



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE MECANIQUE

**Projet de fin d'étude**  
**Pour l'obtention du diplôme de master II en Energétique**

**Thème**

**Effet de la pression sur les performances du système  
de liquéfaction de Claude**

Proposé et encadré par :

M. Younes Benkheda

Réalisé par :

Abbedou Abdelaziz

Année universitaire

2020 / 2021

# REMERCIEMENT

*« Nous rendons grâce à DIEU, qui nous a donné le courage, la patience et la volonté pour réaliser ce travail »*

***JE TIENS À EXPRIMER TOUTE MA RECONNAISSANCE À MON DIRECTEUR DE MÉMOIRE, MONSIEUR BENKHEDA YOUNES. JE LE REMERCIE DE M'AVOIR ENCADRÉ, ORIENTÉ, AIDÉE ET CONSEILLÉ.***

***J'ADRESSE MES SINCÈRES REMERCIEMENTS À TOUS LES PROFESSEURES, INTERVÉNANTS ET TOUTES LES PERSONNES QUI PAR LEURS PAROLES, LEURS ÉCRITS, LEURS CONSEILS ET LEURS CRITIQUES ONT GUIDÉ MES RÉFLEXIONS ET ONT ACCEPTÉ DE ME RENCONTRER ET DE RÉPONDRE À MES QUESTIONS DURANT MES RECHERCHES***

***JE REMERCIE MES TRÈS CHERS PARENTS, QUI ONT TOUJOURS ÉTÉ LÀ POUR MOI, JE REMERCIE MES FRÈRES ET MA SŒUR, IMENE ET MES AMIS POUR LEURS ENCOURAGEMENTS.***

***À TOUS CES INTERVÉNANTS, JE PRÉSENTE MES REMERCIEMENTS, MON RESPECT ET MA GRATITUDE.***

# Dédicace

*JE DÉDIE LE FRUIT DE MES ANNÉES D'ÉTUDES À MES TRÈS CHERS PARENTS OMAR ET FATIHA ET MA BELLE-MÈRE MININA QUI M'ONT TOUT DONNÉ, DE LEURS AMOURS ET LEURS SACRIFICES ÉTERNELS POUR QUE JE PUISSE SUIVRE MES ÉTUDES DANS DES BONNES CONDITIONS ET QUI NE CESSENT PAS DE M'ENCOURAGER ET DE VEILLER POUR MON BIEN, SANS LEURS SOUTIENS CE TRAVAIL N'AURAIT JAMAIS VU LES JOURS.*

*ET AUSSI À MES FRÈRES ET SŒUR SAMIR, REDOUANE, BOUALEM, MOHAMED ET AMINA.*

*À TOUS MES AMIS ET COLLÈGUES IMENE, AMINE, MOHAMED, MIKO, MALEK, BABO, YASSINE, ZAKI, ABDELKADER, MISSOUM.*

**Résumé :**

Dans ce mémoire on a fait une étude thermodynamique très détaillée en se basant sur les paramètres influents du système de liquéfaction cryogénique de Claude, tels que la fraction Y du gaz liquéfié, Le travail nécessaire par unité de masse du gaz comprimée ( $W/m$ ), Le travail nécessaire par l'unité de masse du gaz liquéfiée ( $W/mf$ ) et le FOM. Les paramètres influent sont ( $X=me/m$ ) et P2.

**Mots clé :** thermodynamique, cryogénie, liquéfaction, cycle de Claude.

**Abstract :**

In this thesis a very detailed thermodynamic study was made based on the influencing parameters of the cryogenic liquefaction system of Claude, such as the Y fraction of the liquefied gas, The work required per unit mass of the compressed gas ( $W / m$ ), The work required by the unit of mass of the liquefied gas ( $W / mf$ ) and the FOM. The influencing parameters are ( $X = me / m$ ) and P2.

**Keywords :** thermodynamics, cryogenics, liquefaction, Claude cycle.

**الملخص:**

في هذه الأطروحة، تم إجراء دراسة ديناميكية حرارية مفصلة للغاية بناءً على المعلمات المؤثرة في نظام الإسالة المبردة لكلود، مثل جزء Y من الغاز المسال، والعمل المطلوب لكل وحدة كتلة من الغاز المضغوط ( $W / m$ ) ، الشغل المطلوب بواسطة وحدة كتلة الغاز المسال ( $w / mf$ ) . FOM . العوامل المؤثرة هي ( $X = me / m$ ) و P2.

**الكلمات المفتاحية:** الديناميكا الحرارية، التبريد، التسييل، دورة كلود.

# Table de matières

## Introduction générale

### Chapitre I : Généralités

I.1. Linde Gaz Algérie .....	4
I.1.1. Activités de l'entreprise .....	4
I.1.2. Implantation .....	4
I.1.3. Présentation du site de Réghaia.....	5
I.2. caractéristique de l'air .....	5
I.2.1. Composition .....	5
I.2.2. L'azote.....	5
b) L'azote liquide.....	6
c) Propriétés physico-chimique de l'azote.....	6
I.2.3. L'oxygène .....	6
a) Principales utilisations d'oxygène.....	7
b) L'oxygène liquide.....	7
c) Propriétés physico-chimiques de l'oxygène .....	7
I.2.4. L'argon.....	8
a) l'argon liquide .....	8
b) Propriétés Physico-Chimique de l'argon.....	8
I.2.5. Séparation des composants de l'air .....	9
I.2.6. Etats physiques des matières .....	9
I.2.7. Points d'ébullition des composants de l'air .....	10
I.3. Procédés de séparation .....	10
I.3.1. Aspiration, filtration et compression de l'air atmosphérique .....	11
I.3.2. Pré-refroidissement avec de l'eau froide.....	11
I.3.3. Epuration ou purification.....	11
I.3.4. Refroidissement et liquéfaction.....	12
I.3.5. La séparation .....	13
I.4. Récupération d'argon brut et pur.....	14
I.5. Les équipements de l'installation.....	14
I.5.1. Séparateur d'eau /D2431.....	14
I.5.2. Filtres.....	15
a) Filtres d'aspiration du compresseur d'air/S1146.....	15
b) Filtres d'air instrument /S8346 A/B .....	15

I.5.3. Echangeurs de chaleur.....	16
a) Échangeur de chaleur principal à ailettes-plaques/ E3116 .....	16
b) Sous-refroidisseurE3316 .....	16
I.5.4. Condenseurs/rebouilleurs : E3216, E4116,E4117, E4118 .....	17
I.5.5. Evaporateurs.....	18
I.5.6. Absorbeur tamis moléculaireA2626A/B .....	18
I.5.7. Colonne de rectification .....	18
I.5.8. Turbine d'entraînement du compresseurC3461-X3471 .....	19
I.5.9. Autres équipements .....	20

## Chapitre II : Les cycles de liquéfaction

II.1. L'effet de Joule Thomson .....	25
II.2. Liquéfaction basée sur l'effet Joule Thomson .....	28
II.2.1 La détente adiabatique .....	29
II.3. Les paramètres performants d'un liquéfacteur.....	29
II.4. Le Travail minimum de liquéfaction .....	30
II.5. Système de liquéfaction de Linde Hampson.....	31
a) Diagramme énergétique.....	31
b) Diagramme T-S .....	31
II.6. Système de liquéfaction de Linde Hampson amélioré.....	32
a) Diagramme énergétique et T-S .....	32
II.7. Système de liquéfaction de Collin's.....	35
II.8. Liquéfaction en cascade.....	36

## Chapitre III : Cycle de Claude

III.1. Principe de cycle de Claude.....	39
a) La fraction $y$ du gaz liquéfié.....	41
b) Le travail nécessaire par unité de masse du gaz comprimée (W/m) .....	42
c) Le travail nécessaire par l'unité de masse du gaz liquéfiée (W /mf).....	42
a) Le rendement thermodynamique FOM .....	42

# Chapitre IV : Etude paramétrique du cycle de liquéfaction de Claude

IV.1. Problématique.....	44
Travail demandé.....	44
IV.2. Influence de pression sur les paramètres de cycle de Claude.....	45
IV.2.1. Pour $P_2 = 10$ bar.....	45
IV.2.2. Pour $P_2 = 20$ bar.....	47
IV.2.3. Pour $P_2 = 30$ bar.....	49
IV.2.3. Pour $P_2 = 40$ bar.....	51
IV.2.3. Pour $P_2 = 50$ bar.....	53
• Tableaux des résultats récapitulatifs.....	55
• Diagramme de la fraction $y$ en fonction de $X$ par rapport à chaque pression.....	56
• Diagramme de travail nécessaire par l'unité de masse du gaz liquéfiée ( $W / mf$ ) en fonction de $X$ par rapport à chaque pression.....	56
• Diagramme de FOM en fonction de $X$ par rapport à chaque pression.....	57
IV.3. Discussion des résultats.....	58

## Conclusion générale

## Références bibliographiques

## Annexes

# Liste des figures

## Chapitre I : Généralités

Figure I.1. Schéma de changement des phases des matières .....	9
Figure I.2. Schéma de principe d'une séparation cryogénique de l'air .....	11
Figure I.3. Séparateur d'eau/D2431 .....	15
Figure I.4. Echangeur de chaleur à ailettes-plaques .....	16
Figure I.5. Equilibre des mélanges oxygène-azote en ébullition.....	17
Figure I.6. Garniture moléculaire .....	19
Figure I.7. Plateaux à tamis .....	19
Figure I.8. Procédé générale de liquéfaction de l'air .....	21

## Chapitre II : Les cycles de liquéfaction

Figure II.1. Echelle de température thermodynamique .....	24
Figure II.2. Détente de Joule-Thomson .....	25
Figure II.3. Les lignes isenthalpiques et les points d'inversion dans le diagramme (T-P) .....	28
Figure II.4. Diagramme énergétique minimal .....	30
Figure II.5. Diagramme énergétique de Linde Hampson .....	31
Figure II.6. Diagramme T-S de Linde Hampson.....	31
Figure II.7. Diagramme énergétique de Linde-Hampson amélioré.....	33
Figure II.8. Diagramme T-S de Linde-Hampson amélioré.....	33
Figure II.9. Diagramme énergétique du liquéfacteur de Collin's .....	35
Figure II.10. Diagramme énergétique de liquéfaction en cascade.....	37

## Chapitre III : Cycle de Claude

Figure III.1. Schéma de principe de cycle de Claude .....	40
Figure III.2. Diagramme T-S de cycle de Claude.....	41

## Chapitre IV : Etude paramétrique du cycle de liquéfaction de Claude

Figure IV.1. Le cycle de liquéfaction dans le diagramme T-S pour $P_2 = 10$ bar .....	45
Figure IV.2. Diagramme de FOM en fonction de X pour $P_2 = 10$ bar .....	46
Figure IV.3. Le cycle de liquéfaction dans le diagramme T-S pour $P_2 = 20$ bar. ....	47

Figure IV.4. Diagramme de FOM en fonction de X pour $P_2 = 20$ bar.....	48
Figure.IV.5. Le cycle de liquéfaction dans le diagramme T-S pour $P_2 = 30$ bar .....	49
Figure IV.6. Diagramme de FOM en fonction de X pour $P_2 = 30$ bar.....	50
Figure IV.7. Le cycle de liquéfaction dans le diagramme T-S pour $P_2 = 40$ bar .....	51
Figure IV.8. Diagramme de FOM en fonction de X pour $P_2 = 40$ bar.....	52
Figure IV.9. Le cycle de liquéfaction dans le diagramme T-S pour $P_2 = 50$ bar .....	53
Figure IV.10. Diagramme de FOM en fonction de X pour $P_2 = 50$ bar.....	54
Figure IV.11. Diagramme de la fraction y en fonction de X par rapport à chaque pression .....	56
Figure IV.12. Diagramme de travail liquéfiée (W/mf) en fonction de X par rapport à chaque pression.....	56
Figure IV.13. Diagramme de FOM en fonction de X par rapport à chaque pression.....	57

# Liste des tableaux

## Chapitre I : Généralités

Tableau I.1. Les propriétés physico-chimiques de l'azote.....	6
Tableau I.2. Les propriétés physico-chimiques de l'oxygène .....	8
Tableau I.3. Les propriétés physico-chimiques de l'argon.....	9
Tableau I.4. Point d'ébullition des principaux gaz de l'air.....	10
Tableau I.5. Condenseurs/rebouilleurs .....	17
Tableau I.6. Evaporateur .....	18
Tableau I.7. Les dimensions réelles de la double colonne.....	19

## Chapitre IV : Etude paramétrique du cycle de liquéfaction de Claude

Tableau IV.1. Les paramètres (H-S) des points de cycle de Claude pour $P_2 = 10$ bar.....	45
Tableau IV.2. Les résultats pour $P_2 = 10$ bar en fonction de X.....	46
Tableau IV.3. Les paramètres (H-S) des points de cycle de Claude pour $P_2 = 20$ bar.....	47
Tableau IV.4. Les résultats pour $P_2 = 20$ bar en fonction de X.....	48
Tableau IV.5. Les paramètres (H-S) des points de cycle de Claude pour $P_2 = 30$ bar.....	49
Tableau IV.6. Les résultats pour $P_2 = 30$ bar en fonction de X.....	50
Tableau IV.7. Les paramètres (H-S) des points de cycle de Claude pour $P_2 = 40$ bar.....	51
Tableau IV.8. Les résultats pour $P_2 = 40$ bar en fonction de X.....	52
Tableau IV.9. Les paramètres (H-S) des points de cycle de Claude pour $P_2 = 50$ bar.....	53
Tableau IV.10. Les résultats pour $P_2 = 50$ bar en fonction de X.....	54
Tableau IV.11. Les tableaux récapitulatifs des résultats par rapport aux pressions. ....	55

# Liste des symboles

<b>Symbole</b>	<b>Désignation de la</b>	<b>grandeur Unité</b>
BP	Basse pression	-
D	Débit molaire e distillat	K mole/h
DCS	Un système de contrôle distribué	-
D	Diamètre	m
F	Débit molaire d'alimentation	K mole/h
H	Hauteur	m
HEPT	Hauteur équivalent d'un plateau théorique	m
	Débit de soutirage	K mole/h
	Débit de reflux	K mole/h
NPT	Nombre de plateau théorique	-
NPR	Nombre de plateau réel	-
P	Pression totale	kpas
Pi	Pression partiel	kpas
	Pression en haut de la colonne	kpas
	Pression en bas de la colonne	kpas
T	Température	K
	Température en haut de colonne	K
	Température en bas de colonne	K
Y	Taux de liquidité	
W/m	Le travail nécessaire par unité de masse du gaz comprimée	Kj/kg
W/mf	Le travail nécessaire par l'unité de masse du gaz liquéfiée	Kj/Kg
FOM	Le rendement thermodynamique (Figure Of Merit)	
Wi/m	le travail théorique minimum	Kj/Kg

<b>Symbole</b>	<b>L'équipement</b>
<b>A2626A/B</b>	Tamis moléculaire
<b>C1161</b>	Compresseur centrifuge
<b>C1461</b>	Compresseur de recyclage
<b>C3461</b>	Compresseur / supprimeur a turbine
<b>D2431</b>	Séparateur d'eau
<b>D7131</b> <b>D7332.1/2</b> <b>D7331.D7531</b>	Les réservoirs de stockage des liquide bouillants
<b>E2618</b>	Réchauffeur électrique
<b>E2621</b>	Accumulateur de chaleur
<b>E3116</b>	L'échangeur de chaleur principale a plaque
<b>E3216.E4116</b> <b>E4117.E4118</b>	Condenseur
<b>E3316</b>	Sur-refroidisseur
<b>E1121.E3421</b>	Refroidisseur de sortie
<b>E1421</b>	
<b>E2418.E3427</b>	Refroidisseur d'air de procédés
<b>E8421 A/B</b>	Aéro réfrigérants
<b>J 3958</b>	Ventilateur éjecteur
<b>K2476</b>	L'unité de réfrigération (groupe frigorifique)
<b>LOX D7110</b> <b>N3954.N1153</b> <b>N2653.N1153</b>	Le réservoirs de stockage de oxygène liquide silencieux
<b>P4566</b>	pompe
<b>P3366</b>	Pompe cryogénique
<b>S1146</b>	Filtre d'aspiration du compresseur d'air
<b>T3211</b>	La colonne à garnissage tamis-plateau (haute pression)
<b>T3212</b>	La colonne à garnissage structuré (basse pression)
<b>T4110</b>	La colonne d'argon brut
<b>T4111</b>	La colonne d'argon brut
<b>T4112</b>	La colonne d'argon pur
<b>X3471</b>	Turbine d'entraînement du surpresseur

# INTRODUCTION GENERALE

## **Introduction :**

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

Les études des basses températures sont réalisées dans le but de comprendre les phénomènes physiques qui se manifestent au sein de la matière, conduisant au développement de nombreux procédés comme : la conservation des aliments à l'aide de l'Azote liquide, la supraconductivité, la superfluidité, le Cryo broyage, givrage ou condensation cryogénique et récupération de plus de 90% des gaz destructeurs de la couche d'Ozones. [13]

Le groupe allemand Linde est l'un des plus importants fournisseurs mondiaux de gaz industriels, de procédés et de gaz spéciaux, Les produits et services de Linde peuvent être trouvés dans presque toutes les industries, dans plus de 100 pays y compris l'Algérie. Linde Gas Algérie est la filiale algérienne du groupe Linde.

