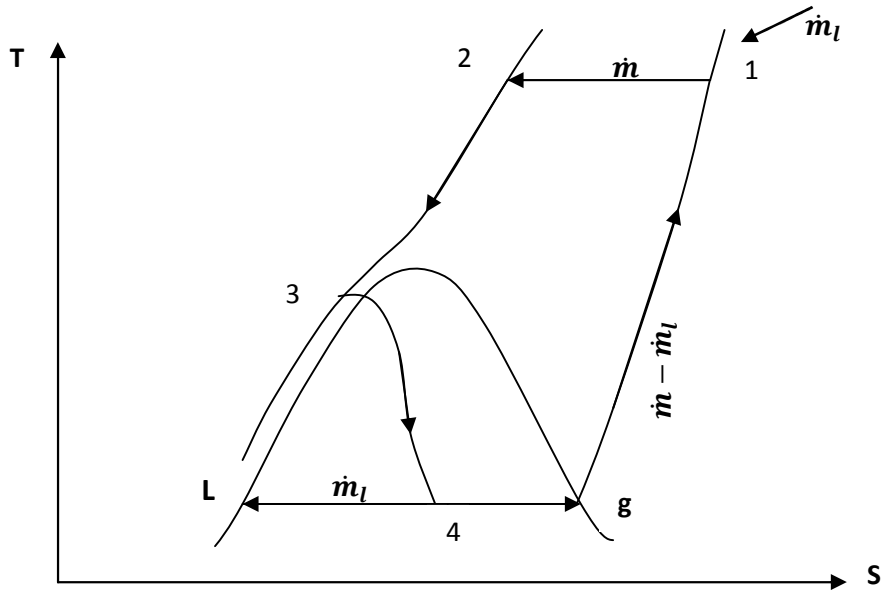


Figure III-7 : Diagramme (T-S) du cycle de Linde

En faisant un bilan énergétique pour le volume de contrôle, délimité par la surface de contrôle (δ), on aura pour une masse de gaz comprimée (\dot{m}) et une masse soutirée (\dot{m}_l) au point L, le bilan suivant :

$$\dot{m}h_2 = \dot{m}_l h_l + (\dot{m} - \dot{m}_l)h_1$$

$\dot{m} (h_2 - h_1) = \dot{m}_l (h_l - h_1)$. En divisant cette égalité sur (\dot{m}) :

$$(h_2 - h_1) = \frac{\dot{m}_l}{\dot{m}} (h_l - h_1)$$

.Avec : $[\dot{m}_l/\dot{m}] = y$ représente la fraction liquéfiée

$$\Rightarrow (h_2 - h_1) = y(h_l - h_1) \Rightarrow y = [(h_2 - h_1)/(h_l - h_1)] .$$

$$\text{Ou bien : } y = [(h_1 - h_2)/(h_1 - h_l)] \quad (\text{III} - 14)$$

On constate bien que l'enthalpie du point (1) est supérieure à celle du point (2) et l'enthalpie du point (2) est supérieure à celle du point (h_l).

Ce qui implique que : $(h_1 - h_2) < (h_1 - h_l)$ et bien évidemment $0 < [(h_1 - h_2)/(h_1 - h_l)] < 1$ D'où : $0 < y < 1$.

La fraction y dépend des conditions initiales et de la pression de compression ainsi que les valeurs de h_1 et h_l sont régies par les conditions initiales, qui sont souvent ambiantes. Afin de maximiser y , la valeur de h_2 doit être aussi petite que possible. Pour avoir un minimum de h_2 ,

le changement d'enthalpie pour un changement de pression donné doit être nul à la température T_1 .

✚ Travail par unité de masse de gaz comprimé \dot{W}_C/\dot{m}

$$\dot{W}_C = \dot{W}_C$$

$$\dot{W}_C + \dot{Q} = \dot{m}\Delta h \Rightarrow \dot{W}_C = \dot{m}\Delta h - \dot{Q} = \dot{m}(h_2 - h_1) - \dot{m}Q$$

Avec : $Q = T(S_2 - S_1)$

$$\dot{W}_C = \dot{m}(h_2 - h_1) - \dot{m}T(S_2 - S_1) = \dot{m} [(h_2 - h_1) - T(S_2 - S_1)]$$

$$\text{D'où : } \dot{W}_C = \dot{m} [(h_2 - h_1) - T(S_2 - S_1)]$$

$$[\dot{W}_C/\dot{m}] = [(h_2 - h_1) - T(S_2 - S_1)] \quad \text{(III - 15)}$$

✚ Travail par unité de masse de gaz liquéfié \dot{W}_C/\dot{m}_l

On a: $y = [\dot{m}_l/\dot{m}] \Rightarrow \dot{m} = (\dot{m}_l/y)$

$$[\dot{W}_C/\dot{m}] = [\dot{W}_{net}/\dot{m}_l] * y \Rightarrow [\dot{W}_C/\dot{m}_l] = (1/y) * [\dot{W}_C/\dot{m}] \quad \text{(III - 16)}$$

$$\Rightarrow [\dot{W}_C/\dot{m}_l] = (1/y) * [(h_2 - h_1) - T(S_2 - S_1)].$$

✚ Facteur de mérite FOM

Il est défini comme étant le rapport entre le travail du cycle idéal sur le travail du cycle réel.

$$\text{FOM} = [(\dot{W}_i/\dot{m}_l)/(\dot{W}_C/\dot{m}_l)] \quad \text{(III - 16)}$$

$$\Rightarrow \text{FOM} = y * \frac{[(h_l - h_1) - T(S_l - S_1)]}{[(h_2 - h_1) - T(S_2 - S_1)]}$$

III.2.2 Cycle de Linde avec pré-refroidissement

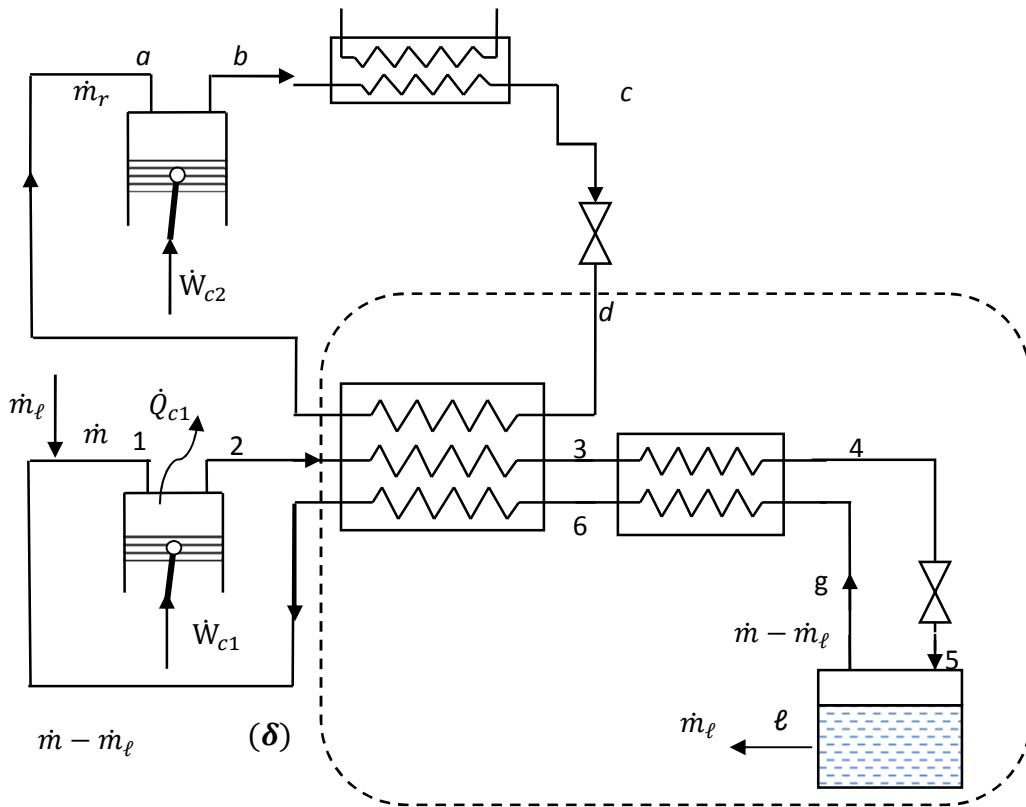


Figure III-8 : cycle de Linde avec un pré-refroidissement

Dans ce cycle, on distingue deux machines ; une machine de liquéfaction et une machine frigorifique. Avec :

\dot{m} : Débit du gaz à comprimé. \dot{m}_f : Débit du gaz liquéfié. \dot{m}_r : Débit du fluide frigorigène.

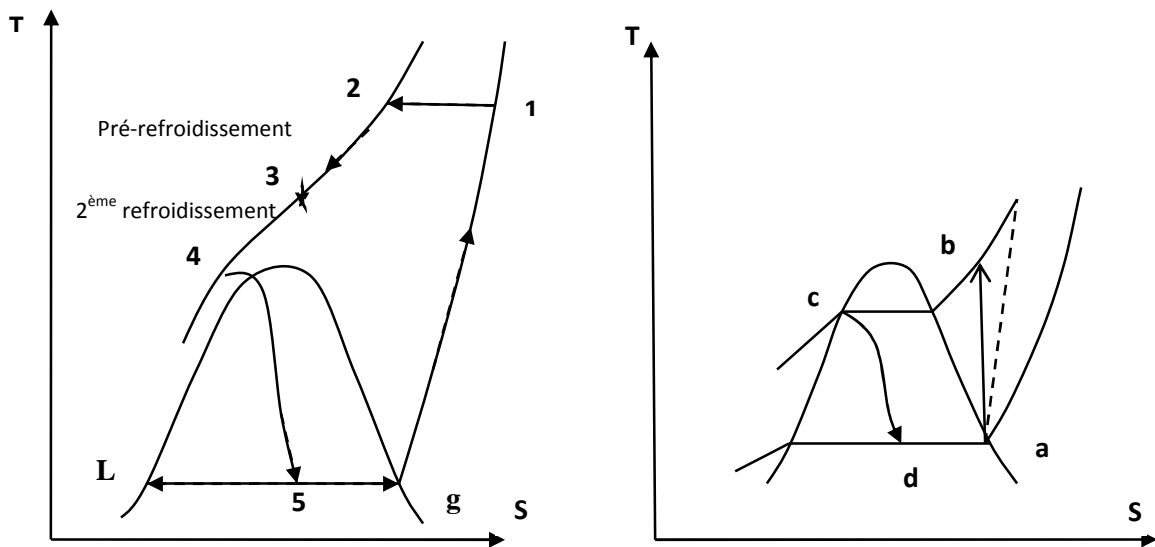


Figure III-9 : Diagramme (T-S) de la machine frigorifique et la machine de liquéfaction

En faisant un bilan énergétique sur le volume de contrôle délimité par la surface de contrôle (δ), on aura :

$$\dot{m}h_2 + \dot{m}_r h_d = \dot{m}_f h_l + (\dot{m} - \dot{m}_f)h_1 + \dot{m}_r h_a$$

$$\dot{m}(h_2 - h_1) = \dot{m}_f(h_l - h_1) + \dot{m}_r (h_a - h_d)$$

En divisant l'égalité sur (\dot{m}) :

$$(h_2 - h_1) = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}}(h_l - h_1) + \frac{\dot{m}_r}{\dot{m}}(h_a - h_d).$$

On pose : $[\dot{m}_r/\dot{m}] = r$ et $[\dot{m}_f/\dot{m}] = y$

$$\Rightarrow (h_2 - h_1) = y(h_l - h_1) + r(h_a - h_d).$$

$$\Rightarrow y(h_l - h_1) = (h_2 - h_1) - r(h_a - h_d)$$

$$\Rightarrow y = \frac{(h_2 - h_1)}{(h_l - h_1)} - r \frac{(h_a - h_d)}{(h_l - h_1)}$$

$$\text{Ou bien : } y = \frac{(h_2 - h_1)}{(h_l - h_1)} + r \frac{(h_d - h_a)}{(h_l - h_1)} \quad (\text{III} - 17)$$

Tel que : ($h_a > h_d$). D'où : $[(h_d - h_a)/(h_l - h_1)] > 0$

$$y = \frac{(h_2 - h_1)}{(h_l - h_1)} + r \frac{(h_d - h_a)}{(h_l - h_1)}.$$

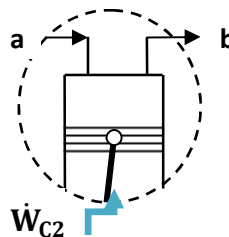
Donc les deux termes sont positifs. Le premier terme de l'expression ci-dessus est le rendement d'un système simple de Linde. Le second terme est le rendement supplémentaire qui correspond au résultat du pré-refroidissement du système simple précédemment.

Cette augmentation de la valeur de la fraction liquéfiée dépend de la modification des valeurs des enthalpies (h_d et h_a) et de débit (\dot{m}_r) du réfrigérant.

Travail par unité de masse comprimé \dot{W}_C/\dot{m}

$$\dot{W}_C = \dot{W}_{C1} + \dot{W}_{C2}$$

- **Machine frigorifique**



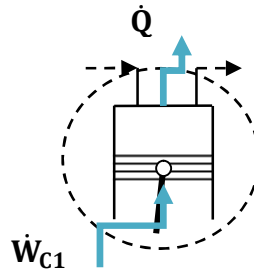
Dans la machine frigorifique, la compression est isentropique.

