

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 : ÉNERGÉTIQUE

PAR :

BOULAICHE MOKRANE

AZEGGAGH BOUSSAAD

Thème

Etude énergétique d'un
liquéfacteur de gaz de type Claude

Soutenu le 21/09/2020 devant le jury composé de:

Mr. A.BENSLIMANE

Président

Mr. F.MENDIL

Rapporteur

Mr. A.SAHI

Examineur

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2019-2020

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Populaire et Démocratique Algérienne République

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

Déclaration sur l'honneur

Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 933 du 28 juillet 2016(*) fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom :

Prénom :

Matricule :

Spécialité et/ou Option :

Département :

Faculté :

Année universitaire :/.....

et chargé de préparer un mémoire de (*Licence, Master, Autres à préciser*) :

Intitulé:

.....

.....

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le

...../...../.....

Signature de l'intéressé

(*) Lu et approuvé

.....

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Populaire et Démocratique Algérienne République

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

Déclaration sur l'honneur

Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 933 du 28 juillet 2016(*) fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom :

Prénom :

Matricule :

Spécialité et/ou Option :

Département :

Faculté :

Année universitaire :/.....

et chargé de préparer un mémoire de (*Licence, Master, Autres à préciser*) :

Intitulé:

.....

.....

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le

...../...../.....

Signature de l'intéressé

(*) Lu et approuvé

.....

REMERCIEMENT

Remerciements

À l'issue de cet humble travail, on commence par remercier Dieu tout-puissant qui nous a donné la force nécessaire à sa réalisation ainsi que nous familles qui grâce à leurs soutiens et encouragement, on est arrivés à achever nos études.

On remercie profondément notre encadreur monsieur Mendil fatsah d'avoir accepté de nous encadrer et de corriger notre travail ainsi que pour sa disponibilité ses réponses et suggestions tout le long de notre recherche.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements aux membres de jurés qui ont accepté d'examiner et de juger notre travail.

Nous tenons aussi à exprimer notre profonde reconnaissance à toute l'équipe de formation de département génie mécanique de l'université de Bejaïa pour leur professionnalisme et leur disponibilité tout au long de nos années de scolarité.

Dédicaces

Dédicace

Je dédie ce travail.

À mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

À mes chères sœurs Tiziri et Inas pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral.

À mon cher frère, Nassim pour son appui et son encouragement,
À toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

À mes amis, mon binôme et mes copains de la section énergétique.

À tous les enseignants et toute la famille universitaire de Bejaia.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infaillible.

Merci d'être toujours là pour moi.

Mokrane

Dédicace

Je dédie ce travail.

À mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

À mes chères sœurs Farida, Hakima, Kahina, Rosa, Lila, pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral.

À mes chers frères, Lahcene, Mohand, Amokrane, pour leurs appuis et leurs encouragements.

À toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

À mes amis, mon binôme et mes copains de la section énergétique.

À tous les enseignants et toute la famille universitaire de Bejaia.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infaillible.

Merci d'être toujours là pour moi.

Boussaad

Sommaire

Sommaire

| | |
|--|-------------|
| Remerciements | i |
| Dédicaces | ii |
| Sommaire | iv |
| NOMENCLATURE | vii |
| Liste des figures et des tableaux | viii |
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre I : Notions sur la cryogénie | |
| I.1. Introduction | 3 |
| I.2. Les principaux contributeurs à la technologie cryogénique | 3 |
| I.3. Les applications de la cryogénie | 5 |
| I.4. Définition de la réfrigération et la liquéfaction | 6 |
| I.4.1. Définition de la réfrigération | 6 |
| I.4.2. La liquéfaction | 6 |
| I.4.3. Importance et utilisation des gaz liquéfiés | 7 |
| I.5. Propriétés de l'hélium | 8 |
| I.6. Liquéfaction des gaz | 9 |
| I.6.1. Principes de liquéfaction | 10 |
| I.6.2. Le coefficient Joule-Thomson | 11 |
| Chapitre II : Les cycles de liquéfaction | |
| II.1. Les méthodes de liquéfaction | 13 |
| II.1.1 Compression de la vapeur | 13 |
| II.1.2. Compression de la vapeur en cascade | 14 |
| II.2. Systèmes de liquéfaction | 15 |
| II.2.1. Procédé à détente isentropique | 15 |
| II.2.1.1 Cycle de Brayton inverse | 16 |

| | |
|--|----|
| II.2.2. Cycle de Claude | 17 |
| II.2.3. Cycle de Claude modifié (Collins) | 18 |
| II.3. Equipements utilisés | 19 |
| II.3.1. Compresseurs cryogéniques | 19 |
| II.3.2. Les échangeurs | 19 |
| II.3.3. Régénérateurs | 19 |
| II.3.4. Machines de détente cryogénique | 20 |
| II.3.5. Autres composants | 20 |
| Chapitre III : Etude thermodynamique des cycles de liquéfaction de type Claude | |
| III.1. Relations thermodynamiques utiles | 21 |
| III.2. Bilan énergétique d'un cycle idéal de liquéfaction | 22 |
| III.3. Etude énergétique de cycle de liquéfaction de Claude à une seule détente | 24 |
| III.4. Etude énergétique de cycle de liquéfaction de Claude modifié ou Collins | 27 |
| Chapitre IV : Résultats et discussion | |
| IV.1. Analyse thermodynamique du cycle de Claude simple | 31 |
| IV.1.1. Influence de la température T_3 et du rapport de la fraction massique X_1 sur les paramètres du cycle de Claude | 33 |
| Discussion | 36 |
| IV.1.2. Influence du rendement de détente η et du rapport de la fraction massique X_1 sur les paramètres du cycle de Claude | 37 |
| Discussion | 40 |
| IV.2. Analyse thermodynamique de cycle de Claude modifié (Collins) | 42 |
| IV.2.1. Influence du rapport de la fraction massique X_1 et X_2 sur les paramètres du cycle de Claude modifié | 44 |
| Discussion | 47 |
| IV.2.2. Influence du rapport X_1 et de la température T_4 sur les paramètres du cycle de Claude modifié | 48 |
| Discussion | 50 |

| | |
|--|-----------|
| Conclusion générale | 52 |
| Référence bibliographique | 53 |
| Annexes | 54 |
| Résumé/Abstract | |

Nomenclature

NOMENCLATURE

Lettres Latines non indicées

| Symboles | Définition | Unité (SI) |
|-----------------------------------|--|------------|
| C_p | : La chaleur spécifique du gaz à pression constant | [kJ/kg.K] |
| E_c | : Energie cinétique | [kJ] |
| E_p | : Energie potentielle | [kJ] |
| E_T | : Energie totale | [kJ] |
| FOM | : Facteur de mérite | - |
| h | : Enthalpie massique | [kJ/kg] |
| h_l | : Enthalpie massique de liquide | [kJ/kg] |
| h_g | : Enthalpie massique de gaz | [kJ/kg] |
| \dot{m}_{e1} | : Débit massique traversant la turbine 1 | [kg/s] |
| \dot{m}_{e2} | : Débit massique traversant la turbine 2 | [kg/s] |
| \dot{m}_l | : Débit massique du gaz liquéfié | [kg/s] |
| \dot{m} | : Débit massique de gaz | [kg/s] |
| Q | : Chaleur massique | [kJ/kg] |
| \dot{Q} | : Puissance thermique | [kW] |
| S | : Entropie massique | [kJ/kg.K] |
| S_l | : Entropie massique du liquide | [kJ/kg.K] |
| T | : Température | [K] |
| W | : Travail massique | [kJ/kg] |
| W_e | : Travail massique de la turbine | [kJ/kg] |
| W_c | : Travail massique du compresseur | [kJ/kg] |
| \dot{W} | : Puissance mécanique | [kW] |
| $\frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}}$ | : Travail net par unité de masse du gaz Comprimé | [kJ/kg] |
| $\frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_l}$ | : Travail net par unité de masse du gaz liquéfié | [kJ/kg] |
| X_1 | : La fraction massique traversant la turbine 1 | - |
| X_2 | : La fraction massique traversant la turbine 2 | - |

| | | |
|-----|---------------------------|---------|
| y | : Le taux de liquéfaction | - |
| U | : Energie interne | [kJ/kg] |

Lettres Grec

| Symboles | Définition | Unité (SI) |
|-----------------|--------------------------------|-------------------|
| μ_{J-T} | : Coefficient de Joule-Thomson | - |
| η | : Rendement de la détente | - |

Liste des figures et tableaux

Liste des figures et tableaux

Chapitre I

| | |
|--|----|
| Figure I.1 : Cycles de réfrigération et liquéfaction | 7 |
| Figure I.2 : Diagramme de phase de ^4He | 9 |
| Figure I.3 : La courbe d'inversion Joule-Thomson pour certains gaz courants. | 12 |
| Tableau I.1 : Température d'inversion maximale | 11 |

Chapitre II

| | |
|--|----|
| Figure II.1 : Réfrigérateur à vapeur comprimée | 13 |
| Figure II.2 : Réfrigérateur à vapeur comprimée en cascade | 14 |
| Figure II.3 : Réfrigérateur à expansion isentropique | 15 |
| Figure II.4 : Un réfrigérateur isobare (cycle de Brayton inversé) | 16 |
| Figure II.5 : Le cycle de Claude : une combinaison de Joule-Thomson et d'expansion adiabatique. | 17 |
| Figure II.6 : Le cycle de Claude modifié et son diagramme (T-S) | 18 |

Chapitre III

| | |
|--|----|
| Figure III.1 : Système thermodynamique idéal de liquéfaction | 22 |
| Figure III.2 : Le cycle Claude à une seule détente | 24 |
| Figure III.3 : Le Cycle de Claude avec 2 détentes isentropiques | 27 |

Chapitre IV

| | |
|--|----|
| Figure IV-1 : Le taux de liquéfaction en fonction de la Température T_3 et le rapport de la fraction massique X_1 | 33 |
| Figure IV-2 : Le facteur de mérite FOM en fonction de la température T_3 et le rapport de la de la fraction massique X_1 | 34 |
| Figure IV-3 : Le travail par unité de masse de gaz comprimée en fonction de la température T_3 et le rapport de la fraction massique X_1 | 34 |

Figure IV-4 : Le travail par unité de masse de gaz liquéfiée en fonction de la température T_3 et le rapport de la fraction massique X_1 35

Figure IV-5 : Le taux de liquéfaction en fonction de rendement de la détente η et le rapport de la fraction massique X_1 37

Figure IV-6 : Le facteur de mérite en fonction de rendement de la détente η et le rapport de la fraction massique X_1 38

Figure IV-7 : Le travail par unité de masse de gaz comprimée en fonction de rendement de la détente η et le rapport de la fraction massique X_1 39

Figure IV-8 : Le travail par unité de masse de gaz liquéfiée en fonction de rendement de la détente η et le rapport de la fraction massique X_1 39

Figure IV-9 : la fraction totale du flux de gaz liquéfié en fonction du rapport de la fraction massique X_1 pour différentes valeurs du rapport de la fraction massique X_2 44

Figure IV-10 : Facteur de mérite FOM en fonction du rapport de la fraction massique X_1 pour différentes valeurs du rapport de la fraction massique X_2 45

Figure IV-11 : Travail net requis par unité de gaz comprimé en fonction du rapport de la fraction massique X_1 pour différentes valeurs du rapport de la fraction massique X_2 45

Figure IV-12 : Travail net par unité de masse de gaz liquéfiée en fonction du rapport de la fraction massique X_1 pour différentes valeurs du rapport de la fraction massique X_2 46

Figure IV-13 : la fraction totale du flux de gaz liquéfié en fonction du rapport de la fraction massique X_1 pour des différentes valeurs de température T_4 48

Figure IV-14 : Facteur de mérite FOM en fonction du rapport de la fraction massique X_1 pour des différentes valeurs de température T_4 49

Figure IV-15 : Travail net requis par unité de gaz comprimé en fonction du rapport de la fraction massique X_1 pour des différentes valeurs de température T_4 49

Figure IV-16 : Travail net par unité de masse de gaz liquéfiée en fonction du rapport de la fraction massique X_1 pour différentes valeurs de température T_4 50

Introduction Générale

La cryogénie est la science qui s'intéresse à la production et aux effets de très faibles températures. Le mot vient du grec "kryos" qui signifie "gel" et "genic" signifiant "produire". Selon cette définition, elle pourrait être utilisée pour inclure toutes les températures inférieures au point de congélation de l'eau (0° C). Toutefois, le prof Kamerlingh Onnes de l'Université de Leiden aux Pays-Bas a été le premier à utiliser le mot en 1894 pour décrire l'art et la science de produire des températures beaucoup plus basses. Il a utilisé ce mot en référence à la liquéfaction de gaz permanents tels que l'oxygène, l'azote, l'hydrogène et l'hélium. [1]

La liquéfaction de l'hélium au début du XXe siècle a été un événement crucial dans l'histoire de la physique. D'une part, l'histoire des efforts qui se sont étendus sur plus de deux cents ans sur la liquéfaction des gaz dits "permanents" s'est achevée avec elle. D'autre part, sa réalisation a contribué de manière décisive à la découverte de la supraconductivité et de la superfluidité dans les décennies suivantes, avec une grande variété de développements ultérieurs en matière de la recherche scientifique et les technologies importantes avec de large les utilisations commerciales et militaires. Dès ses premières années, le comportement particulier de l'hélium liquide a commencé à fasciner et de l'intérêt des scientifiques et des profanes, qui a suscité l'intérêt des recherches lié à la physique des solides et des matériaux. Aujourd'hui, l'hélium est un matériau d'une importance stratégique, et sa gamme liquide de basses températures a considérablement augmenté ses applications en cryo-technologie.

La liquéfaction de l'hélium peut parfaitement être considérée comme le début définitif de la cryogénie. Bien qu'il soit vrai que les premiers développements techniques remontent à la seconde moitié du XIXe siècle, et qu'il soit généralement admis que la cryogénie "est née" avec la liquéfaction simultanée mais indépendante de l'oxygène par l'ingénieur minier français Louis Paul Cailletet (1832-1913) et le physicien suisse Raoul Pierre Pictet (1846-1929) en 1877, c'est avec l'approvisionnement en hélium liquide qu'ont débuté les grandes réalisations de la physique des basses températures. [2]

L'expertise dans le domaine de l'ingénierie cryogénique est demandée dans une grande variété de domaines techniques, notamment les technologies avancées de production et de stockage de l'énergie, les programmes de transport et les programmes spatiaux, ainsi qu'une grande variété d'efforts de recherche en physique et en ingénierie. Par conséquent, le domaine est très interdisciplinaire et comprend essentiellement tous les domaines de l'ingénierie axés sur la technologie des basses températures. Au fil des ans, le mot cryogénie a développé plusieurs usages

communs. Un fluide cryogénique est un fluide utilisé dans la production de froid, tandis que les machines cryogéniques sont le matériel utilisé pour obtenir des environnements à basse température. Au début, il semblerait que toutes les machines et tous les fluides utilisés dans le refroidissement soient identifiés comme cryogéniques. Cependant, il est généralement admis que le mot cryogénie est réservé aux processus qui se déroulent en dessous d'environ 120 °K. [3]

Les différents cycles cryogéniques comme le cycle de Linde, le cycle de Claude, le cycle de Collins, etc. régissent la liquéfaction de divers gaz industriels comme l'air, l'azote, l'hélium, etc. Le travail suivant vise à étudier le cycle Claude pour la liquéfaction de l'air et le cycle de Claude modifié (Collins) pour la liquéfaction de l'hélium. Nous disposons des conditions et des variables de fonctionnement qui peuvent être résolues numériquement ainsi que les propriétés thermodynamiques des gaz à liquéfier.

On essayera à répondre à la question majeure posée dans le domaine, comment peut-on avoir le maximum de gaz liquéfié avec un minimum de travail dépensé, pour permettre la diminution des coûts d'investissement et d'exploitation, et de définir l'état de fonctionnement des cycles étudiés et les améliorations possibles pour une performance optimale des cycles.

Notre travail se partage en quatre chapitres, initié par une introduction générale où on définit les aspects globaux de la cryogénie et les objectifs attendus de notre étude.

Le chapitre I intitulé notions sur la cryogénie où on développe profondément la notion de la cryogénie et ces principaux contributeurs ainsi que les domaines d'application.

Le chapitre II est une démonstration des différents cycles de liquéfaction et les paramètres qui les influencent, avec des définitions et des schémas, on essaie de donner une approche du domaine au lecteur.

Dans le chapitre III ; nous étudions thermodynamiquement les deux cycles de Claude simple et modifié puis, on présente les principes de fonctionnement des cycles et on définit mathématiquement les équations qui permettent l'étude des deux cycles.

Le chapitre IV est consacré aux résultats trouvés après les calculs et leurs présentations sous forme de courbes qu'on a commentées et discutées.

Enfin, on termine par une conclusion générale où on donne notre point de vue sur les résultats et les aboutissements possibles de l'étude.

Chapitre I

Notions sur la cryogénie

Notions sur la cryogénie

I.1. Introduction

La cryogénie, une branche de la physique des basses températures qui s'intéresse aux effets des très basses températures, elle a été étudiée pour la première fois par Michael Faraday, qui a démontré que les gaz pouvaient être liquéfiés, ce qui permettait de produire des basses températures d'environ 173 °K. La technologie cryogénique a été largement reconnue au cours des années 1960, notamment en ce qui concerne les techniques cryogéniques, les configurations des installations de refroidissement et les applications. Des questions et des aspects critiques de la conception, notamment la liquéfaction de l'hélium liquide, les conteneurs cryogéniques isolés, l'amélioration des roulements à basse température, les techniques d'étanchéité et de lubrification, la technologie de la supraconductivité, les effets magnétohydrodynamiques et les applications industrielles à grande échelle, ont été sérieusement pris en considération. [3]

À des températures supérieures à la valeur du point critique, une substance n'existe qu'en phase gazeuse. Les températures critiques de l'hélium, de l'hydrogène et de l'azote (trois gaz liquéfiés couramment utilisés) sont respectivement de -268, -240 et -147 °C. Par conséquent, aucune de ces substances n'existe sous forme liquide dans les conditions atmosphériques. En outre, des températures basses de cette ampleur ne peuvent pas être obtenues par les techniques de réfrigération ordinaires. La question à laquelle il faut répondre dans la liquéfaction des gaz est donc la suivante : comment pouvons-nous abaisser la température d'un gaz en dessous de sa valeur au point critique ? Plusieurs cycles, certains complexes et d'autres simples, sont utilisés avec succès pour la liquéfaction des gaz. [4]

Nous allons aborder les différents cycles durant notre mémoire, en se basant sur les cycles de Claude.

I.2. Les principaux contributeurs à la technologie cryogénique

Parmi les principaux contributeurs à la technologie cryogénique, on peut citer cinq éminents physiciens et chimistes, à savoir Andrews, C. de la Tour, Faraday, Joule et Thomson. Entre 1820 et 1870, ces deux derniers ont démontré la dépendance de l'énergie du gaz à la pression et à la température de fonctionnement. Un physicien anglais, Dewar, a liquéfié de l'hydrogène pour la première fois en 1898 ; et un physicien néerlandais, Kameflingh-Onnes, a liquéfié de l'hélium pour la première fois en 1908 [5].

Tandis que Faraday s'occupait d'expériences de liquéfaction de gaz, les frères Stirling de Scotland, ont mis au point un moteur à air chaud sophistiqué au cours des années 1825 à 1840. Lorsque ce moteur s'est inversé et a été utilisé en tant que moteur à chaleur, il a conduit à d'autres développements cryogéniques importants. Au début des années 1860. Vers 1880, des systèmes de condensation de l'ammoniac plus compacts et plus efficaces ont été mis au point. Des scientifiques néerlandais, dont Kohler et d'autres ont essayé d'améliorer les performances du refroidisseur du Kirk en utilisant un liquéfacteur d'air efficace mis au point entre 1948 et 1954, qui a fourni la capacité de réfrigération dans la gamme des 20 °K. Le cycle Kirk a été modifié par la suite par Gifford et McMahon (G-M) en 1959 à l'aide d'un système situé à distance et composé d'un compresseur, d'un régénérateur et d'un dispositif d'expansion. Les machines à glace utilisées par le médecin de Floride Gorrie ont conduit au développement du moteur d'expansion et de l'échangeur de chaleur à contre-courant, qui se sont révélées d'une importance significative en cryogénie.

Après 40 ans, entre 1899 et 1902, le scientifique Claude a réussi à liquéfier l'air en utilisant une version améliorée du moteur développé par Gorrie. Ce retard de 40 ans est dû au manque d'intérêt scientifique pour atteindre des températures très basses au milieu du 19^{ème} siècle.

Le cycle de Linde simple, basé sur l'effet Joule-Thomson (J-T), était employé à la liquéfaction de l'air vers 1895 par d'éminents scientifiques, dont Linde, Hampson, Dewar et Kamerlingh-Onnes. Dewar a utilisé le système Linde pour liquéfier l'hydrogène gazeux en 1898. Le pré refroidissement de l'air liquide abaissé la température de l'hydrogène en dessous du point d'inversion de la température. Il est important de mentionner que le premier gaz hélium liquéfié de Kamerlingh-Onnes en 1908 en utilisant cette méthode. La très faible température d'inversion de l'hélium (32 °K) a nécessité un pré refroidissement à l'aide d'hydrogène liquide.