Dans cette étude on a fait quatre chapitres, le premier chapitre on parle du système du fonctionnement de Linde Gas Algérie, le deuxième chapitre est une étude bibliographique des cycles de liquéfactions et leur équations de fonctionnement , le troisième chapitre est une étude thermodynamique et énergétique sur le cycle de liquéfaction de Claude , pour le quatrième chapitre on a fait une étude paramétrique sur le système de liquéfaction de Claude avec l'Azote comme un gaz de travail et l'influence de différents paramètres sur le système.

CHAPITRE I  
Généralité

## **Introduction :**

Dans ce chapitre nous allons présenter le site de Linde gaz de Reghaia, nous allons ensuite donner des généralités sur les gaz de l'air et leurs compositions et caractéristiques.

Nous allons expliquer le procédé de liquéfaction des gaz de l'air ainsi que les équipements utilisés dans ce procédé.

### **I.1. Linde Gas Algerie :**

Linde gas Algérie est une société par action au capital de 1 500 000 000 DA issue de la privatisation de l'entreprise nationale de production et de distribution des gaz industriels "GI" qui était une division de l'ex "SNS" sous la tutelle du ministère de l'industrie et de l'énergie avant de devenir sous la tutelle de la société de gestion des participations de l'état (SGP) chimie et pharmacie. A la faveur du programme de privatisation initié par l'état, 66% des actions du capital de GI sont détenues depuis juillet 2007 par le groupe Linde, et 34% détenues par la SGP chimie/pharmacie avec le transfert du management de GI au groupe Linde. [1]

#### **I.1.1. Activité de l'entreprise :**

Linde Gas Algérie a pour mission essentielle de satisfaire aux impératifs économiques du pays en assurant la prise en charge des besoins générés par la multiplicité et l'hétérogénéité des applications des gaz industriels dans différents secteurs de l'économie. Sa mission essentielle est la production, la distribution et la commercialisation des gaz industriels et médicaux.

La distribution de ces gaz à l'état liquide est assurée par une flotte de citernes cryogénique, la distribution se fait par transvasement de conditionnement qui fait appel à des bouteilles. [1]

#### **I.1.2. Implantation :**

Linde Gas Algérie est présente sur l'ensemble du territoire national par un réseau comprenant 9 sites de production : Réghaia, Annaba, Constantine, Ouargla, Oran, Bouira, Sidi Bel Abbés, Arzew et Skikda.

Linde Gas Algérie assure également la commercialisation de matériel et accessoires liés à l'utilisation des gaz industriels et médicaux ainsi que la mise en œuvre des nouvelles applications de ces gaz.

### **I.1.3. Présentation du site de Reghaia :**

Le site de Réghaia est l'un des 9 sites de Linde Gas Algérie. Plusieurs ateliers de production et de conditionnement des liquides et gaz industriels et médicaux y sont implantés. Son exploitation commença en 1976 par la production des gaz de l'air (oxygène, liquide, azote liquide et argon liquide). Le site a connu une extension en implantant des ateliers de production et de conditionnement des liquides et gaz industriels et médicaux.

### **I.2. Caractéristique de l'air :**

#### **I.2.1. Composition :**

L'air atmosphérique est un mélange de plusieurs gaz :

- a) **Les constituants permanents** : qui sont toujours présents dans l'air, et ce en proportion fixes : 78.08 % d'azote, 20.95% d'oxygène, et 0.93% d'argon.
- b) **Les constituants variables** : présents en proportions variant avec le temps et le lieu : Dioxyde de carbone, d'autre gaz inertes néon, hélium, krypton, et xénon. [2]

#### **I.2.2. L'Azote :**

L'azote est un gaz incolore, inodore et sans saveur qui constitue un peu plus des trois quarts du volume de l'atmosphère (78% en volume et 75,5% en masse). Sa formule chimique est N<sub>2</sub>, Les molécules de diazote sont composées de deux atomes d'azote reliés entre eux par une triple liaison qui les rend très stables, et peu aptes à réagir.

##### **a) Principales utilisations d'azote :**

- Métallurgie : traitement thermique (emmanchement).
- Chimie et pétrochimie : stimulation des puits producteurs d'hydrocarbures, protection de catalyseurs.
- Industrie alimentaire et pharmaceutique : conservation des fruits et de légumes, conditionnement des produits pharmaceutiques et alimentaire.
- Médecine : conservation des produits biologiques, congélation, surgélation maintien en froid du sang et des tissus vivants.

- L'azote liquide remplace les réfrigérants traditionnels, tels que les fluoro-carbones et l'ammoniaque, qui peuvent causer des soucis environnementaux ou de santé. Lors de son utilisation dans certaine installation de fabrication. [3]

**b) L'azote liquide :**

L'azote liquide est le gaz diazote refroidi en dessous de son point d'ébullition à 77, 36 K (-195, 79 °C). Il a l'apparence d'un liquide limpide, d'où s'échappent des « vapeurs » blanches. C'est un liquide cryogénique particulièrement courant, tant dans le domaine de la recherche scientifique que dans l'industrie.

**c) Propriétés physico-chimique de l'azote :**

Sous les conditions ordinaires (15°C, 760 mm Hg), l'azote se présente sous forme d'un gaz, il est inodore et incolore.

Tableau I.1. Les propriétés physico-chimiques de l'azote. [4]

Formule chimique	N <sub>2</sub>	Température triple	-210.1 °C
Masse molaire	28,0134 g/mole	Pression triple	0,1253 bar
Dimension moléculaire	3-4,1 Å	Point fusion	-210.0 °C
Masse volumique	314,03 kg/m <sup>3</sup>	Température critique	-146.94 °C
Masse volumique du gaz à 0 °C	1,25053 kg/m <sup>3</sup>	Pression critique	33,999 Bar
Masse volumique liquide à -195,803°C	808,607 kg/m <sup>3</sup>	Taux d'évaporation	45 Wh /L
Point d'ébullition	-196 °C	Permittivité du liquide	1.44

**I.2.3. L'Oxygène :**

L'oxygène est une molécule de formule chimique O<sub>2</sub>, constituée de deux atomes d'oxygène reliés par liaison covalente, appelé par les chimistes dioxygène c'est un gaz qui constitue 20,8 % du volume de l'atmosphère terrestre. [3]

**a) Principales utilisations d'oxygène :**

- Sidérurgie : il est utilisé dans les convertisseurs à oxygène pur pour l'affinage de la fonte et de l'acier.
- Métallurgie : il est employé pour le raffinage de cuivre. il est également utilisé pour le dosage du carbone des métaux.
- Médecine : traitement des insuffisances respiratoires.
- Dans l'industrie de papier : utilisé pour le blanchissement des pâtes à papier.
- Les usines de traitement des eaux usées emploient l'oxygène pour rendre le processus de traitement plus efficace et aussi d'augmenter la capacité des bassins pendant les expansions.
- Dans le domaine biologique : mélange à d'autres gaz, il sert à la réalisation d'une atmosphère respirable. [3]

#### **b) L'oxygène liquide :**

C'est le dioxygène refroidi au-dessous de son point de condensation, soit 90,188 K (-182,96 °C), On l'obtient par distillation fractionnée à partir de l'air. Il rend les matériaux très cassants à son contact en raison même de sa température très basse. C'est un agent oxydant très puissant, inodore de couleur bleu pâle, non toxique, et très réactif

#### **c) Propriétés physico-chimiques de l'oxygène :**

Sous les conditions normales, l'oxygène est un gaz inodore, incolore et insipide ; il se condense dans un liquide bleu-clair, l'oxygène est le plus paramagnétique de tous les gaz.

Le tableau ci-dessous regroupe les principales propriétés physico-chimiques de l'oxygène.

Tableau I.2. Les propriétés physico-chimiques de l'oxygène [10]

Formule chimique	O <sub>2</sub>	Température triple	-218.79 °C
Masse molaire	31,9988g/mole	Pression triple	0,00152 bar
Dimension moléculaire	2,8-4,2Å	Point fusion	-218.8 °C
Masse volumique	436,1 kg/m <sup>3</sup>	Température critique	-118.56 °C
Masse volumique du gaz à 0 °C	1.428 Kg/m <sup>3</sup>	Pression critique	50.43 Bar
Masse volumique liquide a - 182.97°C	1141.0 Kg/m <sup>3</sup>	Taux d'évaporation	68 Wh /L
Point d'ébullition	-183 °C	Permittivité du liquide	1.48

#### I.2.4. L'Argon :

L'argon est un des gaz de l'air atmosphérique, il représente 0,934 % du volume total de l'atmosphère terrestre. Il appartient au groupe des gaz rares avec l'hélium, le néon, le krypton et le xénon, de formule Ar, c'est un gaz neutre et incolore comme le Di- azote N<sub>2</sub>, à l'état naturel il n'est présent que dans l'air. [4]

##### a) L'argon liquide :

Argon liquide est produit en grandes quantités dans les usines de séparation d'air qui se liquéfient et distillent l'air en oxygène, en l'azote et en l'argon. [5]

##### b) Propriétés Physico-Chimique de l'argon :

Tableau I.3. Les propriétés physico-chimiques de l'argon [5]

Formule chimique	Ar	Température triple	-189.15°C
Masse molaire	39,944(g/mole)	Pression triple	0.687 bar
Dimension moléculaire	1,06 ± 0,10 Å	Point fusion	-189.4 °C
Masse volumique	1,38 Kg/m <sup>3</sup>	Température critique	122,7°C
Masse volumique du gaz à 0 °C	11.8 kg /m <sup>3</sup>	Pression critique	48.63 Bar
Masse volumique liquide à -182.97°C	1400kg /m <sup>3</sup>	Taux d'évaporation	61(Wh/l)
Point d'ébullition	-186 °C	Permittivité du liquide	1.54

### I.2.5. Séparation des composants de l'air :

L'air est un mélange de différents gaz comme L'oxygène, l'azote et l'argon ainsi que les gaz rares.

L'oxygène et l'azote sont des produits essentiels presque dans tous les domaines de l'industrie et ils sont principalement produits par la séparation de l'air. Ces gaz sont produits à l'état liquide dans la plupart des installations de séparation et ils sont utilisés dans de nombreux procédés industriels.

### I.2.6. Etats physiques des matières :

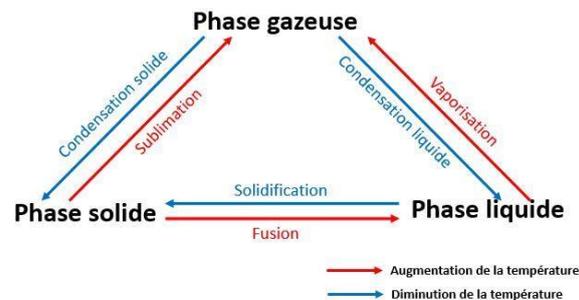


Figure I.1. Schéma de changement des phases des matières [5]

### I.2.7. Points d'ébullition des composants de l'air :

Le point d'ébullition d'un corps c'est les conditions de température et de pression qui doivent être réunies pour qu'il passe rapidement de l'état liquide à l'état gazeux. [8] Et dans ce tableau que les Points d'ébullition des composants de l'air sont représentés :

Tableau I.4.Point d'ébullition des principaux gaz de l'air. [8]

<b>Eau H2O</b>	<b>T d'ébullition (°C)</b>	<b>T d'ébullition (°K)</b>
<b>Propane C4H10</b>	100	373.15 K
<b>Dioxyde de Carbone CO2</b>	-42	231 K
<b>Acétylène</b>	-79	195 K
<b>Oxyde d'azote N2O</b>	-84	190 K
<b>Méthane CH4</b>	-89	185 K
<b>Oxygène O2</b>	-162	112 K
<b>Argon Ar</b>	-186	87 K
<b>Azote N2</b>	-196	77 K

### I.3. Procèdes de séparation :

Conformément à son développement historique, la cryogénie est le plus souvent utilisée pour la solidification, la liquéfaction et la séparation par distillation des gaz et des mélanges gazeux tels que le gaz naturel et l'air. [6]

De fait, l'application de la cryogénie à la production des gaz de l'air (l'Oxygène, l'Azote et l'argon) par liquéfaction et la séparation de l'air selon le cycle de Linde nécessite l'utilisation des équipements décrits ci-dessous figure I.2

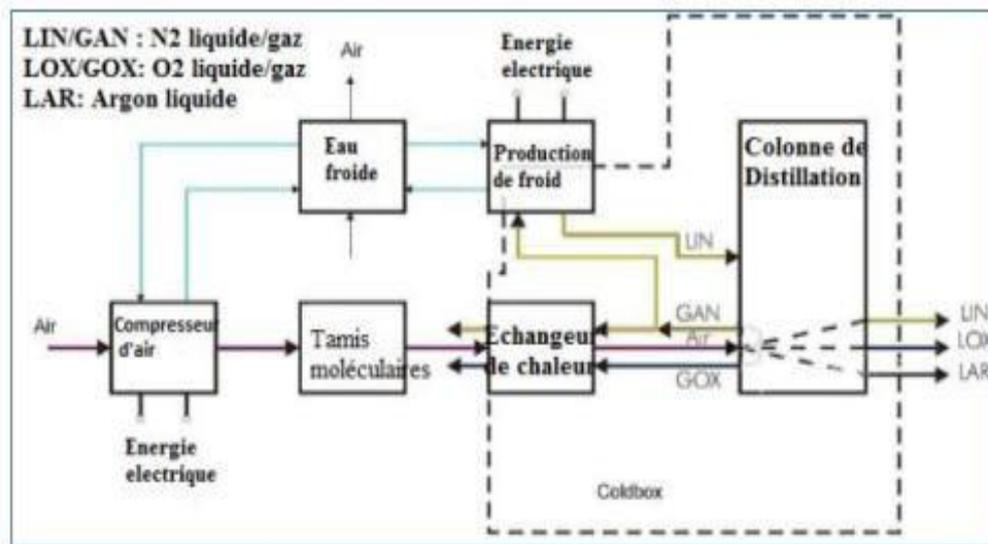


Figure I.2. Schéma de principe d'une séparation cryogénique de l'air. [7]

### I.3.1. Aspiration, filtration et compression de l'air atmosphérique :

La première étape de séparation cryogénique de l'air est la filtration et la compression d'air. Avant la compression, un premier niveau de filtration est réalisé grâce à des filtres d'aspiration du compresseur d'air S1146 retenant les particules de plus de  $2\mu$  tels que les poussières. Lors de son aspiration, l'air comprimé à environ 4.6-5.42 bars et refoule à un débit volumique de 12200 Nm<sup>3</sup>/h.

Dans un compresseur centrifuge C1161, la compression se fait en 3 étages et on trouve 2 réfrigérants inter-étages dont le rôle est de refroidir l'air sortant de chaque étage. [6]

### I.3.2. Pré-refroidissement avec de l'eau froide :

L'air comprimé est pré-refroidi pour atteindre la température approximativement ambiante ( $T= 25^{\circ}\text{C}$ ) par le passage dans les refroidisseurs E1121 et E2418. Le refroidisseur E1121 utilisé pour refroidir l'air par l'eau froide, puis refroidie encore à environ  $20^{\circ}\text{C}$  dans un refroidisseur d'air de procédé E2418 par l'eau refroidie de l'unité K2476. [6]

### I.3.3. Epuration ou purification :

Retirer les gouttelettes d'eau d'un flux de gaz de l'air par une séparation d'eau D2431 en aval de l'unité de réfrigération K2476. L'air ambiant contient d'autres contaminants (humidité, dioxyde de carbone, hydrocarbures et autres...), qui doivent être toujours éliminés pour satisfaire des caractéristiques de qualité du produit. Il est donc indispensable de le purifier, avant que l'air arrive à la partie de distillation, en piégeant le reste de ces contaminants afin

d'éviter la formation de bouchons de neige carbonique et de glace lors de refroidissement. D'autres parts l'oxygène réagit chimiquement (risque d'explosion) à la présence d'hydrocarbures. Pour cette raison une étape supplémentaire a lieu.

L'air est filtré par un adsorbant à tamis moléculaires A2626A/B rempli d'alumine et de zéolithe (épuration par adsorption). Afin d'accélérer cette opération, deux tamis fonctionnent en alternance, pendant que l'un est utilisé, l'autre est régénéré. La pression est de 5,3 bars. La régénération se fait en faisant passer un flux sec d'azote gazeux impur réchauffée par réchauffeur électrique E2618, et un accumulateur de chaleur E2621 dans le tamis dans le sens contraire au flux normal de l'air. Après régénération l'adsorbant est refroidi par un gaz froid (azote impure venant de la boîte froide). [6]

#### **I.3.4. Refroidissement et liquéfaction :**

Après le passage par le tamis, l'air sec dirigé vers un turbo compresseur de recyclage d'air C1461 pour le comprimer de 5 Bar à 33 Bar, avec une température à environ de 31 à 115 °C, puis l'air est refroidi dans un refroidisseur E1421 qui utilise l'eau froide, puis comprimer encore à 49.6 Bar par l'unité de compresseur/supprimeur à turbine C3420.

Le flux de sortie de ce compresseur refroidi par l'eau froide dans l'échangeur E3421, puis l'air refroidie dans le refroidisseur E3427 par l'eau de l'unité de réfrigération K2476. Un débit d'air de 24500Nm<sup>3</sup>/h pénètre dans la boîte froide où il est refroidi par les flux du produit froid dans le principal échangeur à plaque E3116.

