

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

**UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA**  
**FACULTE DE TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**

**MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER**

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Par :

**FERHANE Meriem**

**TOUATI Yasser**

**Thème**

---

**Analyse énergétique d'un liquéfacteur de gaz de type CLAUDE à  
double compression**

---

Soutenu le 27/06/2024 devant le jury composé de :

M. M'HAMDI Mohammed Salah

Président

M. MENDIL Fatsah

Rapporteur

M.ADNANI Massinissa

Examineur

**Année Universitaire 2023-2024**

# *Remerciements*

*Nous remercions*

*Dieu le Tout puissant*

*De nous avoir donné la patience et le courage pour  
réaliser cette étude.*

*Nous tenons à remercier notre enseignant Mr Mendil,  
pour ses conseils précieux, sa disponibilité et son  
encadrement bienveillant.*

*Nos remerciements vont également à tous nos professeurs  
du département génie mécanique pour leur soutien et leur  
enseignement de qualité.*

*Enfin nous tenons à remercier les membres du jury pour  
avoir accepté d'évaluer ce mémoire et pour leurs  
précieuses observations.*



*F.Meriem & T.Yasser -*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à toute ma famille  
particulièrement*

*A mes très chers parents les deux personnes qui me sont très  
cher au monde, Qui m'ont soutenue durant toute ma formation  
et qui continue de m'encourager,*

*A mes parents, et mon fiancé, mes sœurs, frères qui n'ont  
jamais cessé de m'aider et me prodiguer des conseils et étaient  
toujours à mes côtés.*

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

*A toute la famille « Ferhane » Et enfin je le dédie*

*A tous les enseignants et toute la famille universitaire de  
Bejaia*

*Merci.*



*F.Meriem -*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à toute ma famille, particulièrement à mes très chers parents, les deux personnes qui me sont les plus chères au monde. Ils m'ont soutenue durant toute ma formation et continuée de m'encourager. Que Dieu leur accorde une longue vie.*

*À mes sœurs Khadidja, Youssra, Asma, Ihssane et mon frère Islam, qui n'ont jamais cessé de m'aider, de me prodiguer des conseils et d'être toujours à mes côtés.*

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

*À toute la famille TOUATI.*

*Enfin, je dédie ce travail à tous les enseignants et à toute la famille universitaire de Béjaïa.*

*Merci.*

 *T.Yasser -*

# **Sommaire**

## Remerciements

## Dédicaces

## Sommaire

Nomenclature

Liste des tableaux

Liste des figures

## Introduction Générale..... 1

### I. Chapitre I

#### Recherche bibliographique

I.1. Introduction .....	4
I.2. Définition de la liquéfaction.....	4
I.3. Recherche bibliographique.....	5
I.4. Les propriétés physiques aux basses températures .....	7
I.5. Stockage et transfert des fluides cryogéniques .....	7
I.6. Domaine d'utilisation de la cryogénie .....	8
I.7. Importance et utilisation des gaz liquéfiés .....	9
I.8. Conclusion.....	9

### II. Chapitre II

#### Étude thermodynamique

II.1. Introduction.....	11
II.2. Différents types de systèmes de liquéfaction.....	11
II.2.1. Procédé à détente isenthalpique de Joule-Thomson.....	13
II.2.2. Rappel sur l'effet de Joule-Thomson .....	13
II.3. Les cycles de base pour la liquéfaction.....	15
II.3.1. Cycle idéal de liquéfaction.....	15
II.3.2. Cycle de Baryton inverse .....	17
II.3.3. Cycle de Claude pour la liquéfaction .....	18
II.3.4. Cycle de Claude à double compression .....	20
II.3.5. Composant cryogénique .....	26
II.3.6. Echangeurs de chaleurs .....	27
II.3.7. Régénérateurs .....	27
II.3.8. Détendeurs cryogéniques .....	27
II.3.9. Autres composants .....	28
II.4. Conclusion .....	28

### **III. Chapitre III**

#### **Résultat et Discussion**

III.1. Introduction .....	30
III.2. Cycle de Claude double compression.....	30
III.2.1. Influence de pression et de température de cycle d'oxygène et l'azote....	31
III.2.1.1. Influence de pression sur les paramètres du cycle de Claude à double compression.....	31
III.2.1.2. Influence de la température $T_4$ sur les paramètres du cycle de Claude double compression.....	31
III.2.1.2.1. Premier cycle (l'oxygène et L'azote) .....	32
A. Liquéfaction d'oxygène.....	32
B. Liquéfaction d'azote .....	38
III.2.1.2.2. Deuxième cycle (l'oxygène et l'azote).....	45
A. Liquéfaction d'oxygène.....	45
B. Liquéfaction d'azote .....	51
III.3. Conclusion.....	59
<b>Conclusion Générale .....</b>	<b>60</b>
<b>Références Bibliographiques .....</b>	<b>63</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>65</b>

## Nomenclature

### Nomenclature

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

## *Nomenclature*

---

$y$	Le taux de liquéfaction	/
$x$	La fraction massique traversant la turbine	/
<b>Lettres Grecs</b>		
Symbole	Désignation	Unité
$\mu_{J-T}$	Coefficient de Joule-Thomson	/
$\mu_S$	Coefficient de détente isentropique	/

**Liste des tableaux**

**Tableau III.1:** Les différents paramètres du cycle de Claude à double compression ..... 31

## *Liste des figures*

---

### Liste des figures

<b>Figure II.1</b> : Les lignes isenthalpiques et les points d'inversion dans le diagramme (T-P)	12
<b>Figure II.2</b> : Détente de Joule-Thomson. ....	13
<b>Figure II.3</b> : Schéma d'une installation idéale et son diagramme (T-S) .....	16
<b>Figure II.4</b> : Cycle de Brayton inverse.....	18
<b>Figure II.5</b> : Processus et cycle de Claude sur diagramme (T-S).....	19
<b>Figure II.6</b> : Cycle de claudé à double compression avec détente isentropique (de la pression intermédiaire $P_2$ à la pression d'entrée $P_1$ ) .....	21
<b>Figure II.7</b> : Cycle de Claude à double compression(T-S) .....	22
<b>Figure II.8</b> : Volume de contrôle.....	22
<b>Figure II.9</b> : Cycle de claudé à double compression avec détente isentropique (de la haute pression HP vers la pression intermédiaire IP).....	24
<b>Figure II.10</b> : Diagramme de cycle de claudé à double compression (T-S).....	25
<b>Figure III.1</b> : Variation du taux de liquéfaction en fonction des pressions.....	32
<b>Figure III.2</b> : Variation travail requis par unité du gaz comprimé en fonction des pressions .....	32
<b>Figure III.3</b> : Variation du facteur de mérite en fonction des pressions .....	33
<b>Figure III.4</b> : Variation travail requis par unité du gaz liquéfier en fonction des pressions .....	33
<b>Figure III.5</b> : Variation de taux de liquéfaction en fonction température .....	34
<b>Figure III.6</b> : Variation travail requis par unité de gaz comprimé en fonction température .....	35
<b>Figure III.7</b> : Variation du travail par unité de gaz liquéfier on fonction de la température .....	36
<b>Figure III.8</b> : Variation facteur de mérite en fonction température .....	37
<b>Figure III.9</b> : Variation taux liquéfaction en fonction de pression.....	38
<b>Figure III.10</b> : Variation de travail par unité de masse comprimé en fonction de pression .....	39
<b>Figure III.11</b> : Variation de travail par unité de gaz liquéfier en fonction de pression.....	40
<b>Figure III.12</b> : Variation de facteur de mérite en fonction de pression.....	41
<b>Figure III.13</b> : Variation de taux de liquéfaction en fonction de température .....	42
<b>Figure III.14</b> : Variation de travail par unité de gaz comprimé en fonction de température .....	43
<b>Figure III.15</b> : Variation de travail par unité de gaz liquéfier en fonction la température.	43

## *Liste des figures*

---

<b>Figure III.16</b> : Variation de facteur de mérite en fonction de température.....	44
<b>Figure III.17</b> : Variation de taux de léquéfaction en fonction de pression .....	45
<b>Figure III.18</b> : Variation de travail par unité de masse comprimer en fonction de pression .....	46
<b>Figure III.19</b> : Variation de travail par unité de masse liquéfier en fonction de la pression .....	46
<b>Figure III.20</b> : Variation de facteur de mérite en fonction de pression.....	47
<b>Figure III.21</b> : Variation de taux de léquifaction en fonction de température .....	48
<b>Figure III.22</b> : Variation travail par unité e gaz comprimer en foction de la température. 48	
<b>Figure III.23</b> : Variation de travail par unité de gaz liquéfier en fonction de température 49	
<b>Figure III.24</b> : Variation de facteur de mérite en fonction de la température .....	50
<b>Figure III.25</b> : Variation de taux de liquéfaction en fonction de pression.....	51
<b>Figure III.26</b> : Variation de travail par unité de masse du gaz comprimé en fonction de pression.....	52
<b>Figure III.27</b> : Variation de travail par unité de masse du gaz liquéfié en fonction de pression .....	53
<b>Figure III.28</b> : Variation de facteur de mérite en fonction de pression.....	54
<b>Figure III.29</b> : Variation de taux liquéfaction en fonction de T(k) .....	55
<b>Figure III.30</b> : Variation de travail par unité de masse du gaz comprimé en fonction de T(k) .....	56
<b>Figure III.31</b> : Variation de travail par unité de masse du gaz liquéfié en fonction de T(k) .....	57
<b>Figure III.32</b> : Variation de facteur de mérite en fonction de T(k) .....	58

# *Introduction Générale*

## *Introduction Générale*

---

La cryogénie est une branche de la physique qui se concentre sur la production et l'étude des effets des températures extrêmement basses. En général, la cryogénie est définie comme l'étude des matériaux à des températures inférieures à  $-150^{\circ}\text{C}$  ( $-238^{\circ}\text{F}$  ou  $123\text{ K}$ ).

À ces températures, les propriétés physiques des matériaux changent de manière significative, ouvrant des possibilités pour diverses applications scientifiques et industrielles.

La cryogénie, dérivée des termes "froid" et "production", utilise des techniques spéciales pour atteindre et maintenir des températures extrêmement basses, souvent avec des gaz comme l'azote liquide et l'hélium liquide. Elle a de nombreuses applications :

- En médecine pour la cryochirurgie, en ingénierie pour les systèmes de propulsion de fusées et de réacteurs nucléaires.
- En physique pour la recherche sur les supraconducteurs, et pour améliorer les performances des détecteurs de rayonnement et des instruments scientifiques sensibles en réduisant le bruit thermique.

Dans notre présente étude nous allons traiter la liquéfaction des gaz, l'objectif de cette étude coïncide parfaitement avec la recherche des paramètres appliqués sur les cycles de Claude à double compression l'un des problèmes majeurs rencontrés dans les systèmes de liquéfaction des gaz, réside dans l'énergie dépensée durant cette opération.

Il devient impératif d'analyser s'il existe un potentiel de diminution des coûts d'investissement et d'exploitation, il existe cependant des questions sur la pénalité d'efficacité des installations qu'on subit en manipulant certains paramètres pour conserver une meilleure efficacité énergétique et d'en améliorer les performances de ces cycles thermodynamique dont le but d'avoir un maximum de gaz liquéfié en fournissant un minimum d'énergie (travail dépensé).

Un bref aperçu sur notre travail, on a entamé trois chapitres. Le premier chapitre est consacré comme une recherche bibliographique (des définitions, des généralités).

Le deuxième est une étude thermodynamique sur les différents types de système de la liquéfaction et plus profondément l'étude du procédé de Claude à double compression.

## *Introduction Générale*

---

Les troisièmes parties c'est des résultat et discussion des variations et différence dans les deux schémas (double compression) que nous avons étudiés et leurs changements avec les deux gaz utilisés dans le processus.

*Chapitre I*  
*Recherche Bibliographique*

## **I.1. Introduction**

La cryogénie est l'étude et la production de très basses températures (inférieures à -150°C ou 120 K), permettant d'examiner divers phénomènes physiques. Elle se distingue par sa capacité à liquéfier les gaz de l'air en dessous de -153,15°C. Utilisée dans des domaines variés comme l'alimentation, la médecine, l'industrie, la physique et l'élevage, elle présente des applications telles que la conservation des aliments, la suspension du métabolisme, l'étude de la supraconductivité et de la superfluidité, la transformation de matériaux en poudre fine, la récupération des gaz nocifs pour l'ozone, la production de neige artificielle, le transport de gaz naturel, et le traitement de certaines maladies de peau[1].

Le National Bureau of Standards considère que la cryogénie commence à des températures inférieures à 123 K, correspondant aux températures d'ébullition de gaz comme l'hélium et l'hydrogène. L'ingénierie cryogénique se concentre sur le développement de phénomènes, procédés, équipements et techniques à basse température[2].

Une étude spécifique se concentre sur l'analyse énergétique et thermodynamique d'un liquéfacteur de type Claude à double compression, en examinant des paramètres comme le travail par unité de masse, le taux de liquéfaction et le facteur de mérite pour la liquéfaction de divers gaz tels que l'oxygène et l'azote.

## **I.2. Définition de la liquéfaction**

La liquéfaction est un phénomène de condensation qui peut se produire par compression ou refroidissement d'un gaz, il consiste à lui retirer de l'énergie afin de le refroidir depuis la température ambiante jusqu'à son point d'inversion, puis à condenser la vapeur saturée. La première industrialisation de ce procédé est réalisée par Carl Van Linde. La condition essentielle pour liquéfier un gaz quelconque consiste à abaisser sa température au-dessous de la température critique (température d'inversion) qui lui est propre. Tant que cette condition n'est pas réalisée, aucune pression si grande soit-elle, ne peut amener la liquéfaction. La liquéfaction d'un gaz permet de l'emmagasiner, de le transporter...l'opération la plus simple à réaliser pour liquéfier un gaz est la compression isotherme. Cette opération ne peut être réalisée que si la température initiale du gaz est inférieure à la température critique[3].

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

(atomes, molécules, ions) qui constitue la matière. Les particules à l'état gazeux sont très éloignées les unes par rapport aux autres avec une agitation rapide et désordonnée. On observe également de nombreux chocs entre elles. Pour l'état liquide, les particules sont beaucoup plus rapprochées entre elles, elles se déplacent à faible vitesse donnant lieu à des associations temporaires (liaisons faibles). A l'état solide, les particules sont empilées dans un ordre régulier, elles sont très rapprochées les unes aux autres.

Sur ces bases, on peut constater que le passage de l'état gazeux à un état liquide, pourra s'effectuer par la diminution de la distance entre les particules (rapprochement) et par le ralentissement du déplacement de ces particules et on peut réaliser cela par la compression ; l'augmentation de la pression exercée sur le gaz entraîne la diminution de son volume et engendre le rapprochement de ses particules entre elles. Cependant, l'agitation des particules demeure importante et la température s'élève à cause des chocs. Il faudra donc abaisser la température. La diminution de la température extrait de l'énergie calorifique du milieu et ainsi de l'énergie cinétique des particules, ce qui donne un déplacement moins vite de celles-ci. Le rapprochement conjugué au ralentissement permet l'établissement de liaisons entre les particules, ce qui provoque la formation du liquide. Et d'après ce qui précède, on voit qu'un gaz peut être liquéfié si on comprime tout en abaissant sa température.

### **I.3. Recherche bibliographique**

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

En 1892, James Dewar a développé un récipient isolé sous vide pour le stockage de fluide cryogénique et il a résolu le problème de stockage des gaz liquéfiés en créant le premier cryostat, puis il a liquéfié l'hydrogène. En 1907, Linde a installé la première usine de liquéfaction d'air en Amérique. En 1908, Heike Kamerlingh Onnes a liquéfié l'hélium dans le cadre de ces travaux sur la supraconductivité. En 1916, la première production d'argon a été faite. En 1917 et 1922, la première production commerciale d'hélium et de néon a été faite respectivement. En 1933, le refroidissement magnétique a d'abord été utilisé

pour atteindre une température inférieure à 1K. En 1937, l'isolation en poudre évacuée a été utilisée pour la première fois à l'échelle commerciale dans des réservoirs de stockage de fluides cryogéniques. En 1952, le bureau national du laboratoire de génie cryogénique des normes a été créé. En 1958, l'isolation cryogénique multicouche à haute efficacité a été développée.

1877 le début de la cryogénie Le point de départ pour la cryogénie a été déterminé par Cailletet et Pictet en 1877 par leur liquéfaction d'oxygène, le premier des soi-disant gaz permanents à être liquéfiés. Le terme 'permanent' est survenu du fait expérimentalement déterminé que de tels gaz 'permanents' ne pouvaient pas être liquéfiés par la pression seule à la température ambiante. Glace naturelle et glace artificielle en 1877 : L'utilisation de la glace naturelle dans les aliments remonte à très longtemps. Les Chinois l'utilisèrent dans les aliments, tandis que les Romains mélangeaient la neige et les jus de fruits pour fabriquer des sorbets. Premièrement, des progrès considérables ont été accomplis depuis 1850 dans le développement des machines frigorifiques et des compresseurs de gaz associés pour faire de la glace artificielle Cailletet Paris, décembre 1877 de gouttelettes d'oxygène dans un tube de verre à paroi épaisse (P). L'oxygène gazeux a été comprimé à l'aide du compresseur la pression atteignant 200 atm ont été générées par un vérin à vis à commande manuelle.

La pression était transmise à l'oxygène gazeux dans le tube de verre par transmission hydraulique utilisant de l'eau et du mercure. Le gaz a été refroidi à  $110^{\circ}\text{C}$  en entourant le tube de verre d'éthylène liquide, puis dilaté soudainement en relâchant la pression via le volant (O). Un brouillard momentané a été observé et la procédure a pu être répétée pour que d'autres observateurs puissent voir le phénomène[4].

#### **I.4. Les propriétés physiques aux basses températures**

Les fluides cryogéniques sont utilisés à des températures extrêmement basses, généralement en dessous de  $-150\text{ °C}$ , dans des domaines comme la réfrigération, la cryoconservation, la propulsion spatiale et la recherche scientifique.

Exemples courants incluent l'azote liquide ( $-196\text{ °C}$ ), l'hélium liquide ( $-269\text{ °C}$ ) et l'hydrogène liquide ( $-253\text{ °C}$ ). Ces fluides ont une pression de vapeur élevée, s'évaporant facilement, ce qui complique leur manipulation et confinement. Ils produisent des effets thermiques puissants, pouvant causer des brûlures graves au contact de la peau, et ont une densité élevée, facilitant le stockage en vrac.

La manipulation de ces fluides nécessite une isolation adéquate, utilisant des techniques spécialisées pour maintenir les températures basses et prévenir les pertes de chaleur. Des précautions spéciales sont nécessaires en raison de leur température extrêmement basse et des risques associés[6].

#### **I.5. Stockage et transfert des fluides cryogéniques**

Le stockage et le transfert des fluides cryogéniques consistent à gérer et manipuler des substances qui sont maintenues à des températures extrêmement basses, généralement en dessous de  $-150\text{ °C}$ . Ces fluides incluent notamment l'azote liquide, l'oxygène liquide, l'hydrogène liquide et l'hélium liquide.

Pour le stockage des fluides cryogéniques, des réservoirs spéciaux appelés dewars ou réservoirs cryogéniques sont utilisés. Ces réservoirs sont construits avec des matériaux isolants thermiques avancés pour minimiser les pertes de chaleur. Les dewars sont souvent composés de plusieurs couches de matériaux isolants, tels que l'acier inoxydable ou l'aluminium, avec des couches de vide entre elles pour réduire la conductivité thermique.