Claude a encore amélioré ce cycle de réfrigération, et il a été utilisé avec succès pour démontrer la capacité de liquéfaction de l'air en 1902. Claude a conçu des moteurs à expansion d'hydrogène utilisant la technique d'expansion isenthalpique au cours des années 1920 pour produire des températures cryogéniques en dessous du niveau de l'air liquide. Il est intéressant de mentionner que la première utilisation de l'hélium par Kapitza comme fluide de travail (1934) a été la contribution la plus significative à l'art de l'échangeur de chaleur J-T pour refroidir davantage le flux d'hélium comprimé déjà refroidi par l'hélium expansé du moteur J-T. En 1946, Collins a fait la démonstration du liquéfacteur d'hélium avec expansion isentropique de l'hélium à deux niveaux de température, éliminant ainsi le besoin de pré-refroidisseurs dans la liquéfaction de l'hélium. [5]

I.3. Les applications de la cryogénie [6]

Les applications de la technologie cryogénique varient largement :

1- Systèmes de propulsion des fusées : les fluides cryogéniques sont utilisés en raison de l'impulsion spécifique élevée (poussée par unité de débit massique) qui peut être obtenue avec la combinaison hydrogène - oxygène.

2- Industrie de l'acier : l'oxygène est nécessaire dans le processus de fabrication de l'acier, et la production économique d'oxygène dans les volves permet la séparation de l'air dans un système cryogénique. Dans le procédé à ciel ouvert, l'utilisation classique de l'air comme gaz au-dessus de la charge fondue dans le four nécessite un chauffage supplémentaire par un combustible auxiliaire. L'utilisation de l'oxygène permet de faire fonctionner les fours à acier à ciel ouvert à 130 % de leur capacité lorsque de l'air est utilisé.

3- Congélation du sol : la technologie de congélation du sol est une discipline particulière dans le domaine du génie civil et des tunnels. Elle exploite les propriétés des sols gelés artificiellement, à savoir l'augmentation temporaire de la stabilité du sol ou la capacité du sol gelé à empêcher l'infiltration des eaux souterraines. À cette fin, une multitude de tuyaux verticaux sont insérés dans le sol, qui sont ensuite inondés en continu avec un liquide cryogénique, généralement de l'azote liquide.

4- Recyclage du caoutchouc : lorsque le caoutchouc est refroidi à une température inférieure à $210 - 175$ °K, il passe par une transition vitreuse et devient cassant. Dans cet état de fragilité, le caoutchouc peut être facilement écrasé en petites particules. Les composants métalliques et les câbles du pneu d'origine peuvent être facilement séparés par des techniques magnétiques et de soufflage d'air.

5- Transformation et transport des produits alimentaires : la congélation comme technique de conservation des aliments a été utilisée dès 1840. Actuellement, les aliments congelés sont préparés en déplaçant les emballages alimentaires sur un tapis roulant à travers un spray d'azote liquide dans un tunnel spécialement isolé, appelé tunnel de congélation ou congélateur à pulvérisation. Le contact initial avec l'azote liquide congèle toutes les surfaces exposées et permet de sceller à la fois la saveur et l'arôme du produit alimentaire. Les emballages alimentaires passent ensuite par une "zone d'équilibre" dans le tunnel qui est refroidie par la vapeur d'azote froid. Le processus de congélation cryogénique des aliments présente plusieurs avantages par rapport au processus de congélation conventionnelle des aliments qui utilise de l'air froid. La congélation cryogénique dure environ 7 minutes, contre environ 30 minutes pour les méthodes de congélation conventionnelles. Dans la congélation conventionnelle, environ 3 à 15 % en masse (principalement

de l'eau) du produit sont éliminées par le souffle de l'air. En revanche, la congélation cryogénique n'entraîne qu'une déshydratation de 0,2 à 0,3 % en masse. La réduction de la perte d'humidité se traduit par une amélioration de la saveur, de la texture et de l'aspect des aliments congelés par rapport au produit obtenu par la congélation conventionnelle. Le système de congélation cryogénique est assez simple et nécessite environ 10 % des dépenses de maintenance d'un système conventionnel.

6- Applications biologiques et médicales : la chirurgie cryogénique (cryochirurgie) est principalement utilisée pour détruire des tissus pathologiquement altérés, notamment pour la chirurgie des yeux et le traitement des tumeurs, notamment la maladie de Parkinson, cette technique chirurgicale présente plusieurs avantages par rapport à la chirurgie conventionnelle, notamment une réduction des problèmes de saignement, un meilleur contrôle de la zone d'influence et un moindre traumatisme pour le système. Plusieurs sondes spéciales ont été mises au point pour la cryochirurgie. En général, l'azote liquide (ou parfois l'argon liquide) s'écoule à travers une canule isolée sous vide jusqu'à l'extrémité exposée de la sonde et congèle les tissus à détruire. La taille de la région congelée est contrôlée en les ajustant au débit de liquide cryogénique à travers la canule.

I.4. Définition de la réfrigération et la liquéfaction [7] [8]

I.4.1. Définition de la réfrigération :

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

I.4.2. La liquéfaction :

La liquéfaction est un changement d'état qui fait passer un corps de l'état gazeux à l'état liquide. Elle est la transformation inverse de la vaporisation. Bien qu'incorrect selon la terminologie de la thermodynamique, le terme condensation (liquide) est couramment utilisé à la place. Elle peut se produire par compression ou refroidissement d'un gaz. La première industrialisation du procédé est due à Carl von Linde.

Exemples de gaz liquéfiés : hélium liquide $-268,93\text{ °C}$, hydrogène liquide $-252,76\text{ °C}$, néon liquide $-246,053\text{ °C}$, azote liquide $-195,79\text{ °C}$, oxygène liquide $-182,96\text{ °C}$, gaz naturel liquéfié

(composé essentiellement de méthane $-161,52\text{ °C}$) et gaz de pétrole liquéfié (composé essentiellement de propane $-42,1\text{ °C}$ et de butane $-0,5\text{ °C}$).

Dans le cycle de liquéfaction, on extrait de l'énergie à un gaz pour le liquéfier avec une petite partie du débit HP se transforme en liquide, l'autre partie est utilisée à la réfrigération et un débit d'appoint compense le débit de liquide produit.

La liquéfaction des gaz a lieu :

- Pour réduire leur volume et donc mieux les stocker et les transporter.
- Pour les utiliser dans les différents domaines de la cryogénie.

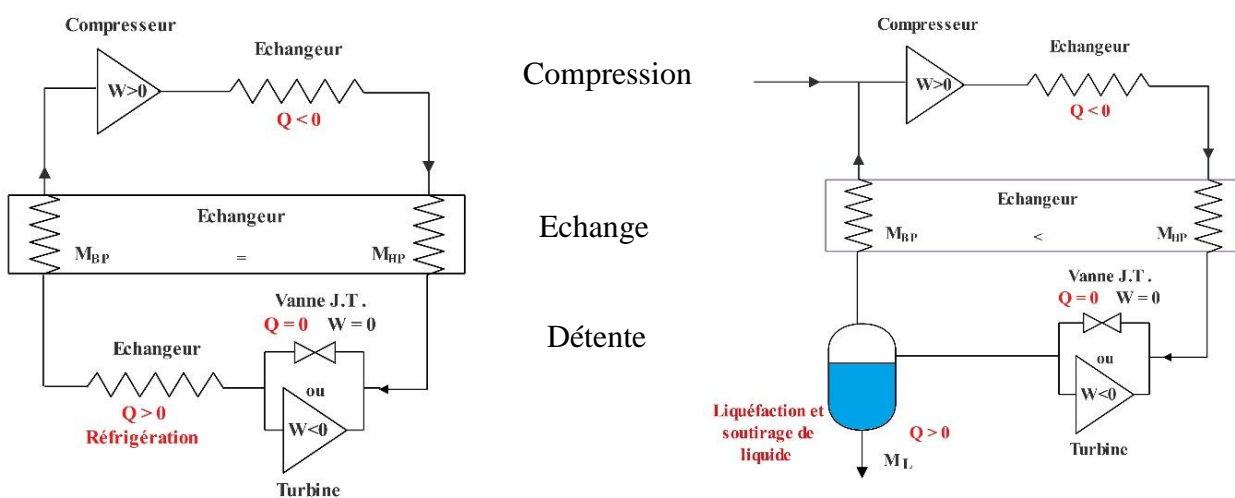


Figure I.1 : Cycles de réfrigération et liquéfaction [8]

I.4.3. Importance et utilisation des gaz liquéfiés [9]

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

a) Obtention des gaz purs :

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

b) Facilité et économie du transport :

Le transport des gaz à moyenne distance dans les canalisations ne se justifie que pour des débits importants assurés en des points bien déterminés, avec une certaine permanence dans le temps.

Pour le gaz naturel, par exemple, son transport par gazoduc est rentable pour des parcours terrestres où les débits sont importants et permanents. Pour les parcours maritimes, on se heurte alors à des difficultés sérieuses : les pipes sous-marines sont très coûteuses et sont exposées à de hauts risques. Pour les autres gaz tels que l'oxygène et l'azote, par exemple, ils sont livrés par petites quantités, il n'est pas possible d'installer des canalisations de distribution. Ces gaz sont généralement livrés à l'état comprimé à 150 bar dans des bouteilles en acier. En raison de la grande épaisseur de ces bouteilles appelées à résister à une pression intérieure assez élevée, on obtient, alors, un poids important, la bouteille vide pèse 70 à 90 kg pour une charge utile de gaz inférieur à 10 kg. Ceci a l'inconvénient du transport d'un poids mort de 7 à 9 fois supérieur à la charge utile entre le lieu de production et le lieu d'utilisation.

c) 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 °C. 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 les laboratoires de recherche où on a besoin d'effectuer des opérations et des expériences diverses à très basse température.

I.5. Propriétés de l'hélium

L'hélium est un fluide assez unique pour attirer l'attention des scientifiques et des ingénieurs. La forme la plus abondante d'hélium (^4He) devient liquide à son point d'ébullition normal de 4,2 °K, qui est le plus bas des fluides cryogéniques courants. Ce qui est encore plus spécial, c'est que l'hélium ne se solidifie pas, même au zéro absolu, à moins qu'une pression externe supérieure à 2,5 MPa ne soit appliquée. Elle n'a donc pas de point triple.

^4He peut également exister dans l'une ou l'autre des deux phases liquides : He I et He II.

He I est le liquide normal, existant entre le point critique ($T_c = 5,2 \text{ °K}$; $P_c = 0,227 \text{ MPa}$) et la transition lambda ($T_\lambda = 2,176 \text{ °K}$ à la pression de vapeur saturée). He II, aussi parfois appelé hélium superfluide, existe entre T_λ et le zéro absolu et possède des propriétés de transport exceptionnels qui présentent un intérêt tant fondamental qu'appliquer sur le plan technique.

Cependant, l'hélium possède également un isotope rare, ^3He , qui est particulièrement important pour la réfrigération à très basses températures ($T \ll 1 \text{ °K}$). ^3He présente également une transition superfluide, mais à environ 0,002 °K. [10]

La transition de l'hélium I à l'hélium II est du 2^e ordre : le nom de transition λ provient de la capacité thermique massique qui croît fortement au point de transition ; l'allure de la courbe rappelle celle de la lettre grecque λ et la partie de la courbe correspondant à He II reste supérieure à celle correspondant à He I, bien au-dessous de T_λ . [11]

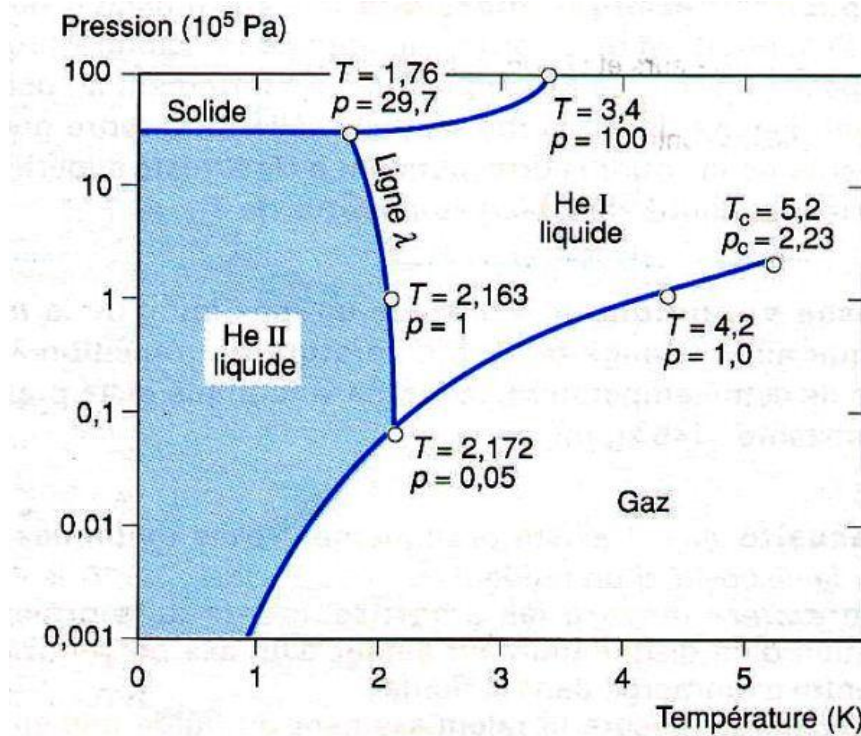


Figure I.2 : Diagramme de phase de ^4He

I.6. Liquéfaction des gaz [12]

La liquéfaction des gaz est toujours réalisée en réfrigérant le gaz à une certaine température en dessous de sa température critique afin que du liquide puisse être formé à une pression appropriée en dessous de la pression critique. Ainsi, la liquéfaction des gaz est un cas particulier de la réfrigération des gaz et ne peut en être séparée. Dans les deux cas, le gaz est d'abord comprimé à une pression élevée dans un compresseur à température ambiante. Ce gaz à haute pression passe à travers un échangeur de chaleur à récupération à contre-courant vers une vanne d'étranglement ou un moteur d'expansion. Lors de la détente à la pression inférieure, un refroidissement peut se produire et un certain liquide peut se former. Le gaz froid à basse pression retourne à l'entrée du compresseur pour répéter le cycle. Le but de l'échangeur de chaleur à contre-courant est de réchauffer le gaz basse pression avant la recompression et de refroidir simultanément le gaz haute pression à la température la plus basse possible avant la détente. Les réfrigérateurs et les liquéfacteurs fonctionnent selon ce principe de base.

Il existe néanmoins une distinction importante entre les réfrigérateurs et les liquéfacteurs. Dans un processus de réfrigération continue, il n'y a pas d'accumulation de réfrigérant dans toute partie du système. Cela contraste avec un système de liquéfaction de gaz, où les liquides s'accumulent et sont retirés. Ainsi, dans un système de liquéfaction, la masse totale de gaz qui est chauffé dans l'échangeur de chaleur à contre-courant est inférieur à celui du gaz à être refroidi par la quantité liquéfiée, ce qui crée un déséquilibre de flux dans l'échangeur de chaleur. Dans un réfrigérateur, les flux de gaz chaud et froid sont égaux dans l'échangeur de chaleur. Il en résulte ce que l'on appelle généralement une "condition de débit équilibré". Dans un échangeur de chaleur de réfrigérateur. Les principes thermodynamiques de la réfrigération et de la liquéfaction sont identiques. Toutefois, l'analyse et la conception des deux systèmes sont tout à fait différentes en raison de la condition d'équilibre du flux dans le réfrigérateur et le déséquilibre des flux dans les systèmes de liquéfaction.

I.6.1. Principes de liquéfaction [12]

La réfrigération préalable à la liquéfaction du gaz est réalisée dans un processus thermodynamique lorsque le gaz de processus absorbe de la chaleur à des températures inférieures à celles de l'environnement. Comme mentionné, un processus de production de réfrigération à des températures de gaz liquéfié implique toujours un certain équipement à température ambiante dans lequel le gaz est comprimé et la chaleur est rejetée dans un réfrigérant. Au cours du processus de compression à température ambiante, l'enthalpie et l'entropie, mais généralement pas la température du gaz, sont diminuées. La réduction de la température du gaz est généralement accompagnée d'un échange de chaleur récupératif entre les flux de gaz de refroidissement et de réchauffement. Suivie d'une expansion du courant à haute pression. Cette expansion peut prendre soit dans un dispositif d'étranglement (expansion isenthalpique) où il n'y a qu'une réduction de la température (Lorsque le coefficient Joule-Thomson est positif ; voir **Tableau I.1**), soit dans un dispositif produisant du travail (expansion isentropique) où la température et l'enthalpie sont toutes deux réduites.

Pour des raisons d'efficacité, les dispositifs à expansion isentropique peuvent sembler préférables pour la liquéfaction du gaz. Cependant, il reste à développer des moteurs d'expansion qui peuvent fonctionner avec plus de quelques pour-cent de liquide présent, en raison de l'érosion.

Par conséquent, de simples dispositifs d'étranglement sont utilisés à un moment donné dans presque tous les systèmes de liquéfaction du gaz. L'étranglement est un processus isenthalpique, et la pente en tout point d'une courbe isenthalpique sur un diagramme pression-température est une

mesure quantitative de la façon dont la température va changer avec la pression. Cette pente est appelée, le coefficient Joule-Thomson (ou J-T) est généralement désignée par :

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

| Température d'inversion maximale | | |
|---|-----------|-----------|
| Fluide | °K | °R |
| Oxygène | 761 | 1370 |
| Argon | 722 | 1300 |
| Azote | 622 | 1120 |
| Air | 603 | 1085 |
| Néon | 250 | 450 |
| Hydrogène | 202 | 364 |
| Hélium | 40 | 72 |

Tableau I.1 : Température d'inversion maximale

I.6.2. Le coefficient Joule-Thomson

C'est une propriété de chaque gaz spécifique, et une fonction de température et de pression, et peut être positif, négative ou nulle. Par exemple, l'hydrogène, l'hélium et le néon ont des coefficients J-T négatifs à température ambiante. Par conséquent, pour être utilisés comme réfrigérants dans un processus d'étranglement, ils doivent d'abord être refroidis soit par un fluide de pré-refroidissement séparé, soit par un moteur d'expansion produisant du travail, à une température en dessous de laquelle le coefficient J-T est positif. Ce n'est qu'alors que l'étranglement provoquera un refroidissement supplémentaire plutôt qu'un réchauffement de ces gaz.

L'azote, le méthane et d'autres gaz, en revanche, ont des coefficients J-T positifs à température ambiante et produisent donc un refroidissement lorsqu'ils sont détendus à travers une vanne. Par conséquent, ils peuvent être liquéfiés directement dans un processus d'étranglement sans qu'il soit nécessaire d'effectuer une étape de pré-refroidissement ou de détente par un dispositif d'extraction.

Les courbes d'inversion complètes pour plusieurs fluides sont indiquées à la figure I.3. La température maximale d'inversion se produit à une pression nulle.

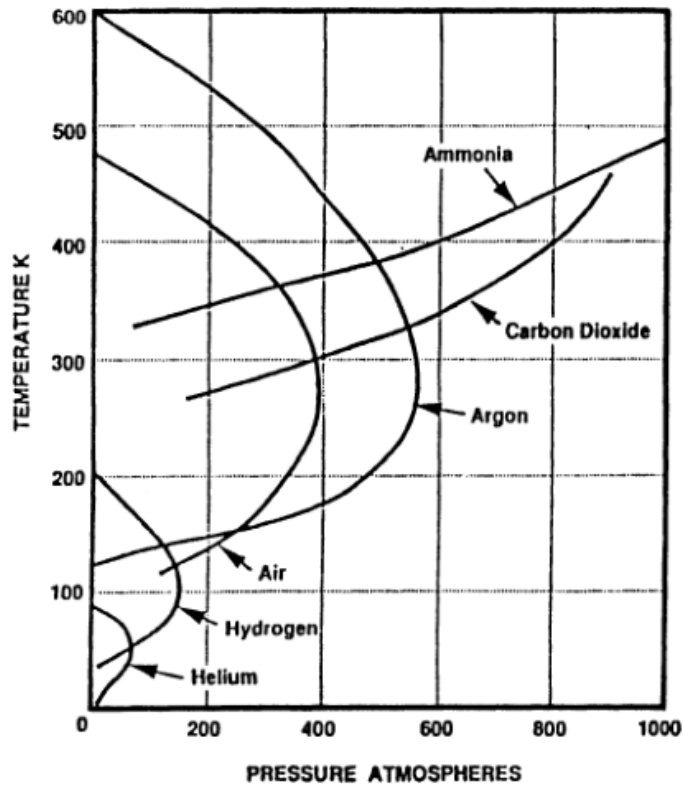


Figure I.3 : La courbe d'inversion Joule-Thomson pour certains gaz courants.

Chapitre II

Les cycles de liquéfaction

Les cycles de liquéfaction

II.1. Les méthodes de liquéfaction

II.1.1. Compression de la vapeur : [12]

La figure II.1 présente un schéma d'un réfrigérateur à vapeur comprimée à un étage normal. La chaleur est absorbée par l'évaporation d'un liquide approprié à T_1 et P_1 dans un évaporateur. Dans un cycle de compression à sec, la vapeur saturée est comprimée à la pression P_2 , et la vapeur surchauffée à la sortie du compresseur est condensée dans un condenseur à T_2 par échange de chaleur avec un réfrigérant approprié. La vapeur peut être entièrement condensée dans son liquide au point 3 simplement parce que la température critique de la vapeur est inférieure à la température du réfrigérant externe (air, eau). Pour cette raison, un réfrigérateur à compression de vapeur ne nécessite pas nécessairement un véritable échangeur de chaleur à récupération. Une vanne d'étranglement permet alors au liquide saturé formé dans l'échangeur de chaleur du condenseur à se dilater de manière approximativement isenthalpique du point 3 au point 4 pour l'évaporateur, complétant ainsi le cycle.

La figure II.1 montre les états du réfrigérant dans ce processus de vapeur comprimée sur un diagramme température-entropie.