En faisant un bilan énergétique pour le volume de contrôle délimité par la surface de contrôle, on aura :

$$\dot{W}_{C2} = \dot{m}_r(h_b - h_a) \cdot (\text{Adiabatique}) \Rightarrow \dot{Q} = 0$$

$$\Rightarrow \dot{W}_{C2} = \dot{m}_r(h_b - h_a)$$

- **Machine de liquéfaction**



Dans la machine de liquéfaction, la compression est isotherme réversible.

En faisant un bilan énergétique sur le volume de contrôle délimité par la surface de contrôle, on aura :

$$\dot{W}_{C1} + \dot{m}h_1 = \dot{m}h_2 + \dot{Q} \Rightarrow \dot{W}_{C1} = \dot{m}(h_2 - h_1) + \dot{Q}$$

Avec : $\dot{Q} = \dot{m}T(S_1 - S_2)$ avec : $T_1 = T_2 = T$

$$\Rightarrow \dot{W}_{C1} = \dot{m}(h_2 - h_1) + \dot{m}T(S_1 - S_2)$$

$$\Rightarrow \dot{W}_{C1} = \dot{m} [(h_2 - h_1) + T(S_1 - S_2)]$$

D'où : $\dot{W}_C = \dot{m}[(h_2 - h_1) + T(S_1 - S_2)] + \dot{m}_r(h_b - h_a)$

$$\Rightarrow [\dot{W}_C/\dot{m}] = [(h_2 - h_1) + T(S_1 - S_2)] + \frac{\dot{m}_r}{\dot{m}}(h_b - h_a)$$

L'exigence de travail pour un système pré-refroidi de Linde-Hampson est donné par :

$$[\dot{W}_C/\dot{m}] = [(h_2 - h_1) + T(S_1 - S_2)] + r(h_b - h_a) \quad (\text{III} - 18)$$

On constate que le premier terme correspond au travail de celui dans un système simple de Linde et le deuxième terme représente le travail supplémentaire requis pour le pré-refroidissement du système.

✚ Travail par unité de masse de gaz liquéfié \dot{W}_C/\dot{m}_l

On a : $y = \frac{\dot{m}_l}{\dot{m}} \Rightarrow \dot{m} = \frac{\dot{m}_l}{y}$

$$\frac{\dot{W}_C}{\dot{m}} = \frac{\dot{W}_C}{\dot{m}_l} * y \Rightarrow \frac{\dot{W}_C}{\dot{m}_l} = \frac{1}{y} \frac{\dot{W}_C}{\dot{m}}$$

D'où : $\frac{\dot{W}_C}{\dot{m}_l} = \frac{1}{y} [(h_2 - h_1) + T(S_1 - S_2) + r(h_b - h_a)]$

✚ Facteur de mérite FOM

Il est défini comme étant le rapport entre le travail du cycle idéal sur le travail du cycle réel.

$$FOM = \frac{(W_i/\dot{m}_l)}{(W_{net}/\dot{m}_l)} \frac{\dot{W}_i}{\dot{m}} = [(h_l - h_1) - T(S_l - S_1)]$$

$$FOM = y * \frac{[(h_l - h_1) - T(S_l - S_1)]}{[(h_2 - h_1) + T(S_1 - S_2) + r(h_b - h_a)]}$$

III.2.3 Cycle de Linde avec étranglement double

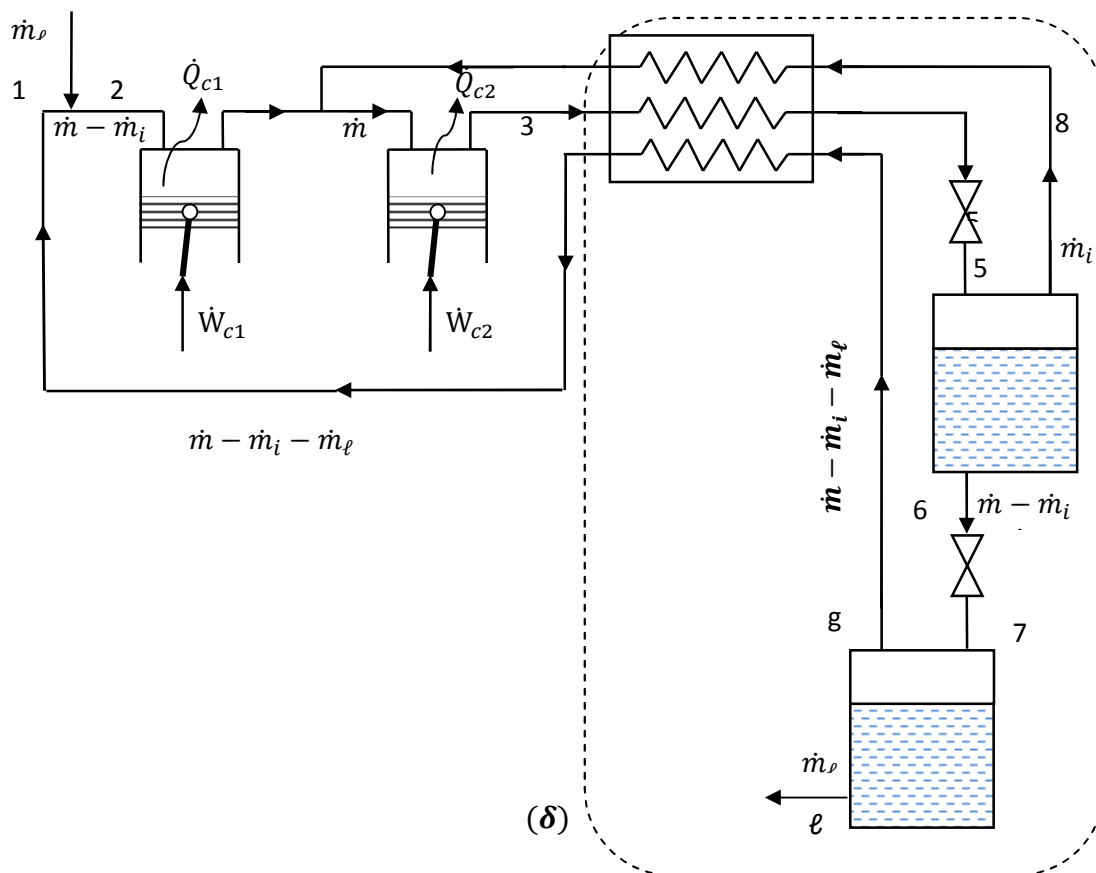


Figure III-10 : Cycle de Linde avec étranglement double

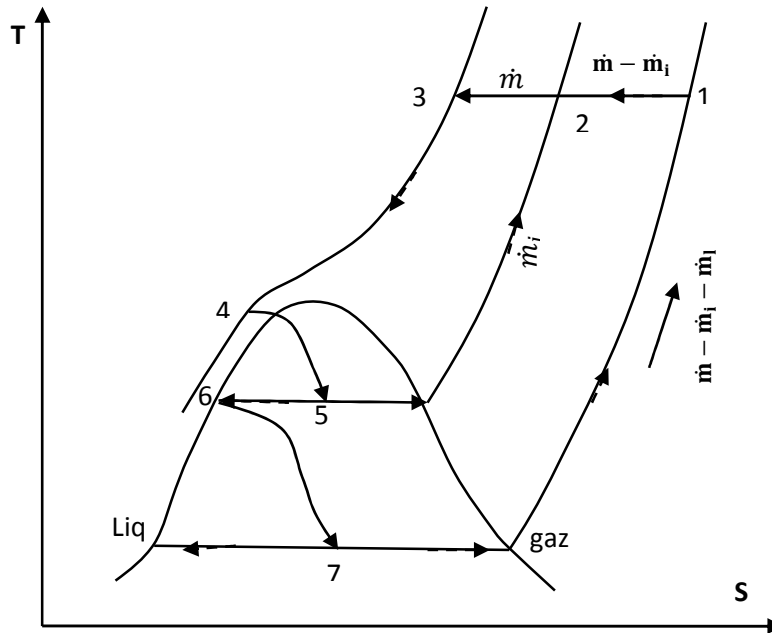


Figure III-10 : Diagramme de Linde avec étranglement double

En faisant un bilan énergétique sur le volume de contrôle délimité par la surface de contrôle (δ), comme l'indique la figure (III-10), on aura :

$$\dot{m}h_3 = \dot{m}_f h_l + \dot{m}_i h_2 + (\dot{m} - \dot{m}_i - \dot{m}_f) h_1$$

$$\Rightarrow \dot{m}(h_3 - h_1) = \dot{m}_f(h_l - h_1) + \dot{m}_i(h_2 - h_1)$$

En divisant sur (\dot{m}) on aura:

$$\frac{\dot{m}}{\dot{m}}(h_3 - h_1) = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}}(h_l - h_1) + \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}}(h_2 - h_1)$$

Avec : $\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}} = y$ On pose : $\frac{\dot{m}_i}{\dot{m}} = i$

D'où : $(h_3 - h_1) = y(h_l - h_1) + i(h_2 - h_1)$

$$\Rightarrow y = \frac{(h_3 - h_1)}{(h_l - h_1)} - i \frac{(h_2 - h_1)}{(h_l - h_1)}$$

Ou bien : $y = \frac{(h_3 - h_1)}{(h_l - h_1)} + i \frac{(h_1 - h_2)}{(h_l - h_1)}$ (III – 19)

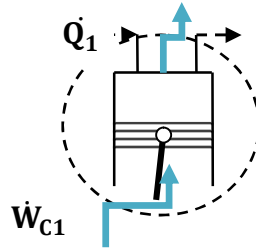
Le premier terme est le rendement pour un système simple de Linde Hampton en considérant que la masse totale du gaz est comprimée à partir de $1 \rightarrow 3$. Le second terme signifie la réduction du rendement liquide correspondant à la modification.

✚ **Travail par unité de masse de gaz comprimé \dot{W}_C/\dot{m}**

Dans ce cycle on possède deux compresseurs effectuant chacun d'eux une compression isotherme réversible.

$$\dot{W}_C = \dot{W}_{C1} + \dot{W}_{C2}$$

• **Premier compresseur :**



En appliquant un bilan énergétique sur le volume de contrôle délimité par la surface de contrôle : $(\dot{m} - \dot{m}_i)h_1 + \dot{W}_{C1} = (\dot{m} - \dot{m}_i)h_2 + \dot{Q}_1$

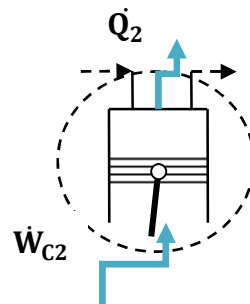
$$\dot{W}_{C1} = (\dot{m} - \dot{m}_i)(h_2 - h_1) + \dot{Q}_1$$

$$\dot{Q}_1 = (\dot{m} - \dot{m}_i)T(S_1 - S_2) \text{ .avec : } T_1 = T_2 = T$$

$$\dot{W}_{C1} = (\dot{m} - \dot{m}_i)(h_2 - h_1) + (\dot{m} - \dot{m}_i)T(S_1 - S_2).$$

$$\dot{W}_{C1} = (\dot{m} - \dot{m}_i)[(h_2 - h_1) + T(S_1 - S_2)]$$

• **Deuxième compresseur :**



En appliquant un bilan énergétique le volume de contrôle délimité par la surface de contrôle :

$$\dot{m}h_2 + \dot{W}_{C2} = \dot{m}h_3 + \dot{Q}_2$$

$$\dot{W}_{C2} = \dot{m}(h_3 - h_2) + \dot{Q}_2$$

$$\dot{Q}_2 = \dot{m} T (S_2 - S_3) \text{ .avec : } T_1 = T_2 = T$$

$$\dot{W}_{C2} = \dot{m}(h_3 - h_2) + \dot{m} T (S_2 - S_3)$$

$$\dot{W}_{C2} = \dot{m}[(h_3 - h_2) + T(S_2 - S_3)]$$

Donc la quantité d'énergie dépensée s'exprime comme suit :

$$\dot{W}_C = \dot{W}_{C1} + \dot{W}_{C2}$$

$$\dot{W}_C = (\dot{m} - \dot{m}_i)[(h_2 - h_1) + T(S_1 - S_2)] + \dot{m}[(h_3 - h_2) + T(S_2 - S_3)]$$

$$\begin{aligned} \dot{W}_C &= \dot{m}[(h_2 - h_1) + T(S_1 - S_2) + (h_3 - h_2) + T(S_2 - S_3)] \\ &\quad - \dot{m}_i[(h_2 - h_1) + T(S_1 - S_2)] \end{aligned}$$

$$\dot{W}_C = \dot{m}[(h_3 - h_1) + T(S_1 - S_3)] - \dot{m}_i[(h_2 - h_1) + T(S_1 - S_2)]$$

$$\frac{\dot{W}_C}{\dot{m}} = [(h_3 - h_1) + T(S_1 - S_3)] - \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}} [(h_2 - h_1) + T(S_1 - S_2)]$$

$$\frac{\dot{W}_C}{\dot{m}} = [(h_3 - h_1) + T(S_1 - S_3)] - i[(h_2 - h_1) + T(S_1 - S_2)] \quad (\text{III} - 20)$$

✚ Travail net par unité de masse de gaz liquéfié \dot{W}_C/\dot{m}_l

On a: $y = \frac{\dot{m}_l}{\dot{m}} \Rightarrow \dot{m} = \frac{\dot{m}_l}{y}$

$$\frac{\dot{m}_l}{\dot{m}} \Rightarrow \dot{m} = \frac{\dot{m}_l}{y} \Rightarrow \frac{\dot{W}_C}{\dot{m}_l} = \frac{1}{y} \frac{\dot{W}_C}{\dot{m}}$$

$$\frac{\dot{W}_C}{\dot{m}_l} = \frac{1}{y} [[(h_3 - h_1) + T(S_1 - S_3)] - i[(h_2 - h_1) + T(S_1 - S_2)]]$$