Lors du transfert des fluides cryogéniques, des tuyaux et des conduites spéciales doivent être utilisés. Ces tuyaux sont généralement fabriqués à partir de matériaux à faible conductivité thermique, tels que l'acier inoxydable, et ils sont conçus pour résister à des températures extrêmement basses. De plus, des équipements de sécurité, tels que des vannes et des régulateurs de pression, sont nécessaires pour contrôler le flux et prévenir les fuites potentielles.

Il est essentiel de manipuler les fluides cryogéniques avec précaution, car ils peuvent entraîner des brûlures sévères au contact direct avec la peau ou les tissus. Des équipements de protection individuelle appropriés, tels que des gants isolants et des lunettes de protection, doivent être utilisés lors de la manipulation de ces substances.

En résumé, le stockage et le transfert des fluides cryogéniques requièrent des réservoirs et des tuyaux spéciaux, fabriqués à partir de matériaux isolants thermiques, ainsi que des équipements de sécurité appropriés pour garantir une manipulation sûre de ces substances à très basses températures.

### **I.6. Domaine d'utilisation de la cryogénie**

De très nombreuses branches d'activité scientifiques et techniques utilisent actuellement la cryogénie sont les sciences physiques étudient des phénomènes spécifiques des basses températures ou qui exigent d'y travailler : supraconductivité, physique nucléaire, magnétisme, technique des gyroscopes de haute précision, électronique appliquée, etc. L'industrie chimique fait un usage croissant de l'oxygène pour les réactions et surtout de l'azote pour l'inertage des atmosphères. La production en quantité massive de l'éthylène ne peut se faire qu'à l'aide des basses températures pour sa séparation et sa purification finale. La biologie utilise le froid pour conserver divers produits (par Lyophilisation), pour la préparation de produits pharmaceutiques et pour de nombreuses autres opérations. La médecine et la chirurgie emploient depuis longtemps des produits de base préparés grâce à la cryogénie : oxygène, protoxyde d'azote, plasma sanguin, etc. Les liquides cryogéniques usuels tels que l'oxygène et l'azote et les gaz rares de l'air sont employés en quantités massives dans la sidérurgie et la métallurgie (notamment argon/hélium pour la soudure)

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

L'utilisation du froid pour le traitement, la production ou la transformation des gaz constitue donc actuellement un des fondements essentiels de l'industrie moderne[7].

## **I.7. Importance et utilisation des gaz liquéfiés**

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

- **Obtention des gazeurs :** Le processus de la liquéfaction assure que le produit liquéfié est pur et, en conséquence, n'a pas besoin d'être purifié davantage par la suite. Parmi les particularités de ces gaz réside dans leur évaporation et condensation à pression et à température constantes[8].

- **Facilité et économie du transport :** Ont liquéfié les gaz pour pouvoir réduire leur volume et ainsi que pouvoir les transporter par bateaux sur de très grandes distances ou à travers des mers profondes (lorsque le transport par gazoduc n'est pas économique) En effet, sous l'état liquide, un gaz occupe un volume environ 600 fois moindre que celui qu'il occupe à l'état gazeux dans les conditions normales de température et de pression. Au point d'arrivée, les gaz sont regazéifiés pour être distribués à la consommation. Le gaz naturel, par exemple, est regazéifiés puis distribué par canalisations. L'oxygène et l'azote arrivent à l'état liquide aux centres de conditionnement ou ils sont regazéifiés et mis en bouteilles pour la distribution à courte distance[8].

- **Usage des basses températures :** Sous certaines conditions, la plupart des gaz ont des températures de condensation inférieures à la température ambiante et même inférieur à 0°. Les gaz liquéfiés peuvent donc se trouver à basses températures et les applications y sont nombreuses. Outre l'utilisation des gaz liquéfiés pour les besoins de la réfrigération et de la climatisation, leur usage est également important dans l'industrie et dans et dans les laboratoires de recherche ou on a besoin d'effectuer des opérations et des expériences diverses à très basse température[8].

## **I.8. Conclusion**

Ce chapitre a exploré la cryogénie en abordant plusieurs aspects clés .la recherche bibliographique à établit une base théorique solide, tandis que l'étude des fluides cryogénique a mis en lumière les critères de sélection importants, le stockage et le transfert des fluides cryogénique ont été examinées, soulignant les défis techniques, des diverses applications de la cryogénie, comme en médecine et en aérospatiale, ont été présentées. Enfin l'importance des gaz liquéfiés a été discutée, montrant leurs avantages en termes de stockage, de transport et d'efficacité énergétique. Ces éléments démontrent l'importance de la cryogénie dans les technologies modernes.

*Chapitre II*  
*Étude Thermodynamique*

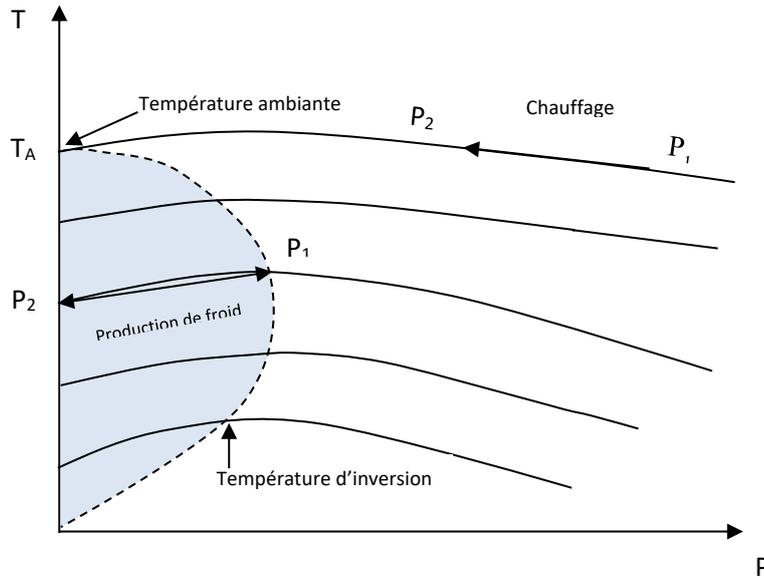
## II.1. Introduction

L'étude thermodynamique des différents cycles de liquéfaction concerne l'analyse des processus utilisés pour transformer les gaz en liquides à basse température. Ces cycles dans de nombreuses applications industrielles, assurent la production de gaz liquéfiés, le stockage et le transport. Les principaux cycles de liquéfaction incluent le cycle de Linde-Hampson, le cycle Claude double compression, cycle combiner. Chaque cycle utilise une série de compressions et de détente pour abaisser la température du gaz jusqu'à ce qu'il atteigne son point de liquéfaction. L'analyse thermodynamique de ces cycles se concentre sur l'efficacité énergétique, la minimisation des pertes et l'optimisation des conditions de fonctionnement. En examinant les différentes étapes de compression, de refroidissement et de détente, les ingénieurs peuvent améliorer les performances des systèmes de liquéfaction et réduire les couts opérationnels.

## II.2. Différents types de systèmes de liquéfaction

L'opération la plus simple à réaliser pour liquéfier un gaz est la compression isotherme, cette opération ne peut être réalisée que si la température initiale du fluide avant sa détente est inférieure à la température critique (température d'inversion), pour les gaz dont la température critique est inférieure à la température ambiante, les procédés thermodynamique de liquéfaction utilisent des cycles à détente. En générale, on peut distinguer trois grandes familles de procédés thermodynamique, à savoir les procédés à détente isenthalpique de Joule-Thomson et les cycles inverses de Baryton (à détente isentropique) et les procédés mixtes associant une détente isenthalpique et une détente isentropique (Cycle de Claude).

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



**Figure II.1** : Les lignes isenthalpiques et les points d'inversion dans le diagramme (T-P)[9]

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

$$\text{donnée par la relation : } \mu_{J-T} = 0 \text{ ou bien : } \mu_{J-T} = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right) = 0 \quad (\text{II.1})$$

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

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

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

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

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

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

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

### II.2.1. Procédé à détente isenthalpique de Joule-Thomson

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

### II.2.2. Rappel sur l'effet de Joule-Thomson

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

Pour comprendre cet effet, il faut tenir compte du comportement non idéal des gaz en introduisant des paramètres comme les interactions intermoléculaires et le volume des particules. Cette non-idéalité se traduit par un coefficient Joule-Thomson propre à chaque gaz [10].

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

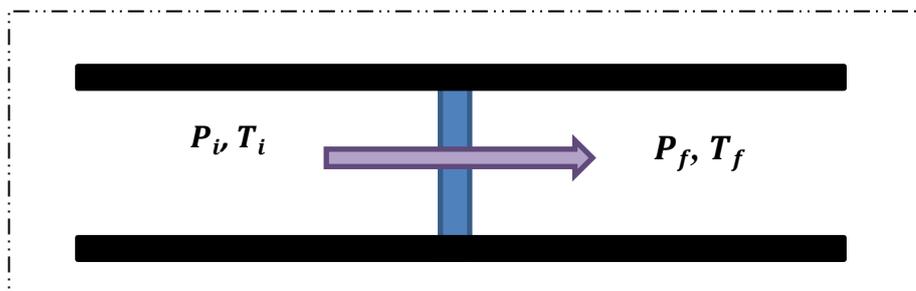


Figure II.2 : Détente de Joule-Thomson [9].

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

$$W_i = -\int_{v_i}^0 P_i dv = -P_i \int_{v_i}^0 dv = P_i V_i \quad (\text{II.2})$$

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

$$W_f = -\int_0^{v_f} P_f dv = -P_f \int_0^{v_f} dv = -P_f V_f \quad (\text{II.3})$$

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

$$W = W_i + W_f = P_i V_i - P_f V_f \quad (\text{II.4})$$

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

$$U_f - U_i = P_i V_i - P_f V_f \quad (\text{II.5})$$

Cette dernière expression peut être réécrite sous la forme :

$$U_f + P_f V_f = U_i - P_i V_i \quad (\text{II.6})$$

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

$$dH = \left( \frac{\partial H}{\partial P} \right)_T dP + \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_P dT \quad (\text{II.7})$$

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

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T dP + \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P dT &= 0 \\
 \Rightarrow \left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T dP &= -\left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P dT \\
 \Rightarrow \left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T &= -\left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_H \\
 \Rightarrow \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right) &= -\left[\frac{\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T}{\left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P}\right]
 \end{aligned}
 \tag{II.8}$$

L'abaissement de la température en fonction de la pression peut être caractérisé par un Coefficient  $\mu_{J-T}$  tel que :

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

Appelé coefficient de Joule-Thomson.

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

## II.3. Les cycles de base pour la liquéfaction

### II.3.1. Cycle idéal de liquéfaction

Un cycle idéal de liquéfaction sera idéal s'il réalise la production de liquide avec le Maximum de rendement, c'est-à-dire le minimum de consommation d'énergie extérieure. Un tel cycle devra donc pour cela faire appel à certaines transformations caractérisant le cycle de Carnot. La différence avec celui-ci est qu'il s'agira d'un cycle ouvert, car le liquide produit est supposé être retiré du système en continu.

Le cycle idéal de liquéfaction correspond à celui mis en jeu dans un processus idéal, composé des transformations suivantes Une compression isotherme entre l'état 1 et l'état 2 Et Une détente isentropique de l'état 2 vers l'état f (état de liquide saturé). Une vaporisation

isotherme de l'état f vers l'état 3 et un échauffement isobare permettant le retour de l'état 3 (vapeur saturée sèche) à l'état initial 1.

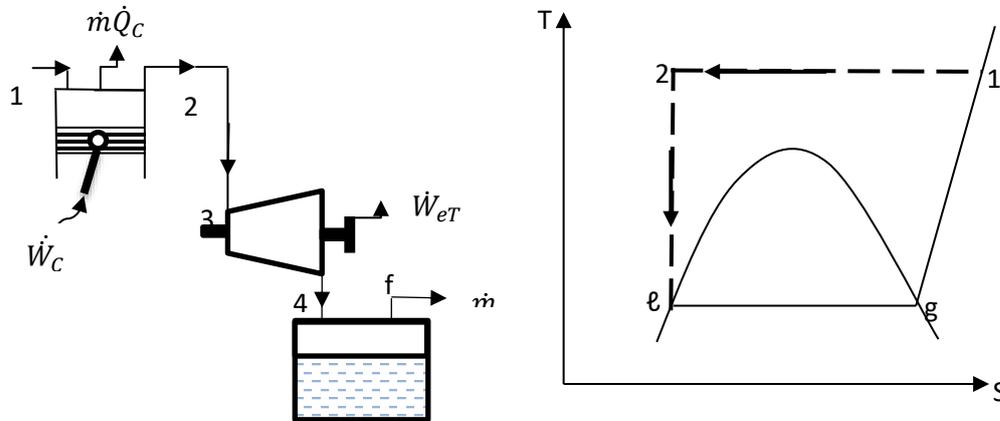


Figure II.3 : Schéma d'une installation idéale et son diagramme (T-S) [7]

➤ Principe de fonctionnement

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

Une compression isotherme réversible (1 → 2).

Une détente isentropique (2 → f).

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

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

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

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

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

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

$$\dot{W}_C + \dot{Q} = \dot{m}\Delta h = (h_2 - h_1) \Rightarrow \dot{W}_C = \dot{m}(h_2 - h_1) - \dot{Q} \tag{II.9}$$

$$\text{D'après la formule de Gibbs : } \delta Q = TdS + \delta q \quad (\text{II.10})$$

Pour une transformation réversible (sans frottement) :

$$\Rightarrow \delta q = 0. \text{ Dou } \delta Q = TdS$$

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

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

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

$$\dot{W}_C = \dot{m}(h_2 - h_1) - \dot{Q} \Rightarrow \dot{W}_C = \dot{m}(h_2 - h_1) - \dot{m}[(S_2 - S_1)] \quad (\text{II.12})$$

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

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

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

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

Dou :

$$\dot{W}_C = -\dot{m}[h_2 - h_1 - T(S_2 - S_1)] \quad (\text{II.13})$$

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

$$\Rightarrow \frac{\dot{W}_C}{\dot{m}} = [(h_2 - h_1) - T(S_2 - S_1)] \quad (\text{II.14})$$

### II.3.2. Cycle de Baryton inverse

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

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

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

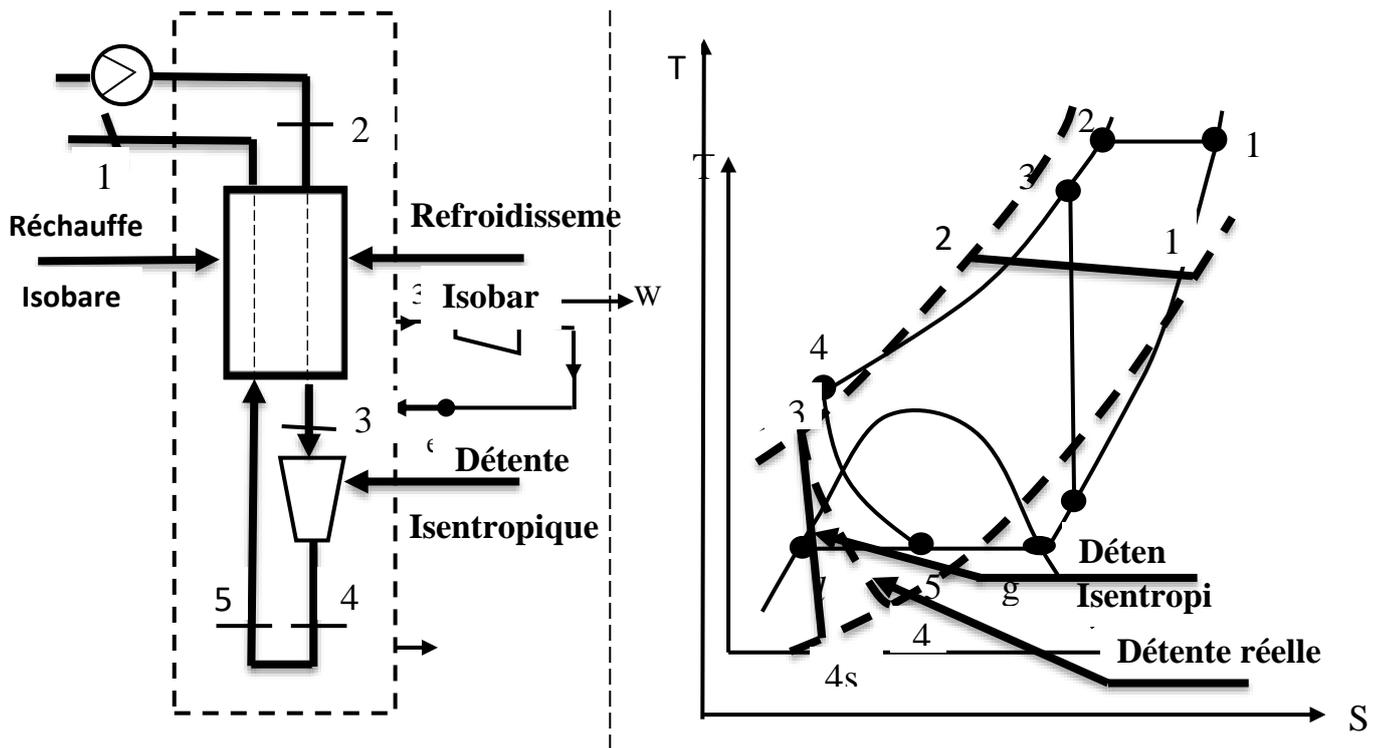


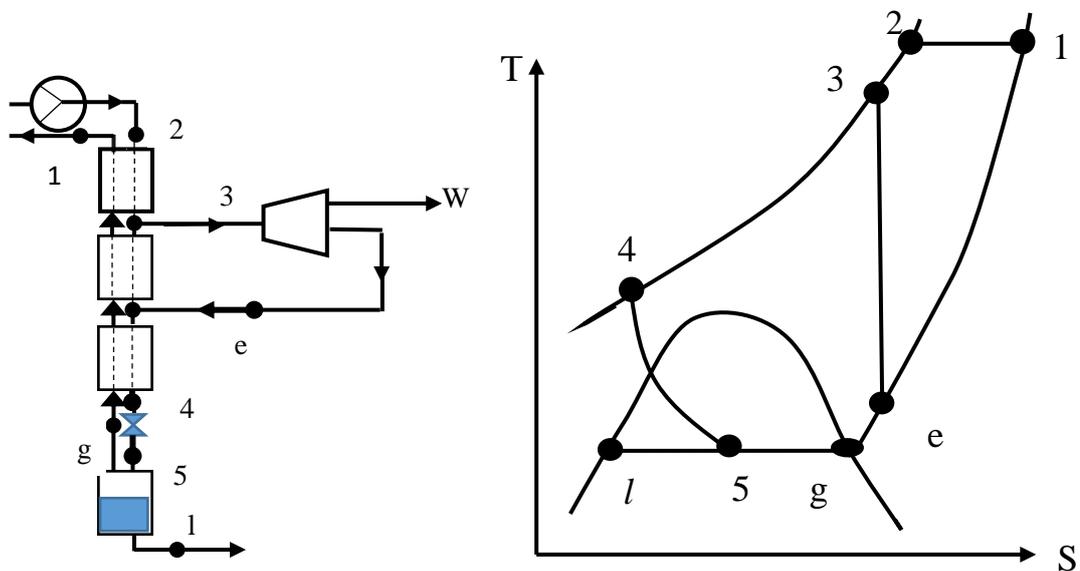
Figure II.4 : Cycle de Brayton inverse [9]

Compression adiabatique (1-2), Refroidissement isobare (2-3) de l'air comprimé dans un échangeur avec l'air extérieur, Détente isentropique (3-4) dans une turbine adiabatique.