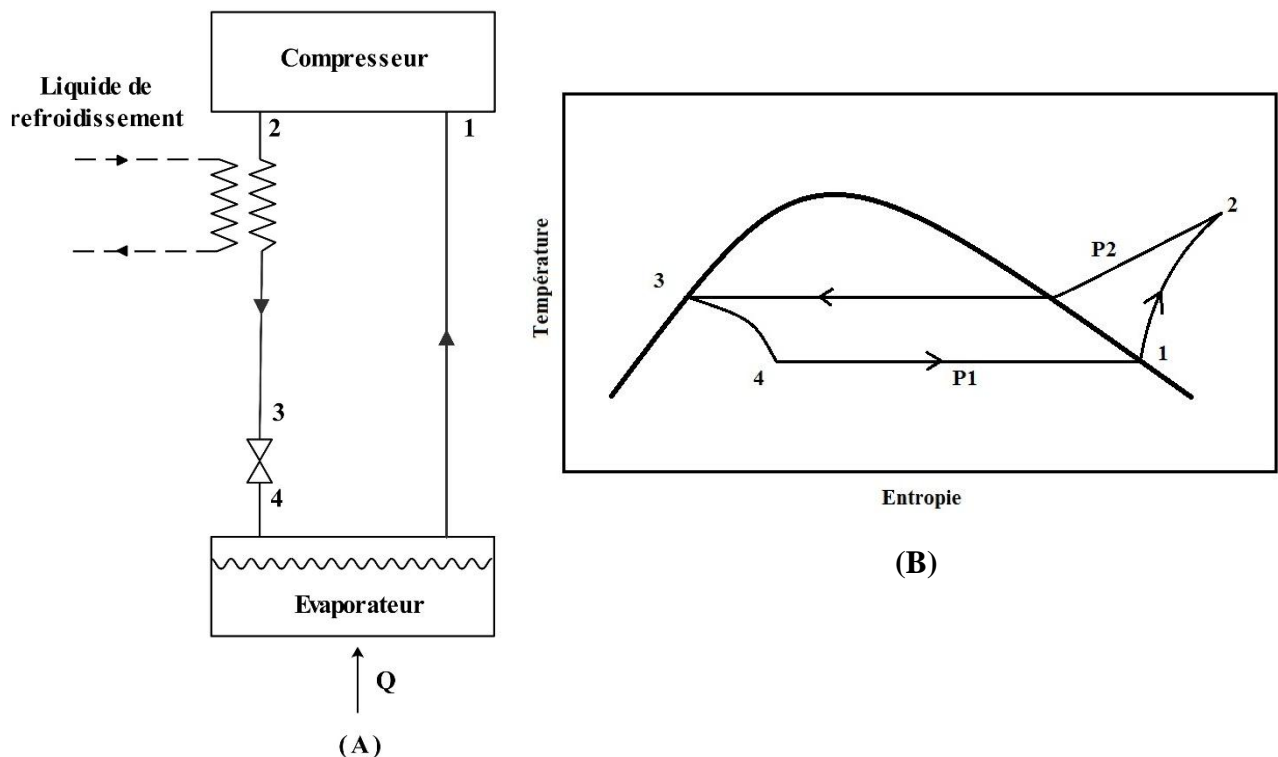


Figure II.1 : Réfrigérateur à vapeur comprimée

(A) Installation (B) Diagramme (T-S)

II.1.2. Compression de la vapeur en cascade : [12]

Il est possible de mettre en cascade plusieurs systèmes de compression de vapeur, chacun contenant des réfrigérants différents, pour atteindre des températures plus basses. Un tel système est illustré de façon schématique à la Figure II.2. La mise en cascade est nécessaire, car les gaz ayant les points d'ébullition les plus bas ont des températures critiques bien inférieures à la température ambiante. Ainsi, il est nécessaire que les températures du condenseur pour ces cycles de compression de vapeur soient fournies par les évaporateurs d'autres cycles de compression de vapeur, qui rejettent la chaleur à des températures plus élevées. L'efficacité des systèmes en cascade est grandement améliorée par l'utilisation d'échangeurs de chaleur qui refroidissent les gaz chauds entrants. Les échangeurs réchauffent les gaz froids avant qu'ils n'atteignent la l'admission du compresseur. À proprement parler, un échangeur de chaleur récupérateur n'est pas nécessaire.

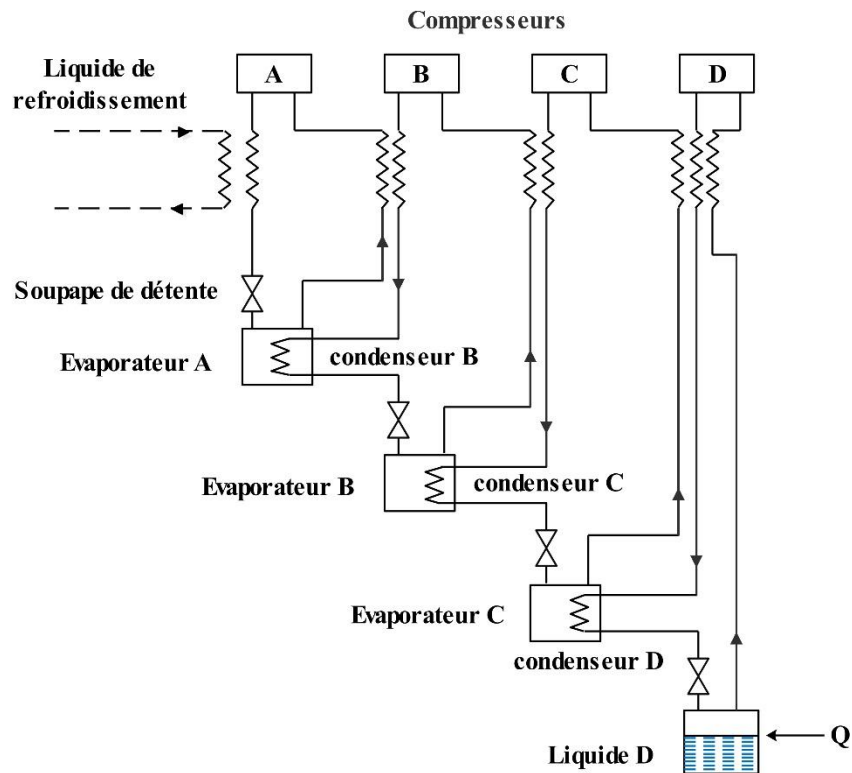


Figure II.2 : Réfrigérateur à vapeur comprimée en cascade

II.2. Systèmes de liquéfaction

II.2.1. Procédé à détente isentropique : [12]

La réfrigération peut toujours être produite en dilatant le gaz de processus dans un moteur (au lieu d'une soupape) et en lui faisant faire du travail. Des échangeurs de chaleur récupérateurs sont également utilisés dans ce cas. La figure II.3 présente un schéma d'un réfrigérateur simple utilisant ce principe et le diagramme température-entropie correspondant. Le gaz comprimé isotherme du point 1 au point 2 à la température ambiante est refroidi dans un échangeur de chaleur à récupération par réchauffement du gaz sur son chemin vers l'entrée du compresseur. Un refroidissement supplémentaire a lieu lors de la dilatation du moteur de 3 à 4. Dans la pratique, cette dilatation n'est jamais vraiment isentropique, ce que reflète la courbe 3-4 sur le diagramme température-entropie. (l'expansion isentropique serait une ligne droite.).

Dans toute expansion génératrice de travail, la température du gaz est toujours réduite ; par conséquent, le refroidissement ne dépend pas du fait d'être en dessous de la température d'inversion avant l'expansion. Dans les grandes machines, le travail produit pendant l'expansion est conservé. Dans les petits liquéficateurs, l'énergie de l'expansion est généralement dépensée dans une pompe à gaz ou hydraulique et n'est pas récupérée. Le réfrigérateur dans la figure II.3 produit un gaz froid qui absorbe la chaleur de 4 à 5 et fournit une méthode de réfrigération qui peut être utilisée pour obtenir des températures entre ceux des points d'ébullition des fluides cryogéniques à point d'ébullition inférieure.

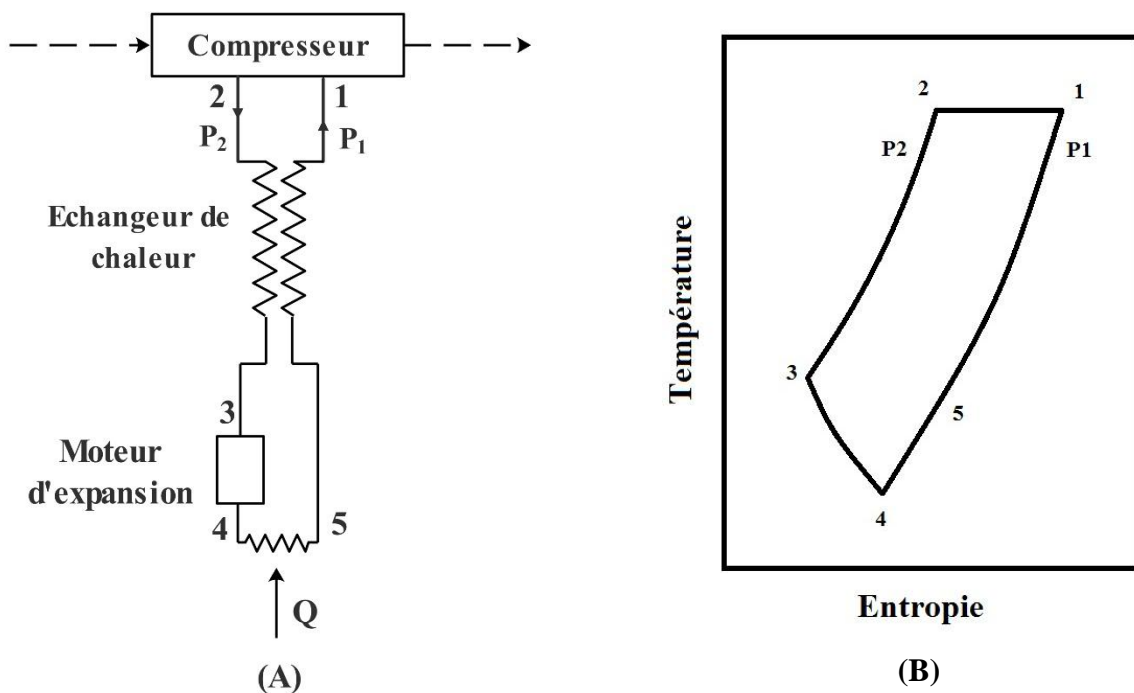


Figure II.3 : Réfrigérateur à expansion isentropique

(A) Installation (B) Diagramme (T-S)

II.2.1.1 Cycle de Brayton inverse [13]

Dans un cycle de Brayton, la détente isenthalpique du cycle de Joule-Thomson est remplacée par une détente avec extraction d'énergie.

Parmi les cycles avec extraction d'énergie, le cycle de Brayton est le plus simple. La puissance utile peut être obtenue jusqu'à des températures de l'ordre de 10 °K, la présence d'un détendeur mécanique froid (alternatif ou rotative), permettant l'extraction d'énergie du gaz, oriente plutôt l'utilisation de ces machines vers les fortes puissances frigorifiques : il est, en effet, délicat de miniaturiser les détendeurs, particulièrement les turbines, sans détérioration du rendement isentropique. Du fait que ce cycle ne comporte pas de bain en relation avec le circuit du compresseur, la basse pression du cycle peut être plus élevée que la pression atmosphérique, ce qui permet de diminuer la taille du compresseur.

On peut imaginer de refroidir le gaz en actionnant une turbine et donc, de fournir en même temps du travail. 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 d'un point de vue technologique est impossible. 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.

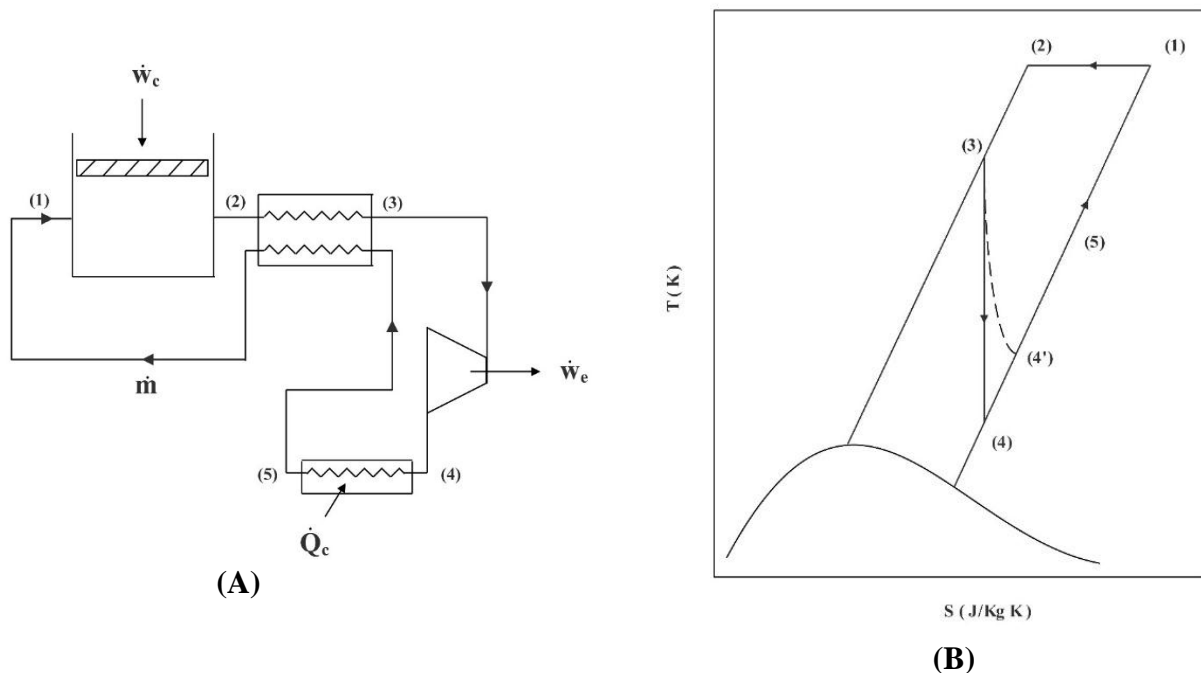


Figure II.4 : un réfrigérateur isobare (cycle de Brayton inversé)

(A) Schéma (B) diagramme T-S

II.2.2. Cycle de Claude [12] [14]

Ce cycle est l'association des cycles de Linde et de Brayton inverse. Le début du cycle est le même que celui de Linde : compression du gaz à liquéfier, premier refroidissement isobare. Le flux est alors divisé en deux :

- Une partie est détendue dans la turbine
- L'autre partie du fluide subit un second refroidissement, puis est envoyé dans la détente isenthalpique.

Les deux fluides « froids » passent dans l'échangeur refroidissant les gaz issus de la compression isotherme.

Le cycle de Claude est un exemple de combinaison de ces méthodes et est illustré à la figure II.5 avec le diagramme température-entropie correspondant.

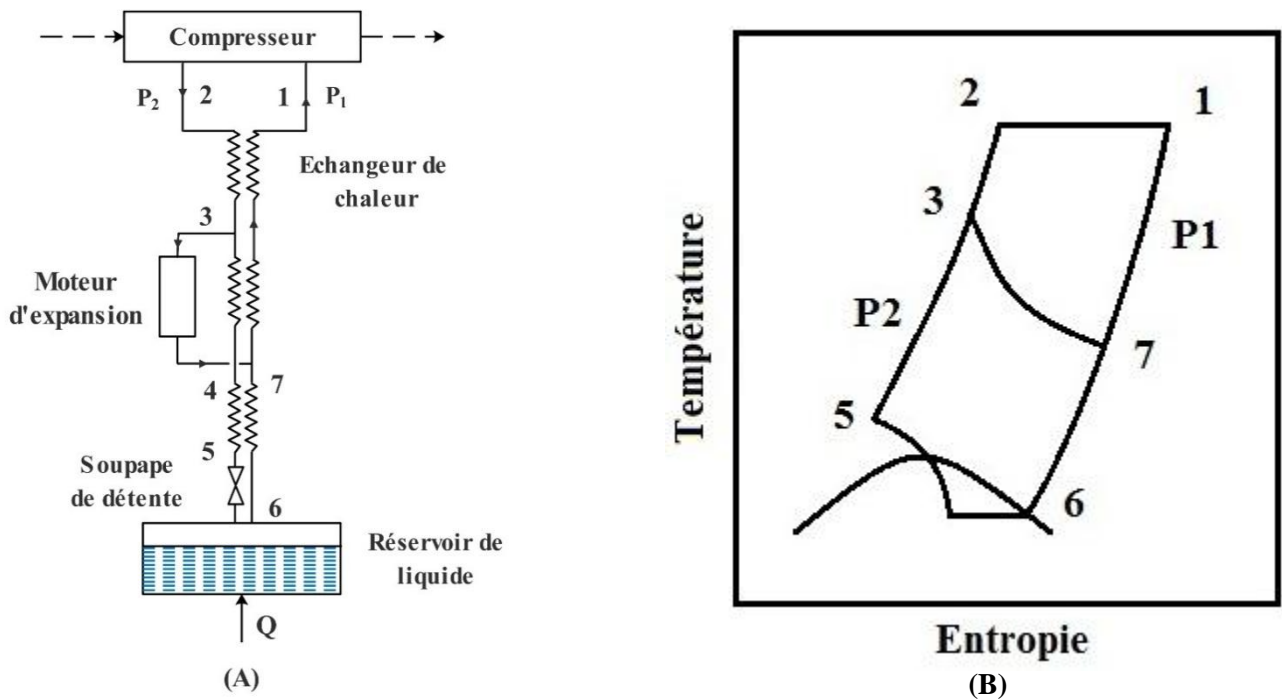


Figure II.5 : Le cycle de Claude : une combinaison de Joule-Thomson et d'expansion adiabatique.

(A) Installation (B) Diagramme (T-S)

II.2.3. Cycle de Claude modifié (Collins)

Dans les années 1940, le liquéfacteur d'hélium Collins est né d'un effort pour produire un système commercial utilisant des moteurs à expansion pour pré refroidir plusieurs échangeurs de chaleur. Le système Collins est en fait similaire au système Claude, sauf qu'il utilise entre deux et cinq moteurs d'expansion au lieu de juste un.

Le liquéfacteur Collins a permis pour la première fois à la production d'hélium liquide de quitter les laboratoires de recherche en physique de quelques experts pour s'installer dans des installations telles que des laboratoires nationaux et des entreprises industrielles. Il a également permis de séparer de grandes quantités d'hélium de sa source principale, le gaz naturel. Le liquéfacteur Collins est basé sur un cycle thermodynamique consistant de compression à température ambiante, cinq échangeurs de chaleur à contre-courant, deux moteurs de détente et un dernier étage de détente Joule-Thomson pour produire du liquide. Une fois développé, le liquéfacteur/réfrigérateur Collins et ses modèles de production commerciale ultérieurs ont permis aux laboratoires de produire leur propre hélium liquide et de refroidir une grande variété de systèmes expérimentaux à $T < 4 \text{ °K}$. Des versions plus grandes de cette machine ont été intégrées à une capacité croissante de production d'hélium liquide. [13]

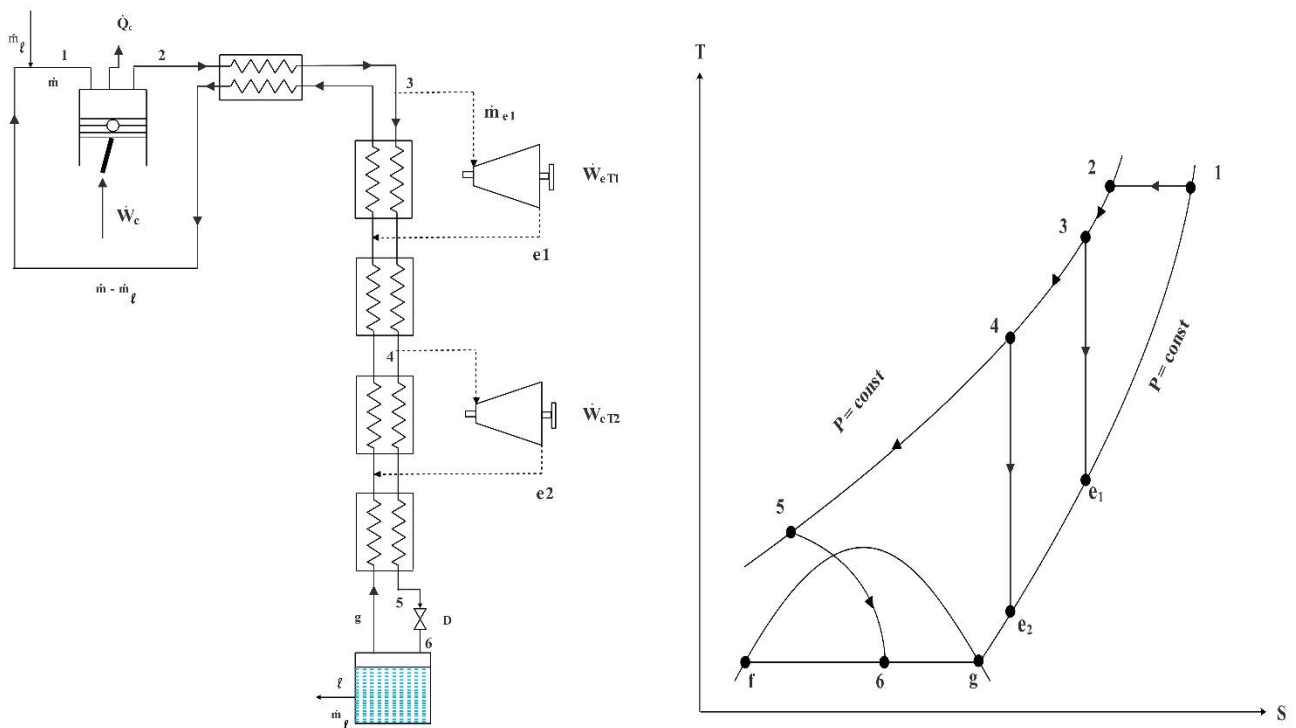


Figure II.6 : Le cycle de Claude modifié et son diagramme (T-S)

II.3. Equipements utilisés

II.3.1. Compresseurs cryogéniques :

Dans la production de gaz industriels tels que l'oxygène, l'azote et l'hélium, ou la liquéfaction de gaz naturel, la puissance de compression représente plus de 80 % des besoins énergétiques totaux. Il est donc essentiel de sélectionner avec soin le compresseur et son entraînement si l'on veut réduire au minimum le coût et la maintenance de l'installation cryogénique. Les éléments essentiels de toute évaluation sont (1) le coût de l'équipement et de l'installation (2) le coût de l'énergie ou du carburant, et (3) le coût de la maintenance. Enfin, l'effet du site de la centrale, de la source de combustible disponible et de sa fiabilité, des installations existantes et de la structure de l'énergie électrique déterminera en fin de compte le choix final.