Une quantité d'air quitte cet échangeur à T= -70 °C passe dans la turbine de détente avec un débit de 18450 Nm<sup>3</sup>/h et génère la réfrigération requise pour le processus cryogénique. En aval de la turbine de détente ce flux est divisé en deux, une partie dirigée vers la colonne T3211 avec un débit de 5780Nm<sup>3</sup>/h, température de -157°C et de pression de 4.4 bars et 12670 Nm<sup>3</sup>/h recyclé vers le compresseur de recyclage C1461. Une partie d'air comprimé est ensuite encore refroidie jusqu'à sa température de liquéfaction -159 °C et directement dirigé vers la colonne de moyenne pression T3211.

Une partie d'air comprimé de débit 6022 Nm<sup>3</sup>/h est ensuite encore refroidie jusqu'à sa température de liquéfaction -159 °C et envoyer vers une vanne de Joule Thomson qui est ouvert à 80% pour régler le débit à une pression de 5.5 bars et température de 176 °C. Puis ce flux injecté au niveau de 6-ème plateau de la colonne MP T3211 à un état mélange de 80% liquide et 20% vapeur dans le but d'améliorer le transfert de matière et de chaleur. [6]

### **I.3.5. La séparation :**

La boîte froide contient 5 colonnes de distillation ; 2 colonnes pour la production O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> et 3 colonnes pour la production d'argon. La colonne à plateaux T3211 fonctionne à moyenne pression soit environ 5 bars avec 54 plateaux, et les 4 autres sont des colonnes à garnissage fonctionnant à basse pression soit environ 1.25 bars.

L'air est injecté en bas de la colonne T3211 avec un débit 12000 Nm<sup>3</sup>/h et une température de -176 °C. A ce niveau, l'air est pré-séparé en liquide enrichi par l'oxygène à 38% en pied de colonne et en azote pur en tête de colonne. Le reflux requis pour la rectification est généré par la condensation de l'azote gazeux contre l'oxygène bouillant dans le condenseur E3216. Une partie de l'azote liquide sert de reflux pour la colonne de pression, la partie restante est sur-refroidie dans l'échangeur E3316 et alimente la colonne basse pression T3212. Une petite partie de l'azote gazeux sous pression est prélevée en tête de la colonne HP et sert de gaz de purge et d'étanchéité pour l'ASU elle-même. Une partie de l'air liquide est prélevée d'un collecteur à part dans la colonne HP puis sur-refroidie, pour être utilisé dans l'amélioration de la rectification dans la colonne BP. Le liquide enrichi en oxygène du fond de la colonne HP est également sur-refroidi dans l'échangeur E3316 et l'évaporateur d'argon E4118. Détendu dans le condenseur d'argon brut E4116, il servira comme réfrigérant pour le condenseur d'argon brut E4116 et pour le condenseur d'argon pur E4117. Le liquide en excédent du condenseur d'argon brut s'écoule par le trop-plein dans la colonne basse pression en tant qu'alimentation d'oxygène.

Dans la colonne basse pression la séparation finale en oxygène liquide pur a lieu, en tant que produit inférieur et azote gazeux en haut de la colonne. Le produit ; oxygène liquide prélevé au fond de la colonne T3212 est pompé par la pompe cryogénique P3366 et partagé en deux flux. L'un des flux est directement dirigé via le sur refroidisseur E3316 vers le réservoir de stockage de LOX D7110. L'autre flux est dirigé vers le condenseur E3216. Le gaz d'azote pur en haut de la colonne BP est réchauffé dans le sur-refroidisseur E3316 et l'échangeur de chaleur principale E3116, Puis il quitte la boîte froide en tant que produit LP- GAN. Le gaz résiduaire d'azote de la colonne basse pression est réchauffée dans le sur-refroidisseur E3316 et l'échangeur de chaleur principale E3116, et sert à régénérer les adsorbants à tamis moléculaire. Ensuite le gaz résiduaire est évacué dans l'atmosphère. [6]

#### **I.4. Récupération d'argon brut et pur :**

Le gaz d'argon enrichi est dévié de la colonne basse pression et alimenté dans le bas de la colonne d'argon brut T4110 où le gaz est séparé en liquide enrichi en oxygène en bas et en gaz enrichi en argon en haut. Le liquide dans le fond retourne dans la colonne basse pression. Le gaz d'argon brut en haut va vers la colonne T4111 et se liquéfie pour la plupart dans le condenseur E4116 contre l'air liquide enrichi en oxygène provenant de la colonne de pression. Le liquide d'argon brut sert de reflux pour la colonne d'argon brut T4111. Le liquide du fond de T4111 est pompé vers la colonne d'argon brut T4110 par P4566 où il sert également de reflux. Environ 3,4 % du gaz d'argon brut en haut est dévié en tant que gaz et est ensuite dirigé vers la colonne d'argon pur T4112. La concentration d'oxygène de l'argon brut répond déjà aux spécifications pour le produit argon ( $< 1$  v ppm O<sub>2</sub>).

Dans la colonne d'argon pur T4112, l'azote est séparé de l'argon brut. L'argon gazeux contenant de l'azote se liquéfie dans le condenseur E4117 contre l'air liquide enrichi du condenseur d'argon brut. L'azote est évacué dans l'atmosphère, l'argon liquéfié sert de reflux pour la colonne d'argon pur. En bas de T4112, l'argon pur liquide est rebouilli dans l'évaporateur E4118 et sert de gaz ascendant dans la colonne d'argon pur. Le liquide en excédent est dévié en tant qu'argon liquide (LAR) vers le réservoir de produit D7531.[7]

#### **I.5. Les équipements de l'installation :**

##### **I.5.1. Séparateur d'eau / D2431 :**

Les séparateurs d'eau sont des cuves cylindriques ayant une entrée de gaz tangentielle et une sortie de gaz centrale en haut. En fonction des besoins particuliers, les séparateurs d'eau incorporent ou non des accessoires internes. Il y a suffisamment de place en bas de la cuve pour collecter l'eau séparée. En réduisant la vitesse de déplacement du gaz qui contient de l'eau, cette dernière se condense en gouttelettes et se sépare du gaz ou forme un film sur les surfaces intérieures figure I.2. [6]

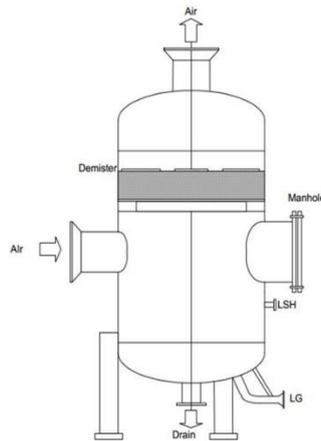


Figure I.3. Séparateur d'eau / D2431.[6]

## I.5.2. Filtres :

### a) Filtres d'aspiration du compresseur d'air / S1146 :

Son rôle est d'enlever les impuretés mécaniques de l'air du côté aspiration du compresseur d'air. L'air entrant dans le premier étage du compresseur passe dans un système de filtration qui retient les impuretés mécaniques et réduit le bruit de l'aspiration. De l'air est pulsé dans l'autre sens aux différents étages du filtre pour évacuer la poussière des alvéoles. Le sable est enlevé de la conduite par le ventilateur d'extraction de sable C1147. [6]

### b) Filtres d'air instrument / S8346 A/B :

Son rôle est d'enlever les impuretés mécaniques de l'air instrument avant d'entrer dans le système d'air instrument, il consiste en un carter métallique dans lequel une cartouche spéciale de filtre ou un élément filtrant est installé. L'air instrument circule de l'intérieur vers l'extérieur de l'élément filtrant où les impuretés mécaniques sont retenues.

L'Alu gel et le tamis moléculaire adsorbent l'humidité, le gaz carbonique et la plus grande partie des hydrocarbures de l'air qui passe à travers l'adsorbent. Etant donné que le tamis a une capacité maximale d'adsorption de ces composants, il doit être régénéré après un certain temps. La régénération se fait en faisant passer un flux chaud et sec d'azote gazeux impur dans le tamis dans le sens contraire au flux normal de l'air. Après régénération, l'adsorbent doit être refroidi par un gaz froid. Parce qu'ils fonctionnent de façon intermittente, les adsorbents à tamis moléculaires vont toujours par paire. [6]

### I.5.3. Echangeurs de chaleur :

#### a) Échangeur de chaleur principal à ailettes-plaques / E3116 :

Il fait l'échange de chaleur entre l'air de processus et les différents flux de produit ou de gaz résiduaire. La plus grande partie de l'air du surpresseur (78 %) est refroidi à environ la température d'entrée de la turbine de détente. La partie résiduelle de l'air du surpresseur est encore refroidie et liquéfiée durant le processus de refroidissement. Les produits froids et les flux de gaz résiduaire ainsi qu'une partie de l'air détendu sont chauffés jusqu'à environ la température ambiante par le flux d'air du surpresseur à contre-courant. [6]

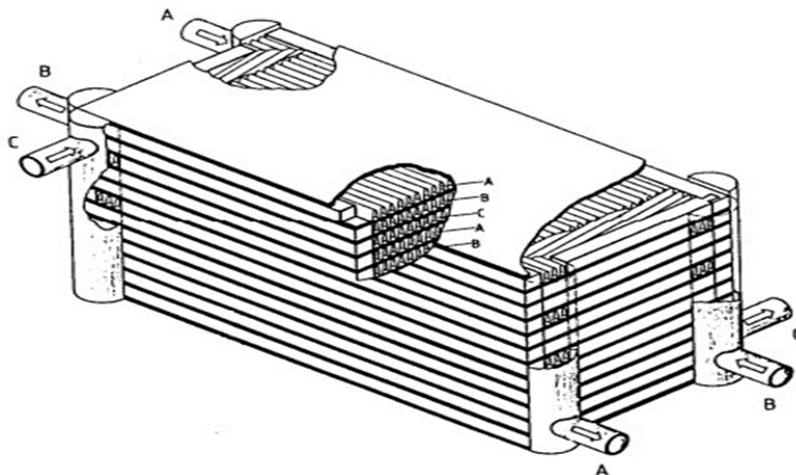


Figure I.4. Echangeur de chaleur à ailettes-plaques. [6]

#### b) Sous-refroidisseur E3316 :

Le sous-refroidissement des liquides ayant un point d'ébullition bas. Les liquides à point d'ébullition bas sont sous-refroidis en échangeant de la chaleur avec un flux de gaz ou de liquide plus froid. L'objectif du sous-refroidissement est de réduire les pertes par évaporation en particulier si le liquide est étranglé (diminution de pression). Le sous-refroidisseur est situé entre la colonne de pression et la colonne basse pression. [6]

### I.5.4. Condenseurs/rebouilleurs : E3216, E4116, E4117, E4118 :

Tableau I.5 : Condenseurs/rebouilleurs. [6]

Symboles	Taches	Conception	
E3216 E4116 E4117 E4118	Liquéfaction d'un gaz en même temps que l'évaporation d'un liquide pour maintenir la rectification dans une colonne.	Condenseur tubulaire	La surface de chauffage consiste en un faisceau de tubes droits raccordés à chaque extrémité à une plaque tubulaire.
		Condenseurs à plaques	La surface de chauffage consiste en un ou plusieurs blocs d'échangeurs à plaques

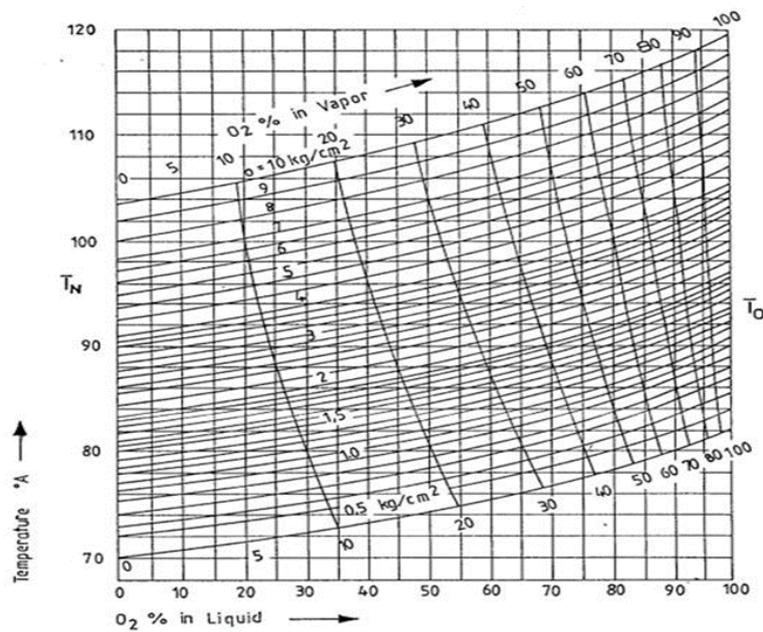


Figure I.5. Equilibre des mélanges oxygène-azote en ébullition. [6]

### I.5.5. Evaporateurs :

Tableau I.6: Evaporateur. [6]

Symbole	Tâche	Conception	Mode de fonctionnement
E7115 E7315 E7318 E7319 A/B E7517	Vaporisation d'un liquide à bas point d'ébullition.	Un certain nombre de tubes sont raccordés bout à bout pour former une bobine. Pour adsorber un maximum de chaleur, ces tubes sont munis d'ailettes.	L'air atmosphérique qui entoure les ailettes des tubes chauffe et vaporise le liquide froid à l'intérieur jusqu'à environ la température ambiante.

### I.5.6. Adsorbours tamis moléculaires A 2626A/B :

Les adsorbours à tamis moléculaires sont des cuves cylindriques empilés d'alugel et de tamis moléculaires entre les grilles d'entrée et de sortie de l'air. L'alugel et tamis moléculaire adsorbent l'humidité, le gaz carbonique et la plus grande partie des hydrocarbures de l'air qui passe à travers l'adsorbours. Etant donné que le tamis à une capacité maximale d'adsorption de ces composants, il doit être régénéré après un certain temps. [7;8]

La régénération se fait en faisant passer un flux chaud et sec d'azote gazeux impur dans le tamis dans le sens contraire au flux normal de l'air. Après régénération, l'adsorbours doit être refroidi par un gaz froid. Il existe deux tamis fonctionne de façon Intermittente :

- ❖ A 2626A
- ❖ A 2626B [7]

### I.5.7. Colonne de rectification :

En séparation de l'air on utilise deux types de garnissage intérieur des colonnes :

- Colonne Tamis-plateaux : T3211
- Colonne à garnitures : T3212, T4110, T4111, T4112.

Tableau I.7. Les dimensions réelles de la double colonne. [9]

Colonne	Section	D(mm)	Plateaux	Type
Haut pression T3211	A	1100	48	Plateaux-tamis
	B	1100	6 54	
Basse pression T3212	A	1100	11	Garnissage Structuré
	B	1100	9	
	C	1100	9	
	D	900	14	
	E	1100	35 78	

Les deux colonnes de rectification sans indiqué sur la Figure I.6 et la figure I.7 :

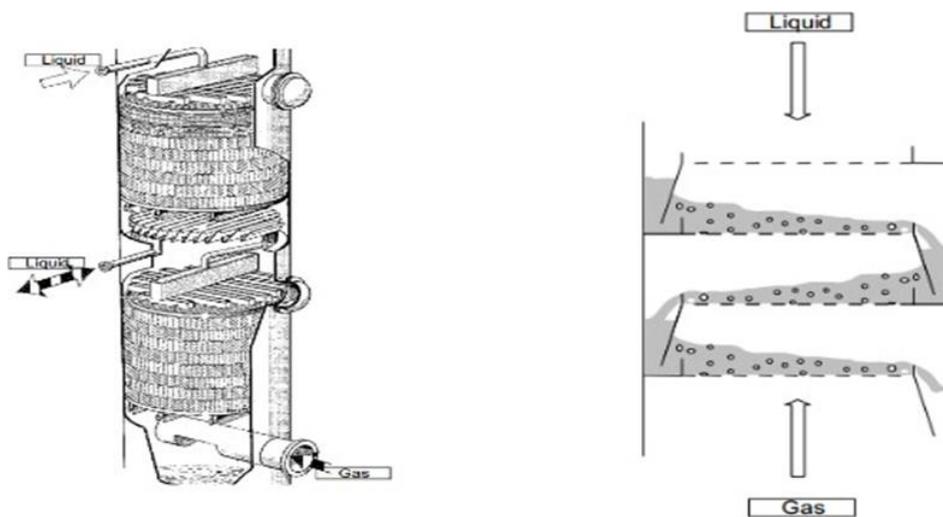


Figure I.6. Garniture moléculaire [6] Figure I.7. Plateaux à tamis [6]

### I.5.8. Turbine d'entraînement du surpresseur C3461-X3471 :

Détente (expansion) de l'air pour produire la source froide nécessaire au procédé. Le surpresseur est entraîné par l'énergie de la turbine de détente. [7]

### **I.5.9. Autres équipements :**

- Chauffage électrique / E2618.
- Accumulateur de chaleur / E2621.
- Pompes cryogéniques.
- Pompes à eau.
- Silencieux : N1151 / N1153 / N2653 / N3954 / N3953.
- Réservoirs de stockage des liquides : D7110, D7310, D7331, D7531.
- Ventilateur éjecteur : J 3958.
- Tour de refroidissement E8421 A.
- Vannes. [6]

### **Conclusion :**

Dans ce chapitre on a présenté la société Linde Gas Algérie de Reghaia, son processus de travail, les équipements utilisés. On a même étudié les caractéristiques des gaz/liquide (Azote, Oxygène, Argon) et les point d'ébullition des principaux gaz de l'air.