✚ Facteur de mérite FOM

Il est défini comme étant le rapport entre le travail du cycle idéal sur le travail du cycle réel.

$$\text{FOM} = \frac{(\dot{W}_i/\dot{m}_l)}{(\dot{W}_C/\dot{m}_l)}$$

Avec : $[\dot{W}_i/\dot{m}] = [(h_l - h_1) - T(S_l - S_1)]$

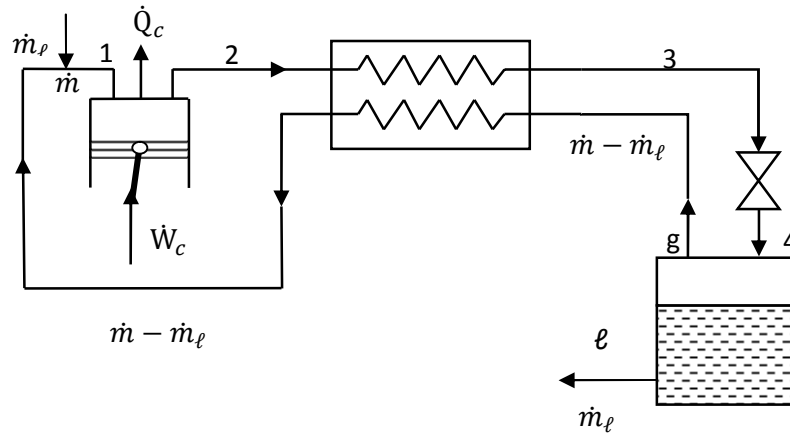
$$\text{FOM} = y * \frac{[(h_l - h_1) - T(S_l - S_1)]}{[[(h_3 - h_1) + T(S_1 - S_3)] - i[(h_2 - h_1) + T(S_1 - S_2)]]}$$

Chapitre IV
Résultats et discussion

Résultats et discussion

IV.1.cycle de Linde simple

Pour une installation cryogénique à étranglement simple (cycle de Linde) pour la liquéfaction du gaz. Les conditions de fonctionnement sont les suivants : $P_1 = 1 \text{ bar}$, $T_1 = 300 \text{ K}$.



Hypothèses

- Tous les éléments de l'installation, à l'exception du compresseur sont parfaitement calorifugés.
- Les variations des énergies cinétique et potentielle sont négligeables.
- La dissipation est négligeable dans toute l'installation à l'exception du détendeur.
- La compression 1-2 est isotherme réversible.

Paramètres à déterminer

- 1- Le taux de liquéfaction y .
- 2- Le travail par unité de masse comprimée.
- 3- Le travail par unité de masse liquéfiée.
- 4- Le facteur de mérite FOM.

Paramètres d'opération de cycle Linde

Pour l'investigation de cycle de Linde pour la liquéfaction de l'oxygène, l'azote, et l'argon deux paramètres d'opération ont été considérés pour minimiser le travail absorbé et maximiser la quantité liquéfiée :

1. La pression à la sortie du compresseur.
2. La température à l'entrée du compresseur.

Résultats et discussion

Paramètres de performances de système de liquéfaction

Quatre fonctions qui peuvent indiquer la performance d'un système de liquéfaction.

- **taux de liquéfaction**

L'équation (III-14) $\Rightarrow y = [(h_1 - h_2)/(h_1 - h_l)]$

- **Travail par unité de masse comprimée \dot{W}_c/\dot{m}**

L'équation (III-15) $\Rightarrow \frac{\dot{W}_c}{\dot{m}} = (h_2 - h_1) + T_1(S_1 - S_2)$

Elle représente la quantité d'énergie dépensée pour liquéfier la fraction correspondante (y).

- **Travail par unité de masse liquéfiée \dot{W}_c/\dot{m}_l**

L'équation (III-16) $\Rightarrow [\dot{W}_c/\dot{m}_l] = \frac{1}{y} \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}}$

$$\Rightarrow \frac{\dot{W}_c}{\dot{m}_l} = \frac{1}{y} [(h_2 - h_1) + T_1 (S_1 - S_2)]$$

Elle représente la quantité d'énergie dépensée pour liquéfier (1 kg) d'oxygène liquide.

- **Facteur de mérite FOM**

Le rendement thermodynamique est le rapport entre le travail théorique minimum et le travail réel nécessaire pour le système. Ce rapport donne la mesure d'approche de performance du système réel au système idéal.

L'équation (III-17) $\Rightarrow \text{FOM} = \frac{(\dot{W}_i/\dot{m}_l)}{(\dot{W}_c/\dot{m}_l)}$

$$\text{Avec } \frac{\dot{W}_i}{\dot{m}} = (h_l - h_1) - T_1(S_l - S_1).$$

IV.1.1 Influence du taux de compression sur les paramètres du cycle de Linde

Pour Les mêmes paramètres à l'entrée du compresseur ($T_1 = 300K$ et $P_1 = 1bar$). Dans cette partie on va fixer la température, correspondante pour chaque fluide

Résultats et discussion

- L'oxygène

Tableau III-1: les différents paramètres du cycle d'oxygène en fonction du taux de compression

| P_2 [bar] | \dot{W}_c/\dot{m} [kJ/kg] | \dot{W}_c/\dot{m}_l [kJ/kg] | FOM | y |
|-------------|-----------------------------|-------------------------------|---------|---------|
| 50 | 301,84 | 8856,8075 | 0,07157 | 0,03408 |
| 100 | 353,02 | 5383,0436 | 0,11777 | 0,06558 |
| 200 | 403,03 | 3486,4186 | 0,18183 | 0,11560 |
| 300 | 432,78 | 2921,0313 | 0,21703 | 0,14816 |
| 400 | 454,73 | 2717,0769 | 0,23332 | 0,16736 |
| 500 | 473,14 | 2665,5774 | 0,23783 | 0,17750 |
| 600 | 488,89 | 2692,5703 | 0,23544 | 0,18157 |
| 650 | 496,22 | 2726,6333 | 0,23250 | 0,18199 |
| 750 | 510,06 | 2827,2268 | 0,22423 | 0,18041 |

- L'azote

Tableau III-2: les différents paramètres du cycle d'Azote en fonction du taux de compression

| P_2 [bar] | \dot{W}_c/\dot{m} [kJ/kg] | \dot{W}_c/\dot{m}_l [kJ/kg] | FOM | y |
|-------------|-----------------------------|-------------------------------|---------|---------|
| 50 | 346,669 | 12223,8716 | 0,06229 | 0,02836 |
| 100 | 407,699 | 7855,4720 | 0,09693 | 0,05190 |
| 200 | 469,619 | 5598,0331 | 0,13602 | 0,08389 |
| 300 | 507,859 | 5058,8604 | 0,15052 | 0,10039 |
| 400 | 536,949 | 5030,9097 | 0,15136 | 0,10673 |
| 500 | 561,379 | 5274,6312 | 0,14436 | 0,10643 |
| 600 | 582,609 | 5729,8288 | 0,13289 | 0,10168 |
| 650 | 592,539 | 6040,1529 | 0,12607 | 0,09810 |
| 750 | 613,799 | 6890,4243 | 0,11051 | 0,08908 |

- L'Argon

Tableau III- 3: les différents paramètres du cycle en fonction du taux de compression

| P_2 | \dot{W}_c/\dot{m} [kJ/kg] | \dot{W}_c/\dot{m}_l [kJ/kg] | FOM | y |
|-------|-----------------------------|-------------------------------|---------|---------|
| 50 | 241,8764 | 6264,6050 | 0,07587 | 0,03861 |
| 100 | 282,9478 | 3722,9936 | 0,12767 | 0,07600 |
| 200 | 323,2478 | 2429,5212 | 0,19564 | 0,13305 |
| 300 | 346,9578 | 2047,5526 | 0,23214 | 0,16945 |
| 400 | 364,7078 | 1917,0931 | 0,24793 | 0,19024 |
| 500 | 379,5778 | 1891,6465 | 0,25127 | 0,20066 |
| 600 | 392,4378 | 1922,5837 | 0,24722 | 0,20412 |
| 650 | 398,1678 | 1951,7072 | 0,24354 | 0,20401 |
| 750 | 409,4878 | 2037,3540 | 0,23330 | 0,20099 |

Résultats et discussion

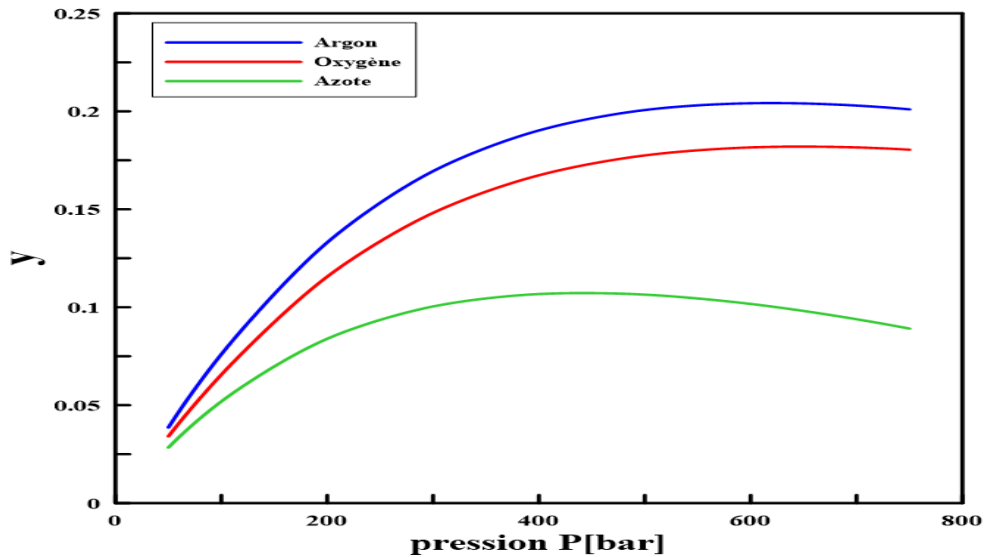


Figure IV-1 : Profil d'évolution du taux de liquéfaction en fonction du taux de compression.

Pour les conditions de fonctionnement initiales (température et pression) indiquées, on remarque qu'une augmentation progressive de la pression de compression, améliore le taux de liquéfaction jusqu'à l'atteinte d'un maximum puis diminuent. Pour l'Oxygène, on a pu obtenir $y=0,18199$ à $p_2 = 650$ bars, $y=0,10673$ pour l'azote à une pression $p_2 = 400$ bars et $y=0,20412$ pour l'argon à $p_2 = 600$ bars.

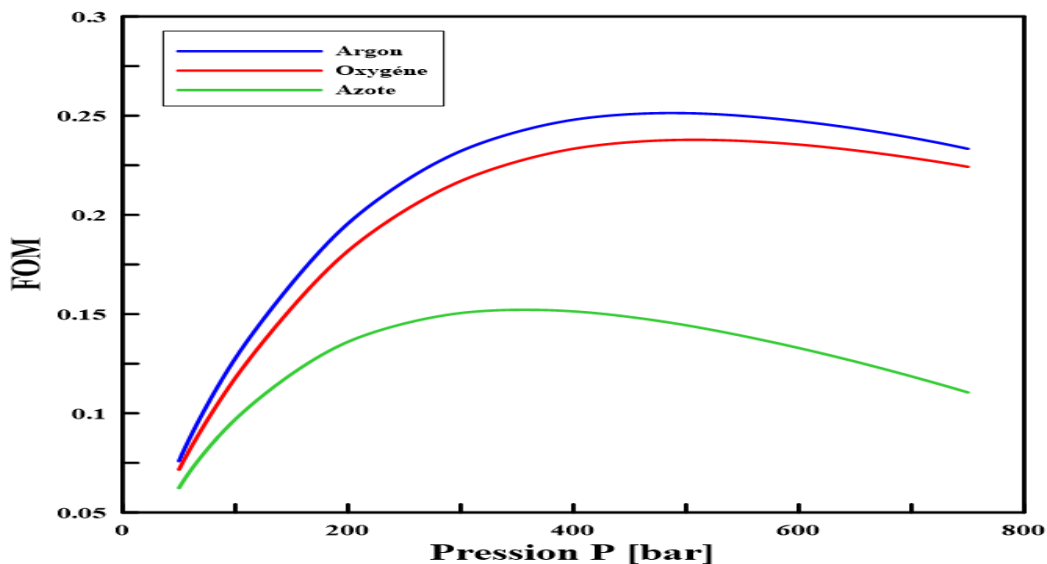


Figure IV-2 : Profil d'évolution du facteur de mérite en fonction du taux de compression

On voit bien qu'en augmentant le taux de compression, le FOM s'améliore pour chaque fluide de travail de plus en plus jusqu'à l'atteinte d'un maximum correspondant pour une pression de compression donnée, puis diminue progressivement. Or, on a pu obtenir un rendement

Résultats et discussion

maximal de 25,127 % pour l'argon, un rendement de 23,78% avec l'oxygène et 15,13% pour le cas de l'azote.