Les compresseurs cryogéniques peuvent être volumétriques (alternatifs ou rotatifs) ou à impulsion (centrifuges) deux contraintes sévères nous obligent de faire un bon choix d'un type par rapport à un autre.

- 1) Le processus de compression qu'il soit le plus possible isotherme.
- 2) Et doit se faire sans polluer le gaz afin de ne pas boucher les échangeurs.

Les compresseurs alternatifs secs ; sont chers et peu fiables et les compresseurs lubrifiés, qui ont une grande fiabilité, mais polluent les gaz par de l'huile. [9]

II.3.2. Les échangeurs :

Un échangeur de chaleur peut être considéré comme un appareil majeur seulement au bon fonctionnement d'une installation industrielle, alors il existe la possibilité de variations presque infinies dans la conception des échangeurs de chaleur. La forme choisie dépend de plusieurs facteurs, parmi lesquels : (1) l'importance d'éviter les chutes de pression (2) la nécessité d'une faible capacité thermique (3) le coût (4) les pressions à supporter, et (5) les dimensions de l'espace disponible pour l'échangeur.

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 dans le but d'avoir des très grandes quantités de chaleur échangée. [9]

II.3.3. Régénérateurs :

Le régénérateur c'est un engin destiné à stocker momentanément la chaleur cédée par le fluide haute pression s'écoulant de la température ambiante T_c à la température froide T_f avant de la restituer à ce fluide repassant de T_f à T_c après détente. Il joue un rôle important dans l'efficacité d'un cryoréfrigérateur à flux alterné, idéalement, ce régénérateur devrait avoir : une capacité thermique infinie par rapport à celle du fluide cryogénique pour limiter ses oscillations en

température, lors des alternances de flux. Une conduction thermique nulle longitudinalement pour empêcher les apports de chaleur parasite par conduction du bout chaud au bout froid. Une conduction thermique infinie dans le sens radial pour assurer une bonne diffusivité thermique lors des échangeurs. Une perte de charge minimale à l'écoulement du fluide cryogénique (transparence élevée) afin de limiter l'énergie de compression non-utile au cycle. [9]

II.3.4. Machines de détente cryogénique [9]

a) Le détendeur alternatif :

Fut la première de détente utilisée. Il est encore apprécié par les opérateurs de petits appareils de laboratoire qui peuvent en assurer facilement l'entretien. Sa vitesse de rotation est limitée à 300 tr/min. Lorsque le débit volumétrique à traiter augmente, il devient rapidement impossible d'augmenter la cylindrée et la vitesse de rotation. Seule la turbine permet d'apporter la fiabilité et l'efficacité requises.

b) Les turbines à paliers à gaz hydrostatiques ou hydrodynamiques :

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

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

II.3.5. Autres composants

Les autres composants particuliers qui constituent un liquéfacteur ou réfrigérateur sont :

- Les vannes cryogéniques.
- Les adsorbants : il est possible que, pendant de longues périodes de fonctionnement, des fuites se déclarent. Les quantités d'impuretés, même à des concentrations très faibles peuvent alors provoquer le bouchage des circuits. Pour pallier cet inconvénient, une capacité remplie de matériau adsorbant est intercalée dans le circuit haute pression à une température permettant de piéger les impuretés. [9]

Chapitre III

Etude thermodynamique des cycles de liquéfaction de type Claude

Etude thermodynamique des cycles de liquéfaction de type Claude

III.1. Relations thermodynamiques utiles [12]

En supposant que les termes cinétiques et énergétiques potentiels de la première loi puissent être négligés, la première loi pour un processus d'état stable peut être simplifiée pour

$$\Delta H = Q - W_s \quad (\text{III.1})$$

Où ΔH est la somme des différences d'enthalpie de tous les fluides entrant et sortant du système (ou de la pièce d'équipement) analysé, Q est la somme de tous les échanges de chaleur entre le système et son environnement, et W est le réseau de puits. Dans le meilleur des cas, $Q = Q_{rev} = T\Delta S$. Le travail pour la masse unitaire est $\frac{-W_s}{\dot{m}}$, le signe moins indiquant les travaux effectués sur

le système. La réorganisation de l'équation(1) pour conserver cette convention donne :

$$\frac{-W_s}{\dot{m}} = -Q + \Delta H = T_i (S_1 - S_2) - (H_1 - H_2) \quad (\text{III.2})$$

S : l'entropie spécifique

H : l'enthalpie spécifique

L'application de la première loi au travail idéal de compression isotherme avec substitution appropriée à la sommation de chaleur se réduit à

$$\frac{-W_s}{\dot{m}} = T_i (S_1 - S_2) - (H_1 - H_2) \quad (\text{III.3})$$

Où \dot{m} est le débit massique du flux à travers le compresseur.

L'évaluation de la puissance frigorifique (Q_{ref}) dans un réfrigérateur dépend du procédé choisi. Par exemple, si le processus de réfrigération est isotherme, la puissance frigorifique peut être évaluée à l'aide de la relation $Q_{ref} = \dot{m}T(S_2 - S_1)$ (III.4)

Maintenant, T est la température à laquelle la réfrigération a lieu et les indices 1 et 2 font référence aux flux d'entrée et de sortie de l'absorption de chaleur. En revanche, si le processus de

réfrigération n'implique que la vaporisation du réfrigérant liquide saturé à pression constante, l'évaluation du droit se réduit à

$$Q_{ref} = \dot{m}h_{fg} \quad (III.5)$$

Où h_{fg} est la chaleur de vaporisation du réfrigérant. Si le processus est effectué à pression constante avec l'absorption de la seule chaleur sensible par le réfrigérant, le droit peut être évalué à partir de

$$Q_{ref} = \dot{m}(H_2 - H_1) = \dot{m}C_p \Delta T \quad (III.6)$$

C_p est constant.

III.2. Bilan énergétique d'un cycle idéal de liquéfaction

Dans le but d'avoir un moyen de comparaison entre les différents systèmes de liquéfaction de gaz, on doit d'abord analyser le cycle thermodynamique idéal de liquéfaction.

Ce système est idéal thermodynamiquement, mais il est plus idéal pour application réelle.

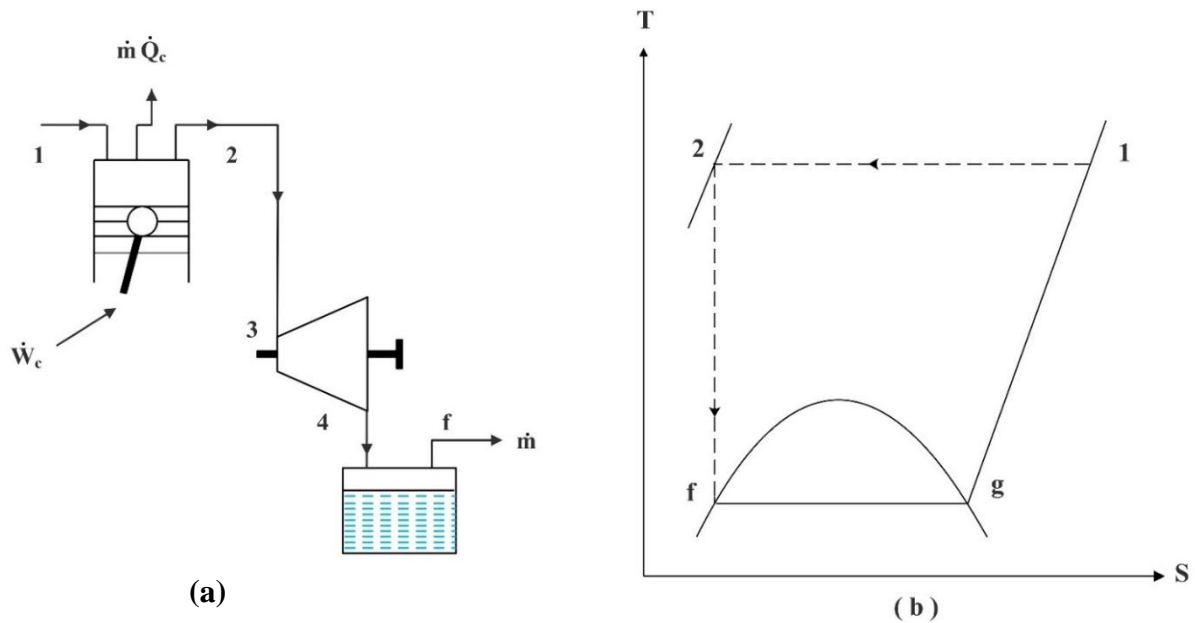


Figure III.1 : Système thermodynamique idéal de liquéfaction

(a) Installation idéale (b) Diagramme (T-S)

❖ Principe de fonctionnement

Le cycle idéal comprendra donc deux phases :

- de (1 \rightleftharpoons 2) : une compression isotherme réversible.
- de (2 \rightleftharpoons 3) : une détente isentropique ; le point 2 sera choisi de telle sorte qu'au point f le palier de liquéfaction correspondant à la pression la plus basse possible (celle du point 1, c'est-à-dire la pression atmosphérique) soit atteint. Le gaz comprimé de (1 \rightleftharpoons 2) sera totalement liquéfier.

❖ **Travail par unité de masse comprimé pour l'installation idéal [\dot{W}_{net}/\dot{m}]**

Bien que, dans un cycle idéal :
$$\frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}} = [(h_2 - h_1) - T(S_2 - S_1)] + \frac{\dot{m}_e}{\dot{m}}(h_e - h_3) \quad (III.7)$$

$$\dot{W}_c = \dot{W}_c' - \dot{W}_D \quad (III.8)$$

\dot{W}_c : La puissance fournit pour la compression isotherme réversible.

\dot{W}_D : La puissance consommée par la turbine à la cour de la détente du gaz.

$$\dot{W}_c + \dot{Q} = \dot{m}\Delta h = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad \Longrightarrow \quad \dot{W}_c = \dot{m}(h_2 - h_1) - \dot{Q} \quad (III.9)$$

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

Pour une transformation réversible (sans frottement)

$$\Longrightarrow \delta\dot{Q} = 0. \text{ D'où : } \delta\dot{Q} = TdS. \quad (III.10)$$

Pour une transformation isotherme : $T = \text{constante}$. $\int \delta\dot{Q} = \int TdS$

$$\Longrightarrow \dot{Q} = T \int_{s_1}^{s_2} dS = T[S] \Big|_{s_1}^{s_2} \Longrightarrow \dot{Q} = T(S_2 - S_1)$$

On aura donc :
$$\dot{Q} = \dot{m}[T(S_2 - S_1)] \quad (III.11)$$

$$\dot{W}_c = \dot{m}(h_2 - h_1) - \dot{Q} \quad \Longrightarrow \quad \dot{W}_c = \dot{m}(h_2 - h_1) - \dot{m}[T(S_2 - S_1)]$$

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

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

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

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

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

$$[\dot{W}_c / \dot{m}] = [(h_1 - h_1) - T(S_2 - S_1)] \quad (III.12)$$

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

$$\Longrightarrow \frac{\dot{W}_i}{\dot{m}} = [(h_1 - h_1) - T(S_1 - S_1)] \quad (III.13)$$

III.3. Etude énergétique de cycle de liquéfaction de Claude à une seule détente

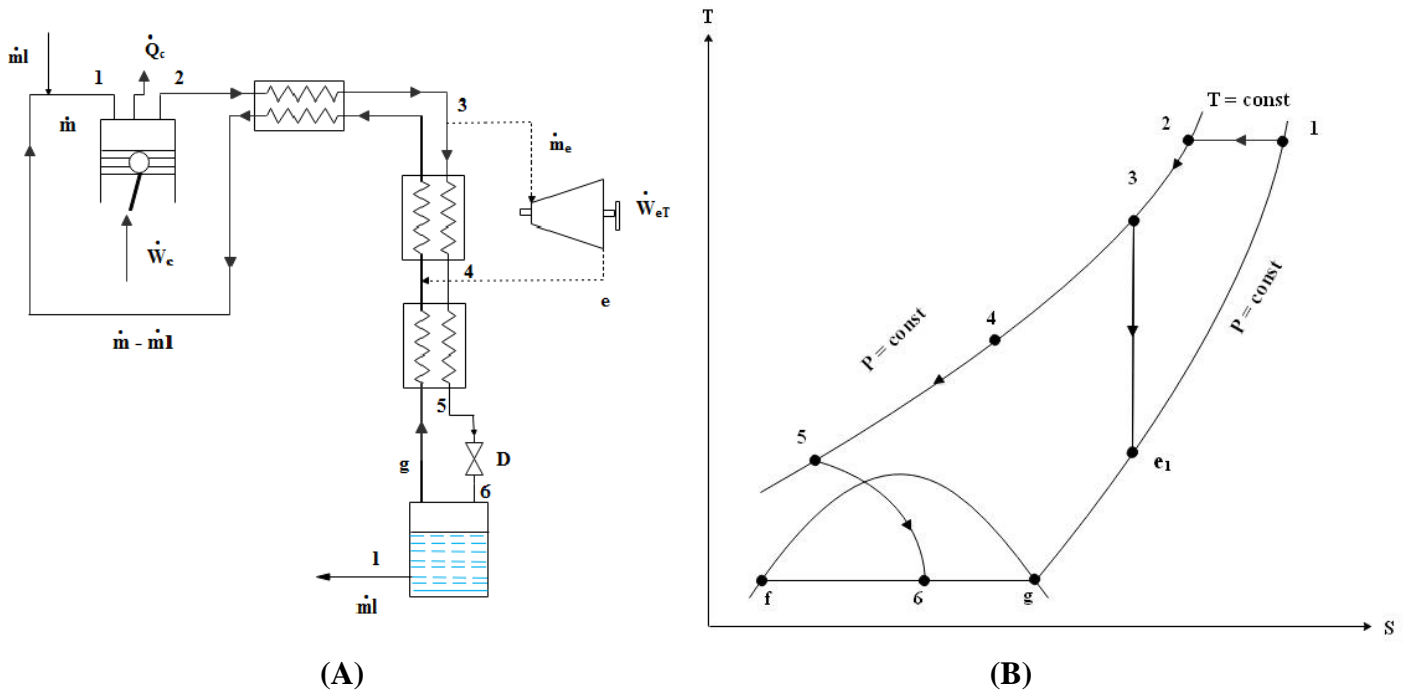


Figure III.2 : Le cycle Claude à une seule détente

(A) Installation (B) Diagramme (T-S)

❖ **Le taux de liquéfaction de l'installation y**

En faisant le bilan énergétique entre les entrées et les sorties pour le volume de contrôle, délimité par la surface de contrôle (δ), on aura :

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

Cela implique : $\dot{m}_l (h_l - h_1) = \dot{m} (h_2 - h_1) + \dot{m}_e (h_e - h_3)$

Divisant l'équation sur \dot{m} , on aura :

$$\frac{\dot{m}_l}{\dot{m}} (h_l - h_1) = \dot{m} (h_2 - h_1) + X_1 (h_e - h_3)$$

Avec : $X_1 = \frac{\dot{m}_e}{\dot{m}}$

Le taux de liquéfaction de gaz s'écrit: $y = \frac{\dot{m}_l}{\dot{m}}$

$$y = \frac{\dot{m}_l}{\dot{m}} = \frac{(h_2 - h_1)}{(h_l - h_1)} + X_1 \frac{(h_e - h_3)}{(h_l - h_1)} \tag{III.14}$$

❖ Le travail net requis par unité de masse de gaz comprimé \dot{w}_{net} / \dot{m}

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_C + \dot{W}_T$$

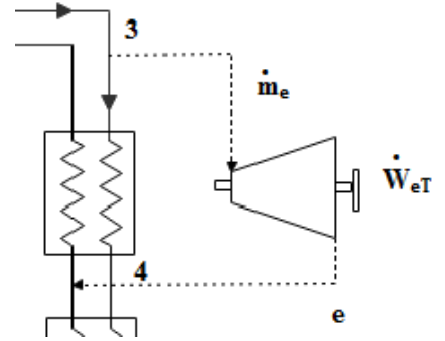
Avec : $\dot{W}_T = ?$

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

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

$$\dot{W}_{T1} = \dot{m}_e (h_e - h_3)$$

Et : $\dot{W}_e = -\dot{W}_{T1}$



Pour la compression 1-2, il est supposé isotherme réversible ($T_1 = T_2$)

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

$$\dot{W}_{C1} + \dot{m}h_1 = \dot{Q} + \dot{m}h_2$$

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

D'après la formule de Gibbs :

$$\delta Q = TdS + \delta q$$

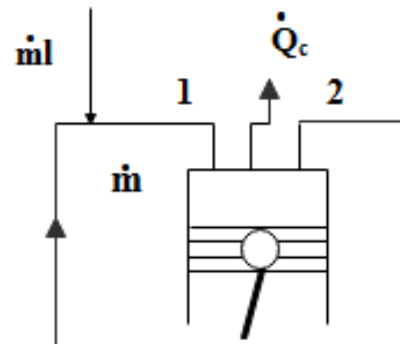
Et $T = T_1 = T_2$, c'est isotherme :

$$\dot{Q} = \dot{m} [T (S_2 - S_1)]$$

Cela implique que :

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

$$\dot{W}_{C1} = \dot{m} [(h_2 - h_1) - T (S_2 - S_1)] \tag{III.15}$$



D'où le travail net :

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_c + \dot{W}_T$$

$$\dot{W}_{net} = \dot{m}[(h_2 - h_1) - T(S_2 - S_1)] + \dot{m}_e(h_e - h_3)$$

$$\frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}} = [(h_2 - h_1) - T(S_2 - S_1)] + \frac{\dot{m}_e}{\dot{m}}(h_e - h_3)$$

$$\text{Avec } \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_l} = \frac{1}{y} * [(h_2 - h_1) - T(S_2 - S_1)] + X_1(h_e - h_3) ; X_1 = \frac{\dot{m}_e}{\dot{m}}$$

Au final on trouve le travail net requis :

$$\frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}} = [(h_2 - h_1) - T(S_2 - S_1)] + X_1(h_e - h_3) \quad (\text{III.16})$$

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

$$\frac{\dot{m}_l}{\dot{m}} = y \rightarrow \dot{m} = \frac{\dot{m}_l}{y} \quad \Longrightarrow \quad \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}} = y * \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_l}$$

D'où :

$$\frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_l} = \frac{1}{y} * \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}}$$

Alors :

$$\frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_l} = \frac{1}{y} * [(h_2 - h_1) - T(S_2 - S_1)] + X_1(h_e - h_3) \quad (\text{III.17})$$

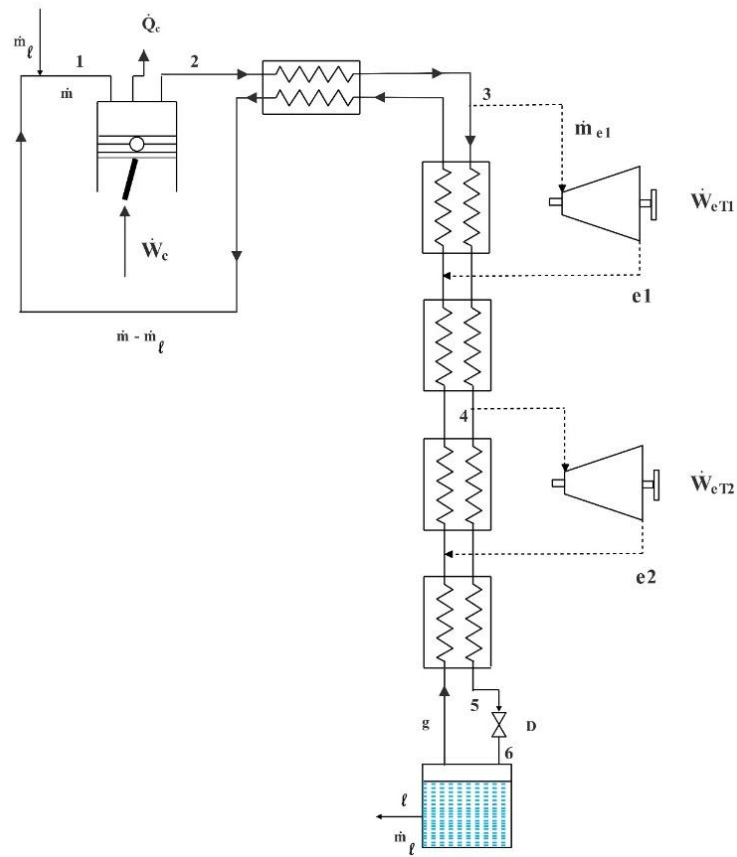
❖ Le facteur de mérite FOM

C'est le rapport entre le travail théorique minimum et le travail réel nécessaire pour le système appelé le rendement thermodynamique. $\dot{W}_{e2} = -\dot{W}_{T2}$

$$FOM = \frac{\left(\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}_l}\right)_i}{\frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_l}} = y * \frac{\left(\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}_l}\right)_i}{\frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}}} \quad \text{Avec } \left(\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}_l}\right)_i = [(h_l - h_1) - T(S_l - S_1)]$$

$$FOM = \frac{[(h_l - h_1) - T(S_l - S_1)]}{[(h_2 - h_1) - T(S_2 - S_1)] + X_1(h_e - h_3)} \quad (\text{III.18})$$