## CHAPITRE II

### Les cycles de liquéfaction

## **Introduction :**

La cryogénie est l'étude et l'utilisation des substances à de très basses températures. La limite supérieure des températures cryogéniques n'est pas fixée, mais l'institut national de la standardisation et de la technologie des Etats-Unis a suggéré que le terme cryogénie soit appliqué à toutes les températures en dessous de  $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $123\text{ }^{\circ}\text{K}$ ). Certains scientifiques prennent le point d'ébullition normal de l'oxygène ( $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$  ou  $90\text{ }^{\circ}\text{K}$ ) comme limite supérieure [14].

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

Les développements simultanés de la technologie et de la physique aux basses températures sont intimement liés à la « course » à la liquéfaction des gaz appelés « permanents » : hydrogène, azote, oxygène...

En 1877, les physiciens Cailletet et Pictet parvinrent, chacun de leur côté, à produire des gouttelettes d'oxygène liquide. En 1883, Wroblewski et Olszewski obtiennent de l'oxygène, puis de l'azote liquide, en quantités suffisantes pour l'étudier [15]. En 1898, Sir James Dewar, chimiste britannique, réussit à liquéfier l'hydrogène [14]. En 1907, Linde installe la première station de liquéfaction d'air aux U.S.A [15]. En 1908, le physicien néerlandais Heike KamerlinghOnnes, liquéfia l'hélium, le gaz le plus difficile à liquéfier [14]. Ce n'est qu'en 1933 que Giauque et Mac Dougall à Berkeley atteignent  $0.3\text{ }^{\circ}\text{K}$ , et de Haas à Leiden  $0.09\text{ }^{\circ}\text{K}$ . Kurti en 1955 atteindra des températures voisines de  $10^{-5}\text{ }^{\circ}\text{K}$  [15].

De nos jours, l'application des techniques cryogéniques a pris, dans de nombreux domaines, une extension considérable (fig II.1). L'oxygène peut être utilisé de différentes façons : par exemple dans les moteurs de fusées, pour permettre la vie dans les vaisseaux spatiaux et les engins de plongée sous-marine. L'azote est utilisé dans le conditionnement des aliments congelés. La cryogénie a aussi rendu possible le transport commercial des gaz naturels liquéfiés. Sans la cryogénie, la recherche nucléaire manquerait de l'hydrogène et de l'hélium liquides utilisés dans les détecteurs de particules et dans les puissants électroaimants dont ont besoins les grands accélérateurs de particules. La chirurgie cryogénique ou la cryochirurgie est utilisée dans le traitement de la maladie de Parkinson, détruire des tumeurs du cerveau et pour inhiber le développement du cancer cervical.

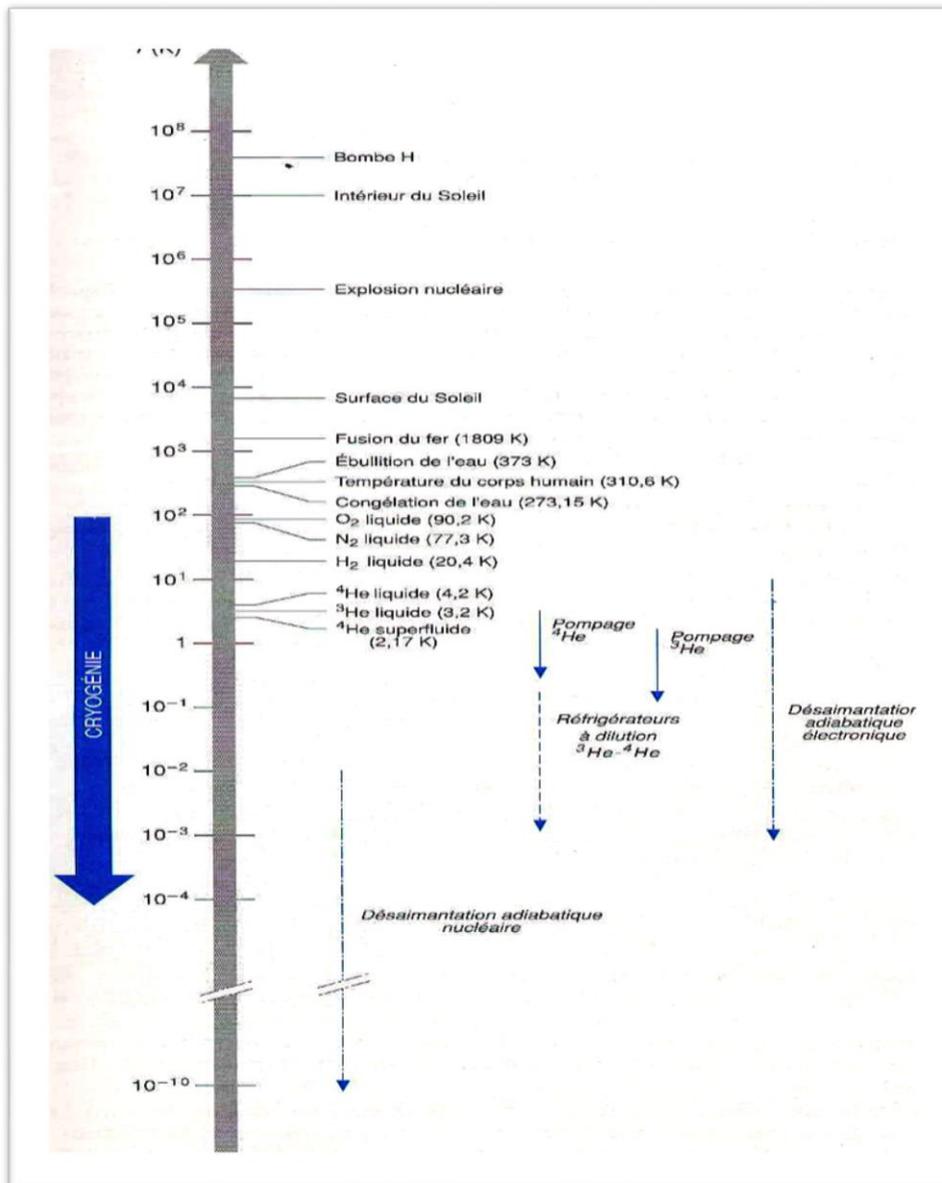


Figure II.1 : Echelle de température thermodynamique

Le problème de stockage des gaz liquéfiés se pose en même temps que leur obtention, il a fallu rapidement trouver des solutions au problème de l'isolation thermique des récipients de stockage.

Les conteneurs et les cryostats constituent l'un des plus puissants supports de la cryogénie. Un cryostat rassemble en général un réservoir de stockage de fluide cryogénique et un dispositif expérimental. Il peut aussi comprendre un ou plusieurs systèmes de réfrigération-liquéfaction. Les cryostats réalisés actuellement sont en général métalliques (acier inoxydable le plus souvent).

La liquéfaction d'un gaz permet de l'emmagasiner et de la transporter dans un récipient de faible volume. Elle permet d'autre part d'obtenir de basses températures par l'évaporation du liquide. Si la température critique du gaz est supérieure à la température ordinaire il suffit, pour le liquéfier, de le comprimer. Mais si la température du gaz est plus basse que la température ordinaire, il faut d'abord le refroidir au-dessous de la température critique puis comprimer. Il est nécessaire pour liquéfier l'oxygène de le refroidir à  $-119^{\circ}\text{C}$ , pour l'hydrogène de le refroidir au-dessous de  $-240^{\circ}\text{C}$ .

### II.1. L'effet de Joule Thomson : [11]

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 change 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. 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.

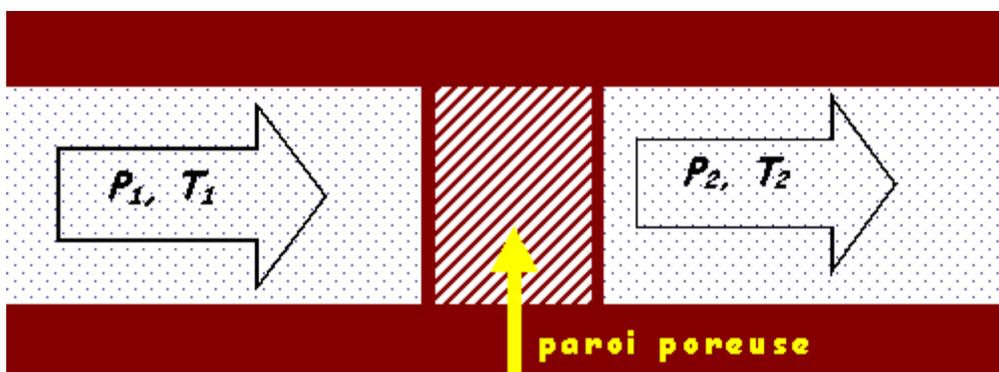


Figure II.2: détente de Joule-Thomson. [11]

Dans cette expérience schématisée à la figure 2-3, un gaz subit une détente à travers un disque poreux et passe d'une pression et d'une température initiale ( $P_1, T_1$ ) à une pression et température finale ( $P_2, T_2$ ). La chute s'effectue entièrement dans le disque poreux. Puisque l'expansion se produit en continu dû au débit de gaz. Cette expérience est beaucoup moins sensible aux imperfections expérimentales de Joule. Cette expérience se déroule toujours en milieu adiabatique et le travail  $W_i$  nécessaire pour faire passer un volume  $V_i$  à travers le disque est donné par :

$$W_i = - \int_{v_i}^0 P_i dv - P_i \int_{v_i}^0 dv = P_i V_i \quad [2.1]$$

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

$$W_f = - \int_0^{v_f} P_f dv - P_i \int_0^{v_f} dv = -P_f V_f \quad [2.2]$$

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

$$W = W_i + W_f = P_i V_i - P_f V_f$$

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

$$U_f - U_i = P_i V_i - P_f V_f$$

Cette dernière expression peut être réécrite sous la forme :

$$U_f + P_f V_f = U_i + P_i V_i \quad [2.3]$$

L'équation (3) démontre que la détente adiabatique d'un gaz, est un processus isenthalpique,

C'est-à-dire où l'enthalpie demeure constante. Cet énoncé peut se réécrire de la façon suivante en utilisant la dérivée totale de l'enthalpie.

$$dH = \left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T dP + \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P dT \quad [2.4]$$

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

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

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

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

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

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.2. Liquéfaction basée sur l'effet Joule Thomson :

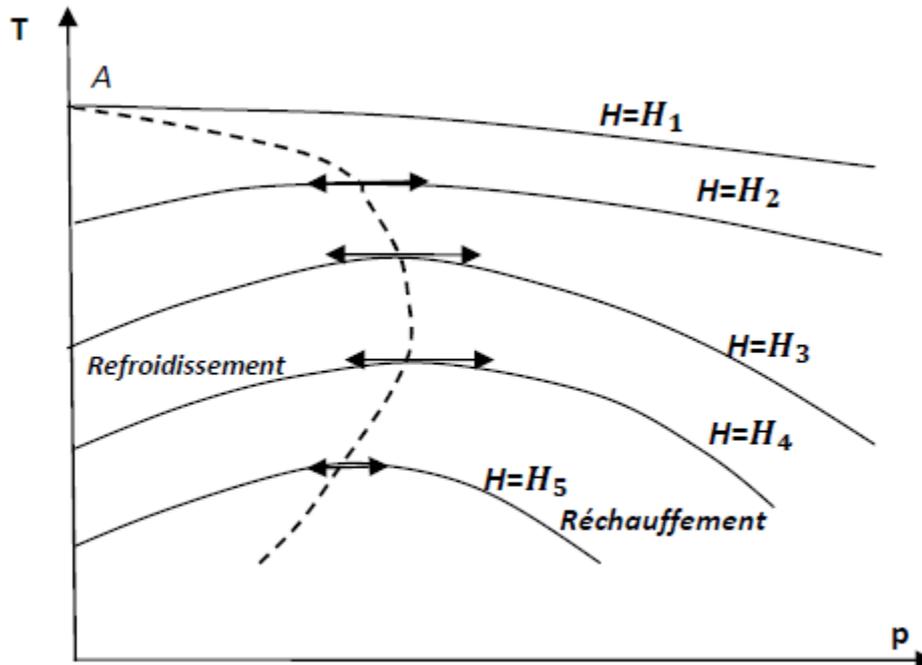


Figure II.3: Les lignes isenthalpiques et les points d'inversion dans le diagramme (T-P). [11]

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

$$\mu_{J-T} = 0 \text{ Ou bien } \mu_{J-T} = \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)_H = 0 .$$

A partir de la figure (2-4), nous constatons que :

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

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

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

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

### II.2.1. La détente adiabatique [12]

La deuxième méthode pour produire les basses températures, c'est la détente adiabatique du gaz à travers une machine d'expansion, pour ce cas idéal la détente est réversible et adiabatique (isentropique), on définit alors un coefficient de détente isentropique.

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

On pouvait d'ailleurs s'y attendre car le travail produit par le système est, en vertu du principe de l'équivalence compensé par diminution d'énergie interne, donc de la température. La détente isentropique, pour une même température de départ et entre deux pressions données, provoque un abaissement de température plus important que la détente isenthalpique. Elle est donc plus intéressante, mais son emploi est toujours combiné avec celle-ci car il n'est pas possible, pour des raisons technologiques, d'admettre la présence de liquide dans les machines de détente

### II.3. Les paramètres performants d'un liquéfacteur :

- Le travail requis par unité de masse gazeuse
- Le travail requis par unité de masse liquéfiée
- Le taux de liquidité  $y$ .

- Le F.O.M (Figure Of Merit) sachant que le  $FOM = \frac{\frac{W_i}{m}}{\frac{W_i}{mf}}$

Sachant que  $mf$  est la masse liquéfiée

$\frac{W_i}{m}$ : Le travail de liquéfaction par unité de masse

$\frac{W_i}{mf}$ : Le travail de liquéfaction par unité de masse liquéfiée

## II.4. Le Travail minimum de liquéfaction :

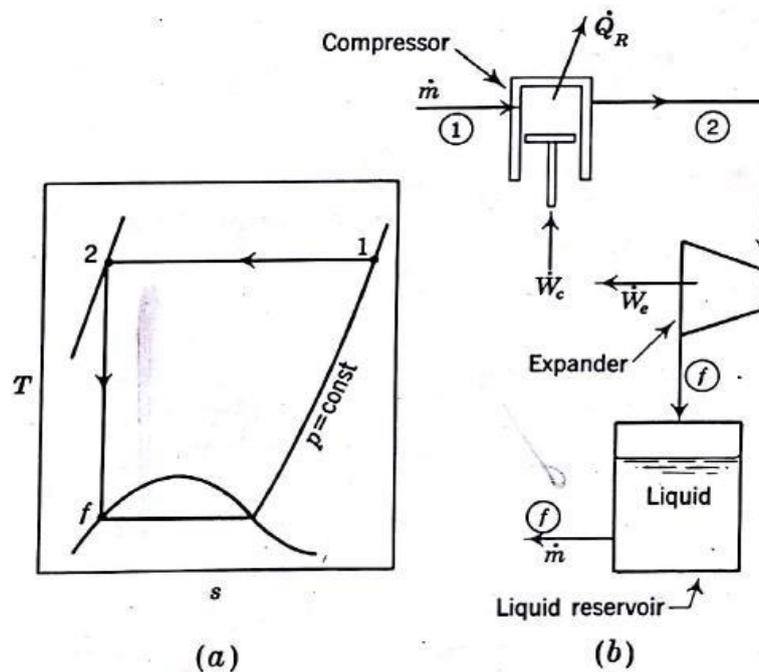


Figure II.4 : Diagramme énergétique minimal.

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

$$\Sigma_{sortie} m(h + Ec + Ep) - \Sigma_{entrée} m(h + Ec + Ep) = \Sigma Q + \Sigma W = Q_{net} + W_{net} \quad [2.5]$$

En choisissant un volume de contrôle adéquat, nous pouvons écrire :

$$Q_R + W = m(h_f - h_1)$$

$$Q_R = mT(s_2 - s_1)$$

$s_2$  et  $s_1$  sont les entropies à la sortie et l'entrée du compresseur et la compression est isotherme sachant que  $T_1 = T_2 = T$

Ainsi le travail idéal de liquéfaction est :

$$\frac{W_i}{m} = T(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2) = \frac{W_i}{m_f}$$

$$y = \frac{m}{m_f} = 1$$

$$FOM = 1$$

## II.5. Système de liquéfaction de Linde-Hampson :

### a) Diagramme énergétique :

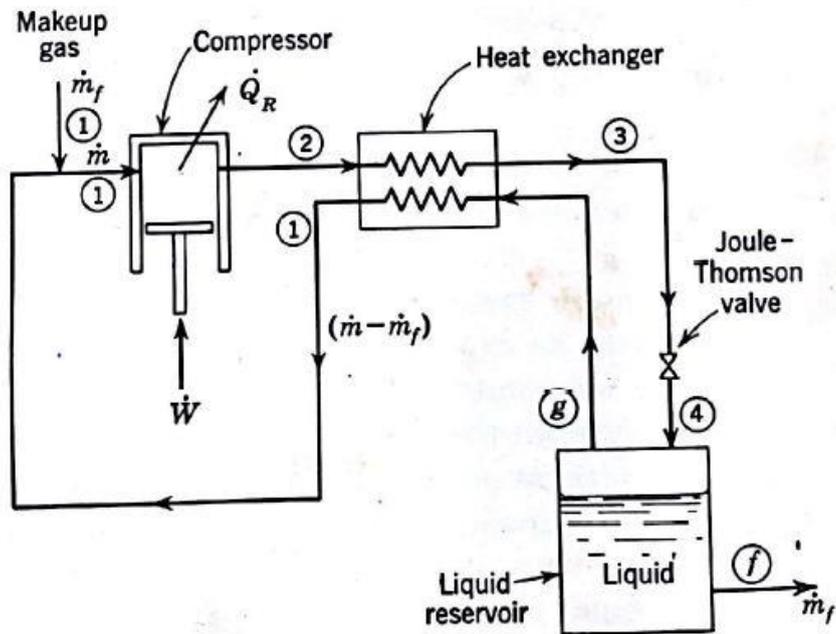


Figure II.5 : Diagramme énergétique de Linde-Hampson.