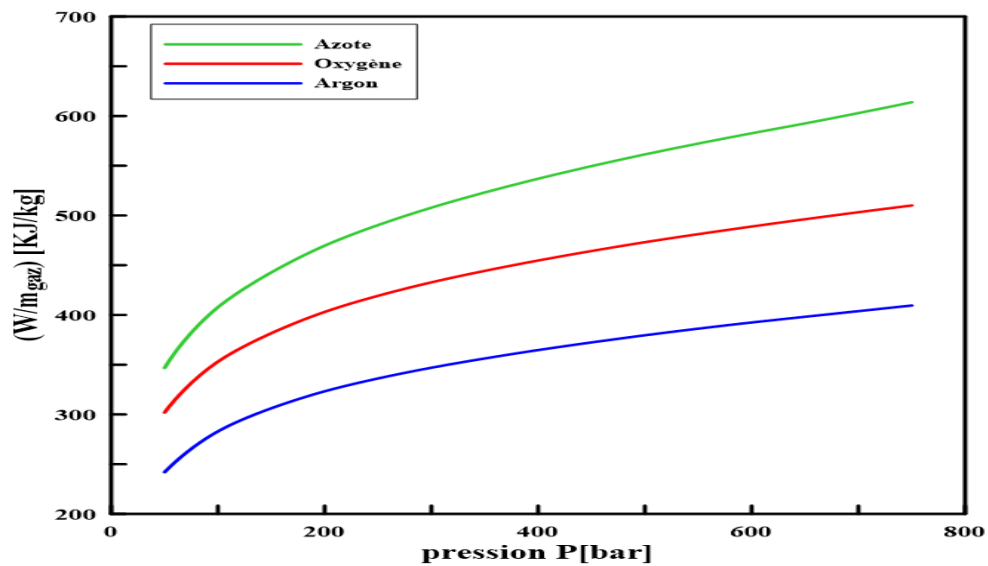


Figure IV-3 : Profil de variation du travail par unité de masse de gaz comprimée en fonction du taux de compression

Pour les mêmes conditions de fonctionnements $(T_1, P_1,)$ données. Pour les trois fluides de travail, on constate que l'énergie dépensée par unité de masse de gaz comprimé augmente pour chaque pression développée.

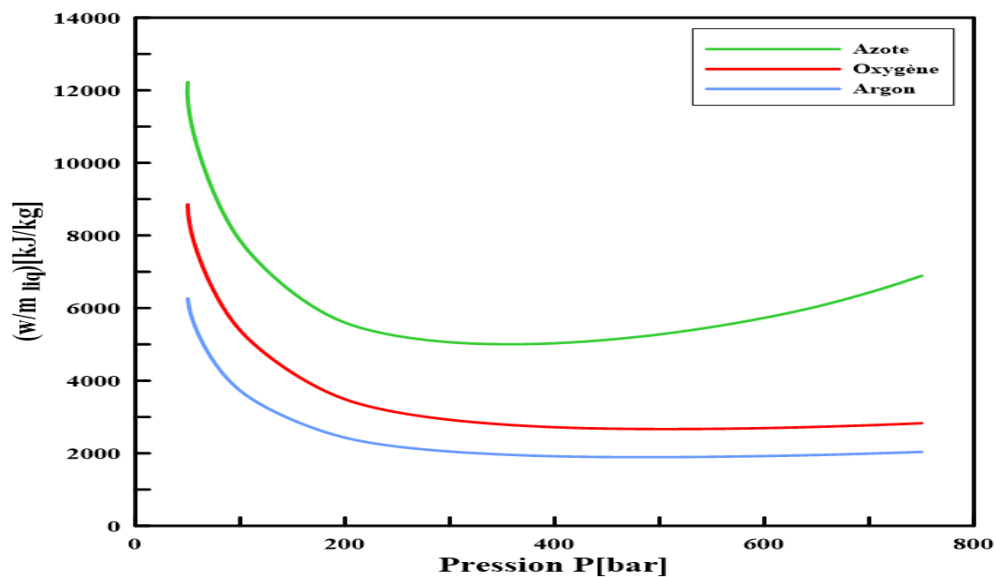


Figure IV-4 : Profil de variation du travail par unité de masse de gaz liquéfiée en fonction du taux de compression

D'après la figure, on voit que l'énergie dépensée pour avoir 1kg liquide de chaque fluide diminue de plus en plus en augmentant la pression de compression.

Résultats et discussion

Et d'ailleurs, on cherche un bon fonctionnement produisant un maximum de liquide et on constate bien que cette énergie diffère d'un fluide à un autre.

IV.1.2L'influence de la température d'entrée du compresseur sur les paramètres du cycle de Linde

Pour la même condition initiale (P_1). Dans cette partie on va fixer les pressions de compression, $P_2=500$ bars correspondante pour chaque fluide.

- **L'oxygène :**

Tableau III-4 : Paramètres de performance en fonction de la température d'entrée du compresseur

| T[k] | \dot{W}_c/\dot{m} [kJ/kg] | \dot{W}_c/\dot{m}_l [kJ/kg] | FOM | Y |
|------|-----------------------------|-------------------------------|---------|---------|
| 310 | 491,1600 | 2991,7768 | 0,22350 | 0,16417 |
| 305 | 482,0550 | 2824,4858 | 0,23057 | 0,17067 |
| 300 | 473,1400 | 2665,5774 | 0,23783 | 0,17750 |
| 298 | 469,6063 | 2604,8718 | 0,24073 | 0,18028 |
| 294 | 461,874 | 2482,6596 | 0,24696 | 0,18604 |
| 292 | 458,568 | 2426,5425 | 0,24987 | 0,18898 |
| 290 | 454,946 | 2369,7572 | 0,25299 | 0,19198 |

- **L'Azote :**

Tableau III-5 : Paramètres de performance en fonction de la température d'entrée du compresseur

| T [k] | \dot{W}_c/\dot{m} [kJ/kg] | \dot{W}_c/\dot{m}_l [kJ/kg] | FOM | Y |
|-------|-----------------------------|-------------------------------|---------|---------|
| 310 | 581,52 | 6038,0022 | 0,13275 | 0,09631 |
| 305 | 571,645 | 5645,7615 | 0,13841 | 0,10127 |
| 300 | 561,3790 | 5275,1268 | 0,14435 | 0,10642 |
| 298 | 553,9658 | 5102,8535 | 0,14770 | 0,10856 |
| 294 | 549,2210 | 4863,3755 | 0,15170 | 0,11293 |
| 292 | 545,0470 | 4732,9541 | 0,15422 | 0,11516 |
| 290 | 541,1350 | 4607,3648 | 0,15673 | 0,11745 |

- **L'Argon :**

Tableau III-6: Paramètres de performance en fonction de la température d'entrée du compresseur

| T [k] | \dot{W}_c/\dot{m} [kJ/kg] | \dot{W}_c/\dot{m}_l [kJ/kg] | FOM | Y |
|-------|-----------------------------|-------------------------------|---------|---------|
| 310 | 393,813 | 2111,2582 | 0,23974 | 0,18653 |
| 305 | 386,435 | 1997,4930 | 0,24410 | 0,19346 |
| 300 | 379,5778 | 1891,6465 | 0,25127 | 0,20066 |
| 298 | 376,3949 | 1848,6979 | 0,25433 | 0,20360 |
| 294 | 370,5750 | 1767,5045 | 0,26040 | 0,20966 |
| 292 | 367,9400 | 1729,4477 | 0,26336 | 0,21275 |
| 290 | 364,9930 | 1690,5650 | 0,26642 | 0,21590 |

Résultats et discussion

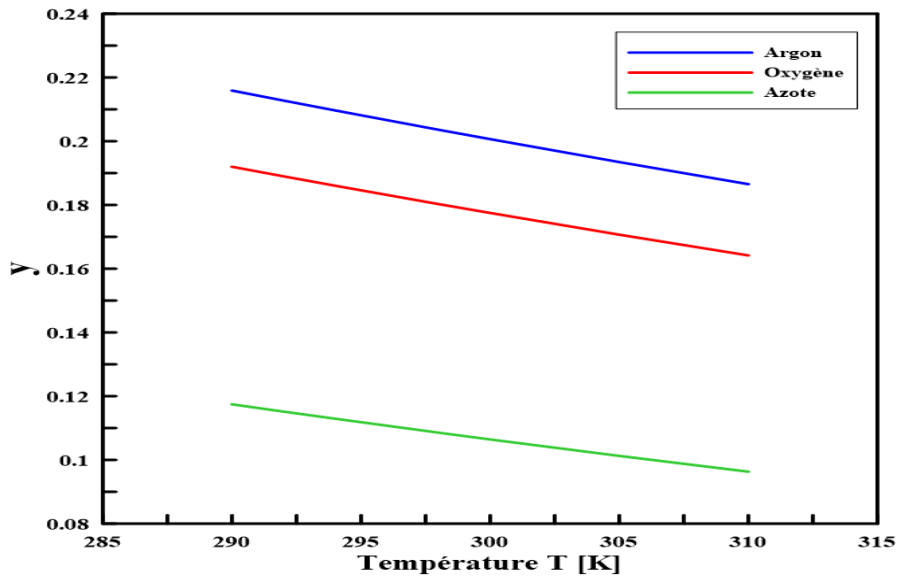


Figure IV-5 : Profil d'évolution du taux de liquéfaction en fonction de la Température de compression

La figure montre que la fraction en liquide de chaque fluide, augmente avec une amélioration remarquable en fonction de l'abaissement de la température d'entrée du compresseur. Donc l'abaissement de température influe d'une façon importante sur le taux de liquéfaction, et le meilleur rendement est atteint pour une température de 17°C.

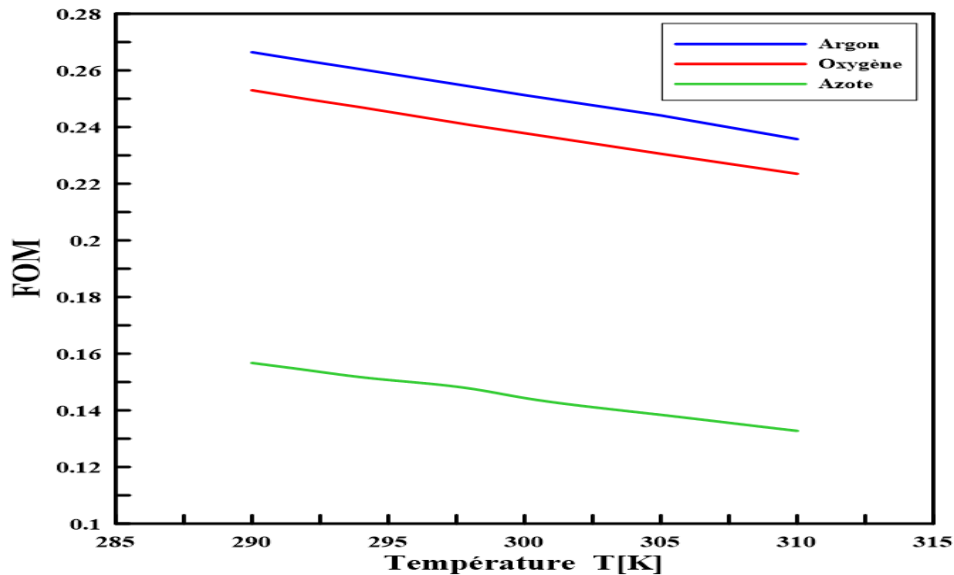


Figure IV-6 : Profil d'évolution du facteur de mérite en fonction de la Température d'entrée du compresseur

Les résultats montrent que l'effet de l'abaissement de la température d'entrée du compresseur est très important, il influe considérablement sur l'augmentation du rendement thermodynamique, avec un rendement de 26.64% pour l'argon, 25.3% pour l'oxygène et

Résultats et discussion

16.41% pour le cas de l'azote pour un système fonctionnant à une température de compression de 17°C.

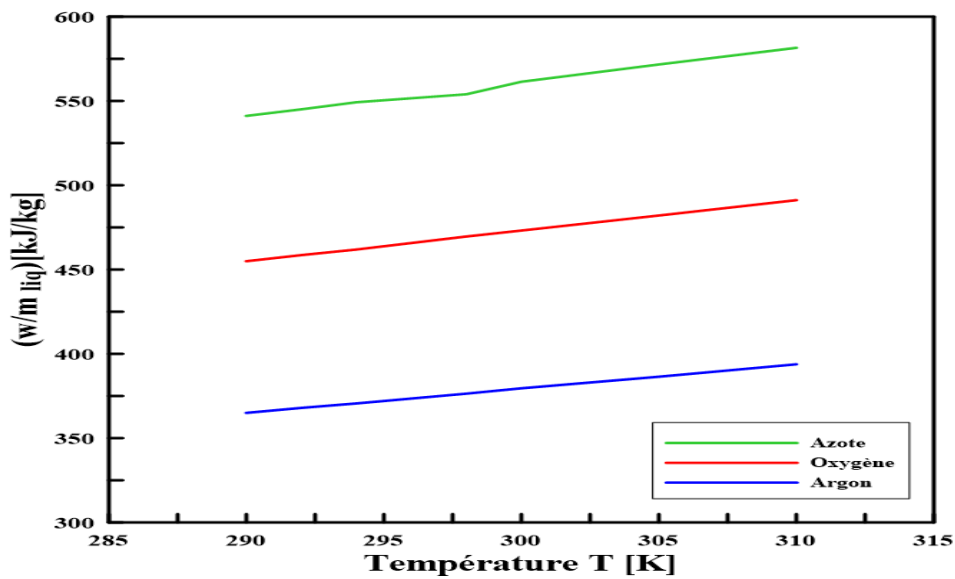


Figure IV-7 : Profil de variation du travail par unité de masse de gaz comprimée en fonction de la Température d'entrée du compresseur

On mentionne que la diminution de la température de compression, entraîne un accroissement important de l'énergie dépensée pour avoir la fraction en liquide correspondante pour chaque fluide. Et d'un point de vue technique, on constate bien que ces résultats se rapprochent bien pour le bon fonctionnement recherché.