III.4. Etude énergétique de cycle de liquéfaction de Claude modifié ou Collins



(A)

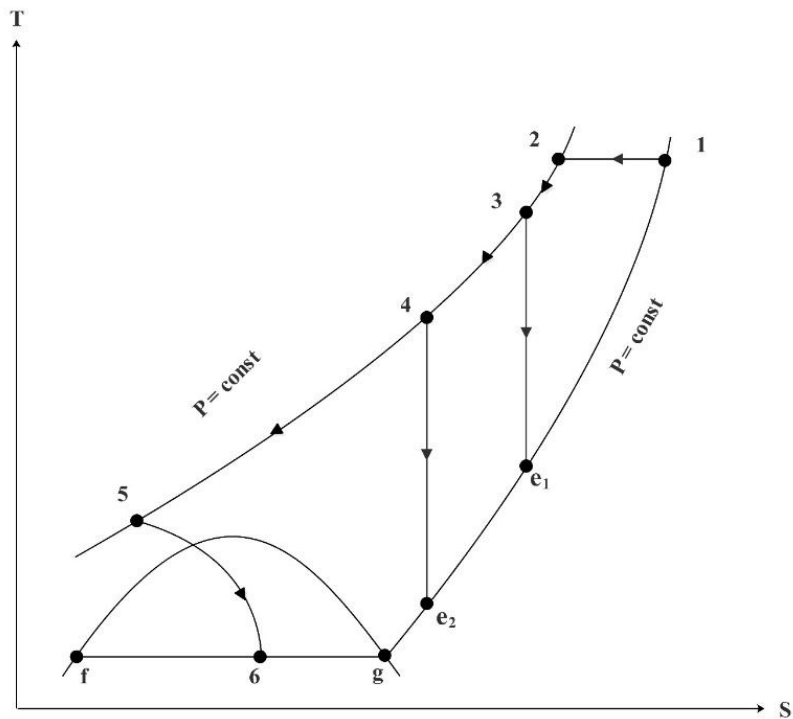


Figure III.3 : Cycle de Claude avec 2 détente isentropiques

(A) Installation (B) Diagramme (T-S)

En faisant le bilan énergétique entre les entrées et les sorties du volume de contrôle, délimité par la surface de contrôle (δ), on aura le bilan suivant :

$$\dot{m}h_2 + \dot{m}_{e1}h_{e1} + \dot{m}_{e2}h_{e2} = \dot{m}_l h_l + (\dot{m} - \dot{m}_l)h_1 + \dot{m}_{e1}h_3 + \dot{m}_{e2}h_4$$

En prenant en compte les facteurs en commun, on trouve :

$$\dot{m}_l (h_l - h_1) = \dot{m}(h_2 - h_1) + \dot{m}_{e1} (h_{e1} - h_3) + \dot{m}_{e2} (h_{e2} - h_4)$$

En devise l'équation sur \dot{m} :

$$\frac{\dot{m}_l}{\dot{m}} (h_l - h_1) = (h_2 - h_1) + x_1 (h_{e1} - h_3) + x_2 (h_{e2} - h_4)$$

Avec : $X_1 = \frac{\dot{m}_{e1}}{\dot{m}}$ et $X_2 = \frac{\dot{m}_{e2}}{\dot{m}}$

❖ **La fraction totale du flux de gaz liquéfié** $y = \frac{\dot{m}_l}{\dot{m}}$

$$y = \frac{\dot{m}_l}{\dot{m}} = \frac{(h_2 - h_1)}{(h_l - h_1)} + X_1 \frac{(h_{e1} - h_3)}{(h_l - h_1)} + X_2 \frac{h_{e2} - h_4}{(h_l - h_1)} \tag{III.19}$$

❖ **Travail net requis par unité de gaz comprimé** \dot{W}_{net} / \dot{m}

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_C + \dot{W}_{T1} + \dot{W}_{T2}$$

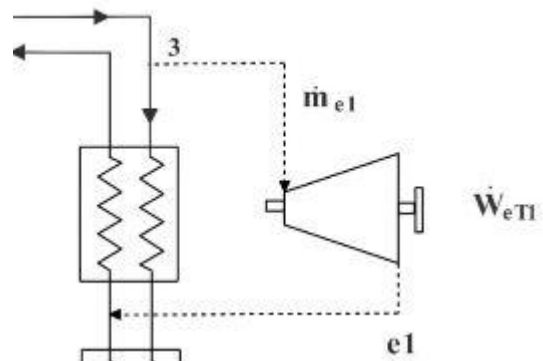
❖ **Turbine 1**

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

$$\dot{W}_{e1} = \dot{m}_{e1} (h_3 - h_{e1})$$

$$\dot{W}_{T1} = \dot{m}_{e1} (h_{e1} - h_3)$$

Avec : $\dot{W}_{e1} = -\dot{W}_{T1}$



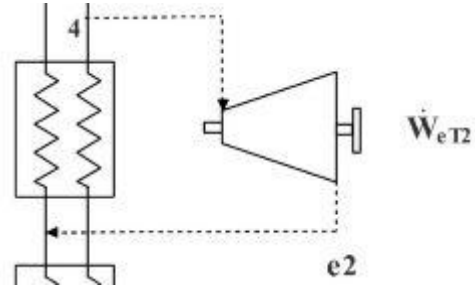
❖ Turbine 2

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

$$\dot{W}_{e2} = \dot{m}_{e2} (h_4 - h_{e2})$$

$$\dot{W}_{T2} = \dot{m}_{e2} (h_{e2} - h_4)$$

Avec : $\dot{W}_{e2} = -\dot{W}_{T2}$



❖ Machine de liquéfaction (compresseur)

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 : $\dot{W}_{c1} + \dot{m}h_1 = \dot{Q} + \dot{m}h_2$

$$\dot{W}_{c1} = \dot{Q} + \dot{m}(h_2 - h_1)$$

D'après la formule de Gibbs :

$$\delta Q = TdS + \delta q \quad \text{Et} \quad T = T_1 = T_2$$

$$\dot{Q} = \dot{m} [T (S_2 - S_1)]$$

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

$$\implies \dot{W}_{C1} = \dot{m} [(h_2 - h_1) - T (S_2 - S_1)] \quad \text{(III.20)}$$

D'où le travail net :

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_C + \dot{W}_{T1} + \dot{W}_{T2}$$

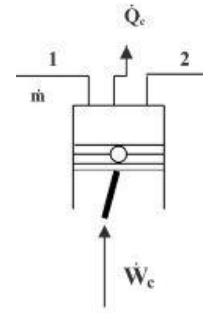
$$\dot{W}_{net} = \dot{m} [(h_2 - h_1) - T (S_2 - S_1)] + \dot{m}_{e1} (h_{e1} - h_3) + \dot{m}_{e2} (h_{e2} - h_4)$$

$$\frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}} = [(h_2 - h_1) - T (S_2 - S_1)] + \frac{\dot{m}_{e1}}{\dot{m}} (h_{e1} - h_3) + \frac{\dot{m}_{e2}}{\dot{m}} (h_{e2} - h_4)$$

Avec : $X_1 = \frac{\dot{m}_{e1}}{\dot{m}}$ et $X_2 = \frac{\dot{m}_{e2}}{\dot{m}}$

Au final on trouve le travail net requis :

$$\frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}} = [(h_2 - h_1) - T (S_2 - S_1)] + X_1 (h_{e1} - h_3) + X_2 (h_{e2} - h_4) \quad \text{(III.21)}$$



On remarque que la première partie du résultat de l'équation correspond au travail requis par le système de liquéfaction Claude simple, le deuxième terme correspond au travail fournis par la détente de gaz dans la turbine 2.

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

$$\frac{\dot{m}_l}{\dot{m}} = y \rightarrow \dot{m} = \frac{\dot{m}_l}{y} \quad \Longrightarrow \quad \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}} = y * \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_l}$$

En trouve : $\frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_l} = \frac{1}{y} * \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}}$

D'où : $\frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_l} = \frac{1}{y} * [(h_2 - h_1) - T(S_2 - S_1)] + X_1(h_{e1} - h_3) + X_2(h_{e2} - h_4)$ (III.22)

❖ **Facteur de mérite FOM**

Le rapport entre le travail théorique minimum et le travail réel nécessaire pour le système appelé le rendement thermodynamique.

$$FOM = \frac{\left(\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}_l}\right)_i}{\frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_l}} = y * \frac{\left(\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}_l}\right)_i}{\frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}}} \quad \text{Avec} \quad \left(\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}_l}\right)_i = [(h_l - h_1) - T(S_l - S_1)]$$

$$FOM = \frac{[(h_l - h_1) - T(S_l - S_1)]}{[(h_2 - h_1) - T(S_2 - S_1)] + X_1(h_{e1} - h_3) + X_2(h_{e2} - h_4)} \quad \text{(III-23)}$$

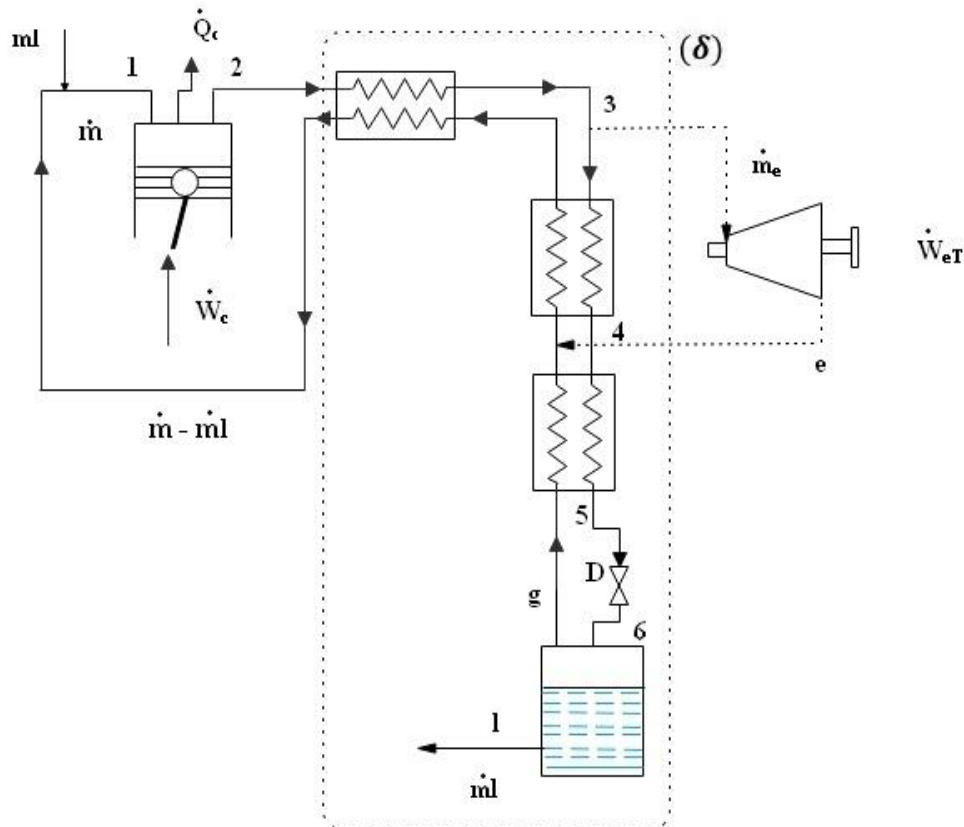
Chapitre IV

Résultats et discussions

Résultats et discussion

IV.1. Analyse thermodynamique du cycle de Claude simple

Nous avons une installation cryogénique de liquéfaction de gaz utilisant le cycle de Claude, représentée par le schéma ci-dessous. Les conditions de fonctionnement sont les suivantes : $P_1 = 1 \text{ bar}$ et $T_1 = T_2 = 300 \text{ K}$ et $P_2 = 40 \text{ bar}$, $\eta_T = 0.8$



Hypothèses :

1. Tous les éléments de l'installation, à l'exception du compresseur, sont parfaitement calorifugés.
2. Les variations des énergies cinétique et potentielles sont négligeables.
3. La dissipation est négligeable dans toute l'installation à l'exception de détenteur.
4. La compression 1-2 est isotherme réversible.
5. La détente 3-e₁ est isentropique.

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 Claude : Pour l'étude de cycle de Claude pour la liquéfaction de l'air, trois paramètres d'opération ont été considérés pour minimiser le travail absorbé et maximiser la quantité liquéfiée :

1. La température à l'entrée de la turbine T_3 .

2. Le rendement isentropique de détente.

3- La fraction massique soutirée X_1 .

Paramètres de performances de système de liquéfaction

Il y'a quatre paramètres qui peuvent indiquer la performance d'un système de liquéfaction :

❖ **Le taux de liquéfaction y :**

$$y = \frac{\dot{m}_l}{\dot{m}} = \frac{(h_2 - h_1)}{(h_l - h_1)} + X_1 \frac{(h_e - h_3)}{(h_l - h_1)} \quad (\text{III.14})$$

❖ **Le travail par unité de masse de gaz comprimé \dot{W}_{net}/\dot{m} :**

$$\frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}} = [(h_2 - h_1) - T(S_2 - S_1)] + X_1(h_e - h_3) \quad (\text{III.16})$$

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

❖ **Le travail par unité de masse liquéfiée \dot{W}_{net}/\dot{m}_l :**

$$\frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_l} = \frac{1}{y} * [(h_2 - h_1) - T(S_2 - S_1)] + X_1(h_e - h_3) \quad (\text{III.17})$$

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

❖ **Facteur de mérite FOM :**

C'est le rapport entre le travail théorique minimum et le travail réel nécessaire pour le système appelé le rendement thermodynamique.

$$FOM = \frac{[(h_l - h_1) - T(S_l - S_1)]}{[(h_2 - h_1) - T(S_2 - S_1)] + X_1(h_e - h_3)} \quad (\text{III.18})$$

IV.1.1 Influence de la température T_3 et du rapport de la fraction massique X_1 sur les paramètres du cycle de Claude :

Dans cette partie, on va voir l'évolution des paramètres de performances \dot{W}_{net}/\dot{m} , $\dot{W}_{net}/\dot{m}l$, y , FOM en fonction du rapport de la fraction massique X_1 et on variant la température $T_3 = 250 \dots 290$ °K pour les mêmes paramètres à l'entrée et à la sortie de compresseur, $P_1 = 1$ bar et $T_1 = T_2 = 300$ °K et $P_2 = 40$ bar, $\eta_{turbine} = 0.8$.

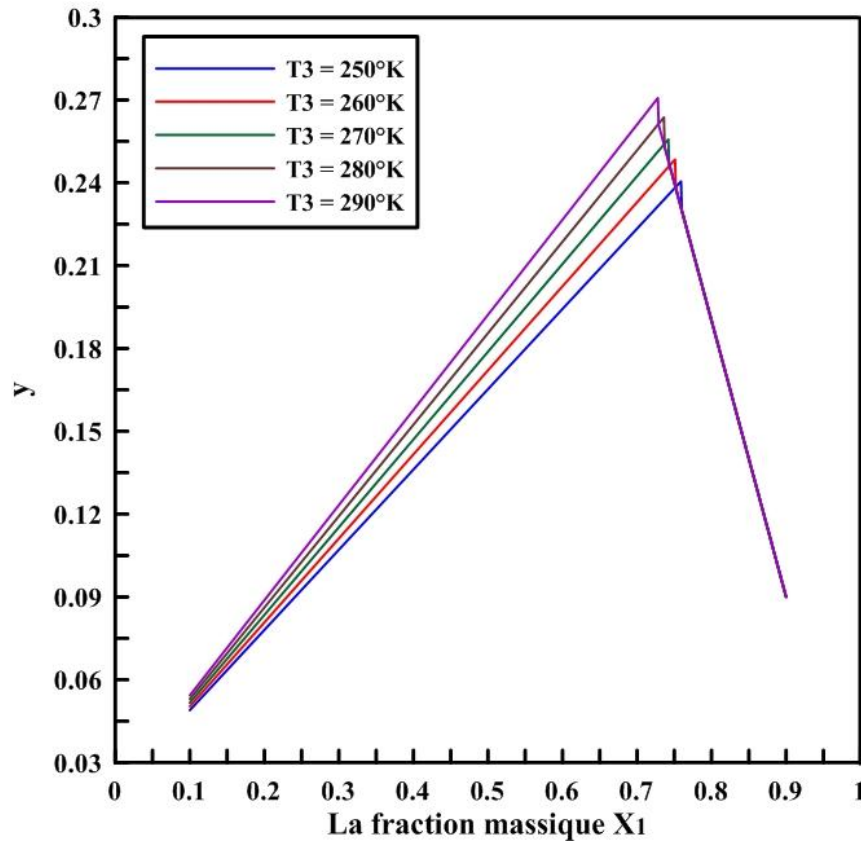


Figure IV-1 : Le taux de liquéfaction en fonction de la Température T_3 et le rapport de la fraction massique X_1

D'après la figure ci-dessus nous constatons que le taux de liquéfaction augmente d'une façon proportionnelle avec la température T_3 et le rapport de la fraction massique X_1 et cela jusqu'à ce qu'il atteigne son apogée $y = 27.04$ % correspond à une température T_3 égale à 290 °K et un rapport de la fraction massique $X_1 = 0.73$, après il commence à subir une diminution progressive correspond à toutes les températures pris en considération, La diminution est due au changement d'équation de calcul, une fois l'addition $X_1 + y \geq 1$ (le rapport de la fraction massique plus le taux de liquéfaction, dépassent l'unité) on utilise $0.99 - X_1$ pour trouver le taux de liquéfaction.

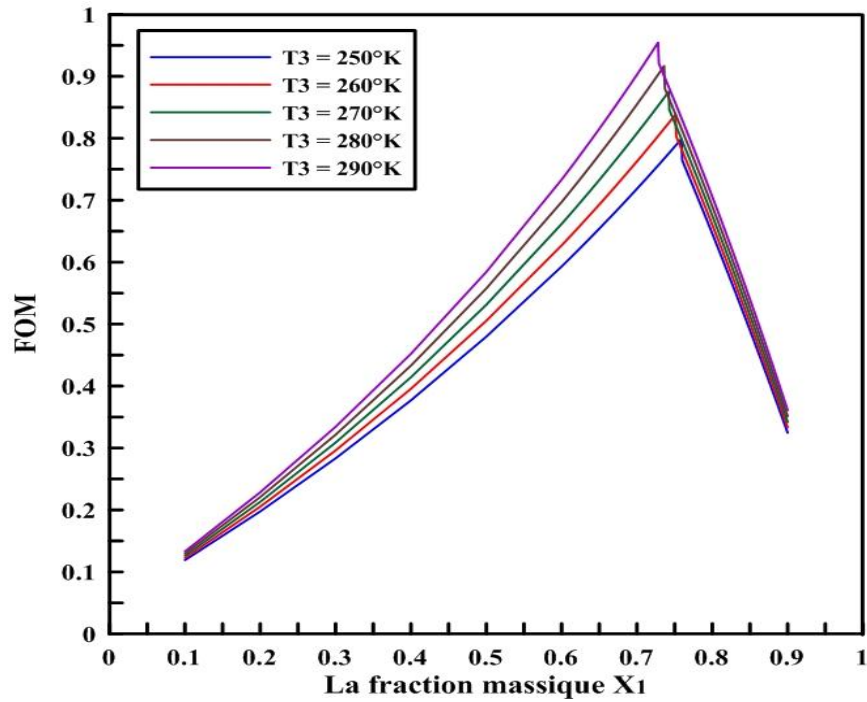


Figure IV-2 : Le facteur de mérite FOM en fonction de la température T_3 et le rapport de la fraction massique X_1

On remarque d'après la figure ci-dessus que le facteur de mérite FOM augmente proportionnellement avec l'évolution de la température T_3 et le rapport de la fraction massique X_1 , et cela, jusqu'à son maximum après il commence à subir une diminution progressive. Le FOM est culminé à une valeur de 95.466 % correspond à $T_3 = 290^\circ\text{K}$ et $X_1 = 0,73$.

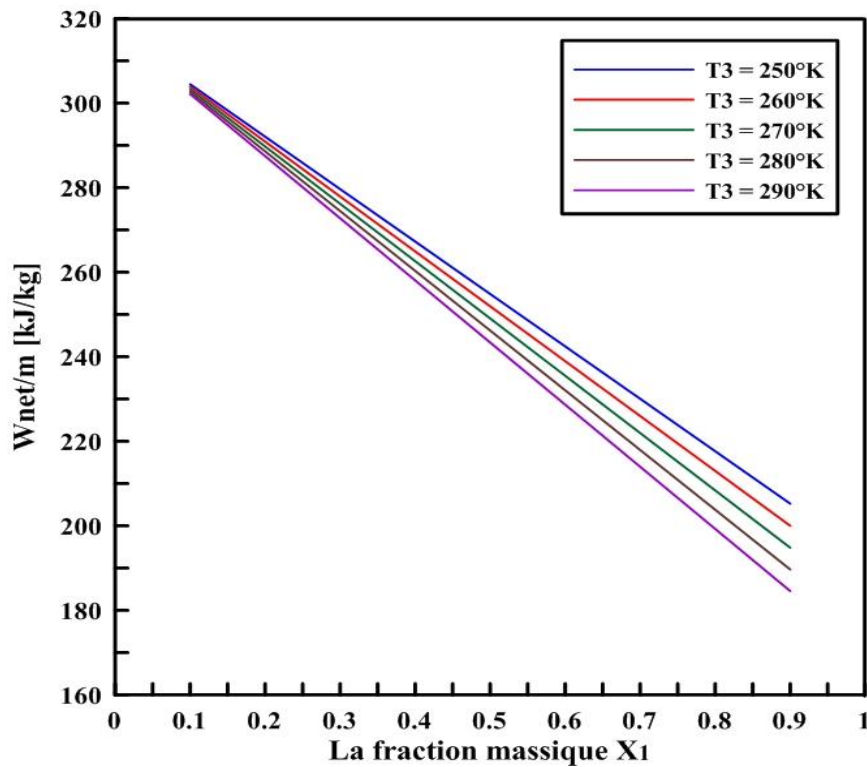


Figure IV-3 : Le travail par unité de masse de gaz comprimée en fonction de la température T_3 et le rapport de la fraction massique X_1

On constate d'après cette figure ci-dessus que l'énergie dépensée par unité de gaz comprimé diminue de plus en plus que la température T_3 et le rapport de la fraction massique X_1 augmentent. La valeur minimale de travail net requis est de : $\dot{W}_{net}/\dot{m} = 187.57$ [KJ/Kg] pour $T_3 = 290$ °K et $X_1 = 0.9$.