### b) Diagramme T-S

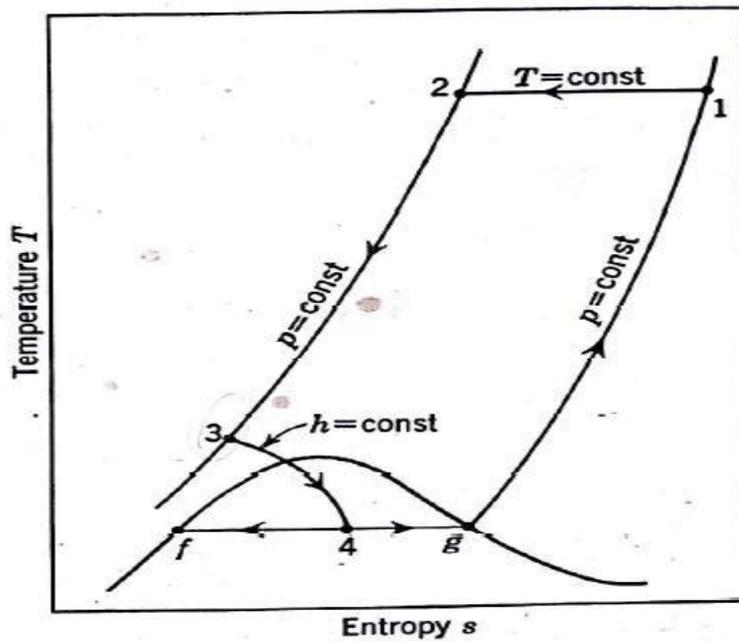


Figure II.6 : Diagramme T-S de Linde-Hampson.

En appliquant le premier principe sur :

$$\Sigma_{\text{sortie}} m(h + Ec + Ep) - \Sigma_{\text{entrée}} m(h + Ec + Ep) = \Sigma Q + \Sigma W \quad [2.5]$$

$$0 = (m - m_f)h_1 + m_f h_f - mh_2$$

Choisissons le volume de contrôle en éliminant le compresseur, nous obtenons :

$$y = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_f} \text{ Avec } y = \frac{m}{m_f}$$

Choisissons le volume de contrôle en incluant le compresseur uniquement, nous obtenons :

$$Q_R + W = m(h_2 - h_1)$$

$$Q_R = mT(s_2 - s_1)$$

Le travail de liquéfaction par unité de masse est :

$$\frac{w}{m} = T(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2) \quad [2.6.1]$$

Le travail de liquéfaction par unité de masse liquéfiée est :

$$\frac{w}{m_f} = \frac{w}{m} \cdot \frac{1}{y} = \frac{h_1 - h_f}{h_1 - h_2} \cdot [T(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)] \quad [2.6.2]$$

## II.6. Système de liquéfaction de Linde-Hampson amélioré :

Le système de Linde-Hampson est modifié partiellement dans lequel le gaz entre dans l'échangeur de chaleur à température plus basse que la température ambiante.

### a) Diagramme énergétique et T-S :

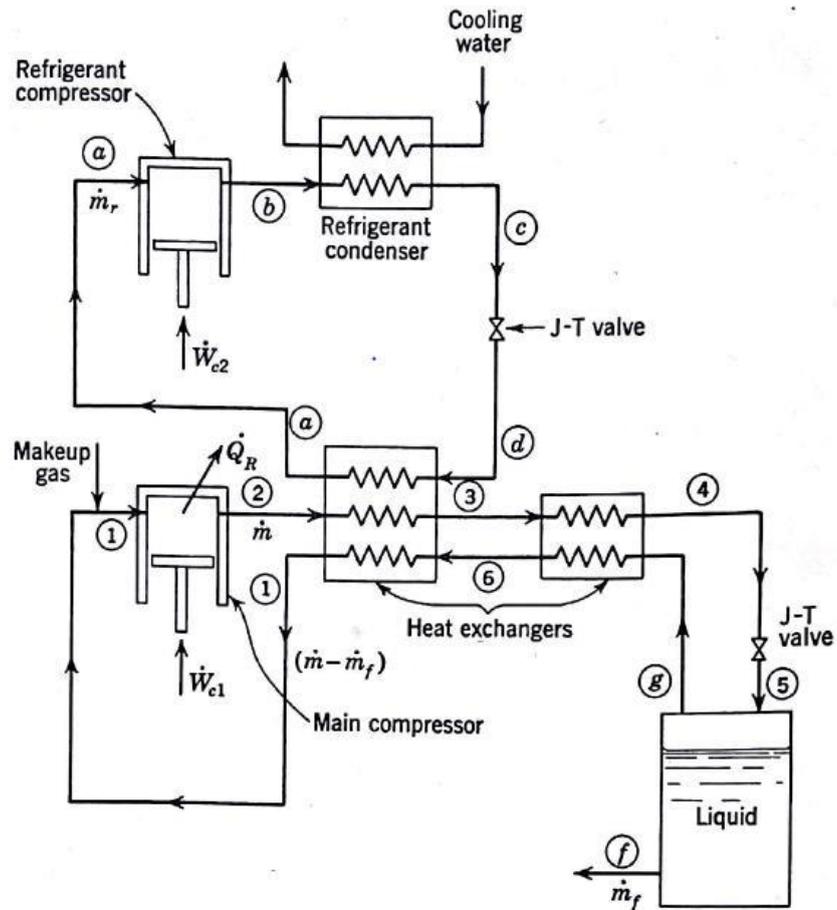


Figure II.7 : Diagramme énergétique de Linde-Hampson amélioré.

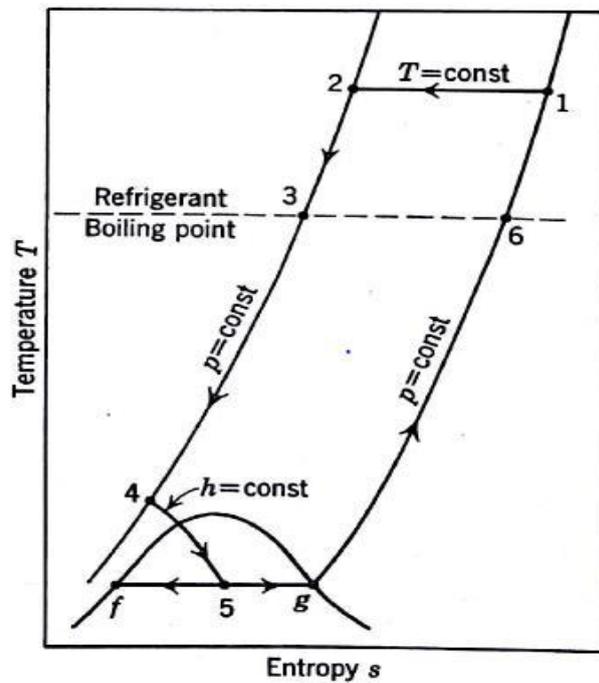


Figure II.8 : Diagramme T-S de Linde-Hampson amélioré.

Calcul du taux de liquidité  $y = \frac{mf}{m}$  sachant que  $r = \frac{mr}{m}$

$r$  : étant le taux de réfrigération (fréon).

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

$$\Sigma_{sortie} m(h + Ec + Ep) - \Sigma_{entrée} m(h + Ec + Ep) = \Sigma Q + \Sigma W = Q_{net} + W_{net} \quad [2.5]$$

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

$$0 = (m - mf) h_1 = m_r h_a = m_f h_f - m h_2 - m_r h_d$$

D'où :

$$y = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_f} + \frac{h_a - h_d}{h_1 - h_f} \quad [2.7.1]$$

Calcul du travail de liquéfaction requis par unité de masse sachant que le compresseur du réfrigérant est adiabatique :

$$QR - Wc_1 - Wc_2 = m(h_1 - h_2) + mr(h_b - h_a)$$

$$QR = -mT(s_1 - s_2) ; T_1 = T_2 = T$$

$$\frac{W}{m} = T (S_1 - S_2) + r (h_b - h_a) - (h_1 - h_2) \quad [2.7.2]$$

On en déduit le travail requis par unité de masse liquéfiée :

$$\frac{W}{mf} = \frac{W}{m} \cdot \frac{1}{y}$$

$$\frac{W}{mf} = \frac{1}{\frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_f} + \frac{h_a - h_d}{h_1 - h_f}} [T (S_1 - S_2) + r (h_b - h_a) - (h_1 - h_2)] \quad [2.7.3]$$

## II.7. Système de liquéfaction de Collin's :

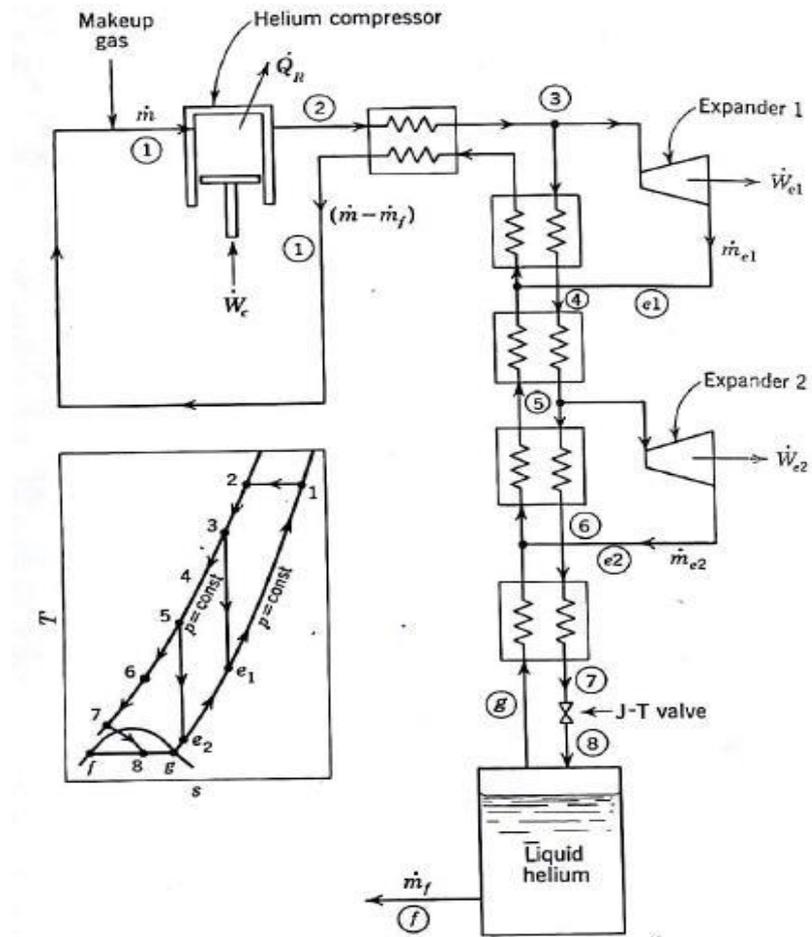


Figure II.9 : Diagramme énergétique du liquéfacteur de Collin's.

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

$$\Sigma_{\text{sortie}} m(h + Ec + Ep) - \Sigma_{\text{entrée}} m(h + Ec + Ep) = \Sigma Q + \Sigma W = Q_{\text{net}} + W_{\text{net}} [2.5]$$

On désigne par :  $y = \frac{mf}{m}$ ;  $x_1 = \frac{me_1}{m}$ ;  $x_2 = \frac{me_2}{m}$

$$We_1 = me_1(he_1 - h_3) : \frac{We_1}{m} = x_1(he_1 - h_3)$$

$$We_2 = me_2(he_2 - h_5) : \frac{We_2}{m} = x_2(he_2 - h_5)$$

$$We_1 + We_2 = mfhf + (m - mf)h_1 - mh_2$$

$$y = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_f} + x_1 \frac{h_3 - h_{e1}}{h_1 - h_f} + x_2 \frac{h_5 - h_{e2}}{h_1 - h_f} \quad [2.8.1]$$

Le travail de liquéfaction requis par unité de masse :

$$W = W_c + W_{e1} + W_{e2}$$

$$\frac{W}{m} = [T(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2)] + x_1(h_{e1} - h_3) + x_2(h_{e2} - h_5) \quad [2.8.2]$$

Le travail de liquéfaction requis par unité de masse liquéfiée :

$$\frac{W}{mf} = \frac{W}{m} \cdot \frac{1}{y}$$

$$\frac{W}{mf} = \frac{1}{\frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_f} + x_1 \frac{h_3 - h_{e1}}{h_1 - h_f} + x_2 \frac{h_5 - h_{e2}}{h_1 - h_f}} [T(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2)] + x_1(h_{e1} - h_3) + x_2(h_{e2} - h_5) \quad [2.8.3]$$

## II.8. Liquéfaction en cascade :

Le système de liquéfaction en cascade consiste à utiliser plusieurs systèmes de réfrigération comme le montre la figure ci-dessous. Pour refroidir l'azote, on utilise l'eau pour refroidir l'ammoniac qui celui-ci refroidit l'éthylène qui de la même manière refroidit le méthane et finalement l'azote. Sachant que la température du point triple de l'azote est inférieure à celle du méthane, celle-ci inférieure à celle de l'éthylène. La température du point triple de l'éthylène est inférieure à celle de l'ammoniac qui celle-ci est inférieure à celle de l'eau.

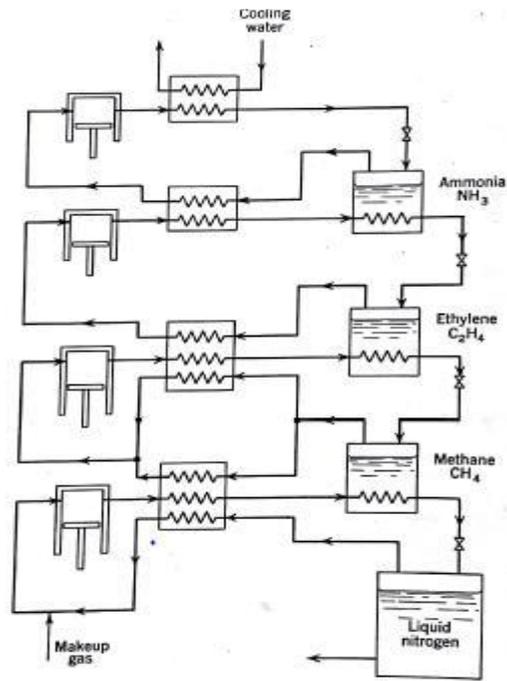


Figure II.10 : Diagramme énergétique de liquéfaction en cascade.

**Conclusion :**

Dans ce chapitre on a parlé de la cryogénie en générale en détaillant sur la liquéfaction, après on a présenté tous les cycles de liquéfactions, leurs diagrammes (énergétique, T-S) et leurs équations de performance (Y, W/m, W/mf, FOM).

**CHAPITRE III**  
**Cycle de Claude**

## **Introduction :**

En 1902 le scientifique Français GEORGE CLAUDE a amélioré le processus de LINDE en ajoutant une machine d'expansion au cycle de liquéfaction.

La concurrence entre LINDE et CLAUDE et leurs compagnies a stimulée une énorme

Montée subite dans le développement de l'industrie cryogénique

En la même année 1902, LINDE a récupéré pour la première fois à partir de l'air de L'oxygène pur. Cette production d'oxygène par rectification était une incitation pour CLAUDE afin de développer son cycle et faire le mieux ; il a construit ce qu'on appelle « retour en arrière » où il a placé un échangeur de chaleur sous forme de tubes verticaux disposés dans la partie inférieure de la colonne de distillation , cet échangeur joue le rôle d'un bouilleur, la condensation de reflux légèrement enrichi en O<sub>2</sub> alimente le milieu de la colonne de distillation , le gaz restant légèrement enrichi en N<sub>2</sub> a été condensé dans les autres tubes coulant en bas et détendre dans la partie supérieure de la colonne , mais en utilisant cette méthode , l' O<sub>2</sub> et N<sub>2</sub> obtenus ne sont pas de degré de pureté élevé , donc ils ont aboutir à une solution « colonne double » où on peut avoir un degré de pureté acceptable .