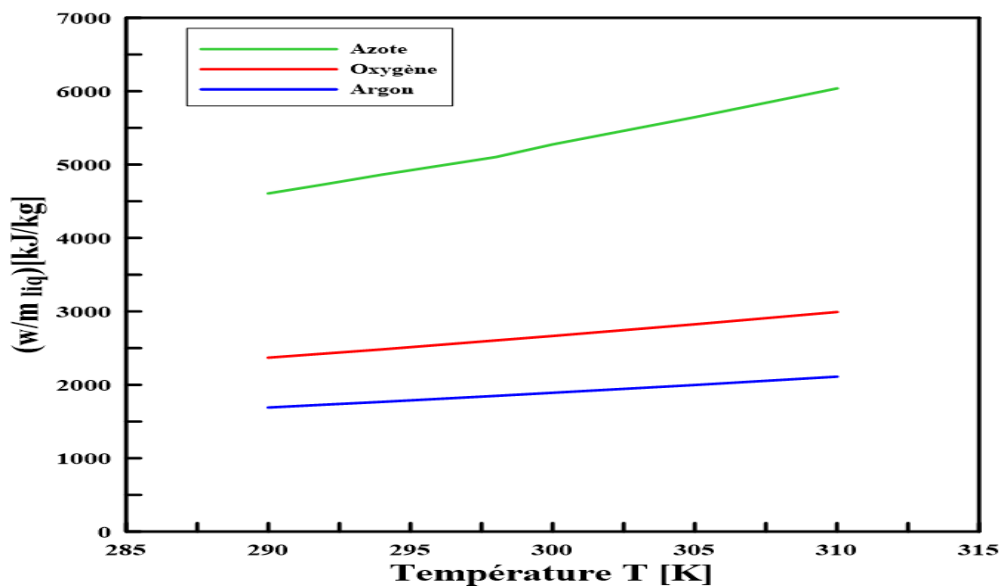


Figure IV-8 : Profil de variation du travail par unité de masse liquéfiée en fonction de la Température d'entrée du compresseur

Résultats et discussion

On voit bien qu'à chaque fois qu'en baisse la température d'entrée de compresseur, on constate que l'énergie dépensée pour avoir 1kg liquide de chaque fluide, diminue de plus en plus, cela dit que le cycle réel se rapproche mieux du cycle idéal.

Discussion

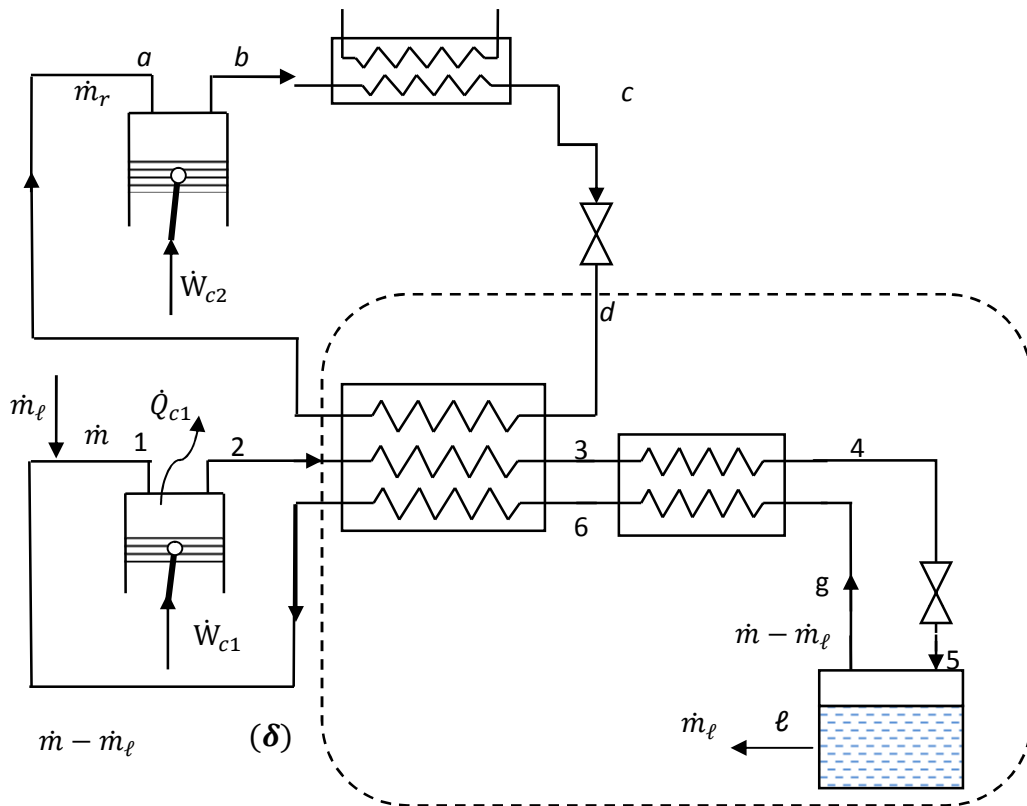
Dans le cycle de Linde simple fonctionnant sous des conditions données. Durant cette étude, on est arrivé à déterminer le point optimal pour chaque fluide de travail avec cette installation comme l'indique le tableau suivant :

| Fluides | P[bar] | T[k] | \dot{W}_c/\dot{m} [kJ/kg] | \dot{W}_c/\dot{m}_l [kJ/kg] | FOM | Y |
|---------|--------|------|-----------------------------|-------------------------------|---------|---------|
| Argon | 500 | 290 | 364,9930 | 1690,5650 | 0,26642 | 0,21590 |
| Oxygène | 500 | 290 | 454,946 | 2369,7572 | 0,25299 | 0,19198 |
| Azote | 500 | 290 | 517,575 | 4400,3995 | 0,16410 | 0,11763 |

D'après les résultats obtenus, on remarque qu'un bon choix de la pression de compression peut bien augmenter le taux de liquéfaction. Et d'un autre point, l'abaissement de la température d'entrée du compresseur, nous a permis d'améliorer de plus la performance du cycle considérée. En effet, pour l'argon on a pu atteindre un meilleur rendement du cycle de 21,6%, pour l'oxygène un rendement de 19.2%, et pour l'azote, on a pu avoir un rendement de 11,76% pour un système fonctionnant à une température d'entrée de 17°C.

Résultats et discussion

IV.2 Analyse thermodynamique du cycle de Linde avec pré-refroidissement :



En utilisant le procédé Linde avec pré-refroidissement. Le gaz à liquéfier, subit un pré-refroidissement extérieur jusqu'à une température $T_3=243\text{K}$ avec une machine frigorifique dont le fluide frigorigène est le fréon R12. Sous les mêmes hypothèses, le cycle de liquéfaction fonctionne entre : $P_1 = 1\text{bar}$, $T_1 = 300\text{K}$ et $P_2=200\text{bars}$. \dot{m} , débit traversant la machine de liquéfaction.

Données relatives la machine frigorifique :

- Température d'évaporation $T_0 = -25^\circ\text{C}$.
- Température de condensation $T_K = 35^\circ\text{C}$.
- \dot{m}_r , débit traversant la machine frigorifique.

Dans ce procédé, on va analyser l'influence du rapport des débits sur les paramètres de performance du cycle en procédant avec trois fluides de travail différents. Dans ce système de Linde avec un pré-refroidissement, les paramètres à chercher sont définis comme suit :

Résultats et discussion

▪ Taux de liquéfaction

L'équation (III-17) $\Leftrightarrow y = \frac{(h_2 - h_1)}{(h_1 - h_1)} + r * \frac{(h_d - h_a)}{(h_1 - h_1)}$

▪ Travail par unité de masse de gaz comprimé \dot{W}_c/\dot{m}

L'équation (III-18) $\Leftrightarrow \frac{\dot{W}_c}{\dot{m}} = (h_2 - h_1) + T(S_1 - S_2) + r(h_b - h_a)$

▪ Travail par unité de masse de gaz liquéfié \dot{W}/\dot{m}_l

L'équation (III-19) $\Leftrightarrow \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_l} = \frac{1}{y} * \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}}$

▪ Facteur de mérite FOM

L'équation (III-20) $\Leftrightarrow \text{FOM} = \left[\frac{\dot{W}_i/\dot{m}_l}{\dot{W}_{net}/\dot{m}_l} \right]$

Avec : $\frac{\dot{W}_i}{\dot{m}} = [(h_l - h_1) - T_1(S_l - S_1)]$

En gardant les mêmes températures et de pressions de fonctionnement, on a intérêt à déterminer les paramètres de performance du cycle pour chaque valeur donnée du rapport (r).

Tel que : $r = [\dot{m}_r/\dot{m}]$

Les résultats obtenus sont classés dans les tableaux suivants :

• L'oxygène

Tableau III-7: les différents paramètres de performance en fonction des rapports des débits

| $r = [\dot{m}_r/\dot{m}]$ | \dot{W}_c/\dot{m} [kJ/kg] | \dot{W}_c/\dot{m}_l [kJ/kg] | FOM | y |
|---------------------------|-----------------------------|-------------------------------|---------|---------|
| 0,1 | 406,4305 | 2861,1797 | 0,22157 | 0,14205 |
| 0,3 | 413,2317 | 2118,5939 | 0,29923 | 0,19505 |
| 0,5 | 420,0330 | 1693,5444 | 0,37434 | 0,24802 |
| 0,8 | 430,2346 | 1313,7737 | 0,48254 | 0,32748 |
| 1,0 | 437,0358 | 1148,7036 | 0,55189 | 0,38046 |

• L'azote

Tableau III-8 : les différents paramètres de performance en fonction des rapports des débits

| r | \dot{W}_c/\dot{m} [kJ/kg] | \dot{W}_c/\dot{m}_l [kJ/kg] | FOM | y |
|------|-----------------------------|-------------------------------|---------|---------|
| 0,1 | 476,0245 | 4826,3662 | 0,16089 | 0,09863 |
| 0,3 | 482,8257 | 3266,9713 | 0,23768 | 0,14779 |
| 0,5 | 489,6269 | 2485,9205 | 0,31236 | 0,19696 |
| 0,8 | 499,8286 | 1846,4299 | 0,42055 | 0,27070 |
| 1,00 | 506,6298 | 1583,8615 | 0,49026 | 0,31987 |

Résultats et discussion

- L'argon

Tableau III-9: les différents paramètres de performance en fonction de rapport des débits

| r | \dot{W}_c/\dot{m} [kJ/kg] | $[\dot{W}_{net}/\dot{m}_l]$ kJ/kg | FOM | y |
|------|-----------------------------|-----------------------------------|---------|---------|
| 0,1 | 326,6483 | 1894,7117 | 0,25086 | 0,17240 |
| 0,3 | 333,4495 | 1327,8492 | 0,35796 | 0,25112 |
| 0,5 | 340,2507 | 1031,9415 | 0,46060 | 0,32983 |
| 0,8 | 350,4524 | 782,4347 | 0,60748 | 0,44790 |
| 1,00 | 357,2536 | 678,3897 | 0,70065 | 0,52662 |

Pour bien éclaircir ces différents résultats inscrits dans les tableaux ci-dessus, on va les représentés sur les figures suivants.

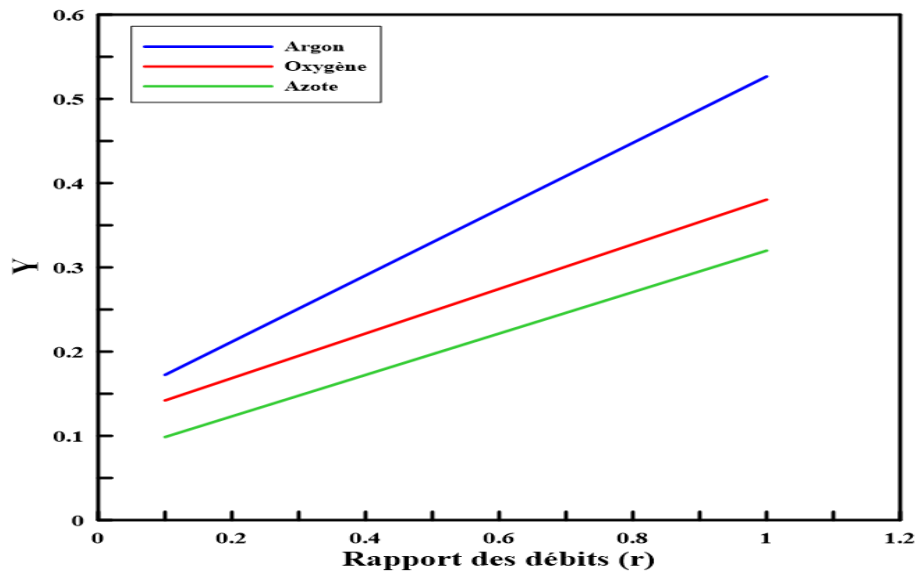


Figure IV-9 : Profil d'évolution du taux de liquéfaction en fonction de la variation du rapport des débits

Cette figure ci-dessus représente la variation du taux de liquéfaction en fonction du rapport des débits. Sous les mêmes conditions de fonctionnement données (pressions et Température), on constate que lorsqu'en augmentant le rapport des débits, on voit que les quantités liquides produites pour chaque fluide de travail augmentent continuellement avec une amélioration remarquable. Et on a pu obtenir : 38.04g d'oxygène liquide sur 100g d'oxygène gazeux, 31.98g d'azote liquide sur 100g d'azote gazeux et 52.66g d'argon liquide sur 100g d'argon gazeux.