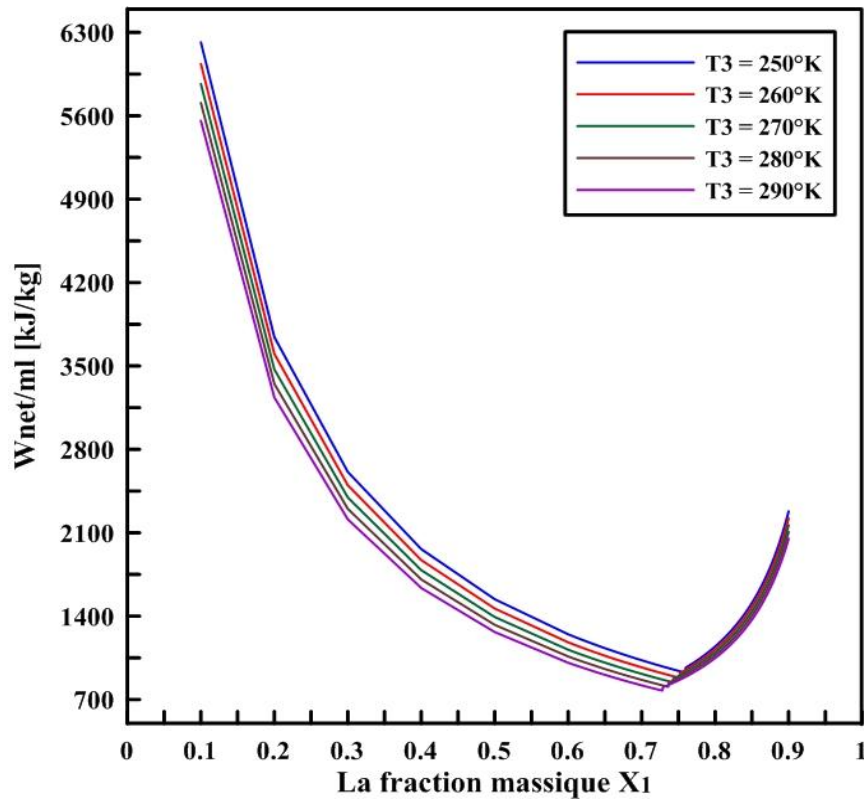


Figure IV-4 : Le travail par unité de masse de gaz liquéfiée en fonction de la température T_3 et le rapport de la fraction massique X_1

La figure ci-dessus montre que le travail net par unité de masse de gaz liquéfié subit une diminution significative avec l'augmentation de la température T_3 et la fraction massique X_1 puis il commence à augmenter après avoir atteint le minimum possible, la valeur minimale est : $\dot{W}_{net}/\dot{m} = 775.12$ [kJ/kg] correspond à $T_3 = 290$ °K et $X_1 = 0.73$.

Discussion :

Dans cette partie, on est arrivé à déterminer des résultats concernant l'influence de la température T_3 et le rapport de la fraction massique X_1 sur le cycle de Claude pour la liquéfaction de l'air sous les conditions suivant : $P_1 = 1\text{bar}$ et $T_1 = T_2 = 300\text{ °K}$ et $P_2 = 40\text{ bar}$, et $\eta_{\text{turbine}} = 0.8$.

D'après ces résultats, on constate que l'accroissement de rapport de la fraction massique X_1 et de la température à l'entrée de la turbine T_3 font augmenter progressivement le taux de liquéfaction y ce qui est justifié par l'élévation de travail de détente isentropique $X(h_3 - h_e)$ par la turbine à chaque accroissement du rapport X_1 , de plus on prend en compte que l'enthalpie varie en fonction de la température et la pression, pour une pression donnée constant chaque élévation de température accroît l'enthalpie du gaz, dans le cas étudié cela influe positivement sur le travail de la turbine qui augmente puis impact favorablement le taux de liquéfaction de l'installation. La valeur maximale qu'on a pu obtenir est $y = 27.04\%$ correspond à $T_3 = 290\text{ °K}$ et $X_1 = 0.73$.

Concernant le facteur de mérite FOM , les résultats nous montrent qu'il augmente progressivement avec l'élévation de T_3 et X_1 jusqu'à ce qu'il atteigne son apogée $FOM = 95.46\%$ correspond à une température $T_3 = 290\text{ °K}$ et un rapport de fraction $X_1 = 0.73$, puis il commence à diminuer. Ce qui nous paraît juste vu qu'on a enregistré une élévation de taux de liquéfaction et une diminution de travail nécessaire à la liquéfaction de gaz. En outre, le sommet du FOM trouvée suggère que l'étude se rapproche de fonctionnement du cycle idéal ou théorique.

Pour les deux derniers facteurs \dot{W}_{net}/\dot{m} et $\dot{W}_{net}/\dot{m}l$ on constate que pour le travail net par unité de gaz comprimé, il diminue progressivement en raison de l'énergie fournie par la turbine au compresseur, à chaque fois que T_3 et X_1 augmentent l'énergie fournie augmente, d'où la diminution de travail nécessaire pour liquéfier 1 kg de gaz, et cela, jusqu'à ce qu'il arrive à son minimum, la valeur la plus minimale est $\dot{W}_{net}/\dot{m} = 187.57\text{ [kJ/kg]}$ obtenue à $T_3 = 290\text{ °K}$ et $X_1 = 0.9$.

Concernant le travail net par unité de masse de gaz liquéfié nous constatons qu'il se diminue aussi à chaque fois que T_3 et X_1 augmente, mais dès qu'il arrive à son minimum, il commence à subir une légère élévation, vu que le FOM est inversement proportionnelle à l'évolution de $\dot{W}_{net}/\dot{m}l$ et qu'on a trouvé une valeur du FOM élevé et un meilleur taux de liquéfaction, c'est juste que le travail net utile pour liquéfier 1 kg de liquide subit une diminution progressive.

La valeur minimale obtenue est $\dot{W}_{net}/\dot{m}l = 775.12$ [kJ/kg] à $T_3 = 290^\circ\text{K}$ et $X_1 = 0.73$, du coup, on peut dire que ces résultats répond favorablement à l'objectif de l'étude dont on vise à liquéfier le maximum de gaz, on fournissant le minimum de travail net.

Et on conclut qu'il faut toujours faire le bon choix de ces paramètres pour avoir un bon taux de liquéfaction et une meilleure performance possible du cycle.

IV.1.2 Influence du rendement de détente η et du rapport de la fraction massique X_1 sur les paramètres du cycle de Claude :

Dans cette partie, on va voir l'évolution des paramètres de performances \dot{W}_{net}/\dot{m} , $\dot{W}_{net}/\dot{m}l$, y , FOM en fonction du rapport de la fraction massique X_1 et on variant le rendement de la détente $\eta = 0.7 \dots 0.9$ avec les conditions initiales suivants $P_1 = 1$ bar et $T_1 = T_2 = 300^\circ\text{K}$, $T_3 = 270^\circ\text{K}$ et $P_2 = 40$ bar.

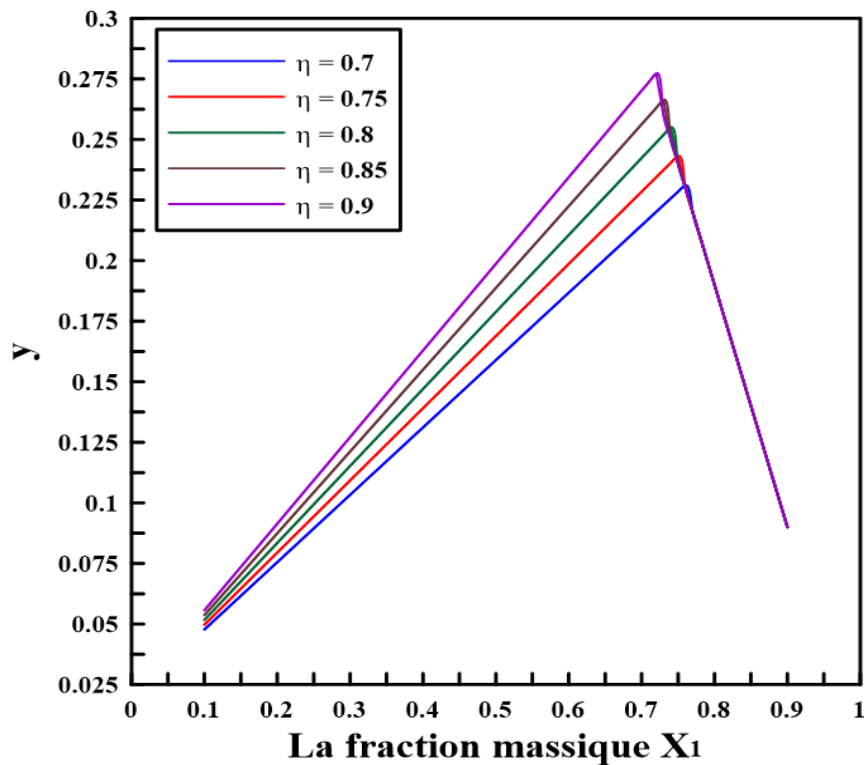


Figure IV-5 : Le taux de liquéfaction en fonction de rendement de la détente η et le rapport de la fraction massique X_1

Nous constatons d'après la figure ci-dessus que le taux de liquéfaction subit un accroissement progressive à chaque fois que le rendement de détente η et le rapport de la fraction massique X_1 augmente, puis quand il arrive à son maximum, il se diminue progressivement, la diminution est due au changement d'équation de calcul, une fois l'addition $X_1 + y \geq 1$ (le rapport de la fraction massique plus le taux de liquéfaction, dépassent l'unité) on utilise $0.99 - X_1$ pour

trouver le taux de liquéfaction. La valeur maximale de taux de liquéfaction qu'on a pu obtenir est $y = 27.74 \%$ correspond à un rendement $\eta = 0.9$ et un rapport de fraction massique $X_1 = 0.72$.

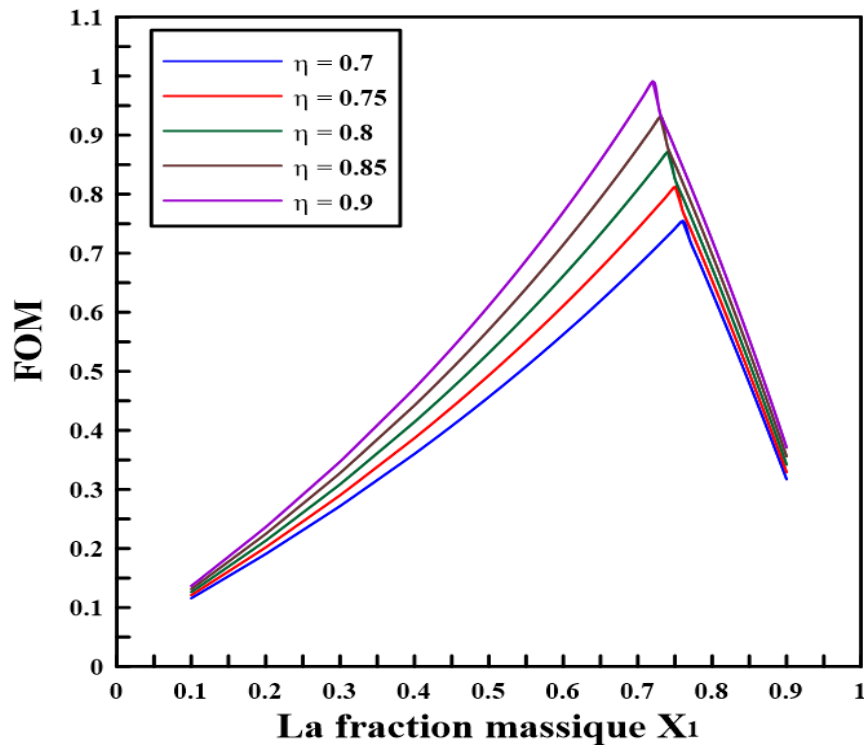


Figure IV-6 : Le facteur de mérite en fonction de rendement de la détente η et le rapport de la fraction massique X_1

Les résultats montrent que le facteur de mérite augmente proportionnellement avec le rendement de détente η et le rapport de la fraction massique X_1 , et cela, jusqu'à ce qu'il arrive à son maximum dans chaque température et fraction qui lui correspond puis il subit une diminution progressive. Le facteur de mérite a culminé à la valeur $FOM = 99.13 \%$ à un rapport de la fraction massique $X_1 = 0.72$ et un rendement de détente $\eta = 0.9$.

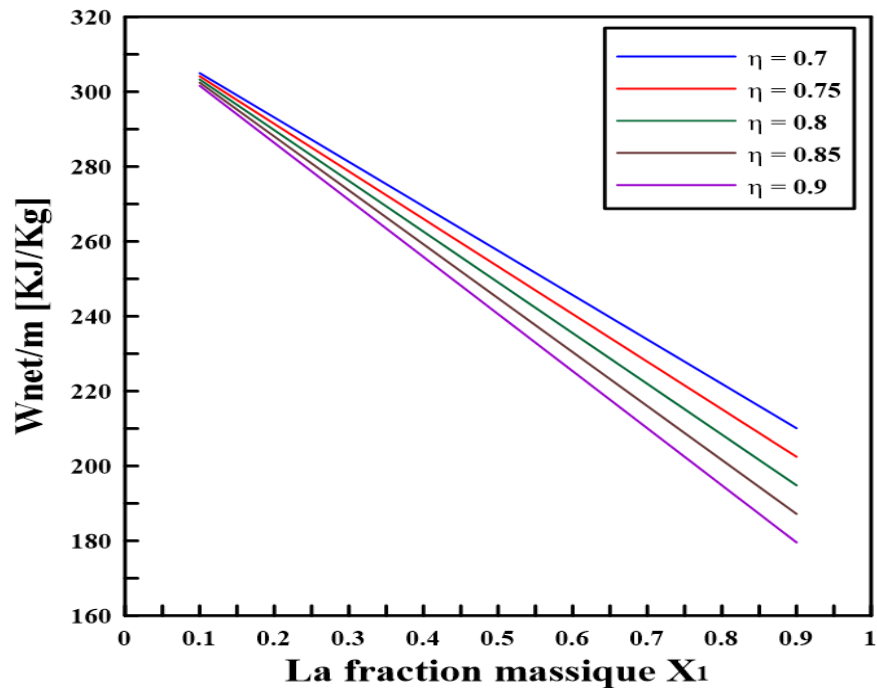


Figure IV-7 : Le travail par unité de masse de gaz comprimée en fonction de rendement de la détente η et le rapport de la fraction massique X_1

Nous constatons d'après la figure ci-dessus que le travail net par unité de masse de gaz comprimé diminue à chaque fois que le rendement de détente η et le rapport de la fraction massique X_1 augmente, et cela, jusqu'à ce qu'il arrive à une valeur minimale de : $\dot{W}_{net}/\dot{m} = 179,565$ [kJ/kg] correspond à $\eta = 0.9$ et $X_1 = 0.9$.

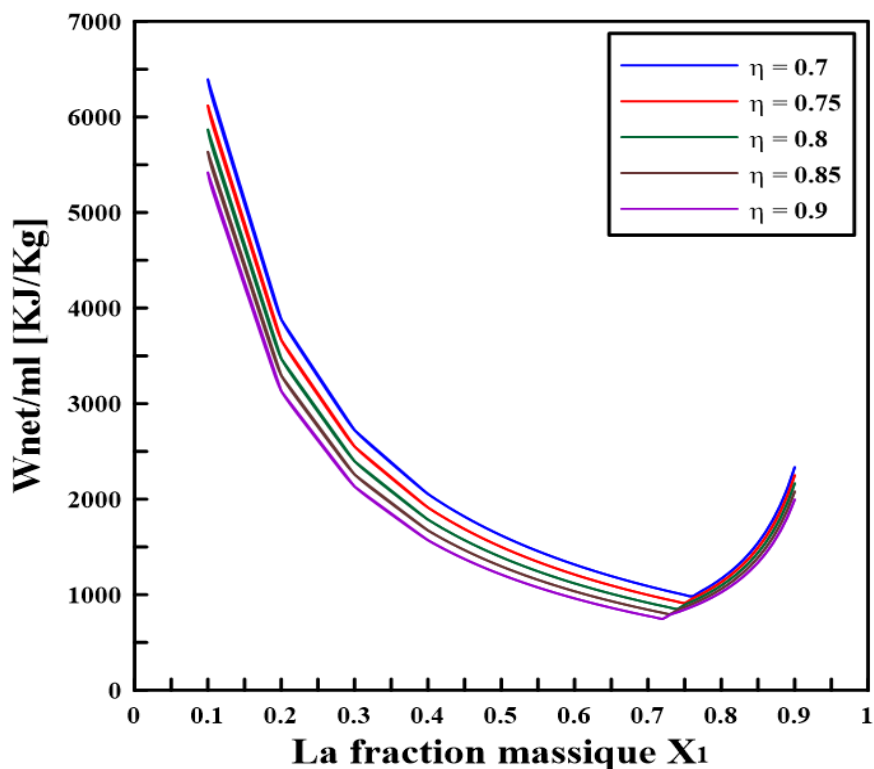


Figure IV-8 : Le travail par unité de masse de gaz liquéfiée en fonction de rendement de la détente η et le rapport de la fraction massique X_1

On constate bien que le travail net par unité de masse de gaz liquéfié diminue à chaque fois que le rendement de la détente η et le rapport de la fraction massique X_1 augmente, puis il commence à subir une légère élévation après avoir, atteindre son minimum, la valeur minimale dans ce cas est estimé à $\dot{W}_{net}/\dot{m}l = 746,4238$ [kJ/kg] correspond à un rendement $\eta = 0.9$ et $X_1 = 0.72$.

Discussion :

Dans cette partie, on est arrivé à déterminer des résultats concernant l'influence de rendement de la détente η et le rapport de la fraction massique X_1 sur le cycle de Claude pour la liquéfaction de l'air sous les conditions suivant : $P_1 = 1\text{bar}$ et $T_1 = T_2 = 300\text{K}$ et $P_2 = 40\text{bar}$.

D'après ces résultats, on constate que l'accroissement du rendement de la détente avec le rapport de la fraction massique X_1 font augmenter progressivement le taux de liquéfaction y jusqu'à ce qu'il atteigne son maximum $y = 27.74\%$ correspond à un rendement $\eta = 0.9$ et une fraction massique $X_1 = 0.72$. ce qui est justifié par l'élévation de travail de détente isentropique $X(h_3 - h_e)$ par la turbine à chaque accroissement du rapport X_1 , de plus on prend en compte que l'évolution du rendement isentropique de la turbine influe positivement sur la quantité de gaz liquéfié vu que l'enthalpie au point e (réelle) diminue avec l'accroissement du rendement, ce qui implique l'amélioration du travail de la turbine et justifier l'évolution du taux de liquéfaction, puis il permet l'amélioration de la performance du cycle.

Concernant le facteur de mérite FOM , les résultats nous montrent qu'il est aussi en évolution proportionnelle avec le rendement de la détente η et X_1 jusqu'à où il atteindra son apogée $FOM = 99.13\%$ correspond à un rendement $\eta = 0.9$ et $X_1 = 0.72$, après il subit une diminution progressive jusqu'à ce qu'il atteigne une valeur minimale de 31.7% .

Ce qui nous paraît juste vu qu'on a enregistré une élévation de taux de liquéfaction et une diminution de travail nécessaire à la liquéfaction de gaz. En outre, le sommet du FOM trouvée suggère que l'étude se rapproche de fonctionnement du cycle idéal ou théorique.

Pour le travail net par unité de gaz comprimé on constate qu'il diminue progressivement vis-à-vis l'augmentation de rendement de détente η et du rapport de la fraction massique X_1 , en raison de l'énergie fournie par la turbine au compresseur à savoir que la turbine fournit plus d'énergie avec un rendement isentropique élevé et plus de masse de gaz qui se détend, d'où la diminution de travail nécessaire à liquéfier 1 kg de gaz. La valeur minimale qu'on a pu obtenir est estimée à : $\dot{W}_{net}/\dot{m} = 179,565$ [kJ/kg].