### II.3.3. Cycle de Claude pour la liquéfaction

Le cycle de Claude associe deux détentes, une isenthalpique et l'autre isentropique (3-e). Le début de cycle de Claude est le même que celui de Linde (1-2 : compression isotherme), puis un premier refroidissement isobare : au point (3) on prélève une partie du gaz partiellement refroidit dans l'échangeur de chaleur « 1 » qu'on envoie dans la turbine. Le gaz subit une détente théoriquement isentropique, la détente réelle est (3-e), il se refroidit et rejoint en (g), la ligne montante des gaz frais (écoulement de retour du gaz non liquéfié).

L'autre partie des gaz traverse l'échangeur de chaleur (3-4) pour aller se détendre isenthalpiquement (4-5).



**Figure II.5 :** Processus et cycle de Claude sur diagramme (T-S) [9]

#### • Principe de fonctionnement

Le cycle de Claude a perfectionné le processus de liquéfaction de l'air en associant l'utilisation d'une machine de détente et d'une vanne à effet Joule-Thomson.

Ce cycle comprend comme illustre la figure II.3 :

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

### II.3.4. Cycle de Claude à double compression

Ce cycle est un processus utilisé dans les systèmes de réfrigération pour produire du froid à des températures extrêmement basses. Il implique deux compressions du gaz réfrigérant, suivies de refroidissement et de détentes successifs. Cela permet d'atteindre des températures très basses nécessaires pour des applications telles que la liquéfaction de l'air et la production *d'azote liquide*

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

$$\Delta E_T = \Delta U + \Delta E_P + \Delta E_C = W_T + \Delta U_{ij} + \Delta E_{Cij} + \Delta E_{Pij} + W_{t_{ij}} \quad (\text{II.15})$$

$$\text{Énergie interne : } \Delta U_{ij} = \sum_i U_i - \sum_j U_j \quad (\text{II.16})$$

$$\text{Énergie cinétique : } \Delta E_{Cij} = \sum_i \frac{1}{2} m_i C_i^2 - \sum_j \frac{1}{2} m_j C_j^2 \quad (\text{II.17})$$

$$\text{Énergie potentielle : } \Delta E_{Pij} = \sum_i m_i g z_i + \sum_j m_j g z_j \quad (\text{II.18})$$

$$\text{Travail des forces de pressions : } \Delta W_{t_{ij}} = \sum_i p_i v_i - \sum_j p_j v_j \quad (\text{II.19})$$

$$\Delta E_T = W_t + \sum_i \left( U_i + \frac{1}{2} m_i C_i^2 + m_i g z_i + p_i v_i \right) - \sum_j \left( U_j + \frac{1}{2} m_j C_j^2 + m_j g z_j + p_j v_j \right) \quad (\text{II.20})$$

En injectant l'équation

$$:\Delta E_T = W + \sum_i \left( H_i + \frac{1}{2} m_i C_i^2 + m_i g z_i \right) - \sum_j \left( H_j + \frac{1}{2} m_j C_j^2 + m_j g z_j \right) \quad (\text{II.21})$$

On pose  $h_T = h + c + gz$  avec :

**$h_T$ : représente l'enthalpie totale par unité de masse**

$$\Delta E_T = W_t + \sum_i m_i (h_T)_i - \sum_j m_j (h_T)_j \quad (\text{II.22})$$

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

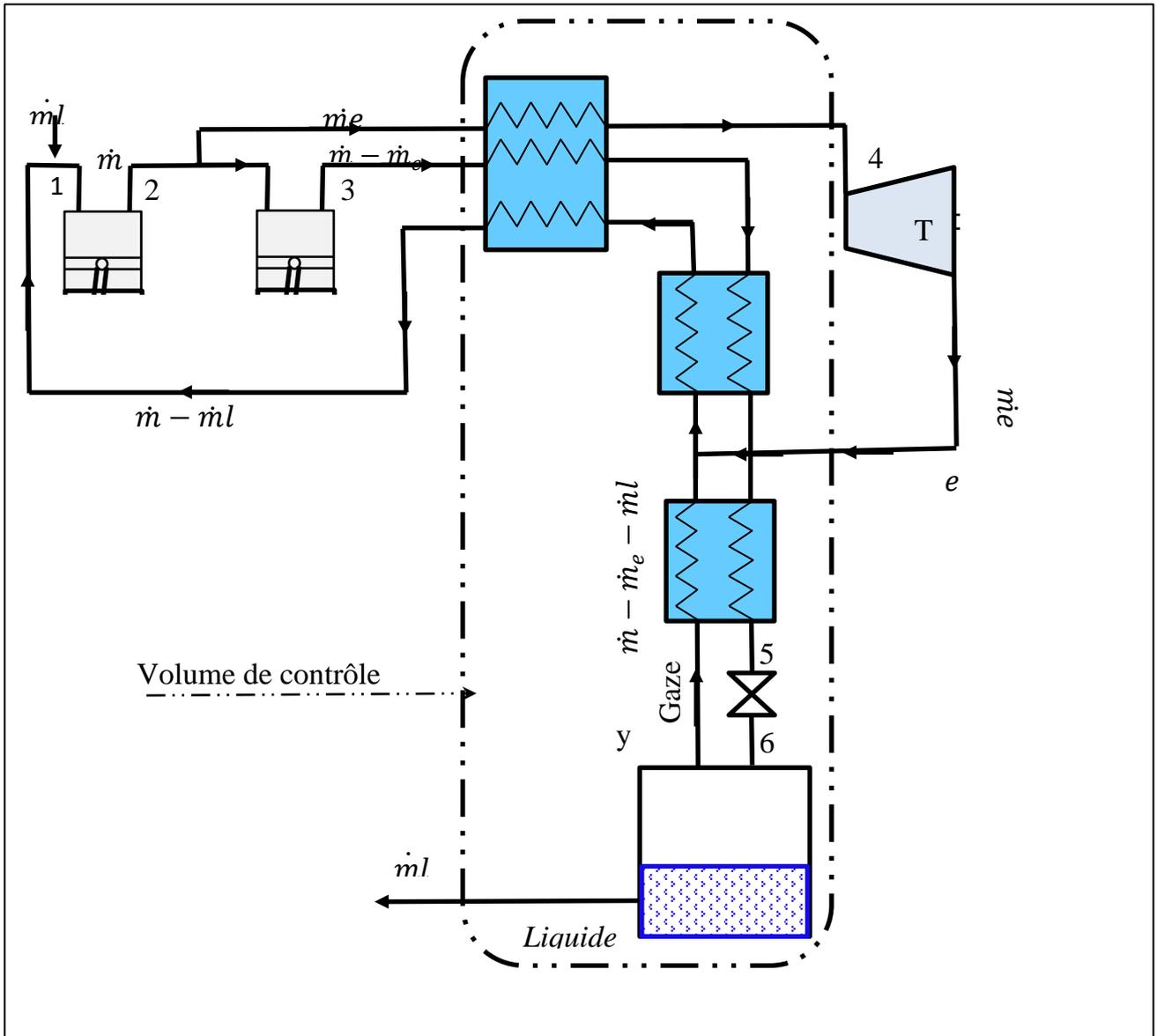
$\dot{\phi}$  : Puissance thermique échangée avec le milieu extérieur

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

$\dot{m}_v, \dot{m}_l$ : Débit massique de fluide.

En considérant un régime permanent :  $\frac{dE_T}{dt} = \dot{E}_t = 0$  (II.23)

Dou  $\dot{\varphi} + \dot{W}_t = \dot{m}(h_{T_s} - h_{T_e}) = \dot{m}\Delta hT$  (II.24)



**Figure II.6 :** Cycle de Claude à double compression avec détente isentropique (de la pression intermédiaire  $P_2$  à la pression d'entrée  $P_1$ )

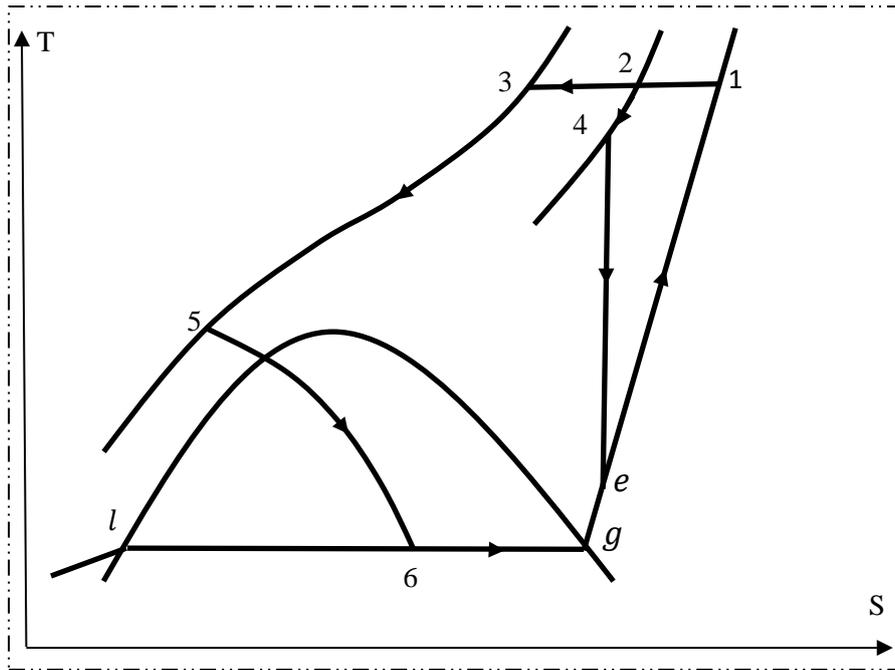


Figure II.7 : Cycle de Claude à double compression(T-S)

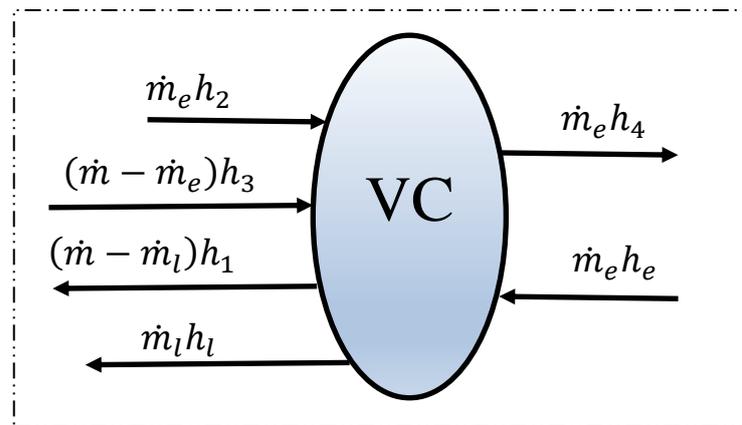


Figure II.8 : Volume de contrôle

En faisant un bilan d'énergie pour le volume de contrôle :

$$(\dot{m} - \dot{m}_e)h_3 + \dot{m}_e h_2 + \dot{m}_e h_e = (\dot{m} - \dot{m}_l)h_1 + \dot{m}_e h_4 + \dot{m}_l h_l$$

$$\dot{m}_l(h_l - h_1) = \dot{m}(h_3 - h_1) + \dot{m}_e[(h_e - h_4) + (h_2 - h_3)] \tag{II.25}$$

Le taux de liquéfaction

$$Y = \frac{\dot{m}_l}{\dot{m}} = \left( \frac{h_3 - h_1}{h_l - h_1} \right) + x \left[ \left( \frac{h_e - h_4}{h_l - h_1} \right) - \left( \frac{h_3 - h_2}{h_l - h_1} \right) \right] \quad (\text{II.26})$$

La puissance mécanique nette de cycle

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_c - \dot{W}_{eT} = \dot{W}_{c1} + \dot{W}_{c2} - \dot{W}_{eT} \quad (\text{II.27})$$

$$\dot{W}_{net} = \dot{m}((h_2 - h_1) - T_1(S_2 - S_1)) + (\dot{m} - \dot{m}_e)((h_3 - h_2) - T_1(S_3 - S_2)) - \dot{m}_e(h_4 - h_e)$$

$$\dot{W}_{net} = \dot{m}((h_3 - h_1) - T_1(S_3 - S_1)) - \dot{m}_e((h_3 - h_2) - T_1(S_3 - S_2)) - \dot{m}_e(h_4 - h_e) \quad (\text{II.28})$$

Le travail net requis par unité de masse de gaz comprimé

$$\frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}} = ((h_3 - h_1) - T_1(S_3 - S_1)) - x[(h_3 - h_2) - T_1(S_3 - S_2) - (h_4 - h_e)] \quad (\text{II.29})$$

Le travail net requis par unité de masse de gaz liquéfié

$$\frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_l} = \frac{1}{y} [((h_3 - h_1) - T_1(S_3 - S_1)) - x[(h_3 - h_2) - T_1(S_3 - S_2) - (h_4 - h_e)]] \quad (\text{II.30})$$

Le facteur de mérite

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

$$FOM = \frac{(\dot{W}_{net}/\dot{m}_l)_{ideal}}{(\dot{W}_{net}/\dot{m}_l)_{réel}} \quad (\text{II.31})$$

Deuxième cycle Claude double compression :

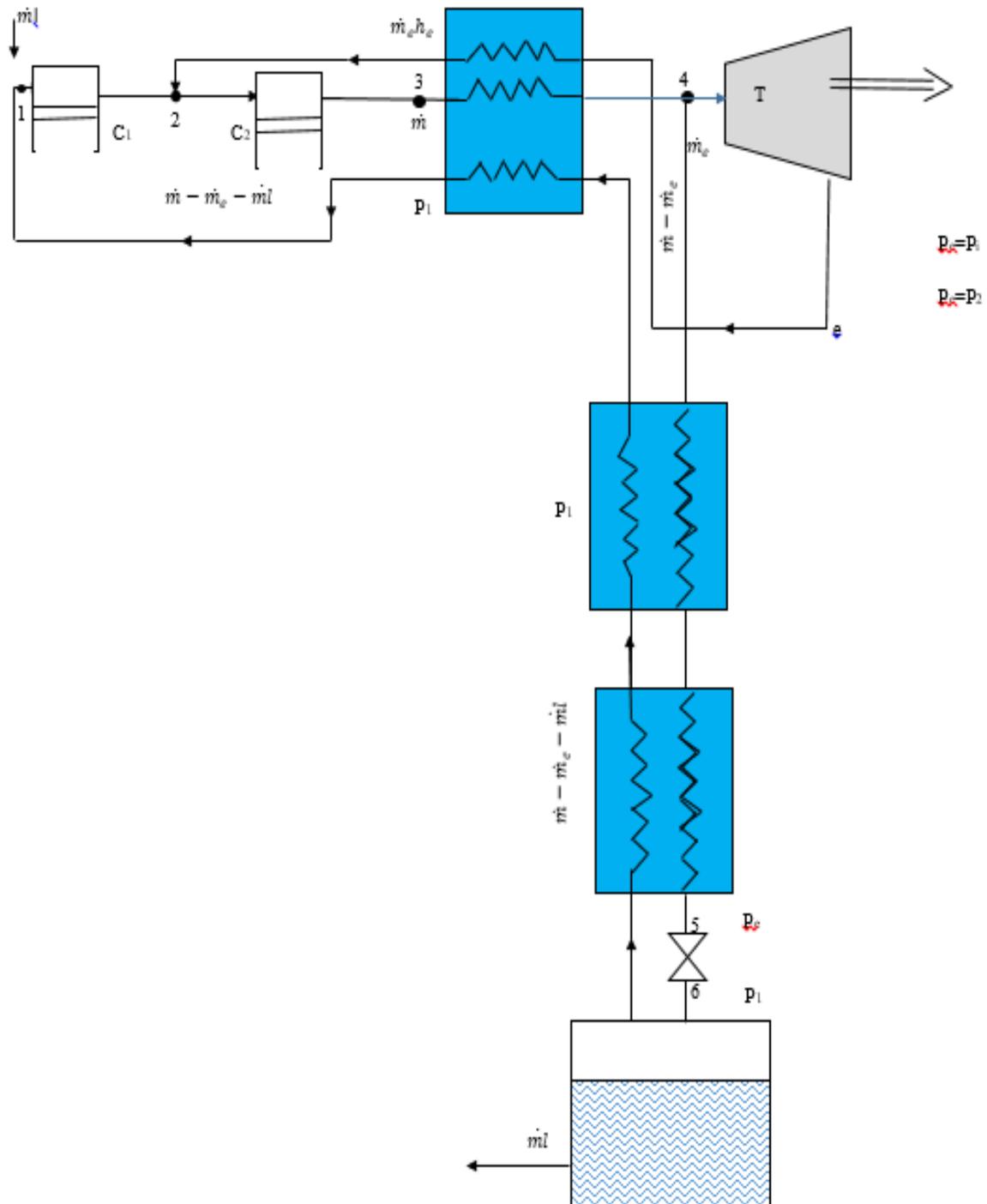
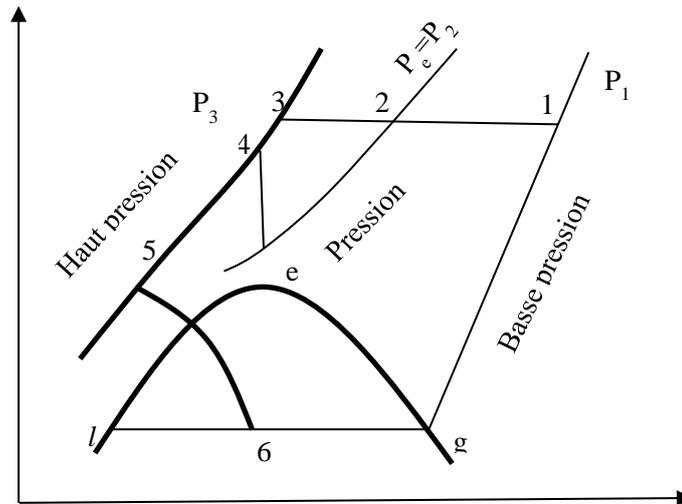


Figure II.9 : Cycle de Claude à double compression avec détente isentropique (de la haute pression HP vers la pression intermédiaire IP)



**Figure II.10 :** Diagramme de cycle de claudé à double compression (T-S)

En faisant un bilan d'énergie :

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

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

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

Le taux de liquéfaction

$$Y = \frac{\dot{m}_l}{\dot{m}} = \frac{h_3 - h_1}{h_l - h_1} + x \left( \frac{h_e - h_1}{h_l - h_1} \right) \tag{II.32}$$

La puissance mécanique net de cycle

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_C - \dot{W}_{eT} = \dot{W}_{C1} + \dot{W}_{C2} - \dot{W}_{eT} \tag{II.33}$$

$$\begin{aligned} \dot{W}_{net} &= (\dot{m} - \dot{m}_e)[(h_2 - h_1) - T_1(S_2 - S_1)] + \dot{m}[(h_3 - h_2) - T_2(S_3 - S_2)] \\ &\quad + \dot{m}_e(h_4 - h_e) \end{aligned}$$

$$\dot{W}_{net} = \dot{m}[(h_3 - h_1) - T_1(S_3 - S_1)] - \dot{m}_e[(h_2 - h_1) - T_1(S_2 - S_1) + \dot{m}_e(h_4 - h_e)] \tag{II.34}$$

Le travail net requis par unité de masse comprimé

$$\frac{W_{net}}{\dot{m}} = [(h_3 - h_1) - T_1(S_3 - S_1)] - \frac{\dot{m}_e}{\dot{m}} [(h_2 - h_1) - T_1(S_2 - S_1)] + \frac{\dot{m}_e}{\dot{m}} [(h_4 - h_e)]$$

$$\frac{W_{net}}{\dot{m}} = [(h_3 - h_1) - T_1(S_3 - S_1)] - x[(h_2 - h_1) - T_1(S_2 - S_1) - (h_4 - h_e)] \quad (\text{II.35})$$

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

Le travail net requis par unité de masse de gaz liquéfié

$$\frac{W_{net}}{\dot{m}_l} = \frac{1}{y} [(h_3 - h_1) - T_1(S_3 - S_1)] - x[(h_2 - h_1) - T_1(S_2 - S_1) - (h_4 - h_e)] \quad (\text{II.36})$$

Le facteur de mérite

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

$$FOM = \frac{(\dot{W}_{net}/\dot{m}_l)_{ideal}}{(\dot{W}_{net}/\dot{m}_l)_{réel}} \quad (\text{II.37})$$

### II.3.5. Composent cryogénique

Les compresseurs cryogéniques peuvent être volumétriques (alternatifs ou rotatifs) ou à impulsion (centrifuges). Dans le domaine de la cryogénie, deux contraintes importantes nous obligent à faire un bon choix d'un compresseur. Il faut que le processus de compression soit le plus possible isotherme.