Résultats et discussion

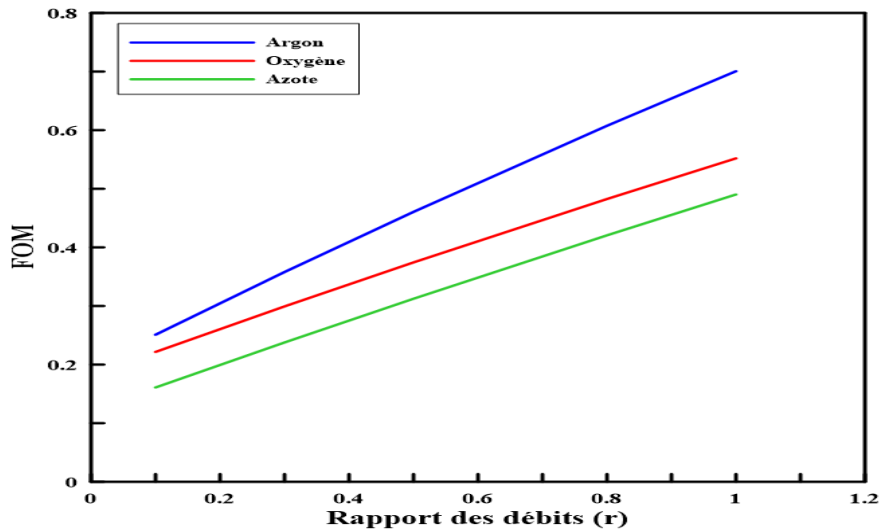


Figure IV-10 : Profil d'évolution du rendement thermodynamique en fonction de la variation du rapport des débits

Selon les résultats interprétés par la figure (IV-10), On peut constater que l'augmentation du rapport des débits traversant chaque machine, entraîne une augmentation brutale des valeurs de rendement thermodynamique du cycle pour chaque fluide de travail.

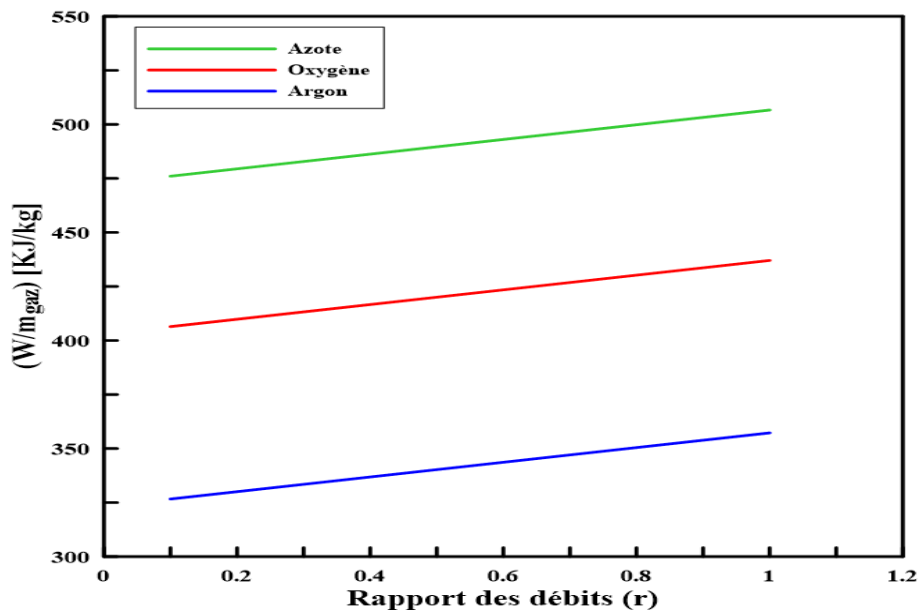


Figure IV-11 : Profil d'évolution du travail par unité de masse de gaz comprimée en fonction de la variation du rapport des débits

En générale, l'énergie dépensée dans un phénomène de compression dépend des conditions initiales (pression et température), et la pression de compression. Pour les trois fluides considéré, on constate que l'ajustement du rapport des débits entraîne une augmentation progressive de l'énergie dépensée pour chaque valeur donnée de (r). Nous remarquons que la

Résultats et discussion

la pente de ce graphique n'est pas influencée significativement par l'augmentation du taux de compression mais varie de la même façon quelque soit le taux de remplissage.

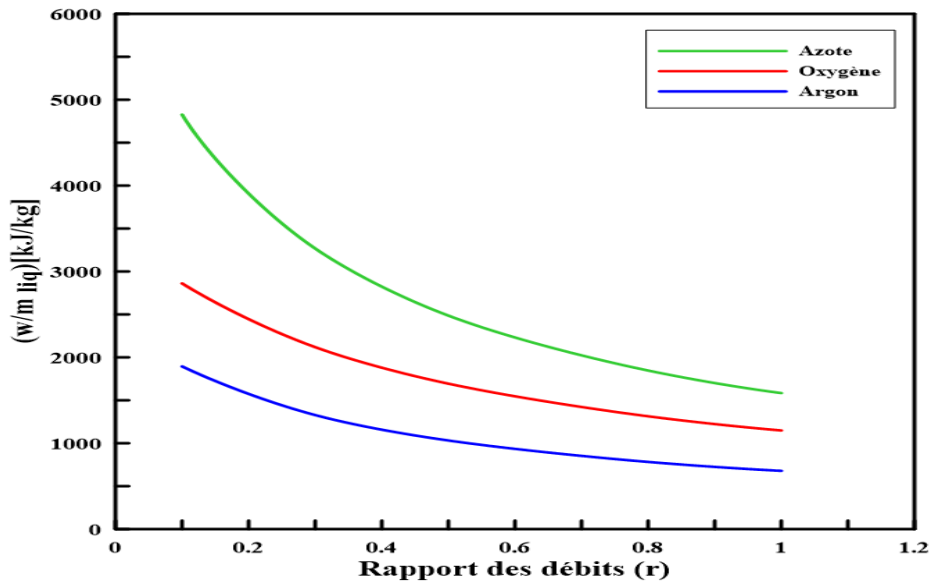


Figure IV-12 : Profil d'évolution du travail par unité de masse liquéfiée en fonction de la variation du rapport des débits

Sous les conditions de fonctionnement, on reconnaît que l'énergie dépensée pour avoir 1kg liquide de chaque fluide diminue de plus en plus en augmentant le rapport des débits. Et d'ailleurs c'est le but recherché ; dépenser moins d'énergie pour avoir un maximum de liquide.

Discussion :

Dans cette installation de Linde avec pré-refroidissement fonctionnant sous les conditions de $P_1 = 1\text{bar}$, $P_2 = 200\text{bars}$ et $T_1 = 300\text{k}$. Durant cette étude, on est arrivé à déterminer le point optimal pour chaque fluide avec cette machine, comme l'indique le tableau suivant :

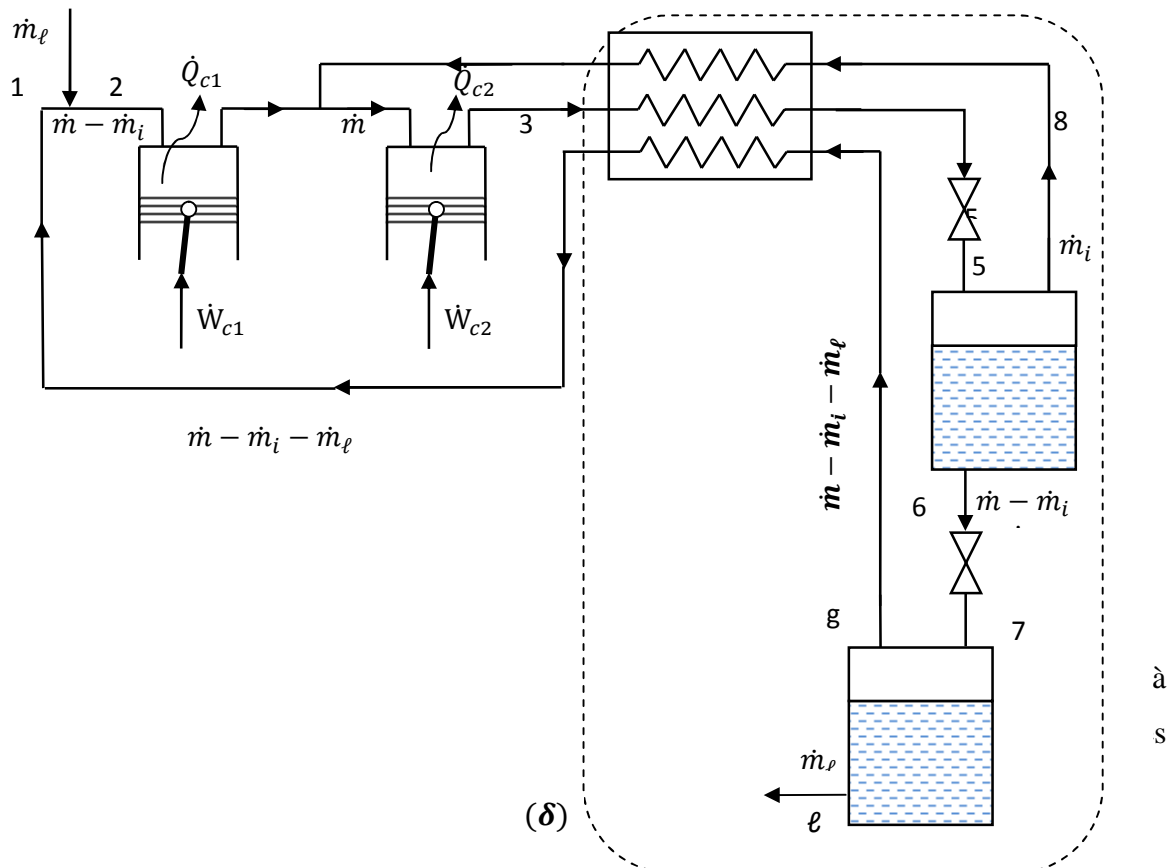
| Fluides | $r = [\dot{m}_r/\dot{m}]$ | \dot{W}_c/\dot{m} [kJ/kg] | \dot{W}_c/\dot{m}_l [kJ/kg] | FOM | Y |
|---------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------------|---------|---------|
| Argon | 1,00 | 357,2536 | 678,3897 | 0,70065 | 0,52662 |
| Oxygène | 1,00 | 437,0358 | 1148,7036 | 0,55189 | 0,38046 |
| Azote | 1,00 | 506,6298 | 1583,8615 | 0,49026 | 0,31987 |

D'après les résultats obtenus, on remarque qu'un bon choix de débit peut bien augmenter le taux de liquéfaction et d'en améliorer la performance du cycle considéré. A titre d'exemple. Pour l'argon, on a pu atteindre un meilleur rendement du cycle de 70.06%. Pour l'oxygène, un

Résultats et discussion

rendement de 55.19%, et pour l'azote, un rendement de 49.02%. Dans ce cas l'oxygène représente un rendement maximal par rapport à l'argon et l'azote.

IV.3 Analyse thermodynamique du cycle de Linde à étranglement double



En variant la pression intermédiaire (P_2), le requis consiste à déterminer les paramètres de performance suivants :

- **Taux de liquéfaction y**

L'équation (III-21) $\Leftrightarrow y = [(h_3 - h_1)/(h_l - h_1)] + i * [(h_1 - h_2)/(h_l - h_1)]$

- **Travail par unité de masse comprimée \dot{W}_c/\dot{m}**

L'équation (III-22) $\Leftrightarrow \frac{\dot{W}_c}{\dot{m}} = [(h_3 - h_1) + T(S_1 - S_3)] - i [(h_2 - h_1) + T(S_1 - S_2)]$

- **Travail net par unité de masse de gaz liquéfié \dot{W}_c/\dot{m}_l**

L'équation (III-23) $\Leftrightarrow \frac{\dot{W}_c}{\dot{m}} = \frac{\dot{W}_c}{\dot{m}_l} y \Rightarrow \frac{\dot{W}_c}{\dot{m}_l} = \frac{1}{y} \frac{\dot{W}_c}{\dot{m}}$

Résultats et discussion

▪ Facteur de mérite FOM

L'équation (III-24) \Leftrightarrow
$$\text{FOM} = \frac{(\dot{W}_i/\dot{m}_i)}{(\dot{W}_c/\dot{m}_i)} \quad \text{Avec : } \frac{\dot{W}_i}{\dot{m}} = [(h_l - h_1) - T(S_l - S_1)]$$

On va faire varier à chaque fois la pression intermédiaire P_2 . Dont le but d'analyser et de comparer les différents résultats afin de trouver le point optimal pour chaque fluide de travail.

On va prendre le rapport des débits : $i = [\dot{m}_i/\dot{m}] = 0,6$

En procédant avec l'oxygène, l'azote et l'argon comme fluides de travail. Pour les conditions de fonctionnement données T_1 et P_1 , les résultats obtenus sont classés dans les tableaux suivants.