### **III.1. Principe de cycle de Claude : [13]**

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 III.1 :

- 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

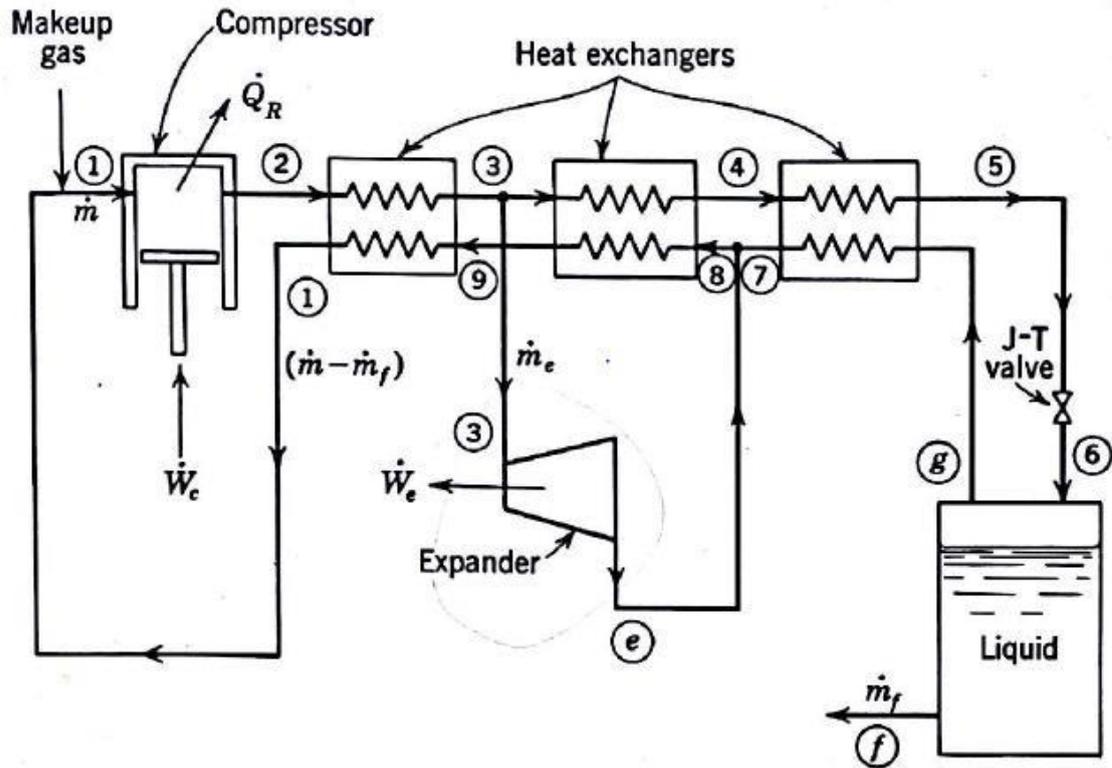


Figure III.1 schéma de principe de cycle de Claude.

Le principe de fonctionnement est comme suit (Figure III.2) : le gaz est d'abord comprimé de  $P_1$  à  $P_2$  à température constante, il est refroidi de 2 en 3 dans le premier échangeur.

Une partie  $\dot{m}_e$  est détendue dans la turbine par une détente isentropique qui l'amène en e, ce gaz s'ajoute ensuite au courant gazeux qui revient du réservoir de liquide. Le reste du gaz traverse les deux autres échangeurs en 4 et 5, il subit une détente isenthalpique dans la vanne et pénètre dans le réservoir. Une partie se liquéfie et évacuée en f, la partie gazeuse se dégage en g et traverse toute la série des échangeurs, après mélange en e avec la partie  $\dot{m}_e$ , le courant gazeux est réchauffé à  $T_1$  et retourne à l'aspiration du compresseur avec une masse  $\dot{m}_1$  de gaz frais.



**b) Le travail nécessaire par unité de masse du gaz comprimée (W/m) [Kj/kg] :**

La première loi de la thermodynamique est donnée par :

$$Q_{net} - W_{net} = \Sigma_{sortie} m \left( h + \frac{V^2}{2} + gz \right) - \Sigma_{entrée} m \left( h + \frac{V^2}{2} + gz \right) \quad [3.2]$$

Si on l'applique à l'ensemble du cycle, sauf le compresseur d'entrée. L'équation devient :

$$W_e = (m - m_f)h_1 + m_f h_f - mh_2$$

En appliquant la 1<sup>ere</sup> loi de la thermodynamique pour l'expandeur uniquement :

$$W_e = m_e(h_e - h_3)$$

Si le travail produit par la détente est utilisé pour aider à la compression, le travail nécessaire pour l'unité de masse du gaz comprimée est donné par :

$$\frac{W}{m} = T(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2) - X(h_3 - h_e) \quad [3.2.1]$$

Avec  $X = \frac{m_e}{m}$  la fraction du gaz passant par l'expandeur.

**c) Le travail nécessaire par l'unité de masse du gaz liquéfiée (W/mf) [Kj/Kg] :**

Ce travail est donné comme suit :

$$\frac{W}{m_f} = \frac{W}{m} \cdot \frac{1}{y}$$

$$\frac{W}{m_f} = \frac{[T(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2) - X(h_3 - h_e)]}{\frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_f} + X \frac{h_3 - h_e}{h_1 - h_f}} \quad [3.3]$$

**d) Le rendement thermodynamique FOM :**

Il est donné :

$$FOM = \frac{\frac{W_i}{m}}{\frac{W}{m_f}} \quad [3.4]$$

Avec  $\frac{W_i}{m}$  est le travail théorique minimum [Kj/Kg] d'un cycle idéal.

## CHAPITRE IV

Etude paramétrique  
du cycle de  
liquéfaction de  
Claude

#### IV.1. Problématique :

Un liquéfacteur cryogénique de Claude utilise l'Azote comme un gaz de travail.

Les conditions de fonctionnements sont :

- $P_1 = 1\text{bar}$
- $T_1 = 290\text{k}$
- $T_f = 80\text{k}$
- $X = m_e/m$

Dans ce modeste travail on utilise le diagramme T-S de la littérature pour les fluides cryogénique d'Azote.

D'abord on trace le cycle de liquéfaction dans les diagrammes T-S. Puis pour  $P_1$  donnée, on fait varier  $P_2$  et on calcule le travail requis par unité de masse gazeuse ( $W/m$ ), Le travail requis par unité de masse liquéfiée ( $W/m_f$ ), Le taux de liquidité  $Y$ , Le F.O.M pour un  $X$  varie de 0 à 0.2 par pas de 0.05. Ensuite on Trace les courbes du FOM pour chaque  $P_2$  variée en fonction de  $X$ . A la fin on Forme des tableaux des résultats récapitulatifs par rapport aux pressions variées. Et pour discuter les résultats et les comparés on trace les courbes de comparaison des valeurs de  $P_2$  en fonction de  $X$  pour  $Y$ ,  $W/m_f$ , et le FOM

## IV.2 Influence de pression sur les paramètres de cycle de Claude :

### IV.2.1 pour $P_2 = 10\text{bar}$ :

- Le cycle de liquéfaction dans le diagramme T-S :

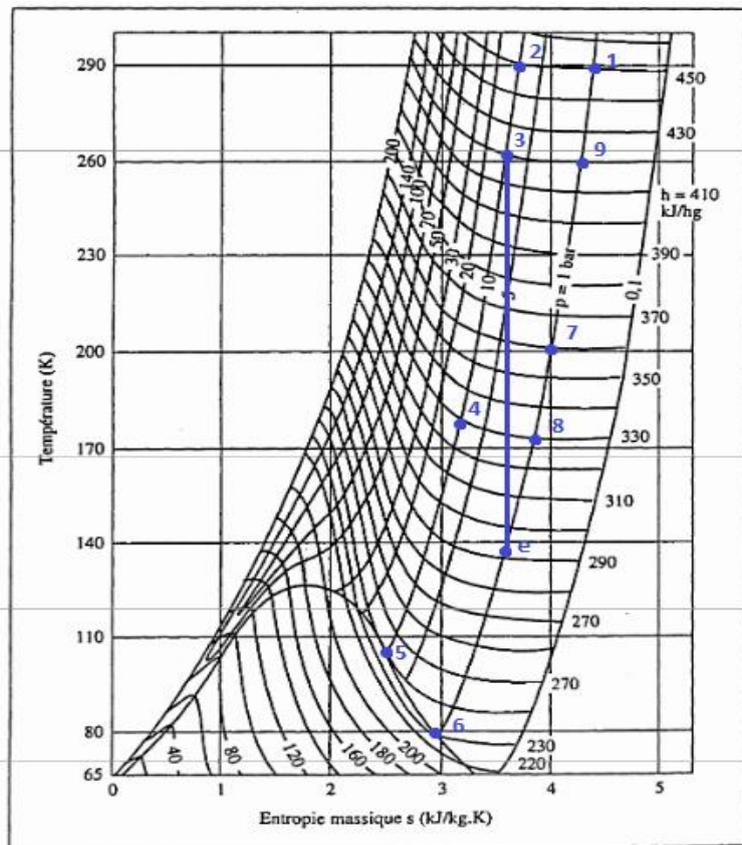


Diagramme de l'azote.

Figure IV.1 : le cycle de liquéfaction dans le diagramme T-S pour  $P_2 = 10\text{ bar}$ .

- Les paramètres de cycle (H-S) :

Tableau IV.1 : les paramètres (H-S) des points de cycle de Claude pour  $P_2 = 10\text{ bar}$ .

Points	H (kj /kg)	S (kj/kg.k)
1	451	4.38
2	449	3.7
3	420	3.58
e	292.5	3.58

- **Résultats :**

Tableau IV.2 : les résultats pour P2 = 10 bar en fonction de X

x	w/m	Y (x)	w/ mf (x)	FOM
0	195,2	0,00443459	44017,6	0,01861074
0,05	188,825	0,01856984	10168,3672	0,08056357
0,1	182,45	0,0327051	5578,64068	0,14684581
0,15	176,075	0,04684035	3759,04497	0,21792769
0,2	169,7	0,06097561	2783,08	0,29435014

- **La courbe du FOM :**

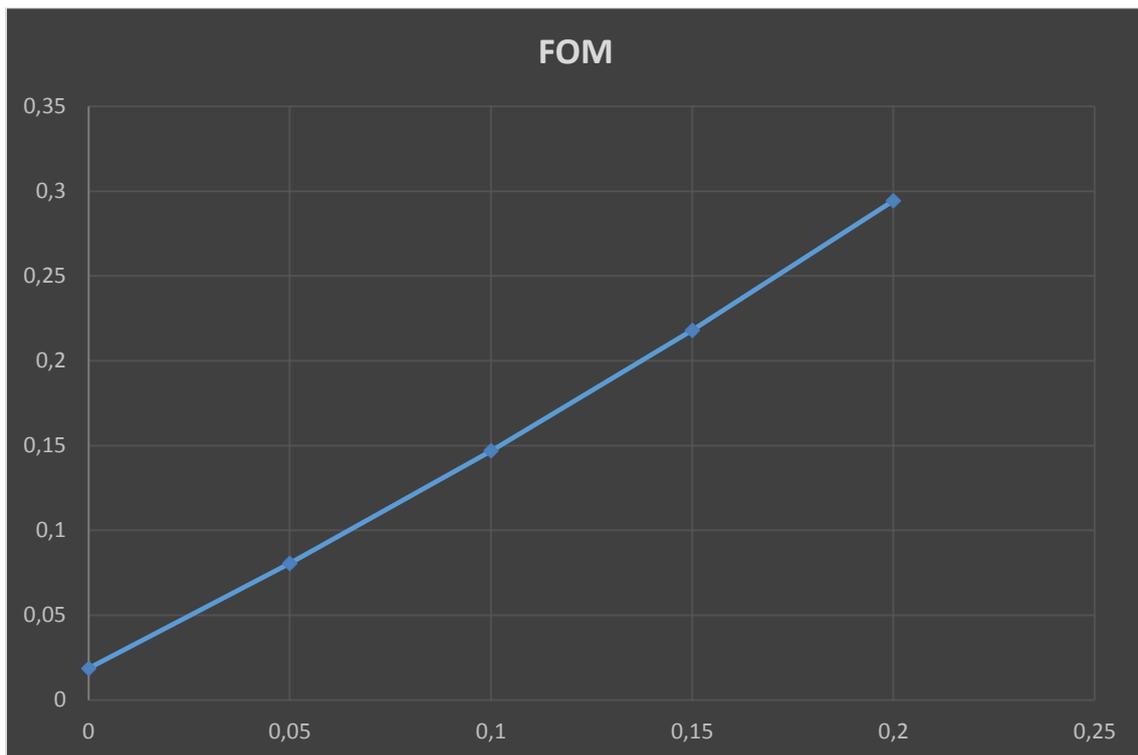


Figure IV.2 : Diagramme de FOM en fonction de X pour P2 = 10 bar.

IV.2.2 pour  $P_2 = 20$  bar :

- Le cycle de liquéfaction dans le diagramme T-S :

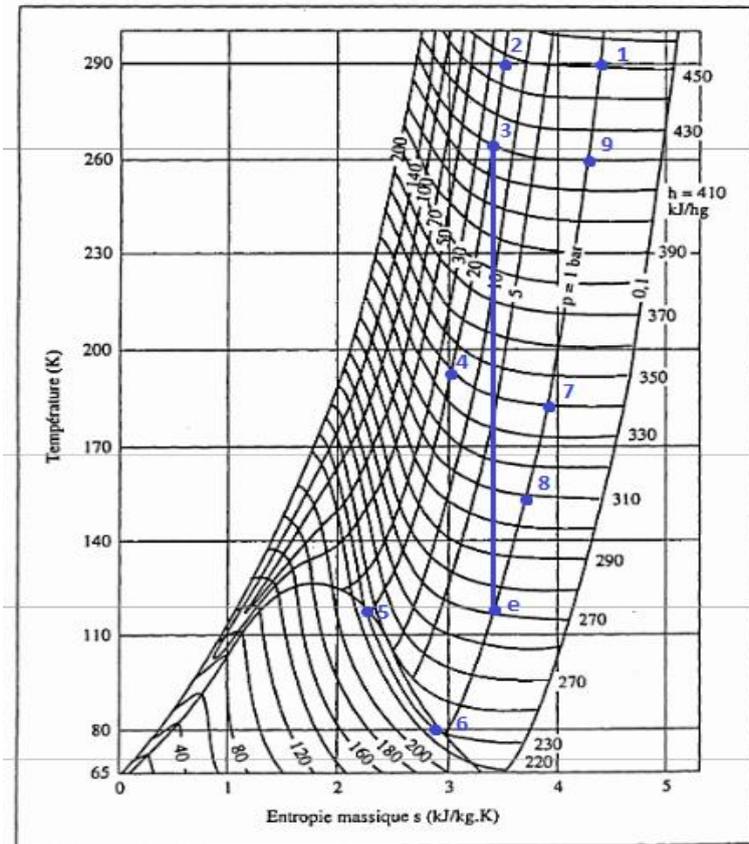


Diagramme de l'azote.

Figure IV.3 : Le cycle de liquéfaction dans le diagramme T-S pour  $P_2 = 20$  bar.

- Les paramètres de cycle (H-S) :

Tableau IV.3 : Les paramètres (H-S) des points de cycle de Claude pour  $P_2 = 20$  bar

Points	H (kJ /kg)	S (kJ/kg.k)
1	451	4.38
2	447	3.54
3	420	3.42
e	272.5	3.42

- **Résultats :**

Tableau IV.4 : Les résultats pour P2 = 20 bar en fonction de X

x	w/m	Y (x)	w/ mf (x)	FOM
0	239,6	0,00886918	27014,9	0,030324006
0,05	232,225	0,025221729	9207,338462	0,088972509
0,1	224,85	0,041574279	5408,392	0,151468311
0,15	217,475	0,057926829	3754,305263	0,218202821
0,2	210,1	0,074279379	2828,510448	0,289622406

- **La courbe du FOM :**

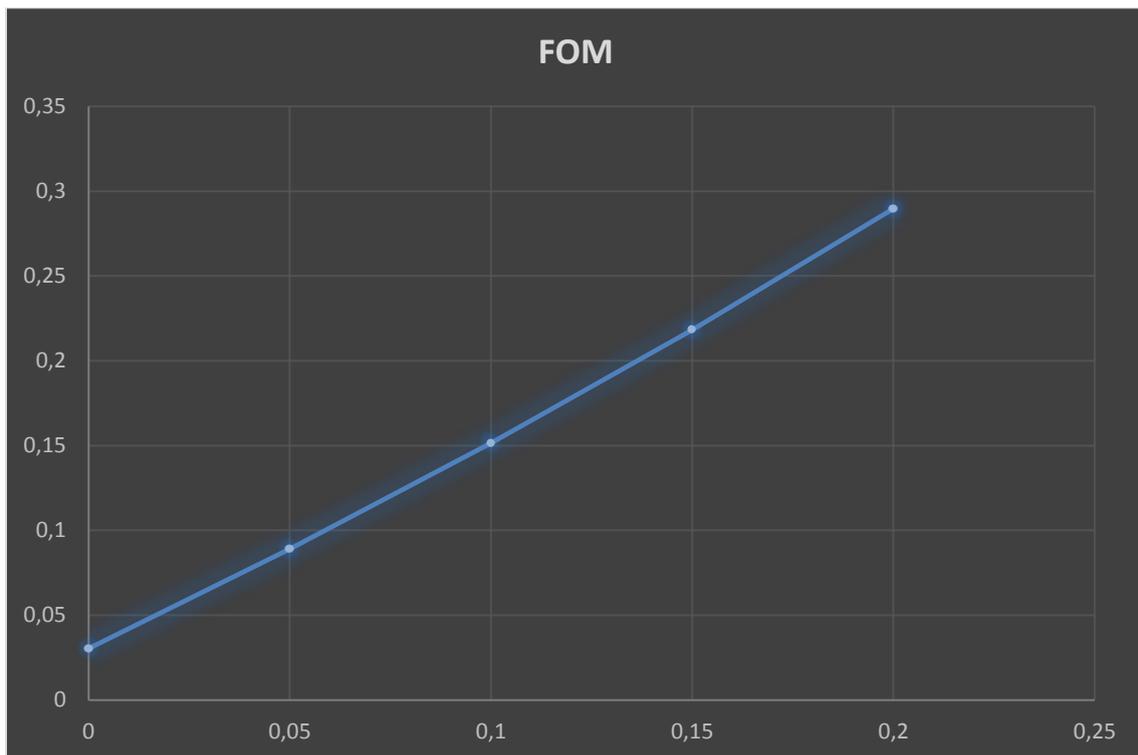


Figure IV.4 : Diagramme de FOM en fonction de X pour P2 = 20 bar.