Le processus doit se faire sans polluer le gaz afin de ne pas boucher les échangeurs.

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

### II.3.6. Echangeurs de chaleurs

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

### II.3.7. Régénérateurs

Dans une installation cryogénique, le régénérateur est destiné à stocker momentanément la chaleur cédée par le fluide à haute pression s'écoulant de la température ambiante à la température froide avant de restituer à ce fluide repassant après détente. Et

D'un point de vue technologique, ces régénérateurs doivent avoir une capacité thermique infinie par rapport à celle du fluide cryogénique et une conductivité thermique nulle dans le sens longitudinal pour empêcher les apports de chaleur parasite par conduction du bout chaud au bout froid. Une conductivité thermique infinie dans le sens radial pour assurer une bonne diffusivité thermique lors des échanges d'énergie (sous forme thermique).

### II.3.8. Détendeurs cryogéniques

#### ➤ Détendeur alternatif

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

#### ➤ Les turbines à paliers à gaz hydrostatique ou hydrodynamique

À paliers statiques, elles sont alimentées par un faible débit de gaz haute pression d'environ 4% du débit de cycle. Ils ont de ce fait une force de sustentation importante et indépendante de la vitesse de rotation. Et les paliers dynamiques qui n'ont pas à être alimentés, supportent mal les variations rapides des conditions de fonctionnement et ont une force de sustentation décroissante avec la vitesse de rotation.

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

### **II.3.9. Autres composants**

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

### **II.4. Conclusion**

En résumé, l'étude thermodynamique des cycles de liquéfaction vise à optimiser la conversion des gaz en liquides à basse température. En améliorant des cycles tels que ceux de Linde-Hampson et Claude à double compression, on peut accroître l'efficacité énergétique et réduire les coûts. Cela est crucial pour les industries qui dépendent du stockage et du transport des gaz liquéfiés, comme les secteurs des gaz industriels.

*Chapitre III*  
*Résultat et Discussion*

### III.1. Introduction

Les cycles de Claude sont essentiels pour la liquéfaction des gaz en raison de leur efficacité industrielle. Ce chapitre présente et analyse les résultats des graphes des cycles de Claude, en examinant l'influence de paramètres comme la pression et la température sur les performances du cycle.

Nous décrirons d'abord les méthodes utilisées pour générer les graphes, puis nous analyserons les résultats en termes d'efficacité énergétique et de rendement. Enfin, nous comparerons les cycles de Claude avec d'autres cycles thermodynamiques pour identifier des améliorations possibles[11].

### III.2. Cycle de Claude double compression

Pour une installation cryogénique à étranglement double utilisant le (cycle de Claude double compression) avec une détente isentropique de la pression intermédiaire jusqu'à pression initiale pour la liquéfaction du gaz représentée par le schéma auparavant. Les conditions de fonctionnement sont les suivantes :  $P_1=1\text{bar}$  et  $T_1=T_3=300\text{K}$  et  $P_3=60\text{ bars}$ .

➤ **Les requis consistent à déterminer :**

1- Le taux de liquéfaction  $y$ .

2- Le travail par unité de masse comprimée  $\dot{w}_c/\dot{m}$

3- Le travail par unité de masse liquéfiée  $\dot{w}_c/\dot{m}_l$

4- Le facteur de mérite  $M = \frac{(\dot{W}_{net}/\dot{m}_l)_{ideal}}{(\dot{W}_{net}/\dot{m}_l)_{réel}}$ .

➤ **Paramètres d'opération de cycle Claude à double compression**

Durant l'analyse thermodynamique du cycle de Claude à double compression, le travail actuel consiste à analyser le processus de la liquéfaction des différents gaz tel que l'oxygéné  $O_2$  et l'azote  $N_2$ . Dans tous les calculs, les différents paramètres ont été analysés afin de minimiser le travail absorbé par le fluide au cours de la compression isotherme (quantité d'énergie dépensé) et maximiser la quantité de gaz liquéfié. Cela a été réalisé en variant ces deux paramètres :

- La pression interne intermédiaire.
- La température au niveau de la détente isentropique (entrer la turbine)

T <sub>4</sub> (K)	P <sub>2</sub> (bar)
200	10
195	20
190	30
185	40
180	50

**Tableau III.1:** Les différents paramètres du cycle de Claude à double compression

### III.2.1. Influence de pression et de température de cycle d'oxygène et l'azote

#### III.2.1.1. Influence de pression sur les paramètres du cycle de Claude à double compression

Dans cette partie, l'évolution des paramètres de performances  $y$ ,  $\dot{w}_c/\dot{m}$ ,  $\dot{w}_c/\dot{m}_l$ , FOM en fonction du compression intermédiaire  $P_2$  et la fraction massique  $x$  (0.15,0.25,0.35,0.45) en variant la pression  $P_2=10, 20,30,40,50$  bar pour les mêmes paramètres à l'entrée et à la sortie de deuxième compresseur,  $P_1 = 1 \text{ bar}$  et  $T_1 = T_3 = 300$  °K et  $P_3 = 60\text{bar}$

#### III.2.1.2. Influence de la température T<sub>4</sub> sur les paramètres du cycle de Claude double compression

Dans cette partie on va fixer les pressions  $P_1= 1\text{bar}$ ,  $P_2=20 \text{ bar}$ ,  $P_3=60\text{bar}$  correspondante pour chaque fluide, puis on va voir l'évolution des paramètres de performances  $y$ ,  $\dot{w}_c/\dot{m}$ ,  $\dot{w}_c/\dot{m}_l$ , FOM en fonction du rapport de température et on variant la température  $T_4=195,190,185,180,175\text{K}$  pour les mêmes paramètres à l'entrée et à la sortie de deuxième compresseur,  $T_1=30\text{K}$ ,

$T_3 = 300$  °K Pour la même condition.

III.2.1.2.1. Premier cycle (l'oxygène et L'azote)

A. Liquéfaction d'oxygène

➤ Variation de la pression P<sub>2</sub>

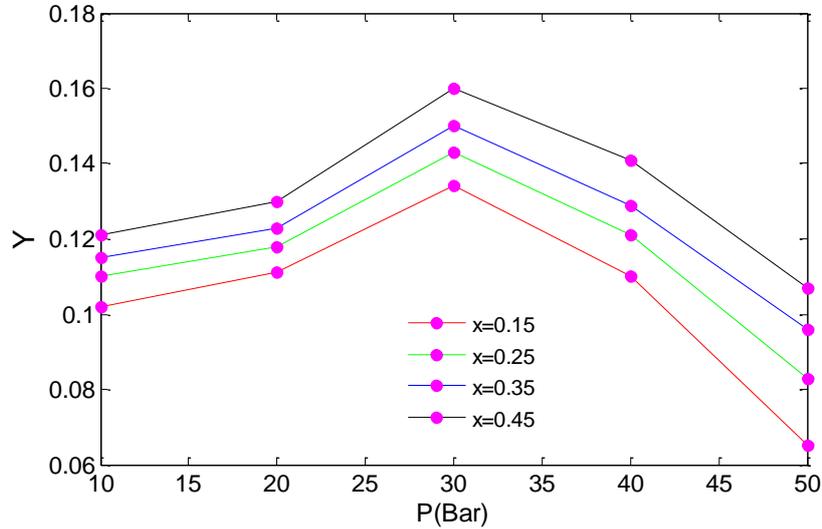


Figure III.1 : Variation du taux de liquéfaction en fonction des pressions

Pour différentes valeurs de la fraction massique ( $x=0.15, x=0.25, x=0.35, x=0.45$ ), on remarque que chaque fois on change la fraction massique, le taux de liquéfaction augmente jusqu'à la pression  $p=30$  bar puis il diminue jusqu'à la pression  $p=50$  bar.

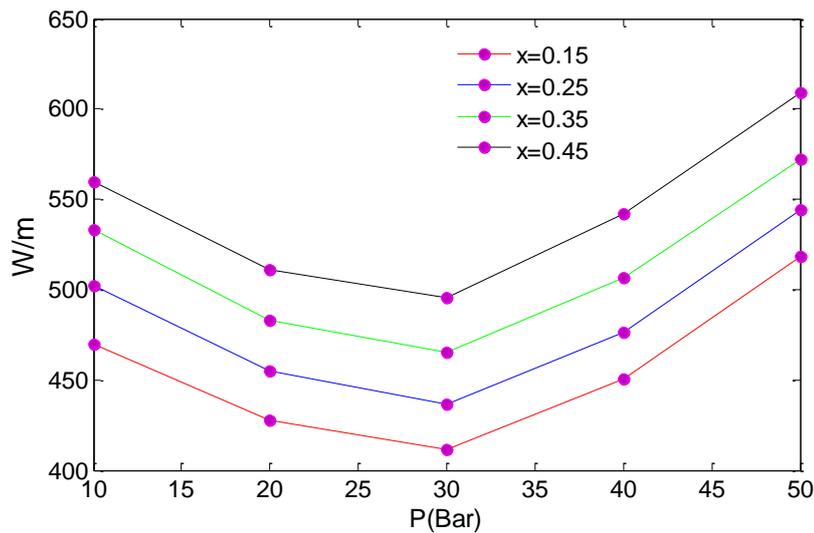


Figure III.2 : Variation travail requis par unité du gaz comprimé en fonction des pressions

La figure montre la variation du travail requis par unité du gaz comprimé, diminue de la pression  $p=10\text{bar}$  jusqu'à la pression  $p=30\text{bar}$ , puis augmente jusqu'à la pression  $p=50\text{bar}$ .

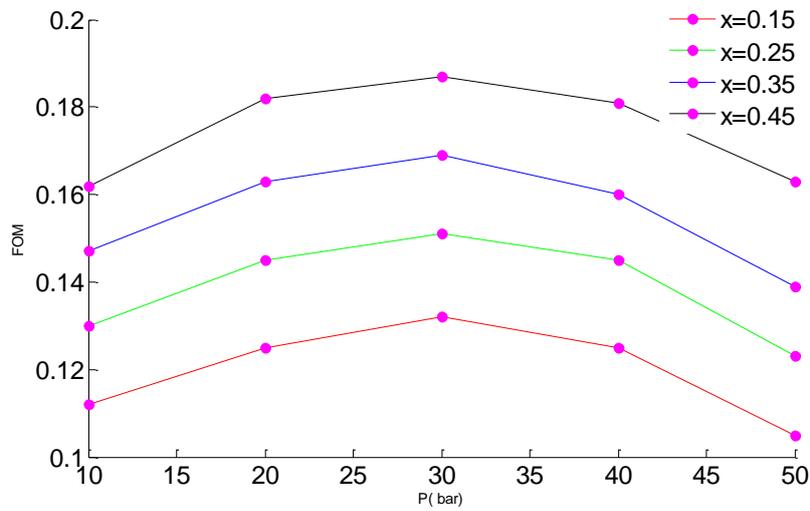


Figure III.3 : Variation du facteur de mérite en fonction des pressions

A partir du graphe suivant on peut conclure que la fraction massique jouer un rôle dans le changement de facteur de mérite on fonction de pression

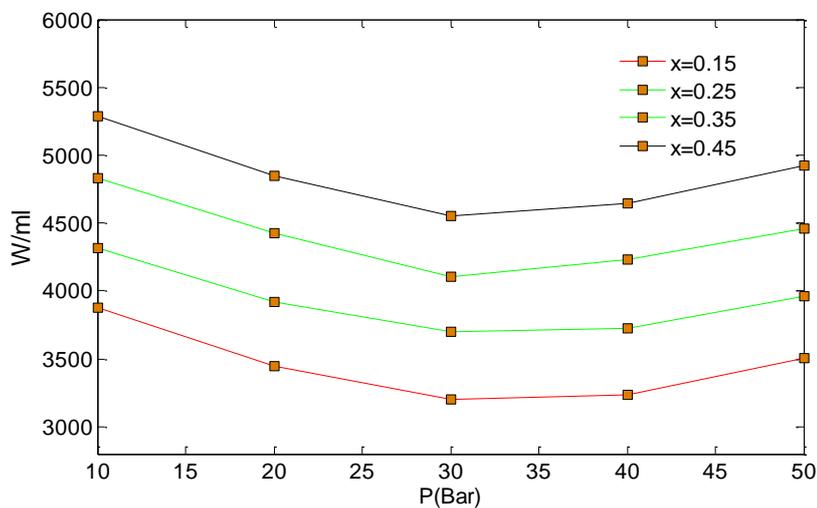
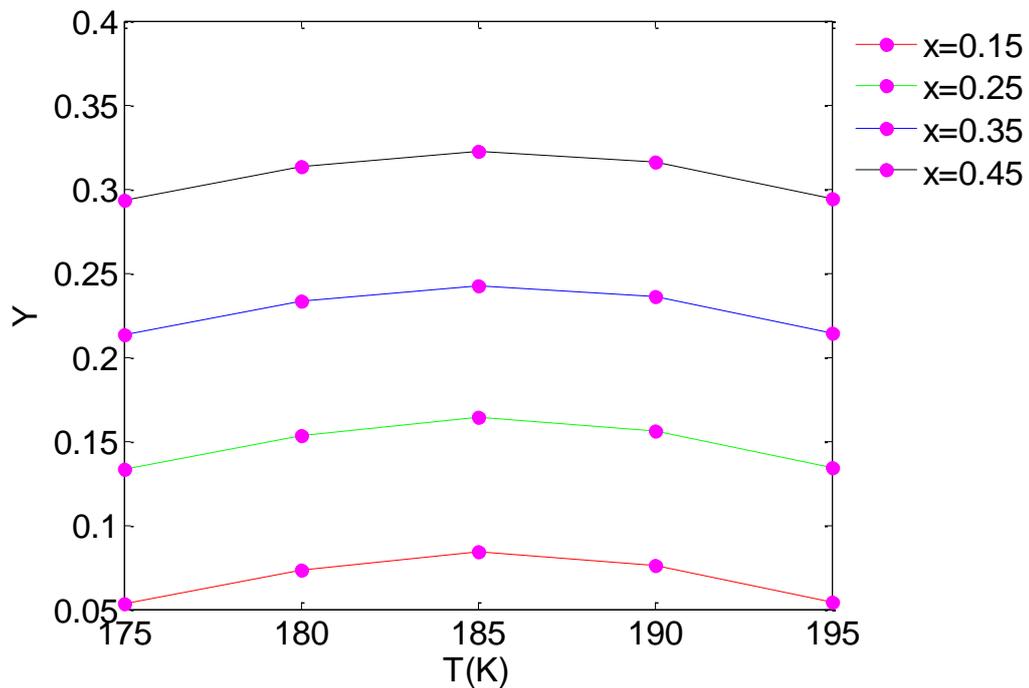


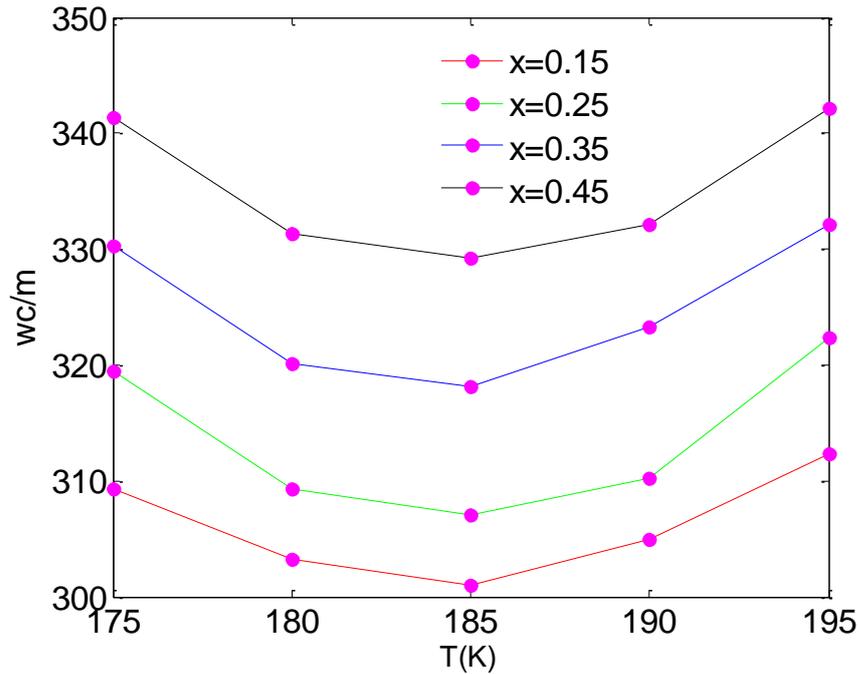
Figure III.4 : Variation travail requis par unité du gaz liquéfier en fonction des pressions

La figure représente la variation de travail requis par unité de gaz liquéfier en fonction de la pression pour différentes valeurs de la fraction massique  $x$  (0.15,0.25,0.35,0.45), on constate que pour toutes les valeurs de  $x$  le travail requis par unité de masse de gaz liquéfier diminue jusqu'à la pression  $p=30\text{ bar}$ , puis augmente jusqu'à  $p=50\text{bar}$

➤ Variation température  $T_4$ 

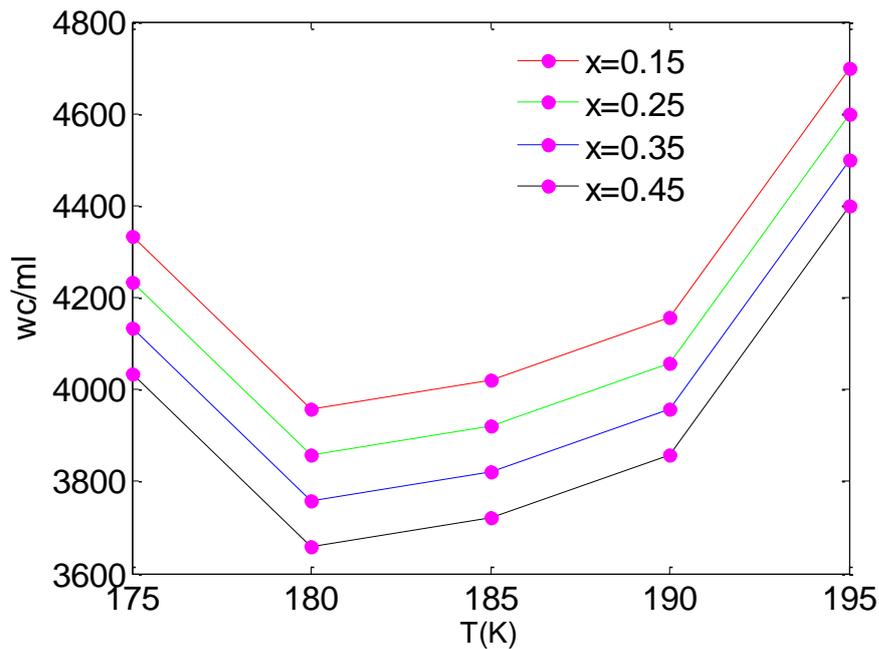
**Figure III.5 :** Variation de taux de liquéfaction en fonction température

Cette figure montre la variation de taux de liquéfaction ( $Y$ ) on fonction de la température  $T$ , pour différentes valeurs de la fraction massique ( $x=0.15, 0.25, 0.35, 0.45$ ) on voit que  $Y$  augmente de température  $T=195K$  jusqu'à la température  $T=185K$ , puis il diminue l'égermant jusqu'à la température  $T=175K$ .