• L'oxygène

Tableau III-10 : les paramètres du cycle en fonction de la pression intermédiaire

| P_2 | \dot{W}_c/\dot{m} [kJ/kg] | \dot{W}_c/\dot{m}_i [kJ/kg] | FOM | y |
|-------|-----------------------------|-------------------------------|---------|---------|
| 10 | 295,6912 | 2646,7168 | 0,23952 | 0,11172 |
| 20 | 263,7442 | 2453,8909 | 0,25834 | 0,10748 |
| 25 | 253,4314 | 2404,9288 | 0,26360 | 0,10538 |
| 30 | 245,092 | 2372,6234 | 0,26719 | 0,10330 |
| 40 | 231,9928 | 2339,1087 | 0,27102 | 0,09918 |
| 50 | 221,926 | 2332,6256 | 0,27177 | 0,09514 |
| 70 | 206,908 | 2369,8087 | 0,26751 | 0,08731 |
| 100 | 191,218 | 2508,4350 | 0,25273 | 0,07623 |
| 150 | 173,530 | 2898,9308 | 0,21868 | 0,05986 |

• L'azote

Tableau III-11 : les paramètres du cycle en fonction de la pression intermédiaire

| P_2 | \dot{W}_c/\dot{m} [kJ/kg] | \dot{W}_c/\dot{m}_i [kJ/kg] | FOM | y |
|-------|-----------------------------|-------------------------------|---------|---------|
| 10 | 346,8537 | 4307,1374 | 0,17679 | 0,08053 |
| 20 | 310,0574 | 4030,5074 | 0,18893 | 0,07692 |
| 25 | 298,2086 | 3967,1225 | 0,19195 | 0,07517 |
| 30 | 288,506 | 3928,4586 | 0,19384 | 0,07344 |
| 40 | 273,3794 | 3900,0452 | 0,19525 | 0,07009 |
| 50 | 261,6176 | 3912,3313 | 0,19463 | 0,06687 |
| 70 | 243,8636 | 4009,5955 | 0,18991 | 0,06082 |
| 100 | 224,9996 | 4266,2040 | 0,17849 | 0,05274 |
| 150 | 203,4176 | 4870,8778 | 0,15633 | 0,04176 |

Résultats et discussion

- L'argon

Tableau III-12 : les paramètres du cycle en fonction de la pression intermédiaire

| P_2 | \dot{W}_c/\dot{m} [kJ/kg] | \dot{W}_c/\dot{m}_l [kJ/kg] | FOM | y |
|-------|-----------------------------|-------------------------------|---------|---------|
| 10 | 237,1719 | 2180,0893 | 0,21802 | 0,10879 |
| 20 | 211,5141 | 2036,5311 | 0,23339 | 0,10386 |
| 25 | 203,3571 | 2005,0986 | 0,23705 | 0,10142 |
| 30 | 196,6341 | 1986,2032 | 0,23931 | 0,09900 |
| 40 | 186,2325 | 1976,5710 | 0,24047 | 0,09422 |
| 50 | 178,1457 | 1989,7880 | 0,23887 | 0,08953 |
| 70 | 166,2111 | 2065,7608 | 0,23009 | 0,08046 |
| 100 | 153,4791 | 2267,0475 | 0,20966 | 0,06770 |
| 150 | 139,3191 | 2847,3149 | 0,16693 | 0,04893 |

Pour mieux interpréter ces résultats, on va les représenter sur les graphes suivants :

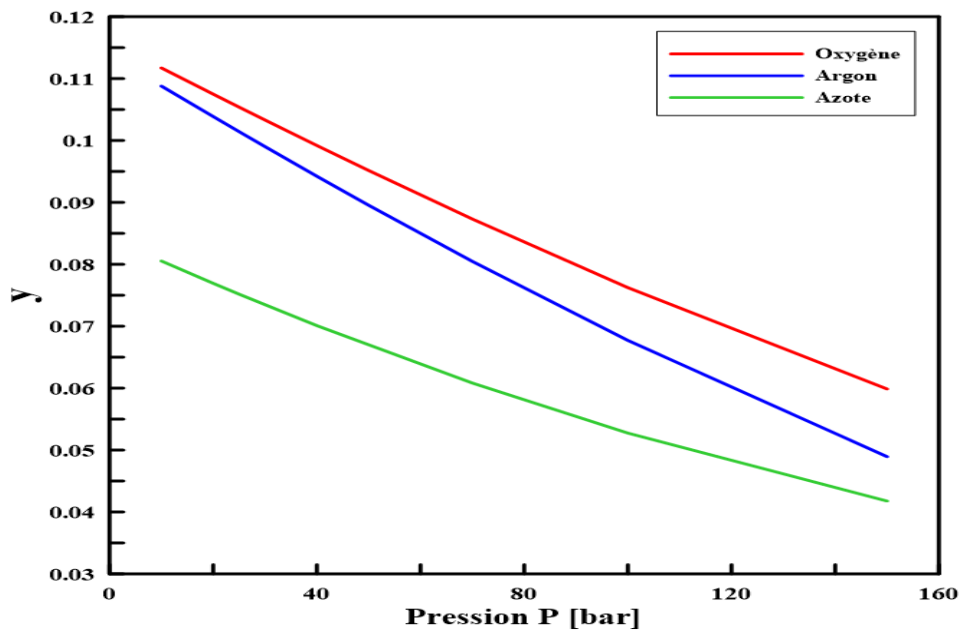


Figure III-13 : Evolution de la fraction en liquide de chaque fluide de travail en fonction de la pression intermédiaire

Selon la figure on constate pour les conditions de fonctionnement données que le taux de liquéfaction prend des valeurs faibles pour chaque fluide correspondant quand la pression intermédiaire augmente, autrement dit ; en augmentant la pression intermédiaire P_2 , le deuxième terme diminue de plus en plus, car l'enthalpie correspondante diminue pour chaque ajustement de P_2 . Dans ce cas l'oxygène présente le taux de liquéfaction maximale par rapport aux autres.

Résultats et discussion

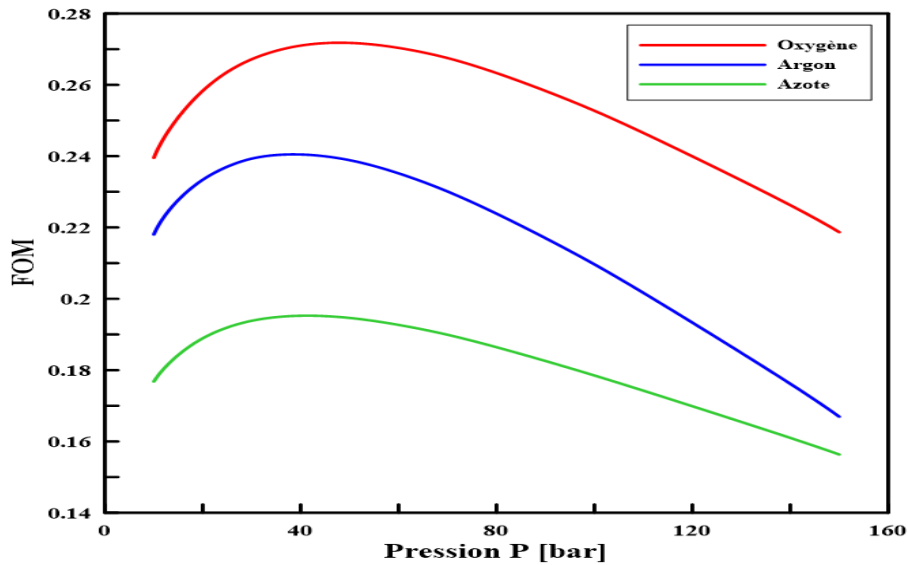


Figure III-14 : Profil de variation du facteur de mérite en fonction de la pression intermédiaire

La figure montre que le facteur de mérite FOM augmente avec l'augmentation de la pression intermédiaire, pour chaque fluide étudiés, augmente jusqu'à une valeur maximale correspondante à une pression intermédiaire donnée, puis diminue progressivement. Tel que les rendements optimaux sont respectivement : 27.17% pour l'oxygène, 24.04% pour l'argon et 19.52%.

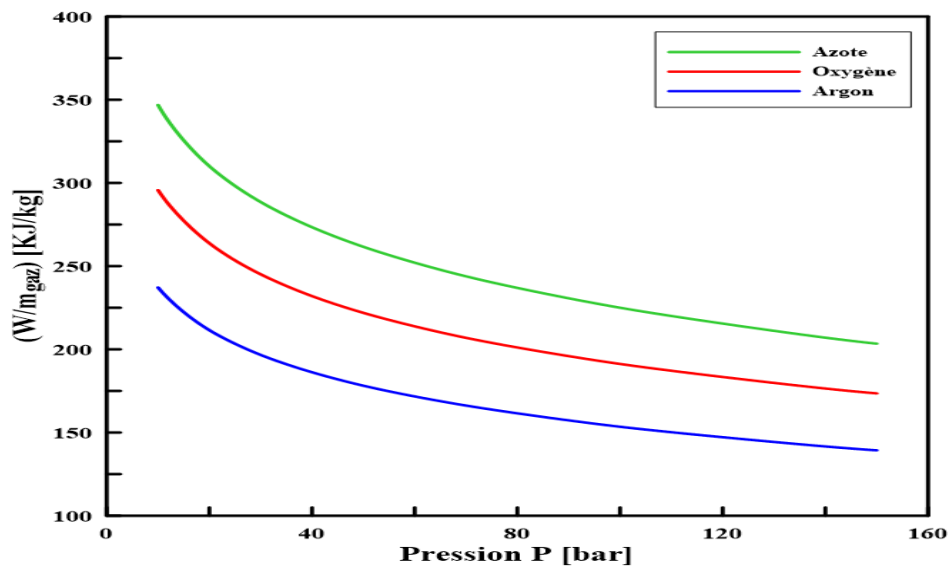


Figure III-15 : Profil de variation du travail par unité de masse de gaz comprimée en fonction de la pression intermédiaire

Suite aux résultats obtenus dans la figure précédente, on constate que pour chaque fluide de travail, on constate que l'énergie dépensée pour avoir la fraction liquide (y), diminue sans cesse en augmentant la pression intermédiaire P_2 .

Résultats et discussion

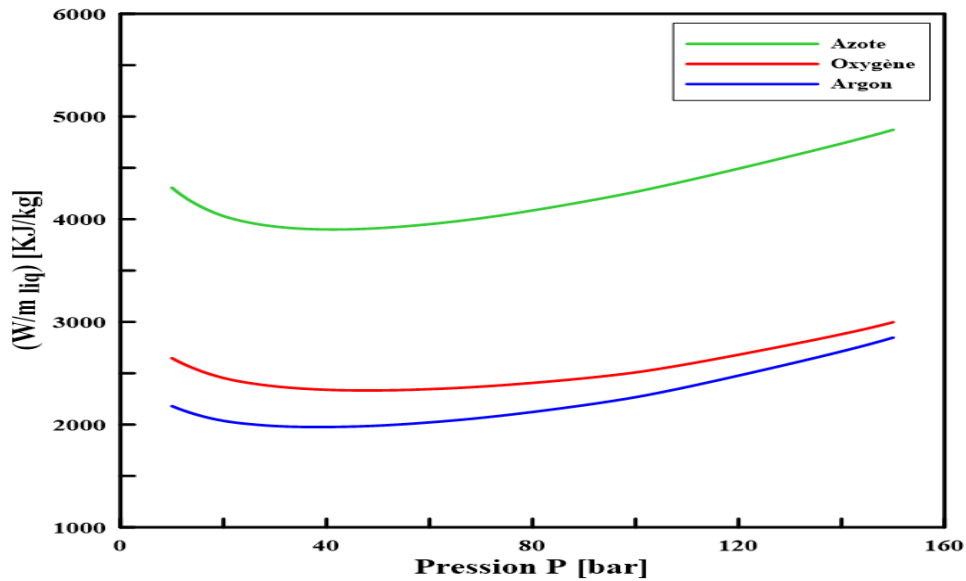


Figure III-16 : Profil de variation du travail par unité de masse liquéfiée en fonction de la pression intermédiaire

Dans ce procédé, sous les mêmes conditions de fonctionnement, on constate que lorsqu'on augmente la pression intermédiaire, l'énergie dépensée pour avoir 1kgliquide de chaque fluide diminue jusqu'à l'atteinte d'une valeur minimale correspondante à la pression de l'optimum de chaque fluide considéré, puis augmente à nouveau.

Discussion

Dans cette machine de Linde à étranglement double fonctionnant sous les conditions de $P_1 = 1bar, P_3 = 200bars$ et $T_1 = 300k$. Durant cette étude, on est arrivé à déterminer le point optimal pour chaque de chaque fluide de travail avec cette installation comme l'indique le tableau suivant :

| Cycles | T[k] | P[bar] | \dot{W}_c/\dot{m} [kJ/kg] | $[\dot{W}_{net}/\dot{m}_l]$ kJ/kg | FOM | Y |
|---------|------|--------|-----------------------------|-----------------------------------|---------|---------|
| Oxygène | 300 | 50 | 221,926 | 2332,6256 | 0,27177 | 0,09514 |
| Argon | 300 | 40 | 186,2325 | 1976,5710 | 0,24047 | 0,09422 |
| Azote | 300 | 40 | 273,3794 | 3900,0452 | 0,19525 | 0,07009 |

D'après les résultats obtenus, on remarque qu'un bon choix de la pression intermédiaire peut bien augmenter notre taux de liquéfaction et d'en améliorer la performance de notre installation considérée. Dans nos exemples :

Pour l'oxygène, on a pu avoir un meilleur rendement du cycle de 27.17% pour une pression de 50bars.

Résultats et discussion

Pour l'argon, on a pu obtenir un meilleur rendement de 24.04% pour une pression de 40bars.

Pour l'azote, on un meilleur rendement de 19.52% pour une pression intermédiaire de 50bars.