IV.2.3 pour  $P_2 = 30 \text{ bar}$  :

- Le cycle de liquéfaction dans le diagramme T-S :

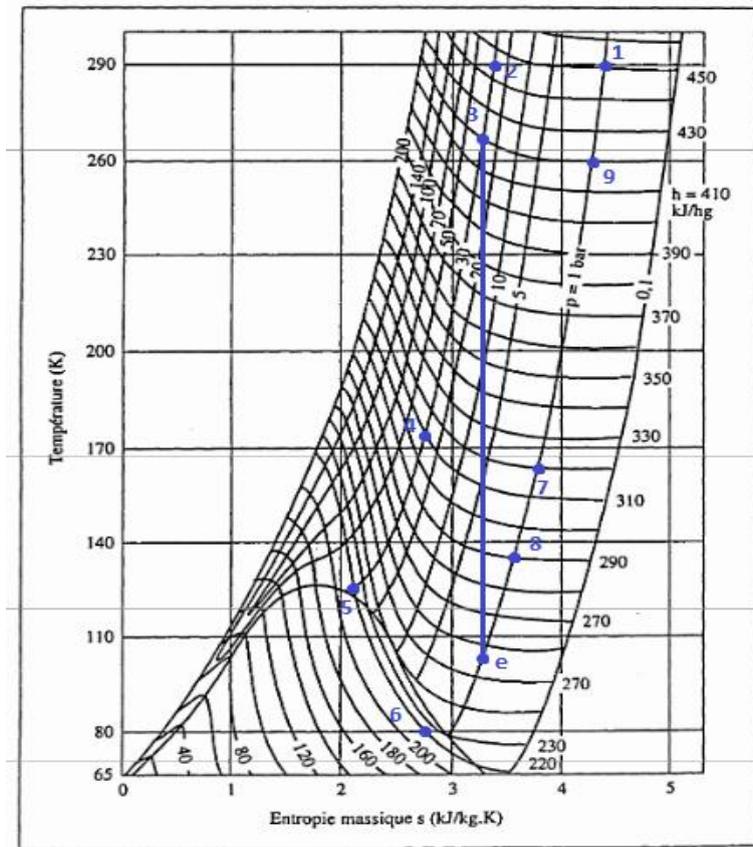


Diagramme de l'azote.

Figure IV.5 : Le cycle de liquéfaction dans le diagramme T-S pour  $P_2 = 30 \text{ bar}$ .

- Les paramètres de cycle (H-S) :

Tableau IV.5 : Les paramètres (H-S) des points de cycle de Claude pour  $P_2 = 30 \text{ bar}$

Points	H (kj /kg)	S (kj/kg.k)
1	451	4.38
2	444	3.39
3	420	3.29
e	256	3.29

- **Résultats :**

Tableau IV.6 : Les résultats pour P2 = 30 bar en fonction de X

x	w/m	Y (x)	w/ mf (x)	FOM
0	280,1	0,015521064	18046,44286	0,045393987
0,05	271,9	0,033702882	8067,559211	0,101542484
0,1	263,7	0,051884701	5082,423077	0,161182961
0,15	255,5	0,070066519	3646,53481	0,224651633
0,2	247,3	0,088248337	2802,319095	0,292329307

- **La courbe du FOM :**

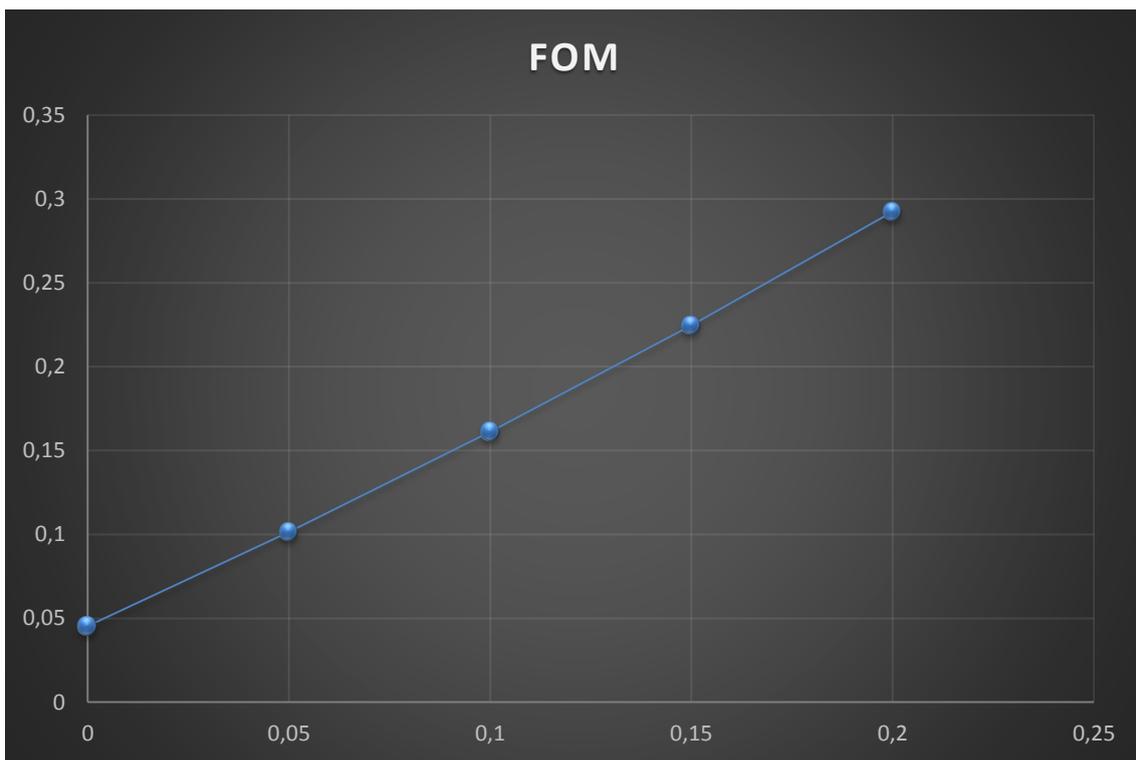


Figure IV.6 : Diagramme de FOM en fonction de X pour P2 = 30 bar.

#### IV.2.4 pour P2 = 40 bar :

- Le cycle de liquéfaction dans le diagramme T-S :

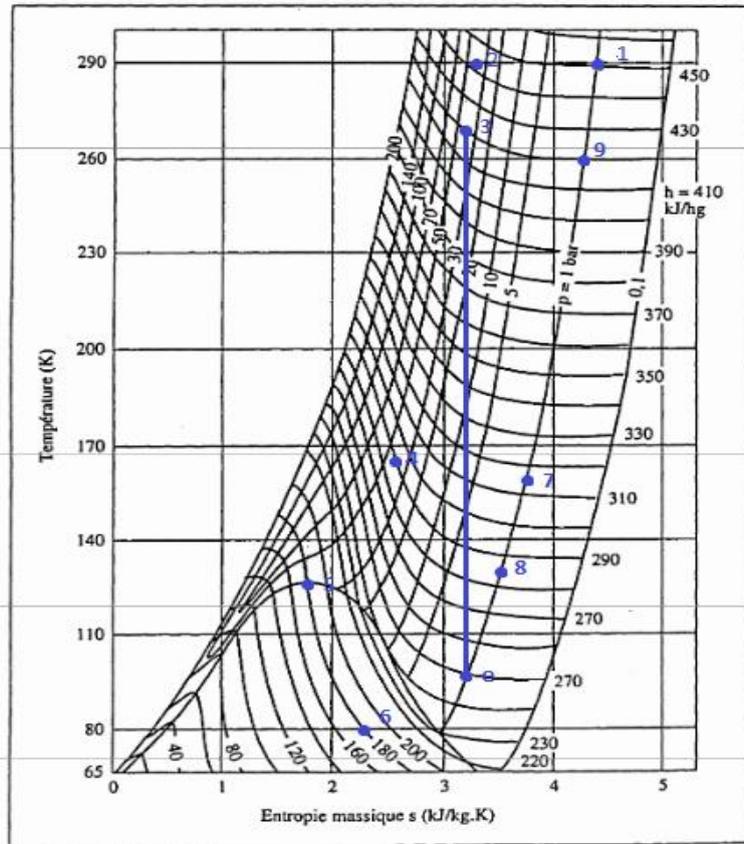


Diagramme de l'azote.

Figure IV.7 : Le cycle de liquéfaction dans le diagramme T-S pour P2 = 40 bar.

- Les paramètres de cycle (H-S) :

Tableau IV.7 : Les paramètres (H-S) des points de cycle de Claude pour P2 = 40 bar

Points	H (kj /kg)	S (kj/kg.k)
1	451	4.38
2	442	3.34
3	420	3.19
e	249	3.19

- **Résultats :**

Tableau IV.8 : Les résultats pour P2 = 40 bar en fonction de X

x	w/m	Y (x)	w/ mf (x)	FOM
0	292,6	0,019955654	14662,51111	0,055870375
0,05	284,05	0,038913525	7299,518519	0,11222658
0,1	275,5	0,057871397	4760,555556	0,172080756
0,15	266,95	0,076829268	3474,587302	0,235769008
0,2	258,4	0,09578714	2697,648148	0,303671923

- **La courbe du FOM :**

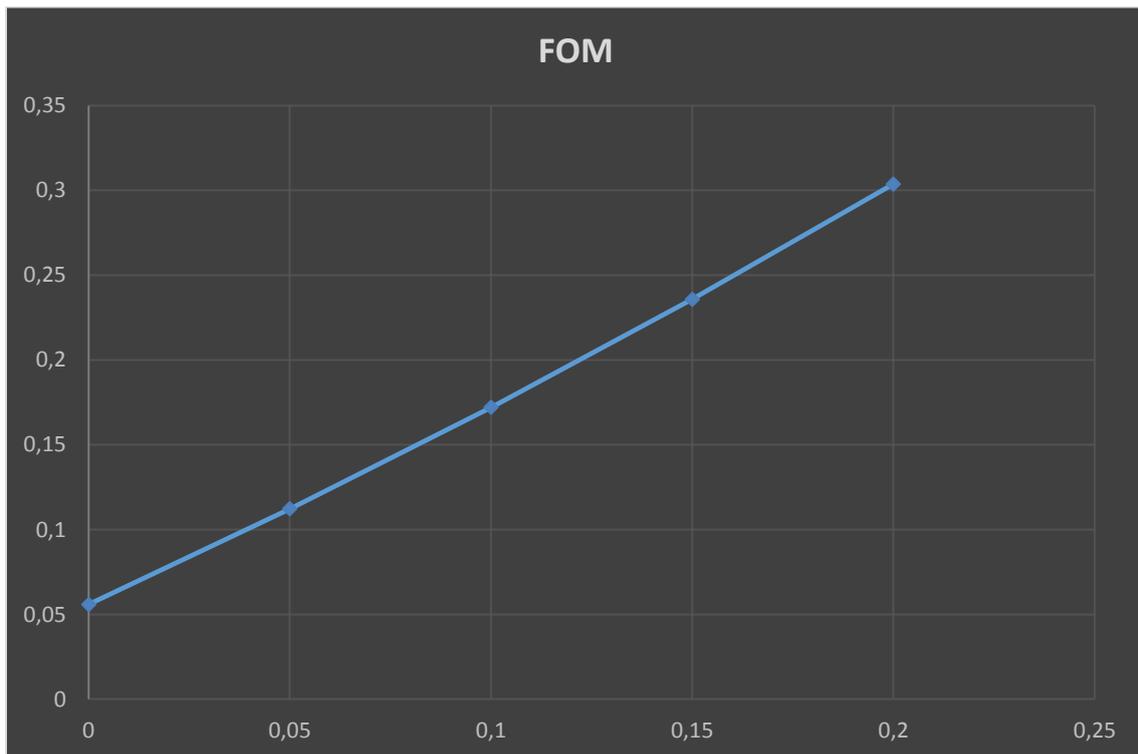


Figure IV.8 : Diagramme de FOM en fonction de X pour P2 = 40 bar.

#### IV.2.5 pour P2 = 50 bar :

- Le cycle de liquéfaction dans le diagramme T-S :

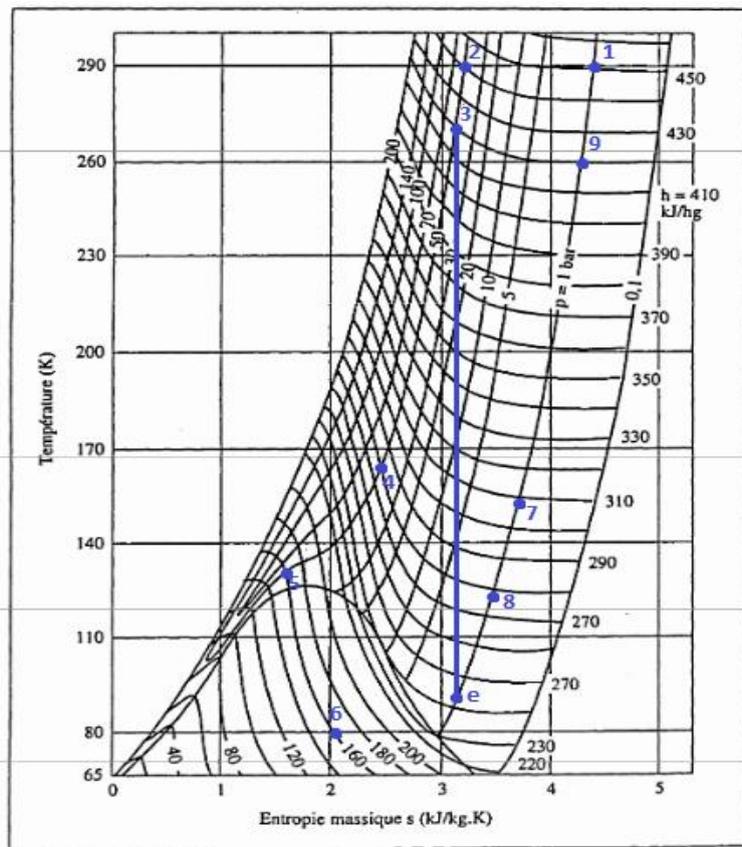


Diagramme de l'azote.

Figure IV.9 : Le cycle de liquéfaction dans le diagramme T-S pour P2 = 50 bar.