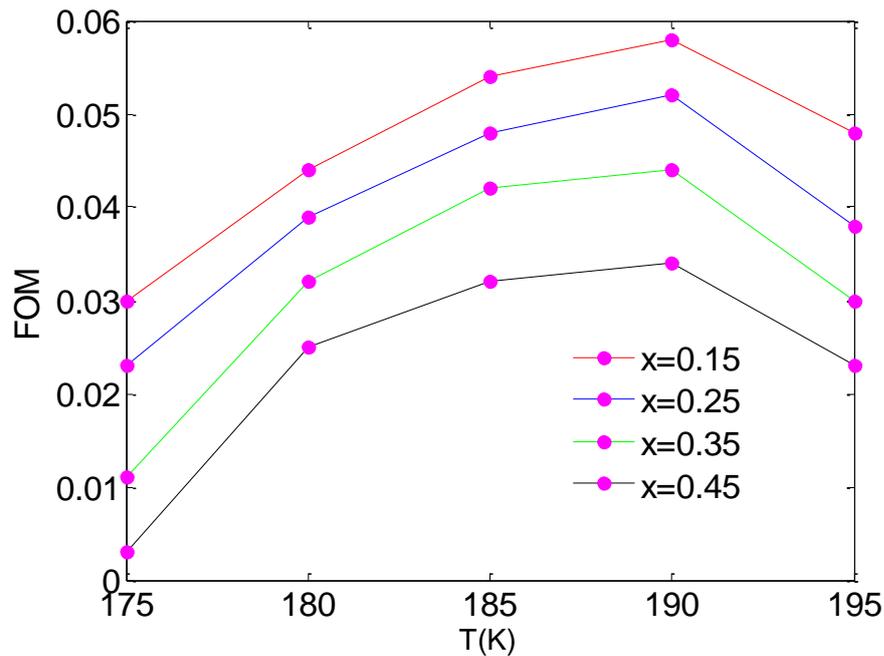
**Figure III.6 :** Variation travail requis par unité de gaz comprimé en fonction température

Cette figure montre clairement que le travail requis par unité de gaz comprimé ( $\dot{w}_c/\dot{m}$ ) varie en fonction de la température ( $T$ ) pour différentes valeurs de ( $x=0.15, 0.25, 0.35, 0.45$ ), on observe que pour chaque valeur de ( $x$ ), le travail nécessaire diminue jusqu'à une température minimale  $T=175$ K, avant d'augmenter à nouveau. Cela indique une relation non linéaire entre la température et le travail requis, suggérant qu'il existe une température optimale à laquelle le travail de compression est minimisé. Cette observation peut être cruciale pour optimiser les processus industriels impliquant la compression de gaz.



**Figure III.7 :** Variation du travail par unité de gaz liquéfier on fonction de la température

Cette figure montre comment travail par unité de gaz liquéfier varie avec la température pour différentes valeurs de ( $x=0.15, 0.25, 0.35, 0.45$ ). A chaque valeurs travail par unité de gaz liquéfier diminue avec l'augmentation de la température  $T=195K$  jusqu'à atteindre un minimum autour de  $T=185K$  puis augmente de niveau  $T=175K$ . Cela suggère une température optimale pour chaque  $x$  ou le travail par unité de gaz liquéfier est le plus bas ce qui est important pour optimiser les processus de compression de gaz et améliorer l'efficacité énergétique.



**Figure III.8 :** Variation facteur de mérite en fonction température

On observe que le facteur de mérite (FOM) augmente avec la température jusqu'à  $T=185\text{K}$ .

Diminue légèrement. Cela indique une température optimale autour de  $T=185\text{K}$  où le FOM est maximal. Cette information est cruciale pour optimiser les processus nécessitant un facteur de mérite élevé, en identifiant les conditions de température idéales pour une efficacité maximale.

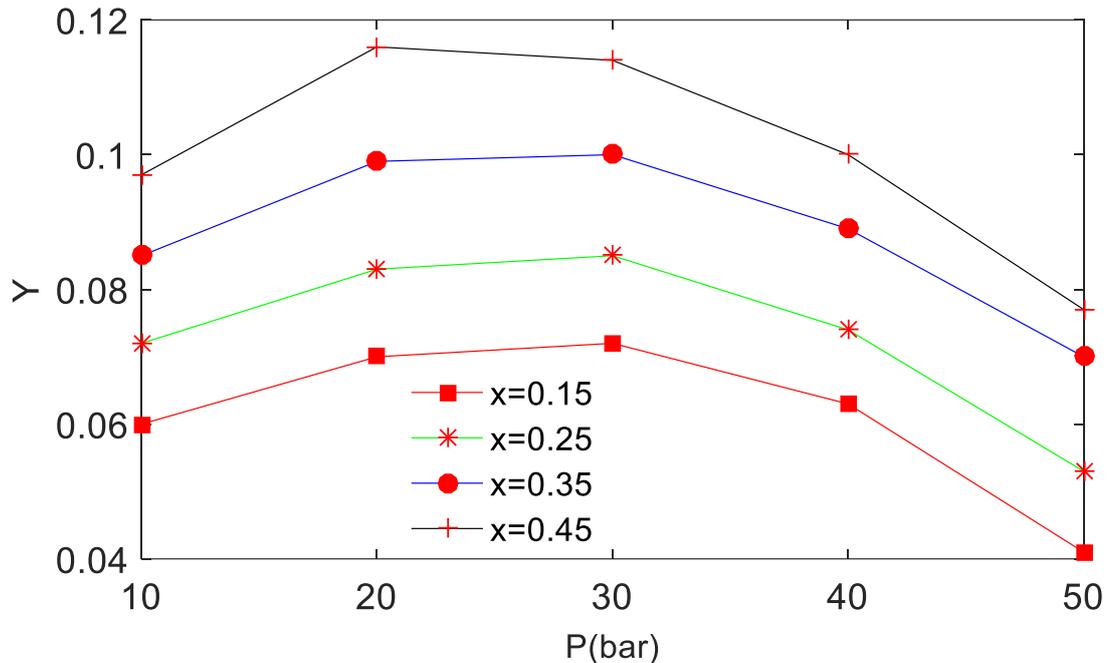
### Discussions de l'oxygène

D'après les résultats obtenus, on remarque qu'un bon choix de la pression intermédiaire peut bien influencer le taux de liquéfaction et d'en améliorer la performance de notre installation pris en considération. Dans cette installation : Pour l'oxygène, on a pu avoir un meilleur rendement du cycle de 19,14% pour une pression de 30 bars correspondante à  $T=190\text{K}$ . On constate que ce procédé de Claude à double compression fonctionnant entre les pressions de 1bar, 10 et 60 bars et une température de détente isentropique variable (entrée de la turbine), nous a permis d'examiner les caractéristiques thermodynamiques pour chaque variation de la température  $T_4$ . Les résultats ont montré que le taux de liquéfaction, le travail par unité de gaz comprimé, travail par unité de masse

liquéfier et le facteur de mérite FOM coïncident parfaitement avec un meilleur point de fonctionnement correspondant à une température  $T_4=185$  K.

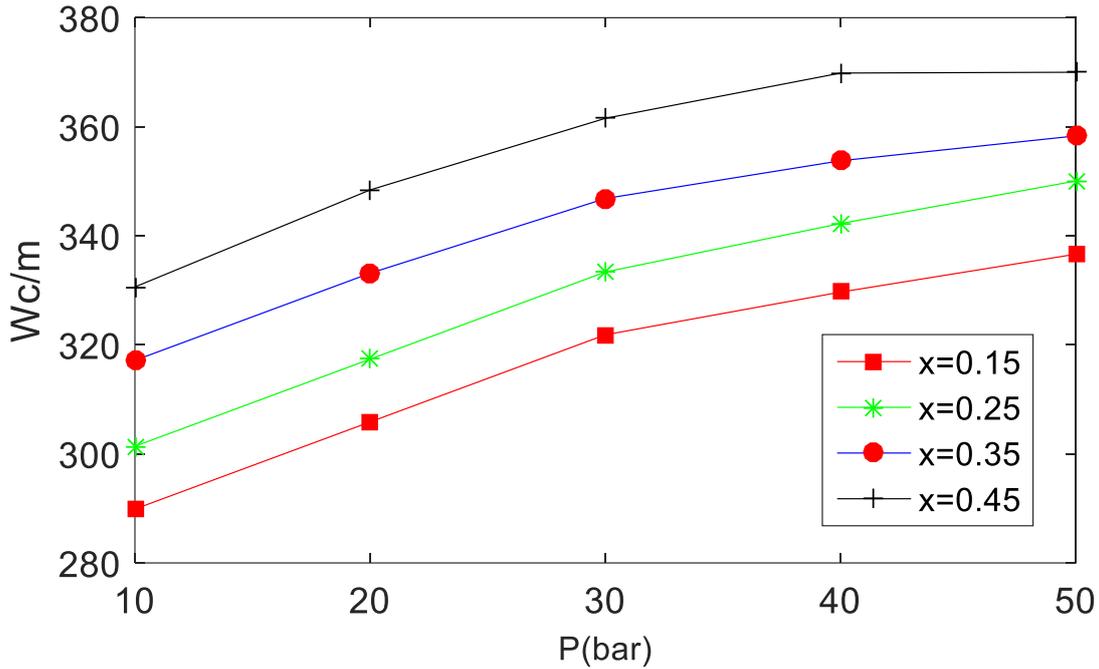
## B. Liquéfaction d'azote

### ➤ Variation de la pression $P_2$



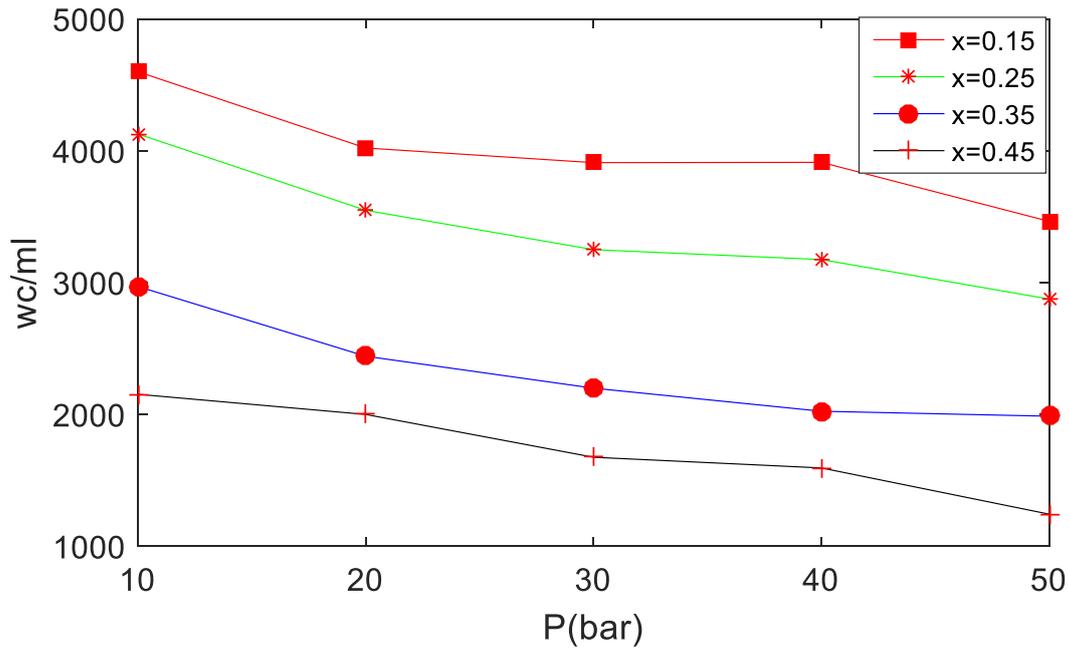
**Figure III.9 :** Variation taux liquéfaction en fonction de pression

Le graphique montre la variation de la variable de taux de liquéfaction en fonction de la pression pour différentes valeurs de fraction massique  $x$  (0.15, 0.25, 0.35, 0.45) on observe que pour toutes les valeurs de  $x$  le taux de liquéfaction augmente avec la pression jusqu'à atteindre un maximum local, puis diminue les courbes suivent une tendance parabolique, indiquant une relation non linéaire entre  $Y$  et  $P$  à mesure que  $x$  augmente, les valeurs maximales de  $Y$  deviennent plus élevées, bien que le pic reste à la valeur de 30 bar



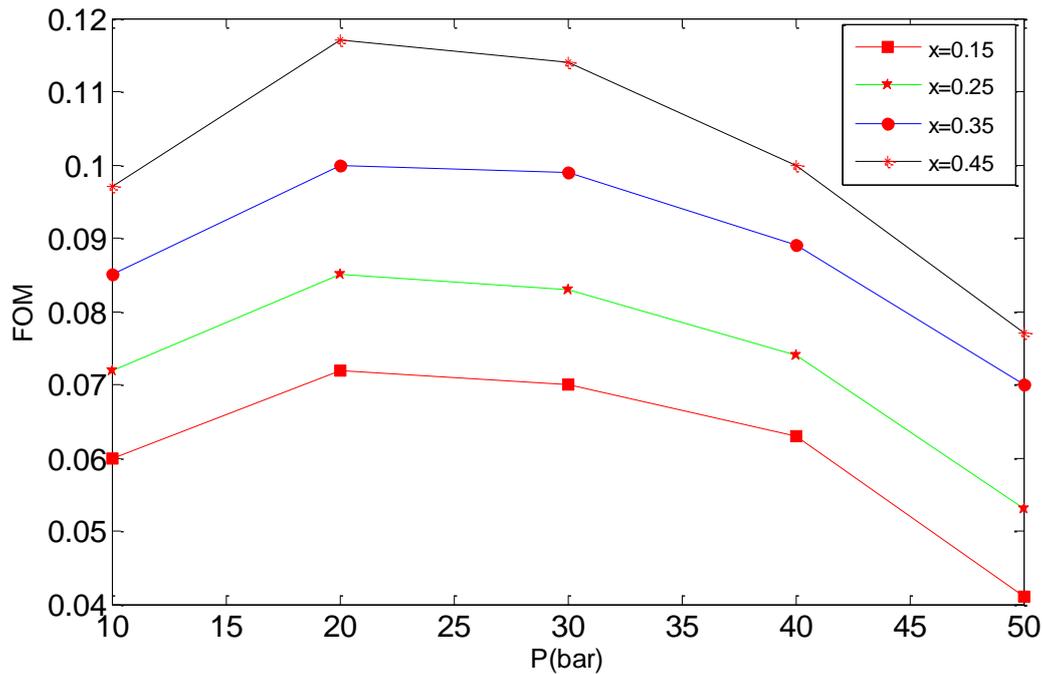
**Figure III.10 :** Variation de travail par unité de masse comprimé en fonction de pression

Le graphique montre comment  $\dot{w}_c/\dot{m}$  (Travail par unité de masse du gaz comprimé) varie en fonction de la pression  $P$  pour différentes valeurs de  $x$  (0.15,0.25,0.35,0.45) globalement, ce travail augmente avec la pression  $P$ . à basse pression (10-20bar) le travail est plus distinct entre les différentes valeurs de  $x$ , avec  $x=0.45$  ayant les valeurs initiales les plus basses. A haute pression (40,50 bar), les courbes convergent légèrement, bien que  $x=0.45$  montre une augmentation plus rapide après 30bar.



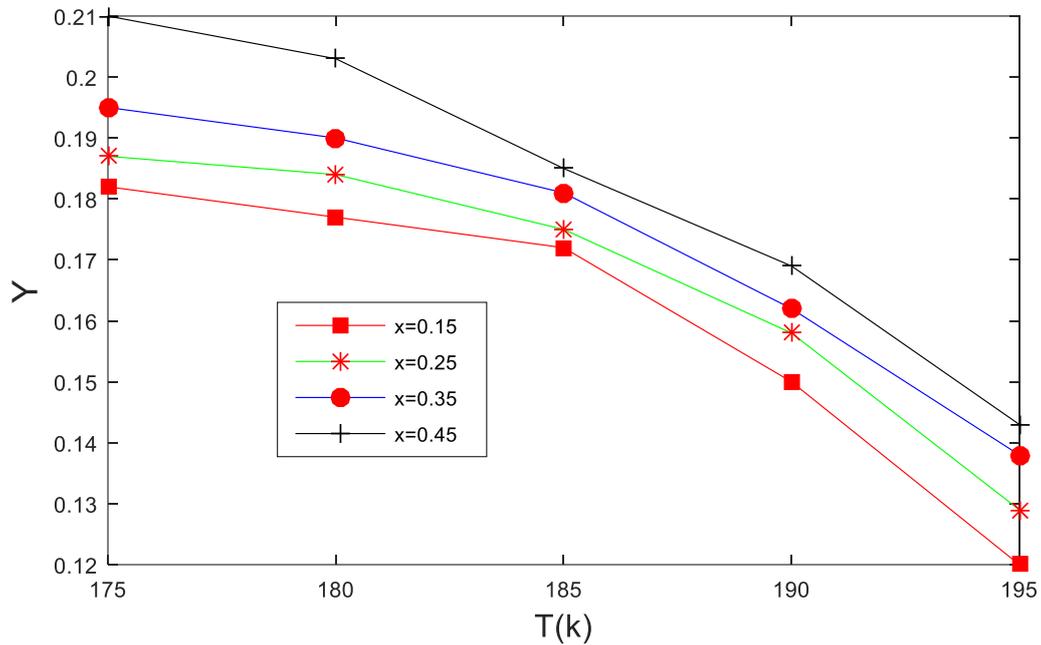
**Figure III.11 :** Variation de travail par unité de gaz liquéfié en fonction de pression

Le graphique montre comment  $\dot{w}_c/\dot{m}$  (Le travail par unité de masse du gaz liquéfié) varie en fonction de la pression  $P$  pour différentes valeurs de  $x$ , On observe une tendance générale à la diminution de ce travail avec l'augmentation de  $P$  pour toutes les valeurs de  $x$ . Les courbes descendent progressivement, indiquant une relation négative entre le travail précédant, à basse pression le travail est plus élevé et varie davantage selon  $x$ ,



**Figure III.12 :** Variation de facteur de mérite en fonction de pression

Le graphique montre la variation de facteur de mérite FOM en fonction de la pression pour différentes valeurs de fraction massique  $x$  (0.15,0.25,0.35,0.45) on observe que pour toutes les valeurs de  $x$  le taux de liquéfaction augmente avec la pression jusqu'à atteindre un maximum local, puis diminue les courbes suivent une tendance parabolique, indiquant une relation non linéaire entre FOM et P à mesure que  $x$  augmente, les valeurs maximales de FOM deviennent plus élevées, bien que le pic reste à la valeur de 20 bar.