Concernant le travail net par unité de masse de gaz liquéfié nous constatons aussi qu'il est en diminution vis-à-vis de l'augmentation de rendement de la détente η et X_1 , puis il commence à

avoir une certaine évolution après avoir atteint son minimum, vu que le FOM est inversement proportionnel à l'évolution de $\dot{W}_{net}/\dot{m}l$ et qu'on a trouvé une valeur du FOM élevé et un meilleur taux de liquéfaction, c'est juste que le travail net utile pour liquéfier 1 kg de liquide subit une diminution progressive. La valeur la plus minimale est de

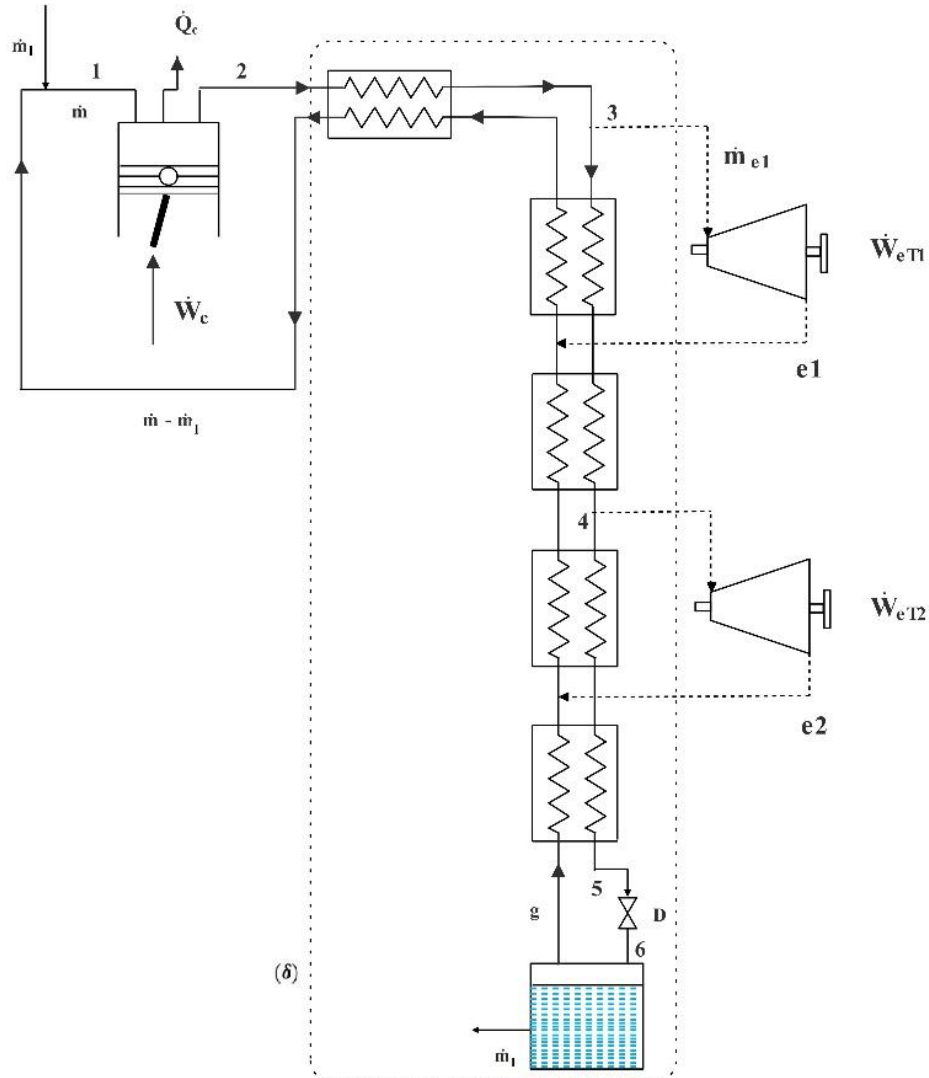
$$\dot{W}_{net}/\dot{m}l = 746,424 \text{ [kJ/kg]}$$

Du coup, on peut dire que ces résultats répondent favorablement à l'objectif de l'étude dont on veut liquéfier le maximum de gaz, on fournissant le minimum du travail net.

À la fin, on conclut qu'il faut toujours faire le bon choix de ces paramètres pour avoir un meilleur taux de liquéfaction, et assurer la meilleure performance du cycle.

VI.2. Analyse thermodynamique de cycle de Claude modifié (Collins) :

Considérant l'installation suivant pour la liquéfaction des gaz, les conditions de fonctionnement sont les suivants : $P_1 = 1 \text{ bar}$, $T_1 = 300 \text{ °K}$, $T_3 = 90 \text{ °K}$, $T_4 = 15 \text{ °K}$



Hypothèse :

- 1- Tous les éléments de l'installation, à l'exception du compresseur, sont parfaitement calorifugés.
- 2- Les variations des énergies cinétiques et potentielles sont négligeables.
- 3- La dissipation est négligeable dans toute l'installation à l'exception du détendeur.
- 4- La compression 1-2 est isotherme réversible.
- 5- Les détentes 3-e1 et 5-e2 sont isentropique.

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 Claude modifié :

Pour étudier le cycle de Claude modifié pour la liquéfaction de l'hélium trois paramètres d'opération ont été considérés :

1. Le rapport de la fraction massique X_1 .
2. Le rapport de la fraction massique X_2 .
3. La température de soutirage T_4 .

Paramètres de performances de système de liquéfaction**❖ La fraction totale du flux de gaz liquéfié :**

$$y = \frac{\dot{m}_l}{\dot{m}} = \frac{(h_2 - h_1)}{(h_l - h_1)} + X_1 \frac{(h_{e1} - h_3)}{(h_l - h_1)} + X_2 \frac{h_{e2} - h_4}{(h_l - h_1)} \quad (\text{III.19})$$

❖ Travail net requis par unité de gaz comprimé :

$$\frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}} = [(h_2 - h_1) - T(S_2 - S_1)] + X_1(h_{e1} - h_3) + X_2(h_{e2} - h_4) \quad (\text{III.21})$$

$$\text{Avec : } X_1 = \frac{\dot{m}_{e1}}{\dot{m}} \quad \text{et} \quad X_2 = \frac{\dot{m}_{e2}}{\dot{m}}$$

❖ Travail par unité de masse de gaz liquéfié :

$$\frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_l} = \frac{1}{y} * \left[[(h_2 - h_1) - T(S_2 - S_1)] + X_1(h_{e1} - h_3) + X_2(h_{e2} - h_4) \right] \quad (\text{III.22})$$

❖ Facteur de mérite FOM :

$$FOM = \frac{[(h_l - h_1) - T(S_l - S_1)]}{[(h_2 - h_1) - T(S_2 - S_1)] + X_1(h_{e1} - h_3) + X_2(h_{e2} - h_4)} \quad (\text{III.23})$$

IV.2.1. Influence du rapport de la fraction massique X_1 et X_2 sur les paramètres du cycle de Claude modifié :

Pour les mêmes paramètres à l'entrée et à la sortie du compresseur ($P_1 = 1 \text{ bar}$, $T_1 = T_2 = 300 \text{ °K}$ et $P_2 = 14 \text{ bar}$). Dans cette partie, on va fixer la température à l'entrée de la turbine 1 au point 3 ($T_3 = 90 \text{ °K}$) et la température à l'entrée de la turbine 2 au point 4 ($T_4 = 15 \text{ °K}$), le rapport de la fraction massique X_1 prend des valeurs allons de 0.1 à 0.9, et le rapport X_2 prend des valeurs de 0.1 à 0.5.

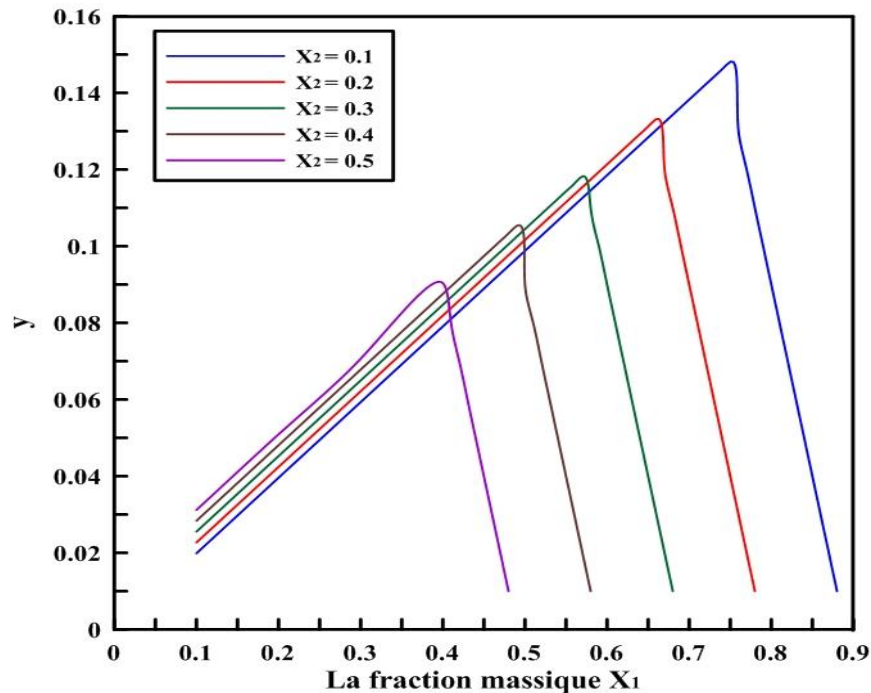


Figure IV-9 : la fraction totale du flux de gaz liquéfié en fonction du rapport de la fraction massique X_1 pour différentes valeurs du rapport de la fraction massique X_2

On remarque que l'évolution de taux de liquéfaction est proportionnelle à l'évolution du rapport de la fraction massique X_1 , et une élévation de taux pour chaque accroissement de rapport de la fraction massique X_2 , puis le taux commence à diminuer graduellement une fois atteint son maximum de $y = 14.81 \%$ pour $X_2 = 0.1$ et $X_1 = 0.75$, la diminution est due au changement d'équation de calcul, une fois l'addition $X_1 + X_2 + y \geq 1$ (le rapport de la fraction massique 1 plus le rapport de la fraction massique 2 plus le taux de liquéfaction, dépassent l'unité) on utilise $0.99 - X_1 - X_2$ pour trouver le taux de liquéfaction.

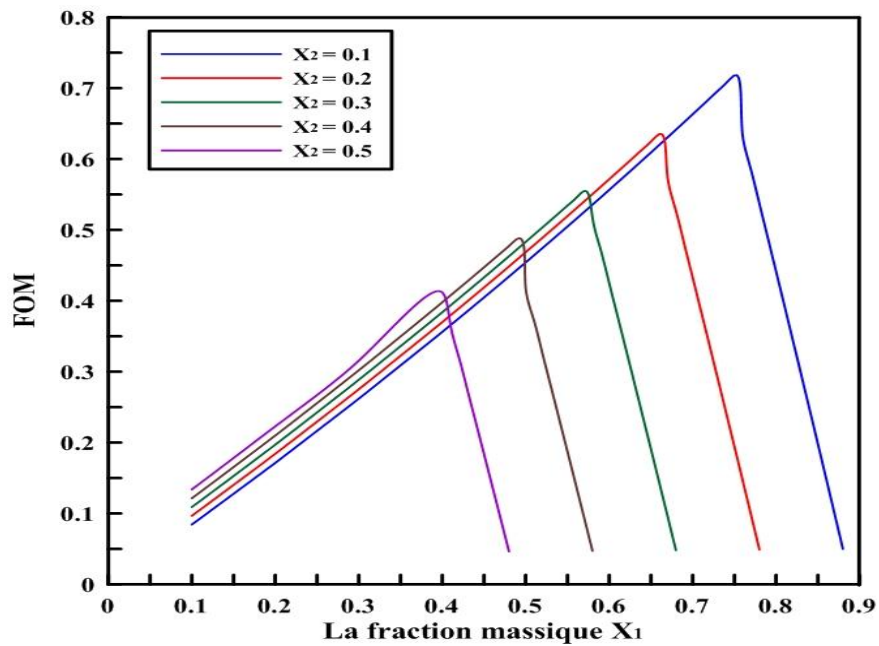


Figure IV-10 : Facteur de mérite FOM en fonction du rapport de la fraction massique X_1 pour différentes valeurs du rapport de la fraction massique X_2

On remarque que le facteur de mérite FOM varie d'une façon proportionnelle à l'évolution de rapport de la fraction massique X_1 , et on constate une montée graduelle de FOM en suivant la progression du rapport de la fraction massique X_2 , puis le rendement commence à diminuer graduellement une fois atteint son maximum, on parvient au résultat suivant $FOM = 71.82\%$ pour $X_2 = 0.1$ et $X_1 = 0.75$.

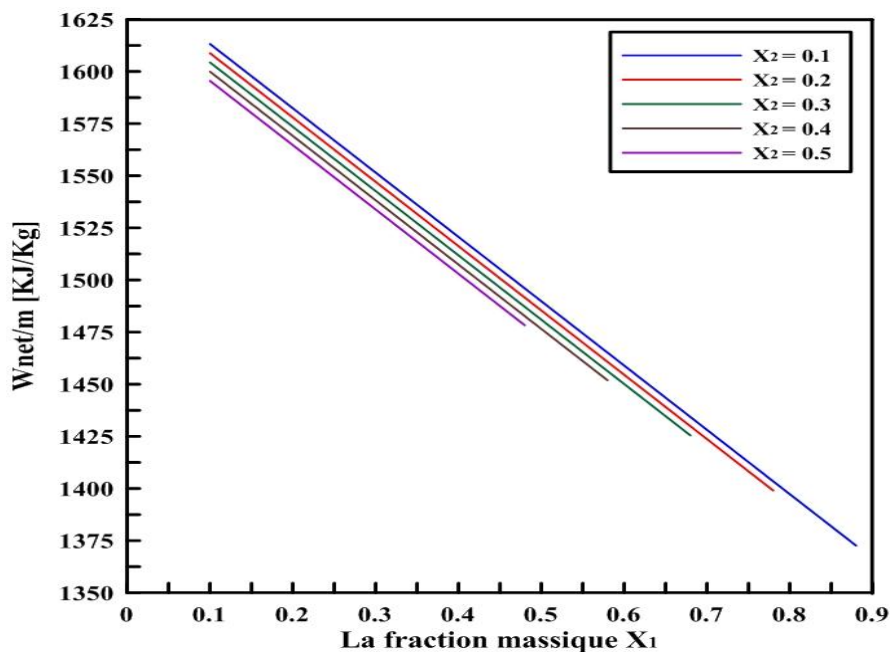


Figure IV-11 : Travail net requis par unité de gaz comprimé en fonction du rapport de la fraction massique X_1 pour différentes valeurs du rapport de la fraction massique X_2

On remarque que le travail net diminue d'une façon proportionnelle à l'accroissement du rapport de la fraction massique X_1 , un autre abaissement de travail net est constaté avec la progression du rapport de la fraction massique X_2 , on trouve un travail net minimal pour liquéfier une unité de gaz comprimé de : $\frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}} = 1372,5881 [kJ/kg]$ pour $X_2 = 0.1$ et $X_1 = 0.88$.

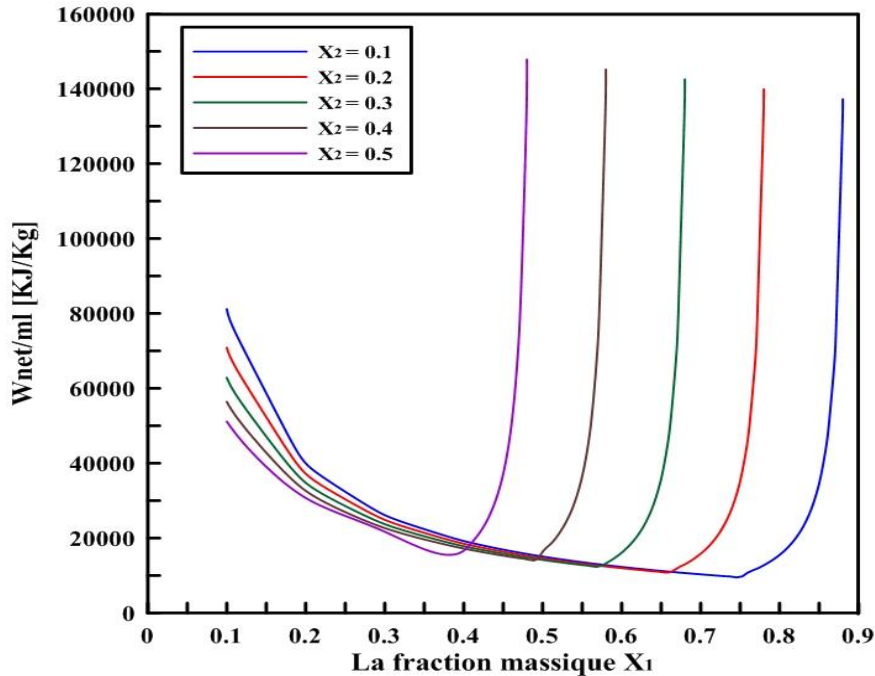


Figure IV-12 : Travail net par unité de masse de gaz liquéfié en fonction du rapport de la fraction massique X_1 pour différentes valeurs du rapport de la fraction massique X_2

On remarque d'après la figure une grande diminution de travail net par unité de masse de gaz liquéfié en fonction du rapport de la fraction massique X_1 , et une diminution de travail en fonction de l'augmentation des valeurs s du rapport de la fraction massique X_2 , puis le rendement commence à augmenter graduellement une fois atteint son minimum, on trouve un travail net minimal pour avoir 1 kg de liquide $\frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}} = 9537,135439 [kJ/kg]$ pour $X_2 = 0.1$ et $X_1 = 0.75$.

Discussion :

Durant cette partie, on a étudié l'influence de deux paramètres, le rapport de la fraction massique X_1 et X_2 sur le cycle de Claude modifié pour la liquéfaction de l'hélium fonctionnant sous les conditions suivantes : $P_1 = 1 \text{ bar}$, $T_1 = T_2 = 300 \text{ °K}$ et $P_2 = 14 \text{ bar}$, $T_3 = 90 \text{ °K}$, $T_4 = 15 \text{ °K}$,

On a pu obtenir une amélioration de taux de liquéfaction qui passe jusqu'à 14.81 % pour $X_2 = 0.1$ et $X_1 = 0.75$, ce qui est le but principal de l'utilisation de deux éléments de détente (turbine) dans le cycle de Collins, comme illustré dans les courbes à chaque fois que les rapports de fractions massiques X_1 et X_2 qui entre dans les turbines augmente le taux de liquéfaction accroît et atteint son maximum, par la suite, il commence à diminuer brutalement. Il faut tenir en compte les résultats de l'addition des deux rapports X_1+X_2 vu qu'à chaque fois l'addition atteint des valeurs entre (80 à 90%) et en laissant la partie restante du gaz se détend dans la soupape de détente (J-T) on aboutit aux meilleurs résultats de taux de liquéfaction.

Pour le facteur du mérite FOM son allure dans les courbes suggère que l'étude se rapproche du fonctionnement du cycle idéal (théorique) pour chaque augmentation des fractions massiques, on a enregistré une valeur maximale pour le FOM de 71.82 %. Dans le cas étudié, on a présumé que les différents organes constituant l'installation (le compresseur, les 2 turbines et les échangeurs de chaleur) ont un rendement optimal de 100% (sans perte) il est normal de trouver un rendement élevé qui se rapproche de fonctionnement d'un système idéal.

Pour le travail net requis par unité de gaz comprimé \dot{w}_{net}/\dot{m} , sa diminution en fonction de l'évolution des 2 rapports des fractions massiques X_1 et X_2 est justifié par l'accroissement de travail fourni par les turbines 1 et 2 pour aider le processus de compression, ce qui implique la diminution de travail utile à la liquéfaction d'une quantité du gaz, on trouve un travail minimale de $\dot{w}_{net}/\dot{m} = 1372,5881 \text{ [kJ/kg]}$

Pour le travail net par unité de masse de gaz liquéfié \dot{w}_{net}/\dot{m}_l nous constatons qu'il diminue aussi à chaque fois que les 2 rapports des fractions massiques X_1 et X_2 augmente, mais dès qu'il arrive à son minimum, il commence à subir une légère élévation, vu que le FOM est inversement proportionnel à l'évolution de \dot{w}_{net}/\dot{m}_l et qu'on a trouvé une valeur du FOM élevé et un meilleur taux de liquéfaction, c'est juste et souhaitable que le travail net utile pour liquéfier 1 kg de liquide subit une diminution progressive. On trouve un travail minimal de : $\dot{w}_{net}/\dot{m}_l = 9537,135439 \text{ [kJ/kg]}$. En conclusion, un bon choix des deux paramètres est nécessaire pour avoir un meilleur taux de liquéfaction et un rendement optimal de l'installation en utilisant le minimum d'énergie possible.

IV.2.2. Influence du rapport X_1 et de la température T_4 sur les paramètres du cycle de Claude modifié :

Pour les mêmes paramètres à l'entrée et à la sortie du compresseur ($P_1 = 1 \text{ bar}$, $T_1 = T_2 = 300 \text{ °K}$ et $P_2 = 14 \text{ bar}$). Dans cette partie, on va fixer la température à l'entrée de la turbine 1 au point 3 ($T_3 = 90 \text{ °K}$) et le rapport de la fraction massique X_2 ($X_2 = 0.2$), le rapport de la fraction massique X_1 prend des valeurs allons de 0.1 à 0.9 et la température T_4 prend des valeurs de 15 à 50 °K.