IV.4 Comparaison des trois cycles

La liquéfaction de chaque fluide considéré (oxygène, azote, argon) avec ces trois procédé de Linde, nous a conduit à avoir :

| Oxygène | FOM | Y |
|---------------------|---------|---------|
| Etranglement simple | 0,25299 | 0,19198 |
| Etranglement double | 0,27177 | 0,09514 |
| Pré-refroidissement | 0,55189 | 0,38046 |

| Azote | FOM | Y |
|---------------------|---------|---------|
| Etranglement simple | 0,16410 | 0,11763 |
| Etranglement double | 0,19525 | 0,07009 |
| Pré-refroidissement | 0,49026 | 0,31987 |

| Argon | FOM | Y |
|---------------------|---------|---------|
| Etranglement simple | 0,26642 | 0,21590 |
| Etranglement double | 0,24047 | 0,09422 |
| Pré-refroidissement | 0,70065 | 0,52662 |

Conclusion

En effet, d'après la littérature, la température d'ébullition de l'oxygène, l'azote et l'argon sont respectivement (-183°C), (-196°C) et (-186) sous la pression atmosphérique. La liquéfaction d'un gaz, consiste à le refroidir sous la pression atmosphérique jusqu'à sa température d'ébullition, ou en dessous de sa température critique à une pression plus élevée. Et pour cela, l'énergie dépensée pour réaliser ce refroidissement devient plus importante. Durant cette étude, d'un point de vu thermodynamique, le facteur de mérite permet de déterminer à quel point le cycle réel se rapproche du cycle idéal.

On constate que ce procédé de Linde avec pré-refroidissement fonctionnant entre une pression de 1bar et 200bar et une température de compression de 27°C, nous a permet d'atteindre un meilleur rendement thermodynamique avec chaque fluide de travail ; 70% avec l'argon, 55% avec l'oxygène et 49% avec l'azote. Cela dit, qu'on a pu enfin obtenir avec cette simple installation 38.04g d'oxygène liquide sur 100g d'oxygène gazeux, 31.98g d'azote liquide sur 100g d'azote gazeux et 52.66g d'argon liquide sur 100g d'argon gazeux.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les cycles de liquéfaction de Linde sont parmi les procédés les plus performants dans le domaine de la liquéfaction des gaz. Dans l'industrie, le coût des liquides cryogènes reste très élevé dû à la difficulté de les liquéfier et à l'énergie dépensée durant cette opération. Cette étude nous a permis de nous familiariser avec ces procédés de séparation de l'air de ces composants essentiels ; l'oxygène, l'azote et l'argon, dont on a pris comme exemples des fluides de travail. Il existe cependant des questions sur la pénalité d'efficacité de ces installations que l'on doit subir pour obtenir un fonctionnement plus fiable.

L'analyse énergétique de ces systèmes, nous a permis de localiser certains paramètres de fonctionnement, dont leurs variations influent sur l'efficacité de ces installations et de prévoir aussi les meilleures conditions de fonctionnement conduisant à un rendement optimal.

Pour le cycle de Linde simple, lorsque la pression de compression augmente, le rendement augmente de plus en plus jusqu'à une valeur de celle-ci correspondante à un point optimal, puis il diminue au-delà de cette pression. Et la diminution de la température de compression, nous a permis d'optimiser encore cette installation, avec une amélioration du rendement de 1,52% de plus. Pour le procédé à étranglement double, le cycle fonctionne entre trois paliers de pression. Lorsqu'en augmentant la pression intermédiaire, le rendement du cycle augmente pour un optimum correspondant à une valeur donnée pour cette pression, puis diminue. Le procédé avec pré-refroidissement est composé d'une machine de liquéfaction et d'une machine frigorifique préservée pour ce pré-refroidissement extérieur. Lorsqu'on augmente le rapport des débits des fluides traversant chaque machine, les quantités liquides produites augmentent fortement avec une meilleure performance indiquée par les rendements obtenus pour chaque fluide de travail.

L'objectif durant cette étude est de produire un maximum du liquide en dépensant moins d'énergie. Les meilleures conditions de fonctionnement pour la liquéfaction de ces composants de l'air considérés, sont caractérisées par un point optimal correspondant à la valeur maximale du facteur de mérite, qui détermine à quel point le cycle réel se rapproche du cycle idéal.

Référence bibliographique

- [1] R.R. Conte, *Eléments de cryogénie*, Masson et cie, (1970).
- [2] J. G. Weisend, *Handbook of Cryogenic Engineering* (1998)
- [3] K.D.Williamson, F.J.EDESKUTY, *Liquid Cryogens. VolII: Theory and Equipment Vol III Properties and Applications* CRC Press. Inc (1983)
- [4] R.R. Conte, *Eléments de cryogénie*, Masson et Cie (1970).
- [5] R. F. Barron, *Cryogenic Systems* (second edition)
- [6] G. Perinić, G. Vandoni, T.Niinikoski, *Cern Introduction to Cryogenic Engineering*(2005)
- [7] P. Lebrun, *Cryophysique et Cryo-ingénierie* .CERN, Organisation européenne Pour la Recherche Nucléaire, *Bulletin de l' IIF* (2003).
- [8] A. Djelloul, 'simulation de cycle de Claude pour la liquéfaction de l'air, de l'azote et de l'oxygène', mémoire magister, Alger (2006), Constantine.
- [9] J. C. Boissin et al. *Cryogénie : mise en œuvre des basses températures*, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie énergétique
- [10] A. Arkharon *Theory and design of cryogenic systems* (1981).
- [11] M. D'Arsonval. *L'air liquide*. *J. Phys. Theor. Appl*, 1898, 7 (1), pp. 497-504.
<10.1051/jphystap: 018980070049700>. < Jpa-00240244 >.
- [12] Mémoire de fin d'étude « séparation cryogénique de l'air » réalisé par : Medjdoul hamza et Chekroune Sofiane 2015.
- [13] I.U.T. de Saint-Omer Dunkerque Département Génie Thermique et énergie
- [14] Y.Cengel, *Thermodynamique une approche pragmatique*,(2009)

Annexe

Etat thermodynamique de l'oxygène surchauffé :

| T [K] | P[bar] | h[kJ/kg] | S[kJ/kg] |
|-------|--------|----------|----------|
| 300 | 1 | 1,540 | 5,138 |
| | 10 | -1,062 | 4,533 |
| | 20 | -3,917 | 4,346 |
| | 25 | -5,329 | 4,284 |
| | 30 | -6,730 | 4,233 |
| | 40 | -9,498 | 4,151 |
| | 50 | -12,22 | 4,086 |
| | 70 | -17,49 | 3,985 |
| | 100 | -24,94 | 3,873 |
| | 150 | -35,96 | 3,738 |
| | 200 | -45,13 | 3,639 |
| | 300 | -58,28 | 3,496 |
| | 400 | -66,02 | 3,397 |
| | 500 | -70,12 | 3,322 |
| | 600 | -71,77 | 3,264 |
| 650 | -71,94 | 3,239 | |
| 750 | -71,30 | 3,195 | |

| T [K] | P[bar] | h[kJ/kg] | S[kJ/kg] |
|-------|--------|----------|----------|
| 310 | 1 | 10,72 | 5,168 |
| 305 | | 6,130 | 5,163 |
| 300 | | 1,540 | 5,138 |
| 298 | | 0,2943 | 5,132 |
| 294 | | -3,962 | 5,119 |
| 292 | | -5,794 | 5,113 |
| 290 | | -7,626 | 5,107 |

| T [K] | P[bar] | h[kJ/kg] | S[kJ/kg] |
|-------|--------|----------|----------|
| 310 | 500 | -45,47 | 3,538 |
| 305 | | -51,84 | 3,517 |
| 300 | | -70,12 | 3,322 |
| 298 | | -72,75 | 3,313 |
| 294 | | -78,05 | 3,295 |
| 292 | | -80,71 | 3,286 |
| 290 | | -83,38 | 3,277 |

Etat thermodynamique de l'oxygène saturé (liquide) :

| T [K] | P[bar] | h[kJ/kg] | S[kJ/kg] |
|-------|--------|----------|----------|
| 90 | 1 | -402,2 | 1,679 |

| T[K] | P[bar] | h[kJ/kg] | S[kJ/kg] |
|------|--------|----------|----------|
| 300 | 1 | 1,811 | 5,296 |
| | 10 | -0,5803 | 4,606 |
| | 20 | -3,153 | 4,393 |
| | 25 | -4,405 | 4,323 |
| | 30 | -5,634 | 4,265 |
| | 40 | -8,023 | 4,173 |
| | 50 | -10,32 | 4,100 |
| | 70 | -14,63 | 3,987 |
| | 100 | -20,39 | 3,863 |
| | 150 | -28,22 | 3,717 |
| | 200 | -34,07 | 3,611 |
| | 300 | -41,13 | 3,460 |
| | 400 | -43,84 | 3,354 |
| | 500 | -43,71 | 3,273 |
| | 600 | -41,68 | 3,209 |
| 650 | -40,15 | 3,181 | |
| 750 | -36,29 | 3,132 | |

Etat thermodynamique de l'azote surchauffé :

| T[K] | P[bar] | h[kJ/kg] | S[kJ/kg] |
|------|--------|----------|----------|
| 310 | 1 | 12,24 | 5,331 |
| 305 | | 7,025 | 5,314 |
| 300 | | 1,811 | 5,296 |
| 298 | | -0,2738 | 5,289 |
| 294 | | -4,441 | 5,275 |
| 292 | | -6,523 | 5,268 |
| 290 | | -8,605 | 5,261 |

| T[K] | P[bar] | h[kJ/kg] | S[kJ/kg] |
|------|--------|----------|----------|
| 310 | 500 | -29,96 | 3,319 |
| 305 | | -36,82 | 3,296 |
| 300 | | -43,71 | 3,273 |
| 298 | | -46,48 | 3,275 |
| 294 | | -52,04 | 3,245 |
| 292 | | -54,82 | 3,236 |
| 290 | | -57,62 | 3,226 |

Etat thermodynamique de l'azote saturé (liquide) :

| T[K] | P[bar] | h[kJ/kg] | S[kJ/kg] |
|------|--------|----------|----------|
| 77 | 1 | -425,9 | 1,332 |

| T[K] | P[bar] | h[kJ/kg] | S[kJ/kg] |
|------|--------|----------|----------|
| 300 | 1 | 0,8122 | 3,009 |
| | 10 | -1,228 | 2,524 |
| | 20 | -3,465 | 2,374 |
| | 25 | -4,570 | 2,325 |
| | 30 | -5,665 | 2,284 |
| | 40 | -7,829 | 2,219 |
| | 50 | -9,951 | 2,167 |
| | 70 | -14,06 | 2,087 |
| | 100 | -19,84 | 1,997 |
| | 150 | -28,34 | 1,890 |
| | 200 | -35,34 | 1,811 |
| | 300 | -45,23 | 1,699 |
| | 400 | -50,88 | 1,621 |
| | 500 | -53,71 | 1,562 |
| | 600 | -54,65 | 1,516 |
| 650 | -54,62 | 1,497 | |
| 750 | -53,80 | 1,462 | |

Etat thermodynamique de l'argon surchauffé :

| T[K] | P[bar] | h[kJ/kg] | S[kJ/kg] |
|------|--------|----------|----------|
| 310 | 1 | 6,027 | 3,026 |
| 305 | | 3,420 | 3,017 |
| 300 | | 0,8122 | 3,009 |
| 298 | | -0,2309 | 3,005 |
| 294 | | -2,317 | 2,998 |
| 292 | | -3,360 | 2,995 |
| 290 | | -4,403 | 2,991 |

| T[K] | P[bar] | h[kJ/kg] | S[kJ/kg] |
|------|--------|----------|----------|
| 310 | 500 | -45,63 | 1,589 |
| 305 | | -49,65 | 1,576 |
| 300 | | -53,71 | 1,562 |
| 298 | | -55,34 | 1,557 |
| 294 | | -58,63 | 1,546 |
| 292 | | -60,28 | 1,540 |
| 290 | | -61,94 | 1,534 |

Etat thermodynamique de l'argon saturé (liquide) :

| T[K] | P[bar] | h[kJ/kg] | S[kJ/kg] |
|------|--------|----------|----------|
| 87 | 1 | -270,9 | 0,5189 |

Résumé :

La cryogénie est la branche de l'ingénierie consacrée aux applications de réfrigération à très basses températures, telle que la liquéfaction des gaz. L'énergie requise durant ce processus demeure importante, et la difficulté de les liquéfier fait en sorte que le coût de ces vecteurs énergétiques reste très élevé.

L'objectif de ce travail est l'étude thermodynamique et énergétique des différentes étapes du procédé de liquéfaction et la séparation des composants de l'air (oxygène, azote et l'argon) et la recherche de certains paramètres appliqués sur les différents cycle de Linde pour obtenir un meilleur rendement et de prévoir une bonne efficacité de ces cycles dont le but de dépensée moins d'énergie pour un maximum du produit liquéfié.

Summary:

Cryogenics is the branch of engineering applied to refrigeration at very low temperatures, such as liquefaction of gases. The energy required during this process remains important, and the difficulty of liquefying them means that the cost of these energy carriers remains very high.

The objective of this work is the thermodynamic and energetic study of the various stage of the liquefaction process and the separation of air components (oxygen, nitrogen and argon) and the search for certain parameters applied to the different cycles of Linde, to get better performance and predict a good efficiency of these cycles whose purpose of spending less energy for a maximum of liquefied product.