➤ Variation de la pression  $T_4$ 

**Figure III.13 :** Variation de taux de liquéfaction en fonction de température

Les résultats de cette figure montrent des courbes qui augmentent de manière convergente et parfaite avec une relation inverse entre la température et le taux de liquéfaction  $Y$ , et une relation directement proportionnelle croissante entre la fraction massique et le taux  $Y$ .

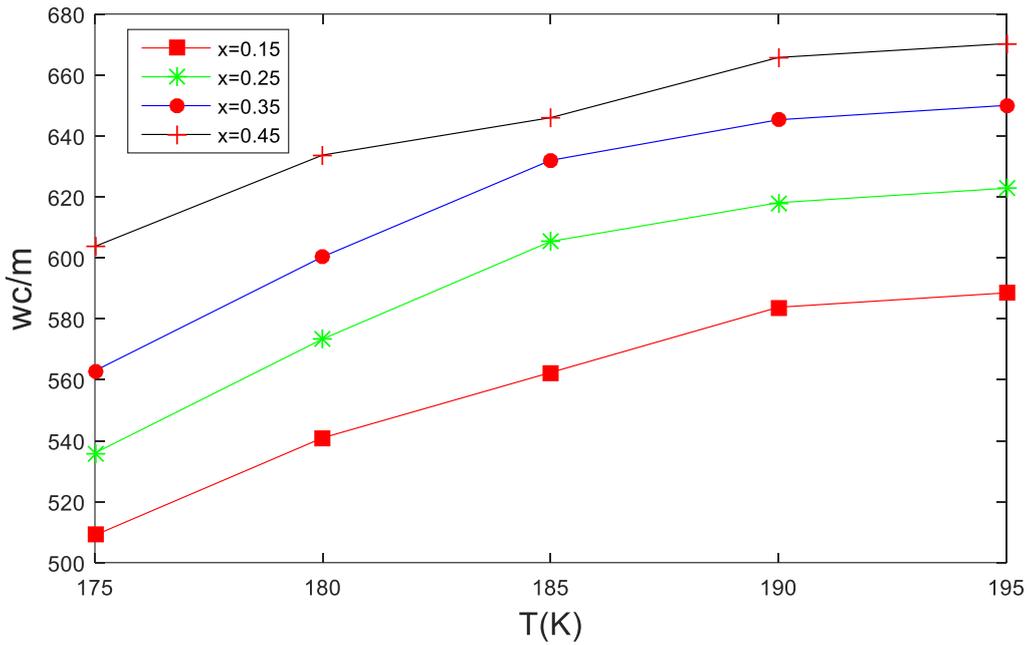


Figure III.14 : Variation de travail par unité de gaz comprimé en fonction de température

Pour  $\dot{w}_c/\dot{m}$  (Travail par unité de masse du gaz comprimé) on remarque que les courbes diminuent pour différentes valeurs de la fraction massique ils diminuent progressivement, avec la valeur décroissante de x

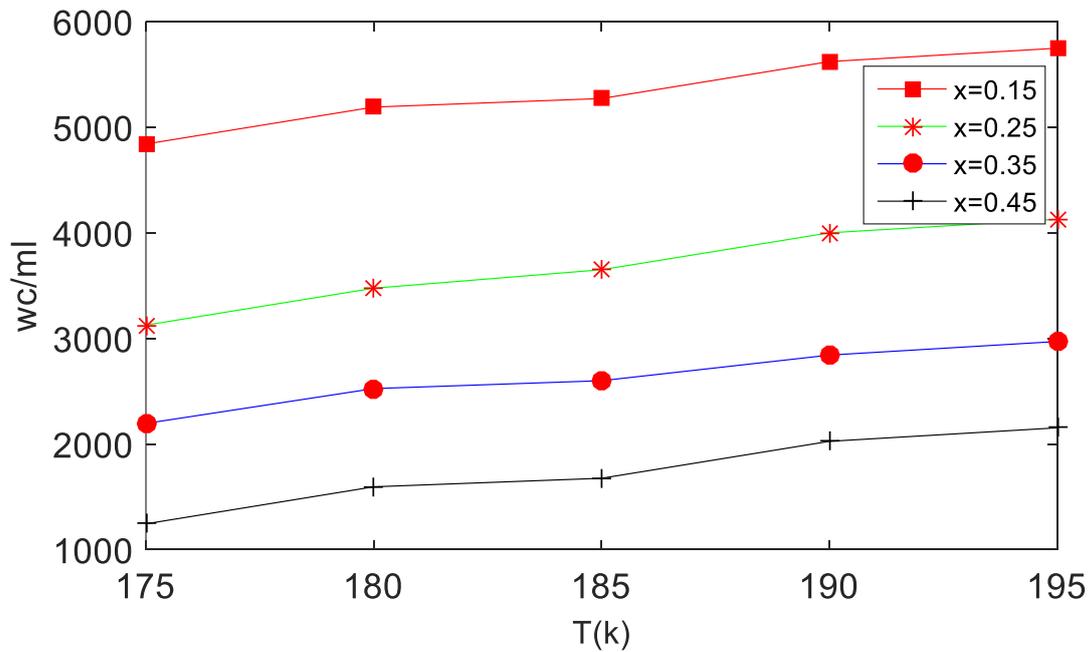
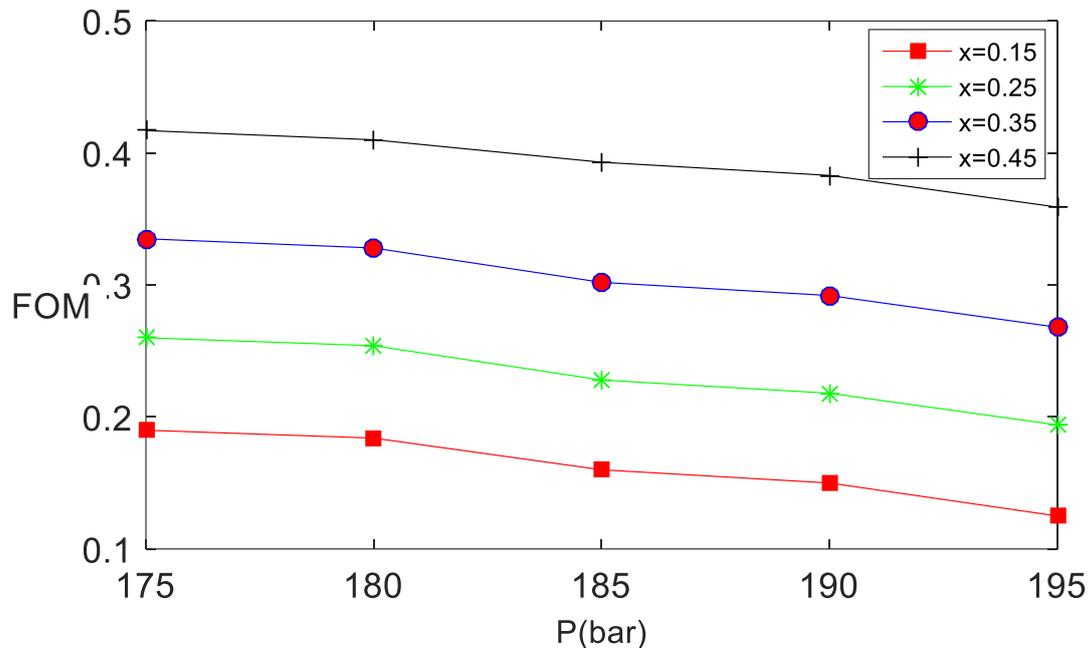


Figure III.15 : Variation de travail par unité de gaz liquéfier en fonction la température

Le graphique montre la variation de  $\dot{w}_c/\dot{m}$  (Le travail par unité de masse du gaz liquéfié) en fonction de la température, on remarque que lorsque la température diminue, les courbes diminuent de manière assez inégale et régulière, et aussi une relation inverse entre la fraction massique et le travail cité en haut.



**Figure III.16 :** Variation de facteur de mérite en fonction de température

Pour toutes Cette figure montre la variation de facteur de mérite FOM en fonction de la température T pour différentes valeurs de la fraction massique ( $x=0.15, 0.25, 0.35, 0.45$ ) on voit que FOM tend à diminuer légèrement avec l'augmentation de température les valeurs de x.

### Discussion de l'azote

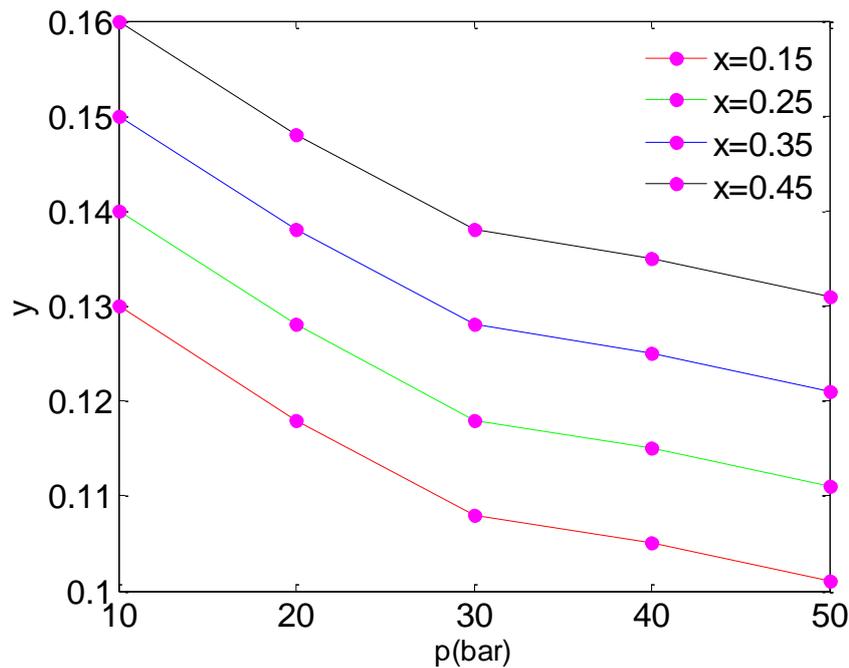
D'après les résultats obtenus, on remarque qu'un bon choix de la pression intermédiaire peut bien influencer le taux de liquéfaction et d'en améliorer la performance de notre installation pris en considération. Dans cette installation : Pour l'azote, on a pu avoir un meilleur rendement du cycle de 19% pour une pression de 20 bars correspondante à  $T=190$  K. On constate que ce procédé de Claude à double compression fonctionnant entre les pressions de 1bar, 10 et 60 bars et une température de détente isentropique variable (entrée de la turbine), nous a permis d'examiner les caractéristiques thermodynamiques pour chaque variation de la température  $T_4$ . Les résultats ont montré que le taux de liquéfaction,

le travail par unité de gaz comprimé, travail par unité de masse liquéfier et le facteur de mérite FOM coïncident parfaitement avec un meilleur point de fonctionnement correspondant à une température  $T_4=180$  K.

### III.2.1.2.2. Deuxième cycle (l'oxygène et l'azote)

#### A. Liquéfaction d'oxygène

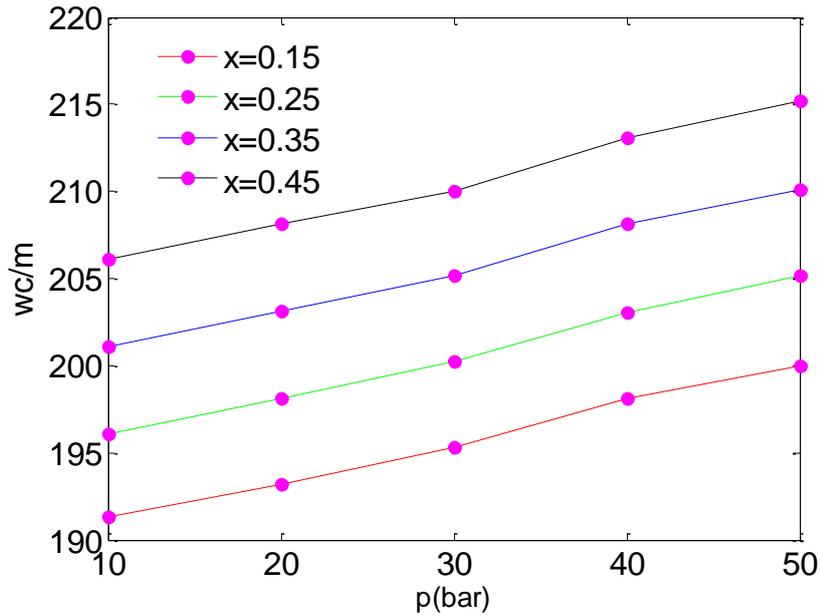
##### ➤ Variation de la pression $P_2$



**Figure III.17 :** Variation de taux de léquéfaction en fonction de pression

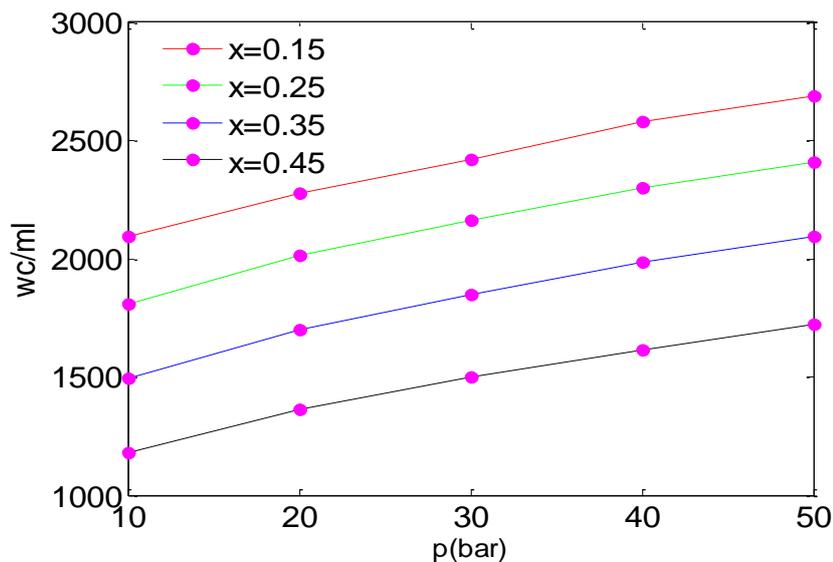
Cette figure montre que le taux de liquéfaction diminue linéairement avec l'augmentation de la pression pour toutes les valeurs de x (0,15. 0,25. 0,35, 0,45) par exemple, pour  $x=0.15$ , le taux Y

Passé d'environ 0.16 à 10 bars à environ 0.12 à 50 bars, cette tendance indique que des pressions plus élevées réduisent le taux de liquéfaction,



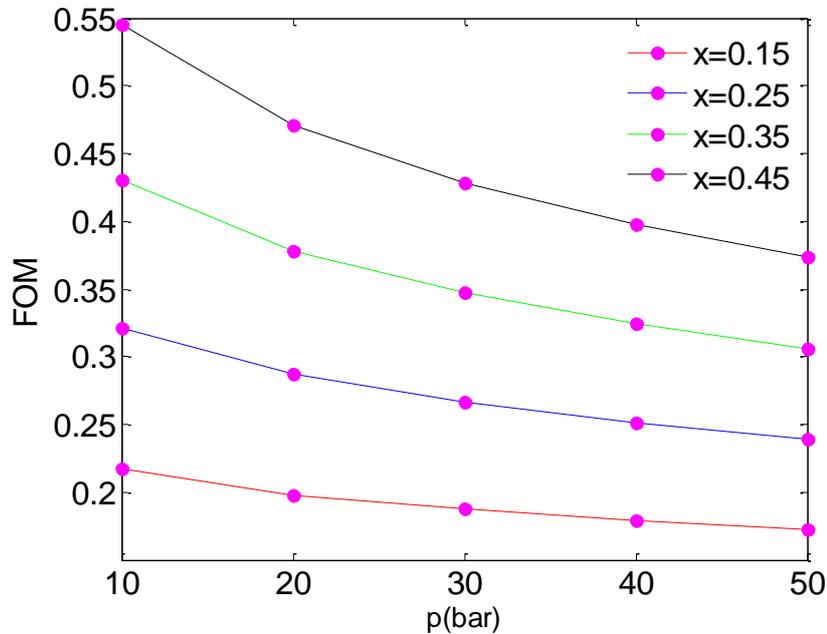
**Figure III.18 :** Variation de travail par unité de masse comprimer en fonction de pression

La figure montre que  $\dot{w}_c/\dot{m}$  (Travail par unité de gaz comprimé) augmente linéairement avec la pression, quel que soit la valeur de  $x$ . par exemple, pour  $x = 0.15$  le travail passe d'environ 20bar  $\dot{w}_c/\dot{m}_i$  à 10 bar à environ 50 bars de même, pour  $x=0.45$ , il passe d'environ 195 à 200K.



**Figure III.19 :** Variation de travail par unité de masse liquéfier en fonction de la pression

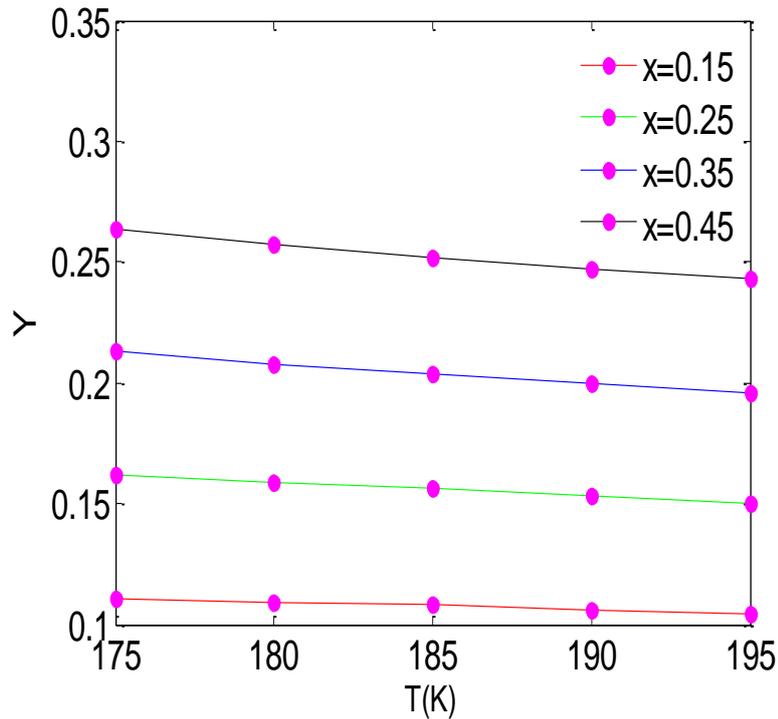
Le graphique montre la variation de travail par unité de masse de gaz liquéfier en fonction de la pression P, pour différentes valeurs de fraction massique x on remarque les courbes augmentent parfaitement et régulièrement il existe une relation proportionnelle entre les courbes et la pression P et aussi la fraction massique.