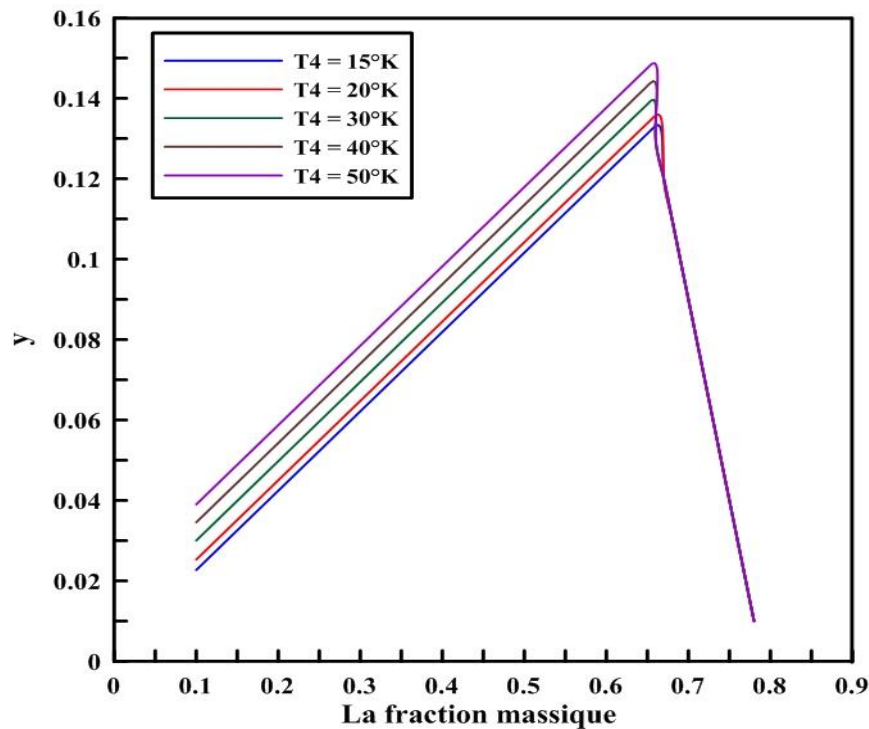


Figure IV-13 : la fraction totale du flux de gaz liquéfié en fonction du rapport de la fraction massique X_1 pour des différentes valeurs de température T_4

On remarque que le taux de liquéfaction varie d'une façon proportionnelle à l'évolution du rapport de la fraction massique X_1 et une augmentation du taux en fonction de température T_4 et aussi constater, le taux diminue progressivement une fois atteint son maximum de : $y = 14.85 \%$ pour $X_1 = 0.655$ et $T_4 = 50 \text{ °K}$. la diminution est due au changement d'équation de calcul, une fois l'addition $X_1 + X_2 + y \geq 1$ (le rapport de la fraction massique 1 plus le rapport de la fraction massique 2 plus le taux de liquéfaction, dépassent l'unité) on utilise $0.99 - X_1 - X_2$ pour trouver le taux de liquéfaction.

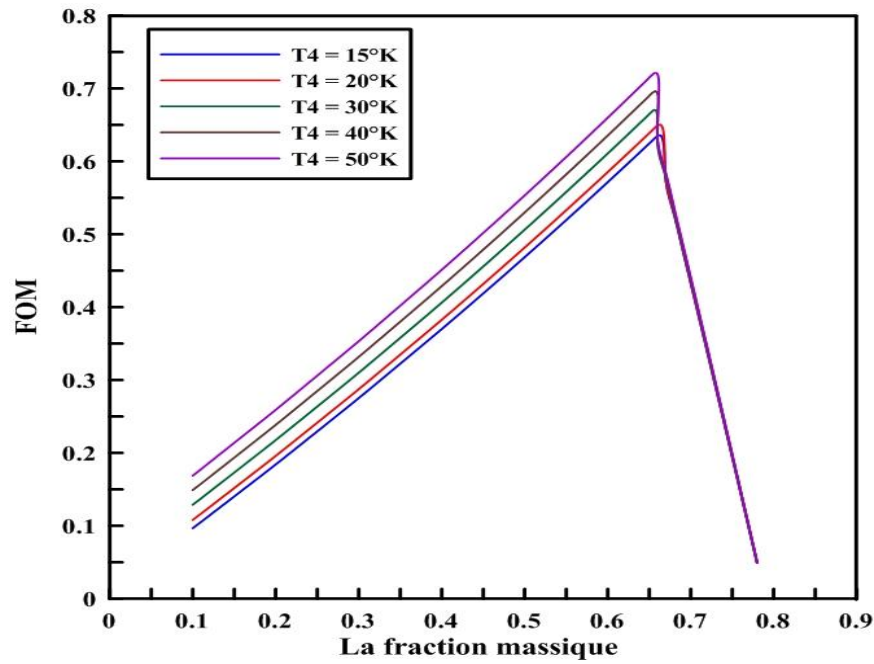


Figure IV-14 : Facteur de mérite FOM en fonction du rapport de la fraction massique X_1 pour des différentes valeurs de température T_4

D'après la figure on remarque que le facteur de mérite augmente lorsque le rapport de la fraction massique X_1 accroît, et une amélioration est constatée à chaque accroissement de la température T_4 , on obtient un rendement maximal $FOM = 72.04\%$ pour $X_1 = 0.66$ et $T_4 = 50^\circ\text{K}$, puis un décroissement brutal du FOM est constaté une fois atteint son maximum.

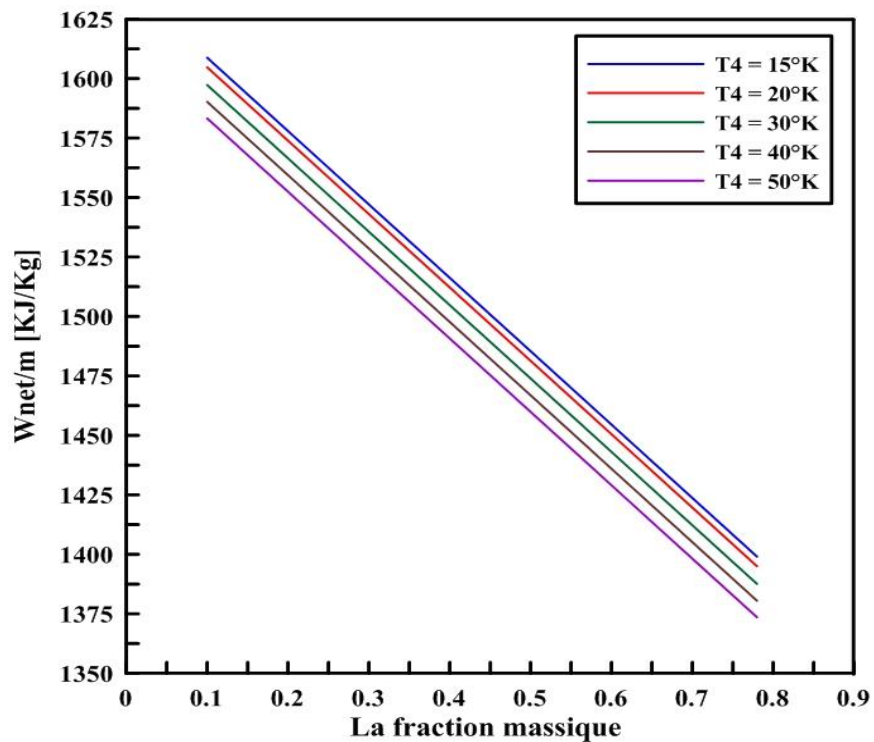


Figure IV-15 : Travail net requis par unité de gaz comprimé en fonction du rapport de la fraction massique X_1 pour des différentes valeurs de température T_4

D'après la figure une diminution considérable du travail net requis par unité de gaz comprimé est constaté d'une façon proportionnelle à l'augmentation du rapport de la fraction massique X_1 , un autre abaissement du travail net selon la température T_4 est observé, on obtient

$$\frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}} = 1373.5089 \text{ [KJ/Kg]} \text{ pour } X_1 = 0.78 \text{ et } T_4 = 50^\circ\text{K}.$$

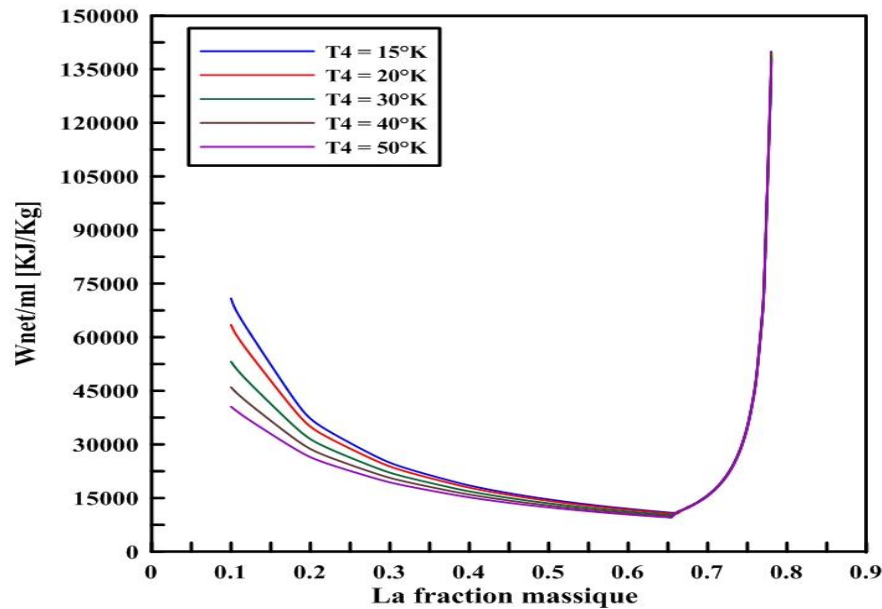


Figure IV-16 : Travail net par unité de masse de gaz liquéfié en fonction du rapport de la fraction massique X_1 pour différentes valeurs de température T_4

On remarque un décroissement considérable du travail net par unité de masse de gaz liquéfié en fonction de l'élévation du rapport de la fraction massique X_1 et en constate un autre décroissement en fonction de l'accroissement de la température T_4 , puis jusqu'à approximativement $X_1 = 0.66$ le travail requis augmente brutalement. On obtient le travail net minimal $\frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}} = 9507,458043$ [kJ/kg] pour $X_1 = 0.655$ et $T_4 = 50^\circ\text{K}$.

Discussion :

Durant cette partie, on a étudié l'influence de deux paramètres le rapport de la fraction massique X_1 et la température à l'entrée de la turbine 2 T_4 sur le cycle de Claude modifié pour la liquéfaction de l'hélium fonctionnant sous les conditions suivantes : $P_1 = 1 \text{ bar}$, $T_1 = T_2 = 300 \text{ }^\circ\text{K}$ et $P_2 = 14 \text{ bar}$ $T_3 = 90 \text{ }^\circ\text{K}$, $X_2 = 0.2$.

On a pu obtenir une amélioration de taux de liquéfaction qui passe jusqu'à 14.85 %, ce qui est un but principal de l'utilisation de deux éléments de détente (turbine) dans le cycle de Collins, comme illustré dans les courbes à chaque fois que le rapport de la fraction massique X_1 qui rentre

dans la première turbine augmente, le taux de liquéfaction augmente due à l'accroissement du travail fourni par la turbine 1 et une autre augmentation avec l'élévation de la température à l'entrée de la turbine 2 T_4 due à l'accroissement de la valeur d'enthalpie ce qui améliore graduellement le travail de la turbine 2, vu que le fonctionnement des 2 turbines s'améliore alors on obtient une augmentation de rendement.

Pour le facteur du mérite FOM à chaque augmentation du rapport de la fraction massique X_1 et de la température T_4 le rendement accroît et on a enregistré une valeur maximale de 72.04 %, vu que dans le cas étudié, on a supposé que les différents organes constituant le cycle (le compresseur, les 2 turbines et les échangeurs de chaleur) ont un rendement optimal de 100% (sans perte) il est normal de trouver un rendement élevé qui se rapproche de fonctionnement d'un système idéal.

Pour le travail net requis par unité de gaz comprimé \dot{w}_{net}/\dot{m} sa diminution en fonction de l'évolution du rapport de la fraction massique X_1 et de la température T_4 est justifié par l'élévation de travail fourni par les turbines 1 à cause de l'augmentation de masse de gaz qui se détend à travers et de la turbine 2 qui à chaque amélioration de T_4 enregistre un accroissement d'énergie fourni. Cela implique la diminution de travail utile à la liquéfaction d'une quantité du gaz, vu que les deux turbines fournissent plus d'énergie pour aider le processus de compression. On trouve un travail minimal utile de $\dot{w}_{net}/\dot{m} = 1373.5089$ [KJ/kg]

Pour le travail net par unité de masse de gaz liquéfié \dot{w}_{net}/\dot{m}_l nous remarquons qu'il diminue aussi à chaque fois que le rapport de la fraction massique X_1 et la température T_4 augmentent, puis dès qu'il arrive à son minimum, il commence à subir une légère élévation. Vu que le FOM est inversement proportionnel à l'évolution de \dot{w}_{net}/\dot{m}_l et qu'on a trouvé une valeur du FOM élevé et une amélioration de taux de liquéfaction, c'est juste que le travail net utile pour liquéfier 1 kg de liquide subit une diminution progressive. On trouve un travail minimal de $\dot{w}_{net}/\dot{m}_l = 9507,458043$ [KJ/kg]

En conclusion, un bon choix des deux paramètres est nécessaire pour avoir un meilleur taux de liquéfaction et un rendement optimal de l'installation en utilisant le minimum d'énergie possible.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans le domaine cryogénique, le cycle de Claude est l'un des cycles les plus utilisés pour la liquéfaction des gaz en raison de sa performance et son efficacité sur le plan industriel, cette étude nous a permis de l'étudier profondément et de se familiariser avec les gaz à liquéfier, on a utilisé deux gaz précisément dans notre étude avec l'air présent en abondance et l'hélium qui est connu pour sa rareté et son coût élevé, ce qui pousse l'industrie cryogénique à investir massivement dans les études qui permettent son exploitation maximale et une diminution de l'énergie nécessaire à sa liquéfaction.

L'étude de cycle de Claude pour la liquéfaction de l'air indique clairement que les paramètres d'opération la température à l'entrée de la turbine 1 T_3 ainsi que le rendement isentropique de la détente ont un impact non-négligeable sur le rendement et la quantité d'air liquéfié par l'installation, on observe une augmentation jusqu'à une valeur optimale puis il commence à diminuer progressivement, donc un compromis entre les deux paramètres est nécessaire pour une meilleure performance de l'installation.

Pour le cycle de Claude modifié, on a simulé son fonctionnement pour la liquéfaction de l'hélium vu que le cycle est généralement utilisé pour la liquéfaction de l'hélium, les résultats montrent l'influence des paramètres choisis le rapport de la fraction massique X_2 et la température à l'entrée de la deuxième turbine T_4 sur le fonctionnement de l'installation. En effet, on remarque une montée graduelle du rendement et de la quantité liquéfiée jusqu'à une valeur maximale où il commence à diminuer, ce qui suggère qu'un bon choix permettra d'optimiser l'installation et d'avoir le maximum de liquide avec une grande économie en énergie dépensée.

La problématique posée par l'étude était de liquéfier le maximum de gaz possible en réduisant le coût de l'énergie à dépenser, ce qui est prouvé possible à réaliser avec un bon choix des paramètres étudiés ou d'autres paramètres déjà traités par la littérature.

Références Bibliographique

Références Bibliographique

- [1] Bahman Zohuri, édit., Hybrid Energy Systems, 1ère éd. Usa : Springer, Cham, 2018.
- [2] Simon Reif-Acherman, The first liquefactions of helium around the world. Elvesier, 2009
- [3] Animesh Jha, “ Technological Advancements and Chronological Development History of Cryogenic Technology,” dans Cryogenic Technology and Applications, 1ère éd. Usa : Elsevier Inc , 2006
- [4] Yunus Cengel et Michael Boles, thermodynamics an engineering approach, 9 ème éd. McGraw-Hill, 2019.
- [5] S. C. Collins. Early history and developments of cryogenics. Cambridge, MA: Arthur D. Little, 1965.
- [6] Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry: Cryogenic Technology R ANDALL F. BARRON, C HRISTOPH W INDMEIER, Linde AG, 2013.
- [7] A.MOHAMED CHERIF, Étude thermodynamique et simulation du cycle de liquéfaction d’Azote. Université Annaba, (2018).
- [8] P. Duchesne, Introduction à la cryogénie, Ecole des Accélérateurs – BENODET - 2016
- [9] D. AMEL, simulation de cycle de claudes pour la liquéfaction de l’air, de l’azote et de l’oxygène, (2006).
- [10] K.D. Timmerhaus, R.P. Reed, cryogenic engineering. Springer,2007.
- [11] Bernard HÉBRAL, Cryogénie - Propriétés Physiques aux Basses Températures, Technique De l’ingénieur. France.
- [12] T. M. Flynn, cryogenic engineering, Second Edition Revised and Expanded ,(2005)
- [13] Van Sciver, Steven W., Helium Cryogenics, 2 eme éd. New York: Springer-Verlag, Cham, 2012.
- [14] Olivier PERROT, COURS DE MACHINES FRIGORIFIQUES. I.U.T. de Saint-Omer Dunkerque, 2010.
- [15] E.W.lemmon, M.L. Huber, M.O. McLinden. (2007) REFPROP.

Annexes

A. Etat thermodynamique de l'air à $T = 300^{\circ}\text{K}$ pour $P_1 = 1\text{bar}$ et $P_2 = 40\text{bar}$: [15]

| T [$^{\circ}\text{K}$] | P [bar] | h [kJ/kg] | s [kJ/kgK] |
|--------------------------|---------|-----------|------------|
| 300 | 1 | 426,4 | 3,8914 |
| 300 | 40 | 417,91 | 2,8069 |

B. Etat thermodynamique de l'air surchauffé : [15]

| T_3 [$^{\circ}\text{K}$] | P [bar] | h [kJ/kg] | s [kJ/kgK] | he ₁ pour P = 1bar [kJ/kg] | η_T | he ₁ réelle pour P=1bar et $T_3 = 270^{\circ}\text{K}$ [kJ/kg] | η_T | he ₁ réelle pour P=1bar |
|------------------------------|---------|-----------|------------|---------------------------------------|----------|---|----------|------------------------------------|
| 250 | 40 | 363,6 | 2,6087 | 208,58 | 0,7 | 266,92 | 0,8 | 239,584 |
| 260 | 40 | 374,64 | 2,652 | 212,34 | 0,75 | 258,445 | 0,8 | 244,8 |
| 270 | 40 | 385,57 | 2,6933 | 216,07 | 0,8 | 249,97 | 0,8 | 249,97 |
| 280 | 40 | 396,42 | 2,7327 | 219,77 | 0,85 | 241,495 | 0,8 | 255,1 |
| 290 | 40 | 407,19 | 2,7705 | 223,45 | 0,9 | 233,02 | 0,8 | 260,198 |

C. Etat thermodynamique de l'air saturée liquide : [15]

| T [$^{\circ}\text{K}$] | P[bar] | h [kJ/kg] | s [kJ/kgK] |
|--------------------------|--------|-----------|------------|
| 81,6 | 1 | -0,22367 | 0,0028176 |

D. Etat thermodynamique de l'hélium à $T = 300^{\circ}\text{K}$ pour $P_1 = 1\text{bar}$ et $P_2 = 14\text{bar}$: [15]

| T [$^{\circ}\text{K}$] | P [Bar] | h [kJ/kg] | s [kJ/kgK] |
|--------------------------|---------|-----------|------------|
| 300 | 1 | 1563,5 | 28,027 |
| 300 | 14 | 1567,7 | 22,546 |

E. Etat thermodynamique de l'hélium surchauffé pour $T_3 = 60^{\circ}\text{K}$: [15]

| T_3 [$^{\circ}\text{K}$] | P [bar] | h [kJ/kg] | s [kJ/kgK] | he ₁ pour P=1bar [kJ/kg] |
|------------------------------|---------|-----------|------------|-------------------------------------|
| 60 | 14 | 319,33 | 14,164 | 113,16 |

F. Etat thermodynamique de l'hélium surchauffé pour différents valeurs de T_4 : [15]

| T_4 [°K] | P [bar] | h [kJ/kg] | s [kJ/kgK] | he ₂ pour P=1bar [kJ/kg] |
|------------|---------|-----------|------------|---|
| 15 | 14 | 71,717 | 6,3783 | 27,486 |
| 20 | 14 | 102,47 | 8,1515 | 37,996 |
| 30 | 14 | 159,1 | 10,453 | 57,506 |
| 40 | 14 | 213,32 | 12,014 | 76,307 |
| 50 | 14 | 266,57 | 13,202 | 94,808 |

G. Etat thermodynamique de l'hélium saturée liquide : [15]

| T [K] | P[bar] | h [kJ/kg] | s [kJ/kgK] |
|-------|--------|-----------|------------|
| 4,2 | 1 | -0,075233 | -0,015301 |

Résumé :

La cryogénie est la science et la technologie qui traite des températures inférieures à 120 °K parmi ces branches essentielles la liquéfaction des gaz, la complexité des techniques utilisées pour produire des liquides à partir des cryogène justifier le coût élevé de ses opérations et la nécessité d'investissement dans l'optimisation des cycles de liquéfaction divers.

L'objectif de notre travail est d'étudier thermodynamiquement les deux cycles de Claude simple et modifié pour la liquéfaction de l'air et l'hélium respectivement, on a étudié l'influence des paramètres d'opération des cycles sur le rendement et l'énergie dépensée par l'installation et la possibilité de maximiser la quantité de gaz liquéfiés, tout en respectant les propriétés thermophysique des fluides cryogéniques utiliser et la capacité réelle des installations.

Mots clés : Cryogénie, Basse température, Liquéfaction, Air, Hélium, Claude, Collins, Rendement,.

Abstract :

Cryogenics is the science and technology that deals with temperatures below 120 °K among these essential branches the liquefaction of gases, the complexity of the techniques used to produce liquids from cryogens justify the high cost of its operations and the need for investment in the optimization of various liquefaction cycles.

The objective of our work is to study thermodynamically the two simple and modified Claude cycles for the liquefaction of air and helium respectively, we studied the influence of the operating parameters of the cycles on the efficiency and energy expended by the plant and the possibility of maximizing the quantity of liquefied gas, while respecting the thermo-physical properties of the cryogenic fluids used and the actual capacity of the equipments.

Keywords : Cryogenics, Low temperatures, Liquefaction, Air, Helium, Claude, Collins, Yield.