**Figure III.20 :** Variation de facteur de mérite en fonction de pression

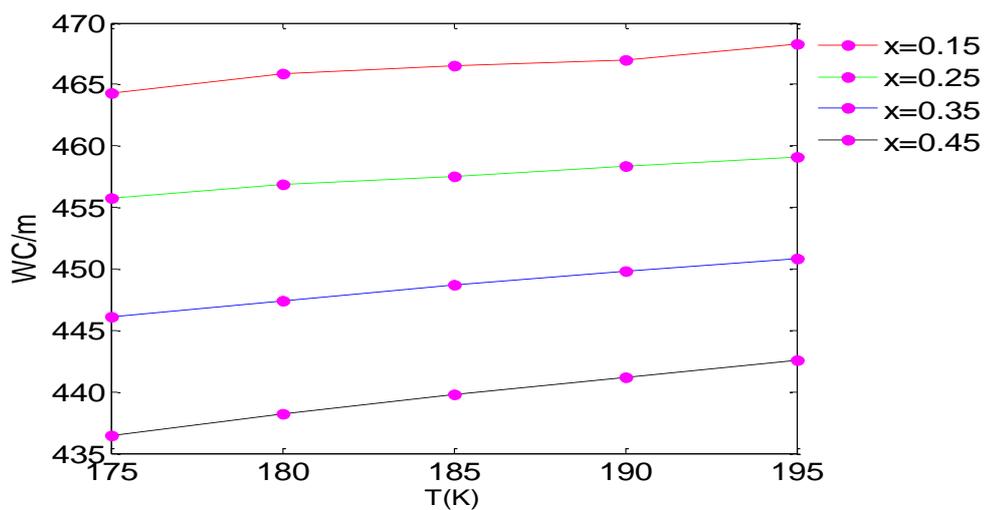
Cette figure montre la variation de facteur de mérite FOM en fonction de la pression p pour différentes valeurs de la fraction massique ( $x=0.15, 0.25, 0.35, 0.45$ ) on voit que FOM tend à diminuer légèrement avec l'augmentation de pression pour toutes les valeurs de x.

➤ Variation de la température  $T_4$



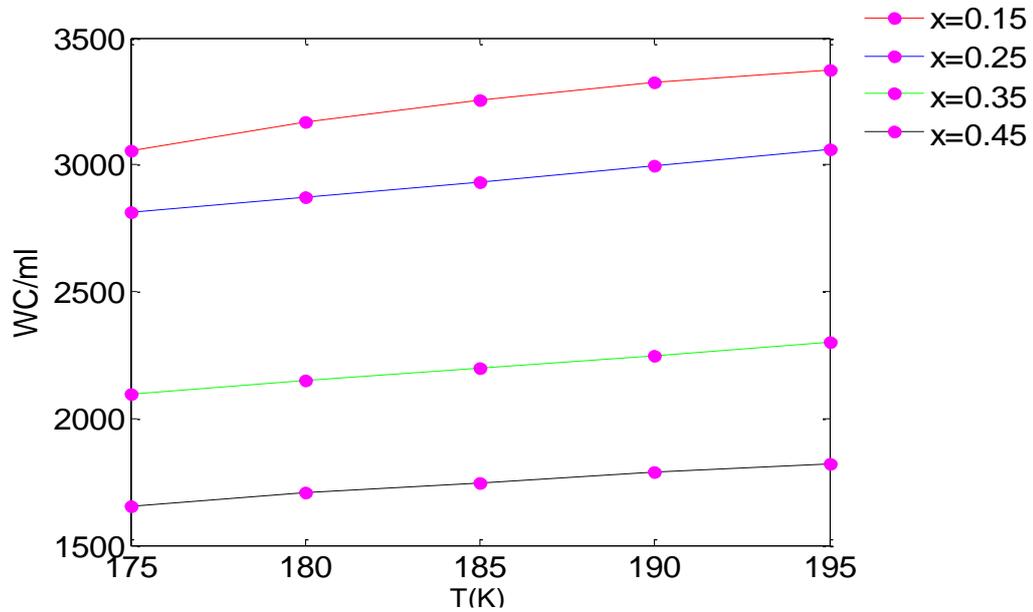
**Figure III.21 :** Variation de taux de léquifaction en fonction de température

Les résultats de cette figure montres des courbes augmentent de manière convergente et parfaite avec une relation inverse entre la température et le taux de liquéfaction Y, et une relation directement proportionnelle croissante entre la fraction massique et le taux Y.



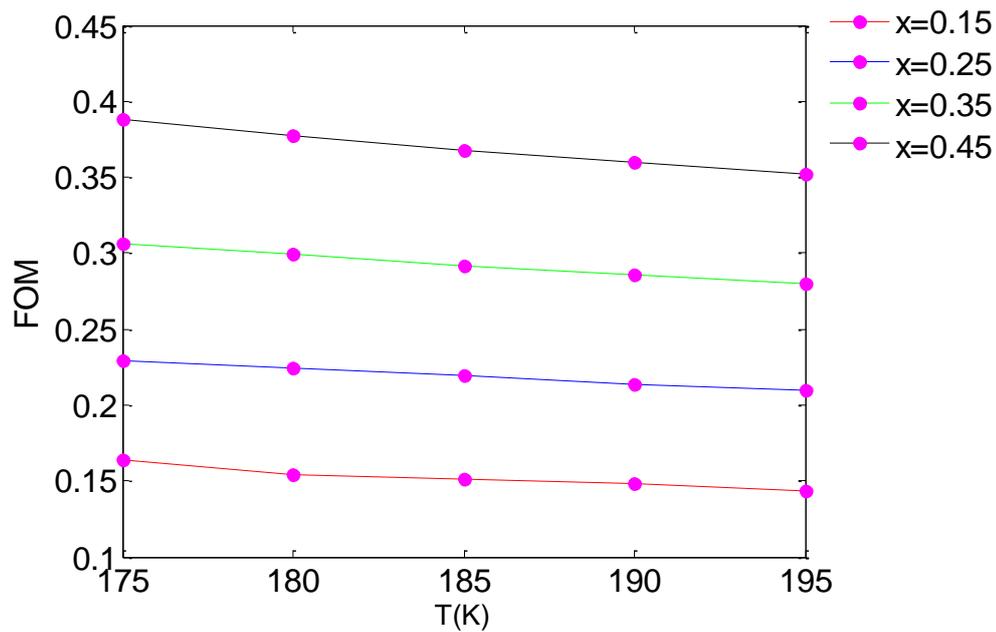
**Figure III.22 :** Variation travail par unité e gaz comprimer en foction de la température

Pour  $\dot{w}_c/\dot{m}$  (Travail par unité de masse du gaz comprimé) on remarque que les courbes diminuent pour différentes valeurs de la fraction massique ils diminuent progressivement, avec la valeur décroissante avec une relation proportionnelle entre la température et le travail



**Figure III.23 :** Variation de travail par unité de gaz liquéfier en fonction de température

La figure montre la variation de  $\dot{w}_c/\dot{m}$  (Le travail par unité de masse du gaz liquéfié) en fonction de la température en remarque lorsque la température diminue le travail par unité de masse du gaz liquéfié diminue à chaque valeur de x.

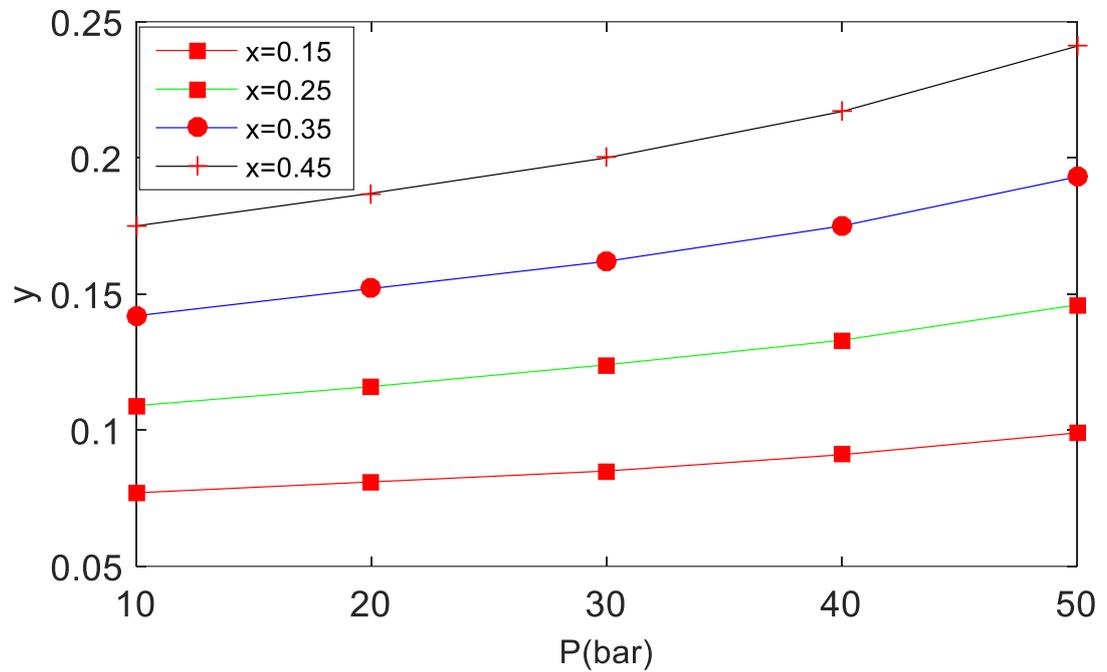


**Figure III.24 :** Variation de facteur de mérite en fonction de la température

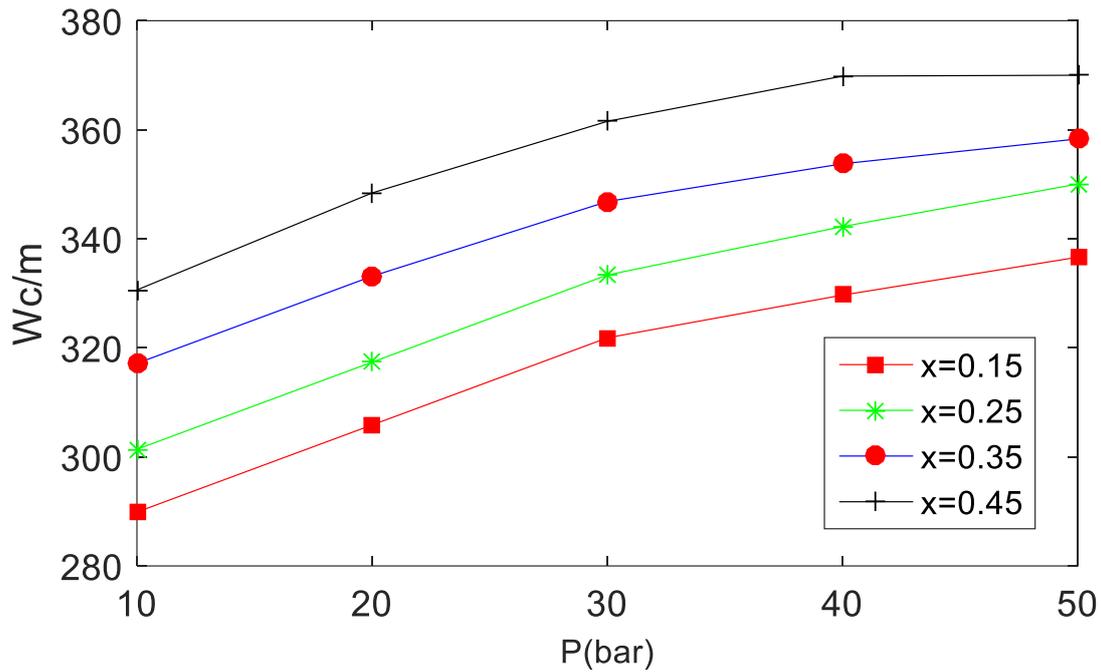
Le graphique montre la variation de FOM (facteur de mérite) en fonction de la température, on remarque que lorsque la température diminue, les courbes augmentent de manière assez inégale et régulière, et aussi une relation proportionnelle entre la fraction massique et FOM

### Discussions de l'azote

D'après les résultats obtenus, on remarque qu'un bon choix de la pression intermédiaire peut bien influencer le taux de liquéfaction et d'en améliorer la performance de notre installation pris en considération. Dans cette installation : Pour l'azote, on a pu avoir un meilleur rendement du cycle de 55% pour une pression de 10 bars correspondante à  $T=200$  K. On constate que ce procédé de Claude à double compression fonctionnant entre les pressions de 1bar, 10 et 60 bars et une température de détente isentropique variable (entrée de la turbine), nous a permis d'examiner les caractéristiques thermodynamiques pour chaque variation de la température  $T_4$ . Les résultats ont montré que le taux de liquéfaction, le travail par unité de gaz comprimé, travail par unité de masse liquéfier et le facteur de mérite FOM coïncident parfaitement avec un meilleur point de fonctionnement correspondant à une température  $T_4=185$  K.

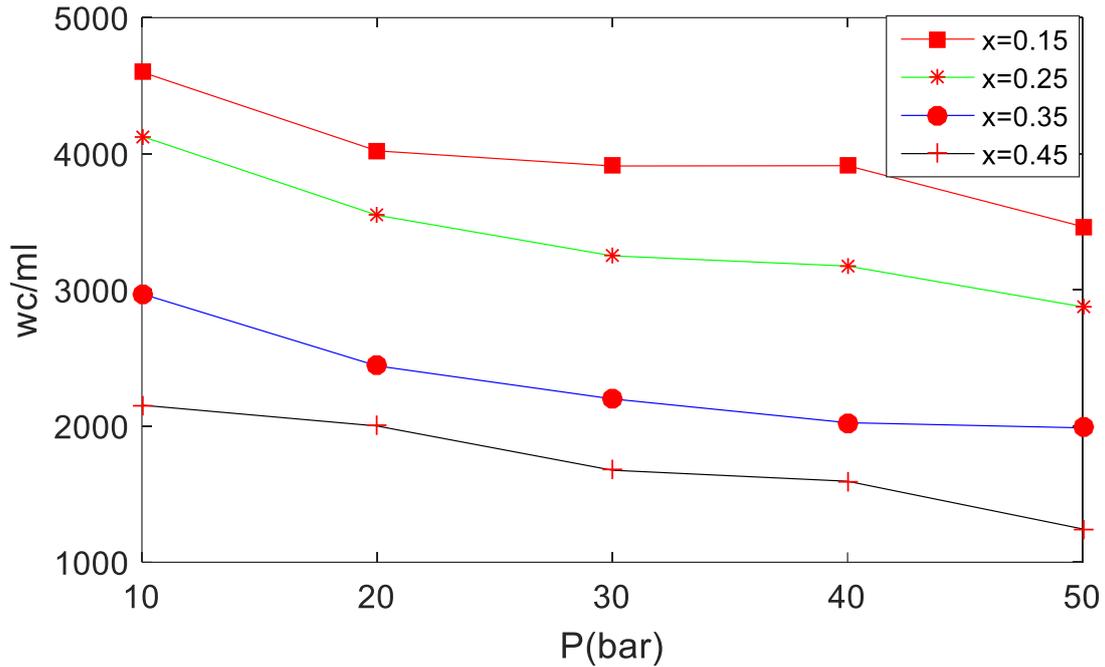
**B. Liquéfaction d'azote**➤ **Variation de la pression  $P_2$** **Figure III.25 :** Variation de taux de liquéfaction en fonction de pression

Le graphique montre la variation de la variable de taux de liquéfaction en fonction de la pression  $P$ , pour différentes valeurs de fraction massique  $x$  (0.15, 0.25, 0.35, 0.45) on remarque que les courbes augmentent parfaitement et régulièrement il existe une relation proportionnelle entre les courbes et la pression  $P$  et aussi la fraction massique.



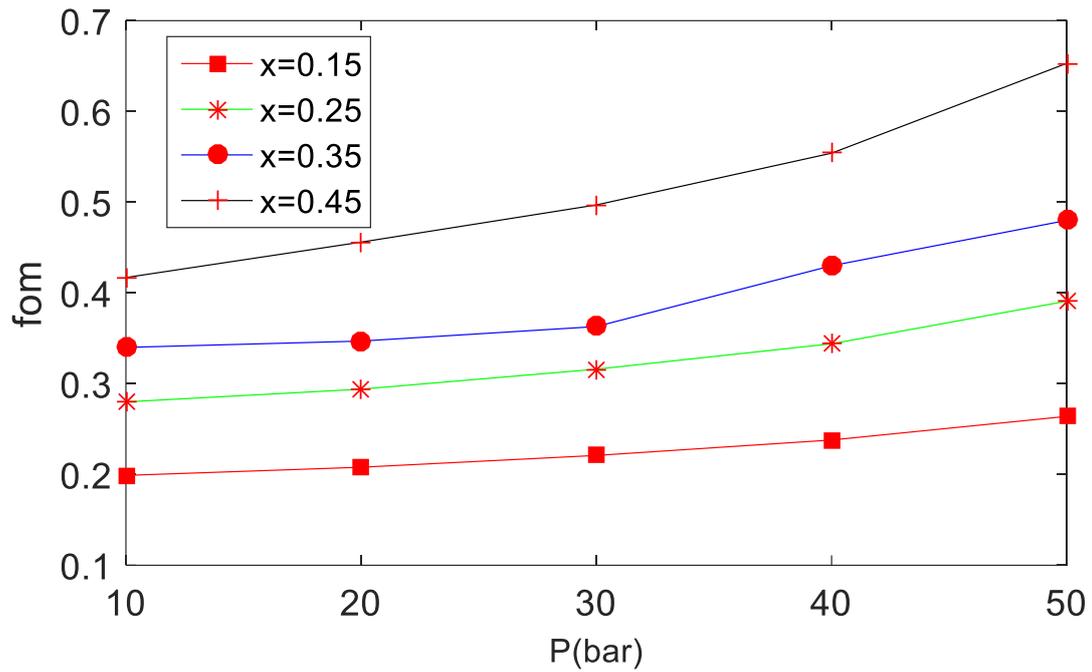
**Figure III.26 :** Variation de travail par unité de masse du gaz comprimé en fonction de pression

Le graphique montre comment  $\dot{W}_c/\dot{m}$  (Travail par unité de masse du gaz comprimé) varie en fonction de la pression  $P$  pour différentes valeurs de  $x$  (0.15,0.25,0.35,0.45) globalement, ce travail augmente avec la pression  $P$ .et l'augmentation de  $x$ .



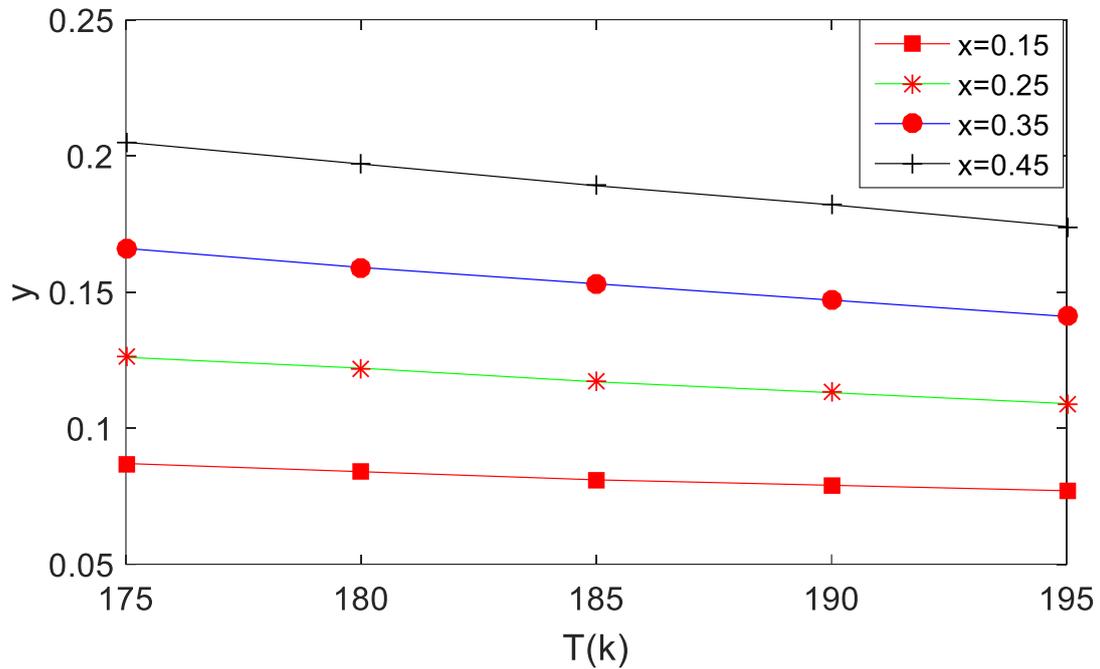
**Figure III.27 :** Variation de travail par unité de masse du gaz liquéfié en fonction de pression

Le graphique montre comment  $w_c/\dot{m}$  (Le travail par unité de masse du gaz liquéfié) varie en fonction de la pression  $P$  pour différentes valeurs de  $x$ . On observe une tendance générale à la diminution de ce travail avec l'augmentation de  $P$  pour toutes les valeurs de  $x$ . Les courbes descendent progressivement, indiquant une relation négative entre le travail précédant, à basse pression le travail est plus élevé et varie davantage selon  $x$ ,



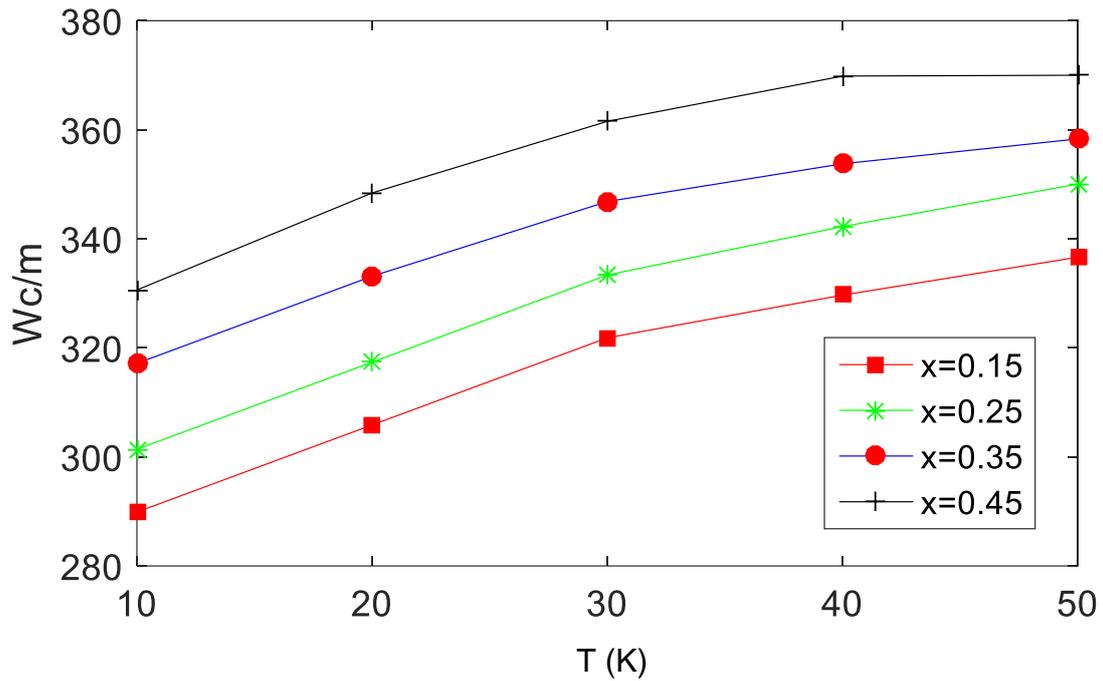
**Figure III.28 :** Variation de facteur de mérite en fonction de pression

Le graphique montre la variation de FOM (facteur de mérite) en fonction de la pression P pour différentes valeurs de x précédant, pour  $x=0.45$ , les courbes augmentent avec une relation proportionnelle entre les trois variables (facteur de mérite, la pression et la fraction massique (x)).

➤ Variation de la température  $T_4$ 

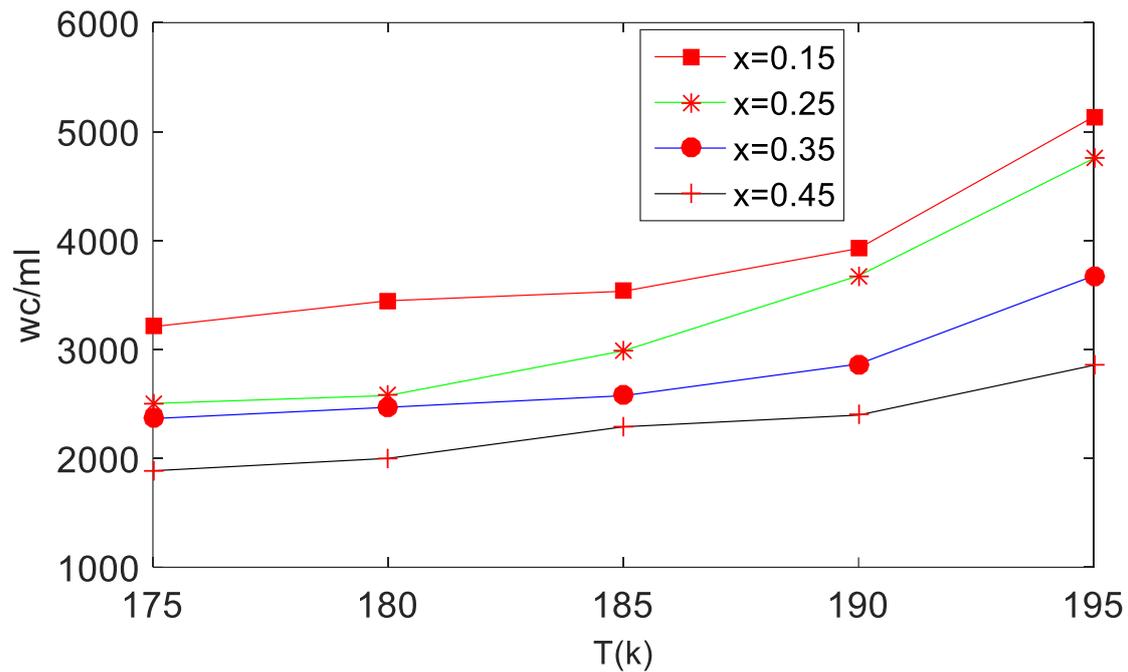
**Figure III.29** : Variation de taux liquéfaction en fonction de T(k)

Les résultats de cette figure montrent des courbes qui augmentent de manière convergente et parfaite avec une relation inverse entre la température et le taux de liquéfaction  $Y$ , et une relation directement proportionnelle croissante entre la fraction massique et le taux  $Y$ .



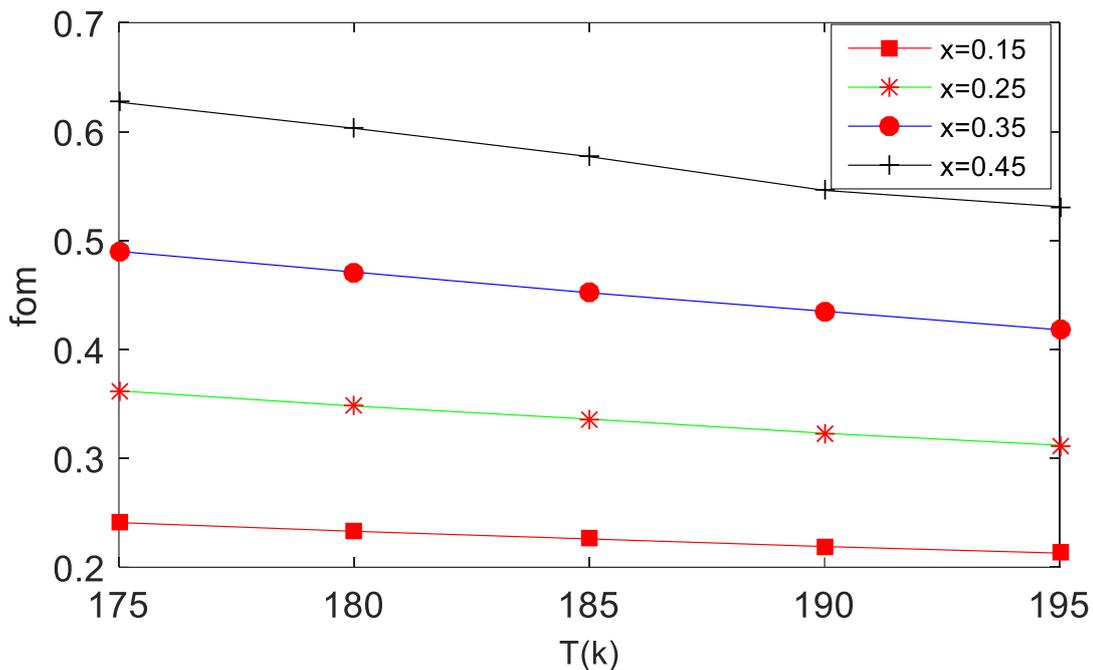
**Figure III.30 :** Variation de travail par unité de masse du gaz comprimé en fonction de T(k)

Pour  $\dot{w}_c/\dot{m}$  (Travail par unité de masse du gaz comprimé) on remarque que les courbes diminuent pour différentes valeurs de la fraction massique ils diminuent progressivement, avec la valeur décroissante de x



**Figure III.31 :** Variation de travail par unité de masse du gaz liquéfié en fonction de T(k)

Le graphique montre la variation de  $\dot{w}_c/\dot{m}$  (Le travail par unité de masse du gaz liquéfié) en fonction de la température, on remarque que lorsque la température diminue, les courbes diminuent de manière assez inégale et régulière, et aussi une relation inverse entre la fraction massique et le travail cité en haut.



**Figure III.32 :** Variation de facteur de mérite en fonction de T(k)

Cette figure montre la variation de facteur de mérite FOM en fonction de la température T pour différentes valeurs de la fraction massique ( $x=0.15, 0.25, 0.35, 0.45$ ) on voit que FOM tend à diminuer légèrement avec l'augmentation de température pour toutes les valeurs de x.

### Discussion de l'azote

D'après les résultats obtenus, on remarque qu'un bon choix de la pression intermédiaire peut bien influencer le taux de liquéfaction et d'en améliorer la performance de notre installation pris en considération. Dans cette installation : Pour l'azote, on a pu avoir un meilleur rendement du cycle de 24% pour une pression de 50 bars correspondante à  $T=180$  K. On constate que ce procédé de Claude à double compression fonctionnant entre les pressions de 1bar, 10 et 60 bars et une température de détente isentropique variable (entrée de la turbine), nous a permis d'examiner les caractéristiques thermodynamiques pour chaque variation de la température  $T_4$ . Les résultats ont montré que le taux de liquéfaction, le travail par unité de gaz comprimé, travail par unité de masse liquéfier et le facteur de mérite FOM coïncident parfaitement avec un meilleur point de fonctionnement correspondant à une température  $T_4=195$  K.

### **III.3. Conclusion**

Les résultats obtenus montrent que les cycles de Claude, utilisés pour la liquéfaction des gaz, présentent une grande efficacité et pertinence industrielle. L'analyse des graphes révèle que des paramètres comme la pression intermédiaire et la température jouent un rôle crucial dans les performances du cycle.

Une compréhension approfondie de ces cycles permet d'identifier des pistes d'amélioration pour optimiser les systèmes thermodynamiques, renforçant ainsi leur efficacité énergétique et leur rendement global.

## *Conclusion Générale*

## *Conclusion Générale*

---

Les cycles de liquéfaction de Claude à double compression représentent une avancée majeure dans le domaine de la cryogénie et des technologies de liquéfaction des gaz, ces cycles optimisent le processus de conversion des gaz en liquides à des températures extrêmement basse, offrant une efficacité énergétique supérieure et des taux de liquéfaction élevés.

En utilisant une série de compression, de refroidissement et de détente isentropiques, le cycle de Claude à double compression parvient à minimiser les pertes thermodynamiques, ce qui se traduit par une consommation d'énergie réduite et des coûts opérationnels moindres. L'une des principales forces de ce cycle réside dans sa capacité à atteindre des taux de liquéfaction de l'ordre de 20-30%, ce qui le rend particulièrement adapté aux applications industrielles nécessitant une production continue et fiable de gaz liquéfiés.

De plus, la stabilité et la fiabilité du cycle permettent une exploitation sûre et efficace avec un besoin réduit en maintenance, ce qui est crucial pour les opérations à grande échelle. Ces avantages font du cycle de Claude à double compression une technologie clé dans divers secteurs industriels, le transport de gaz naturel liquéfié et d'autres applications cryogéniques.

Ainsi, ce cycle positionne comme une méthode de choix pour la liquéfaction des gaz, combinant efficacité, fiabilité et coût-efficacité. Il représente une contribution significative aux progrès technologiques dans le domaine de la cryogénie, répondant aux besoins croissants de l'industrie moderne en matière de stockage et de transport de gaz liquéfiés.

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

Pour le cycle de Claude à double compression, lorsque la pression intermédiaire augmente, le rendement augmente de plus en plus jusqu'à une valeur de celle-ci correspondante à un point optimal, puis il diminue au-delà de cette pression. Et la diminution de la température de détente à l'entrée de la turbine, nous a permis d'optimiser encore cette installation, avec une amélioration du rendement de plus.

## *Conclusion Générale*

---

L'objectif durant cette étude était de mettre un outil permettant d'analyser la performance du cycle de Claude considéré dont le but de produire un maximum du liquide en dépensant moins d'énergie.

Les meilleures conditions de fonctionnement pour la liquéfaction de ces composants de l'air considérés (Oxygène, Azote), sont caractérisées par un point optimal correspondant à la valeur maximale du facteur de mérite, qui détermine d'un point de vue thermodynamique à quel point le cycle réel se rapproche du cycle idéal.

## *Références Bibliographiques*

## *Références Bibliographiques*

---

- [1] K.D.Williamson, F.J.EDESKUTY, Liquid Cryogens. Voll: Theory and Equipment Vol III Properties and Applications CRC Press. Inc (1983)
- [2] R. F. Barron, Cryogenic Systems (second edition)
- [3] P. Lebrun, Cryophysique et Cryo-ingénierie, CERN : Organisation européenne pour la recherche nucléaire, Bulletin de l'IIF (2003).
- [4] Ali Moussa Abderraouf et Djilali Billet, Étude thermodynamique du cycle de Linde pour la liquéfaction de l'azote, mémoire master II, université de Blida (2019).
- [5] A. Djelloul, 'simulation de cycle de Claude pour la liquéfaction de l'air, de l'azote et de l'oxygène', mémoire magister, Alger (2006), Constantine.
- [6] R.R. Conte, Eléments de cryogénie, Masson et Cie (1970).
- [7] M. D'Arsonval. L'air liquide. J. Phys. Theor. Appl, 1898, 7 (1), pp. 497-504. <10.1051/jphysap: 018980070049700>. < Jpa-00240244 >.
- [8] P. Lebrun, Cryophysique et Cryo-ingénierie. CERN, Organisation européenne Pour la Recherche Nucléaire, Bulletin de l'IIF (2003).
- [9] I.U.T. de Saint-Omer Dunkerque Département Génie Thermique et énergie
- [10] Y.Cengel, Thermodynamique une approche pragmatique,(2009)
- [11] BOUKHEDENA Amine, calcul thermique d'une installation cryogénique de liquéfaction de méthane, mémoire master II, université Badji-Mokhtar d'Annaba (2020).

# *Annexes*

**L'état thermodynamique des points 1 et 3 de l'oxygène**

<b>T(k)</b>	<b>P(bar)</b>	<b>h(kj/kg)</b>	<b>S(kj/kg.K)</b>
300	1	546.4289	3.9229
300	60	531.98	2.8195

**Etat thermodynamique de l'oxygène saturé (liquide) :**

<b>T(K)</b>	<b>P(bar)</b>	<b>h(kj /kg)</b>	<b>S(kj/kg.K)</b>
90	1	139,83	4,4292

**L'état thermodynamique des points 1 et 3 de l'Azote**

<b>T(k)</b>	<b>P(bar)</b>	<b>h(kj/kg)</b>	<b>S(kj/kg.K)</b>
300	1	515,28	3,88867
300	60	503,03	2,63462

**Etat thermodynamique de l'Azote saturé (liquide) :**

<b>T(K)</b>	<b>P(bar)</b>	<b>h(kj /kg)</b>	<b>S(kj/kg.K)</b>
90	1	118,68	1,9064

**Cas variation T4 de l'oxygène point 1 et 2 et 3**

<b>T(k)</b>	<b>P(bar)</b>	<b>h(kj /kg)</b>	<b>S(kj/kg.K)</b>
300	1	546.4289	3.9229
300	10	544.21	3.31861
300	60	531.98	2.8195

**Cas variation T4 de l'azote point 1et 2 et 3**

<b>T(k)</b>	<b>P(bar)</b>	<b>h(kj /kg)</b>	<b>S(kj/kg.K)</b>
300	1	515.28	3.88867
300	10	513.30	3.19910
300	60	531.98	2.63462

# *Analyse énergétique d'un liquéfacteur de gaz de type CLAUDE à double compression*

## *Résumé*

La cryogénie représente un domaine essentiel de l'ingénierie, axé sur l'application de réfrigération à très basses températures, telles que la liquéfaction des gaz, le processus de liquéfaction exige une quantité importante d'énergie, et la complexité de ce processus maintient les couts énergétiques élevés.

Ce travail vise à explorer les aspects thermodynamiques et énergétiques des différentes étapes de la liquéfaction, ainsi que l'analyses de l'implémentation des composantes, de Lair comme l'oxygène, l'azote.

En étudiant les divers paramètres appliqués au cycle de Claude à double compression, nous cherchons à améliorer le rendement et l'efficacité énergétique, de réduire la consommation d'énergie tout en maximisant la production de la quantité liquéfiés.

## *Abstract*

Cryogenics represents an essential field of engineering, focused on the application of refrigeration at very low temperatures, such as the liquefaction of gases, the liquefaction process requires a significant amount of energy, and the complexity of this process keeps the energy costs high.

This work aims to explore the thermodynamic and energetic aspects of the different stages of liquefaction, as well as the analysis of the implementation of the components, of Lair such as oxygen, nitrogen.

By studying the various parameters applied to the double compression Claude cycle, we seek to improve the performance and energy efficiency, to reduce energy consumption while maximizing the production of the liquefied quantity.

## *المخلص*

تمثل علم التبريد (الكريوجينيا) مجالاً أساسياً من مجالات الهندسة، يركز على تطبيق التبريد في درجات حرارة منخفضة جداً، مثل تسييل الغازات، ويتطلب عملية التسييل كمية كبيرة من الطاقة، وتعقيد هذه العملية يحافظ على تكاليف الطاقة مرتفعة.

يهدف هذا العمل إلى استكشاف الجوانب الديناميكية الحرارية والطاقة لمراحل التسييل المختلفة. بالإضافة إلى تحليل تنفيذ مكونات الهواء مثل الأكسجين والنيتروجين، ومن خلال دراسة العوامل المختلفة المطبقة على دورة كلود ذات الضغط المزدوج، نسعى إلى تحسين الكفاءة وزيادة فعالية استهلاك الطاقة، وتقليل استهلاك الطاقة مع زيادة إنتاج كمية المواد المسالة إلى أقصى حد ممكن.