- Les paramètres de cycle (H-S) :

Tableau IV.9 : Les paramètres (H-S) des points de cycle de Claude pour P2 = 50 bar

Points	H (kj /kg)	S (kj/kg.k)
1	451	4.38
2	440	3.25
3	420	3.125
e	241	3.125

- **Résultats :**

Tableau IV.10. : Les résultats pour P2 = 50 bar en fonction de X

x	w/m	Y (x)	w/ mf (x)	FOM
0	316,7	0,024390244	12984,7	0,063089636
0,05	307,75	0,044235033	6957,155388	0,117749275
0,1	298,8	0,064079823	4662,934256	0,175683369
0,15	289,85	0,083924612	3453,694848	0,237195246
0,2	280,9	0,103769401	2706,963675	0,302626891

- **La courbe du FOM :**

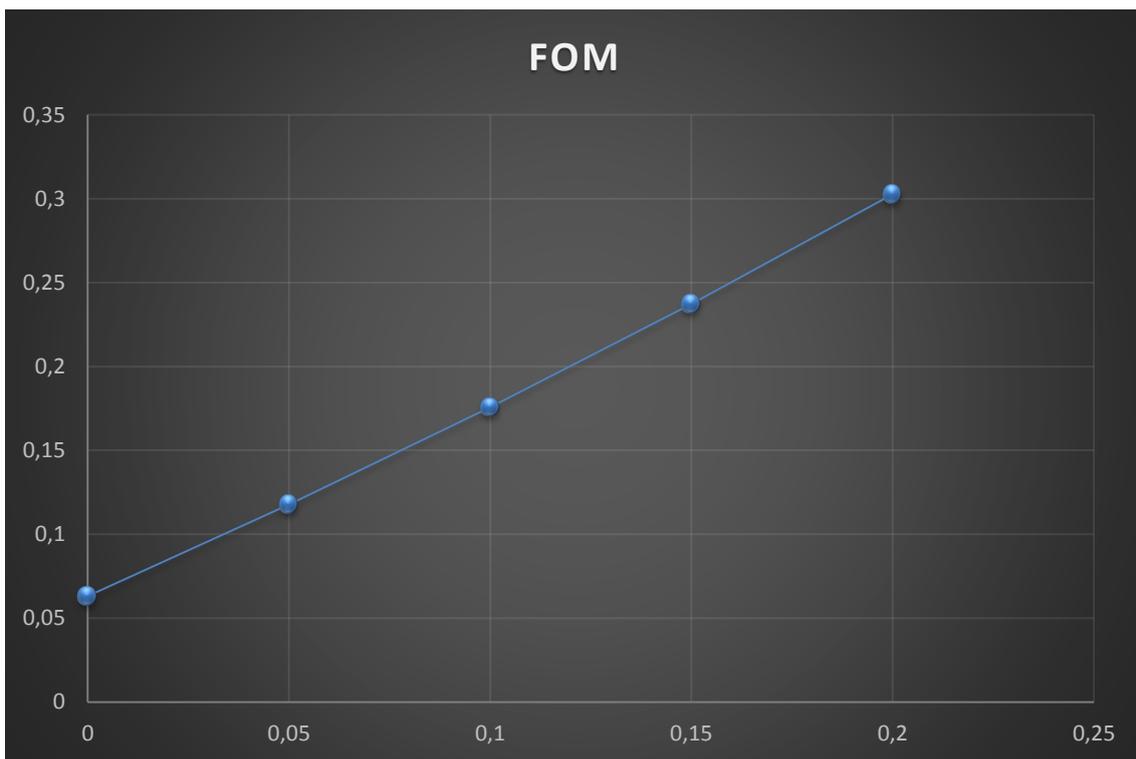


Figure IV.10 : Diagramme de FOM en fonction de X pour P2 = 50 bar.

- **Tableaux des résultats récapitulatifs :**

Tableau IV.11. : Les tableaux récapitulatifs des résultats par rapport aux pressions.

X = 0	W/m	Y	W/mf	FOM
P = 10	195,2	0,00443459	44017,6	0,018610738
P = 20	239,6	0,00886918	27014,9	0,030324006
P = 30	280,1	0,015521064	18046,44286	0,045393987
P = 40	292,6	0,019955654	14662,51111	0,055870375
P = 50	316,7	0,024390244	12984,7	0,063089636

X = 0.05	W/m	Y	W/mf	FOM
P = 10	188,825	0,018569845	10168,36716	0,080563574
P = 20	232,225	0,025221729	9207,338462	0,088972509
P = 30	271,9	0,033702882	8067,559211	0,101542484
P = 40	284,05	0,038913525	7299,518519	0,11222658
P = 50	307,75	0,044235033	6957,155388	0,117749275

X = 0.1	W/m	Y	W/mf	FOM
P = 10	182,45	0,0327051	5578,640678	0,146845808
P = 20	224,85	0,041574279	5408,392	0,151468311
P = 30	263,7	0,051884701	5082,423077	0,161182961
P = 40	275,5	0,057871397	4760,555556	0,172080756
P = 50	298,8	0,064079823	4662,934256	0,175683369

X = 0.15	W/m	Y	W/mf	FOM
P = 10	176,075	0,046840355	3759,04497	0,217927693
P = 20	217,475	0,057926829	3754,305263	0,218202821
P = 30	255,5	0,070066519	3646,53481	0,224651633
P = 40	266,95	0,076829268	3474,587302	0,235769008
P = 50	289,85	0,083924612	3453,694848	0,237195246

X = 0.2	W/m	Y	W/mf	FOM
P = 10	169,7	0,06097561	2783,08	0,294350144
P = 20	210,1	0,074279379	2828,510448	0,289622406
P = 30	247,3	0,088248337	2802,319095	0,292329307
P = 40	258,4	0,09578714	2697,648148	0,303671923
P = 50	280,9	0,103769401	2706,963675	0,302626891

- **Diagramme de la fraction y en fonction de X par rapport à chaque pression :**

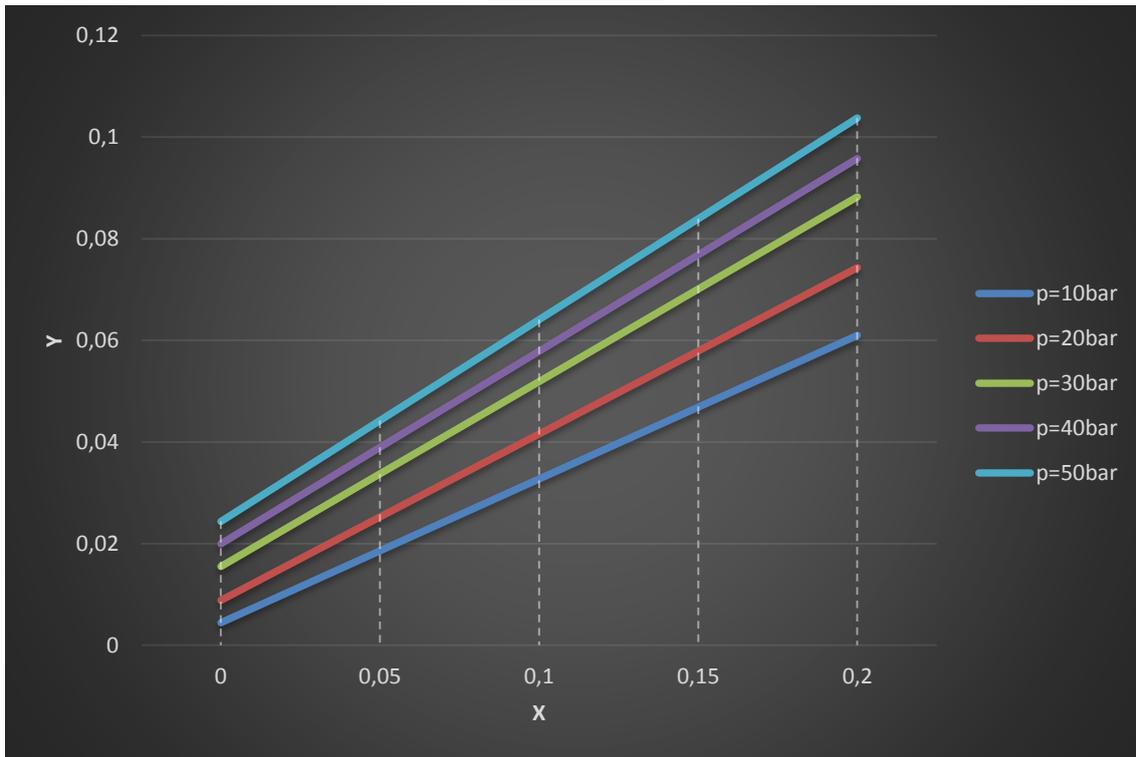


Figure IV.11 : Diagramme de la fraction y en fonction de X par rapport à chaque pression.

- **Diagramme de travail nécessaire par l'unité de masse du gaz liquéfiée (W /mf)en fonction de X par rapport à chaque pression :**

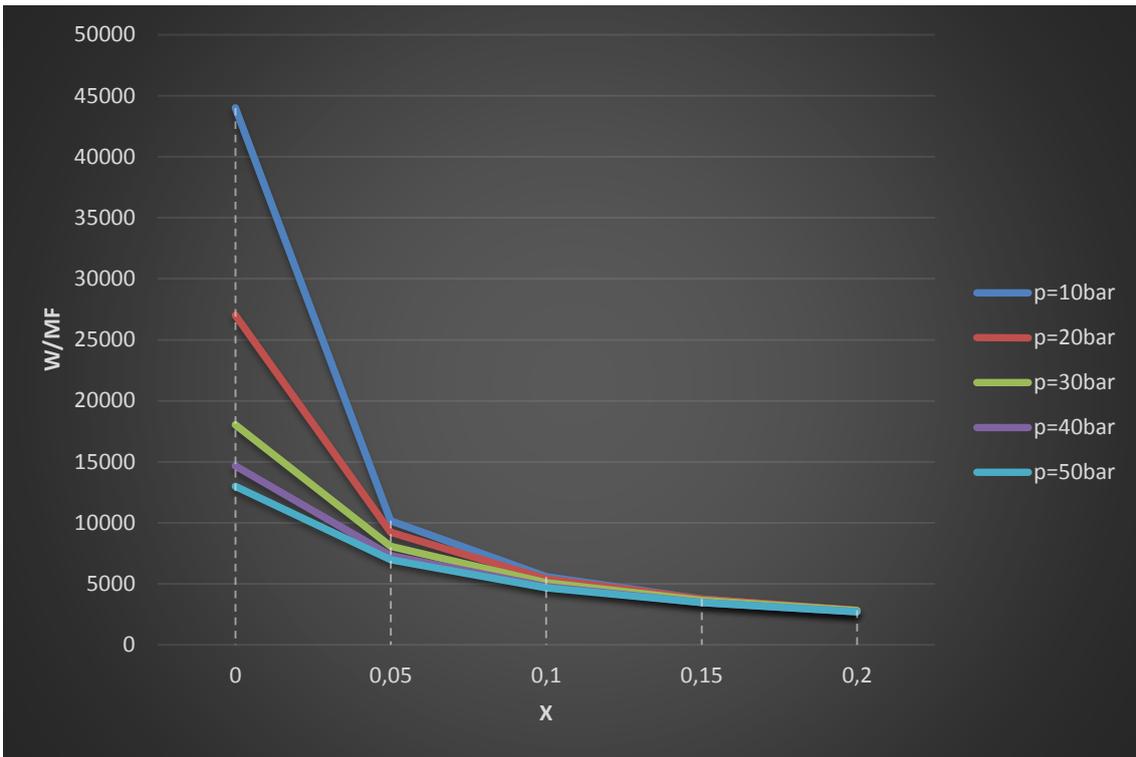


Figure IV.12 : Diagramme de travail liquéfiée (W/mf) en fonction de X par rapport à chaque pression.

- **Diagramme de FOM en fonction de X par rapport à chaque pression :**

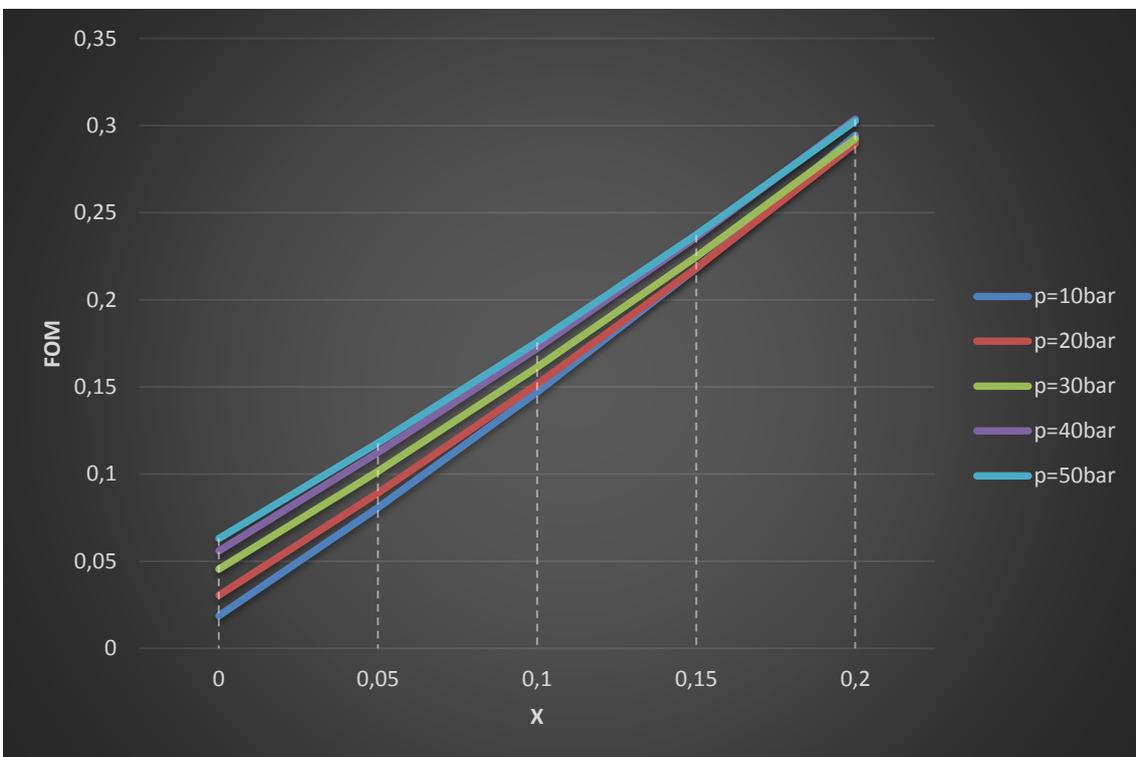


Figure IV.13 : Diagramme de FOM en fonction de X par rapport à chaque pression

### IV.3 Discussion des résultats :

- D'après les figures (IV.2) (IV.4) (IV.6) (IV.8) (IV.10), on observe que le FOM augmente quand on a augmenté la pression P2 de 10 à 50 bar ; et le FOM augmente aussi lorsque les valeurs de X sont augmentées.
- D'après la figure (IV.11), la fraction Y augmente chaque fois on a augmenté la pression P2, et on observe aussi qu'il augmente d'une façon linéaire en fonction de X.
- D'après la figure (IV.13), le FOM augmente de la même manière que la fraction Y, par contre tous les résultats se rapprochent à X=0.2
- D'après la figure (IV.12), on observe que lorsque P2 est inférieure, W/mf est plus élevé à X=0. En fonction de X tous les résultats diminuent à des valeurs proches à X=0.2
- D'après la figure (IV.12), on remarque que à X<0.05 le système de liquéfaction réagit comme le système de liquéfaction de Linde-Hampson.

CONCLUSION  
GENERALE

### **Conclusion générale :**

Dans ce mémoire on a fait une étude thermodynamique très détaillée en se basant sur les paramètres influents du système de liquéfaction cryogénique de Claude, tels que la fraction  $Y$  du gaz liquéfié, Le travail nécessaire par unité de masse du gaz comprimée ( $W/m$ ), Le travail nécessaire par l'unité de masse du gaz liquéfiée ( $W/mf$ ) et le FOM. Les paramètres influent sont ( $X=me/m$ ) et  $P_2$ .

Avec cette étude et d'après les résultats on a conclu que :

Lorsque on change les valeurs de  $P_2$  au système de liquéfaction, les paramètres influents changent avec les enthalpies  $H$  et les entropies  $S$ .

Lorsque la courbe de  $Y$  augmente, la courbe du FOM augmente de la même manière.

La pression  $P_2$  et la valeur de  $X$  sont des paramètres influent sur le FOM,  $W/m$ ,  $W/mf$  et  $Y$ .

Le changement des valeurs de  $P_2$  n'a pas beaucoup d'influence sur  $W/mf$  vers  $X=0.2$

Pour  $X < 0.05$  le système de liquéfaction réagit comme le système de liquéfaction de Linde-Hampson.

REFERANCE  
BIBLIOGRAPHIQ  
UE

## Référence bibliographique :

- [1] Note de LINDE
- [2] N, BOOTH. Industrial gases. 1ère édition. 1973. P6 à 7. ISBN008016860-4.
- [3] DRAGLIA Walid.' Etude d'unité de séparation de l'air : Centrale à oxygène d'El-Hadjar Dimensionnement de la section d'épuration d'air (Tamis moléculaires).
- [4] Cryogénie, ses applications en supraconductivité '. Techniques de l'ingénieur, traité génie des procédés. 1995.P39.
- [5] <http://www.maxicours.com/se/fiche/6/6/375266.html>12/06/2019
- [6] Manuel d'exploitation de Réghaia'. Chapitre1 : description de processus, spécifications Générales et principales théoriques. version1.12/01/2011.Ndoc :0100PMC1001. Réf :1110AEF3.
- [7] Air separation techniques course by Anders Lenneskog, Cryogenic plants. Version Française: 25-01-1997.ref: TTP-941083e.
- [8] Manuel d'exploitation de Hassi Messaoud'. Chapitre2 : partie de l'usine. Version1.12/01/2011. Ndoc: 0100PMC1002.Réf:1110AEF3.
- [9] Plant 1110-AEF3. Item: LOX3000-AR. Doc: &AA0100PCE1002.PAGE2.1 OF 1 (Linde- Réghaia-component specification).
- [10] [https://www.azprocede.fr/Cours\\_GC/rectification\\_plateaux.html](https://www.azprocede.fr/Cours_GC/rectification_plateaux.html) 22/06/2019
- [11] I.U.T. de Saint-Omer Dunkerque Département Génie Thermique et énergie.
- [12] Le froid et ses applications dans l'industrie du gaz – collection des techniques gazières association technique de l'industrie du gaz en France.
- [13] R.R. conte, Eléments de cryogénie, Masson et Cie, (1970)
- [14] Air liquide Advanced Technologies l'inergie de la cryogénie et des gaz
- [15] Cryogénique systèmes (second édition) by RANDALLF.BARRON

## ANNEXES

# Annexes

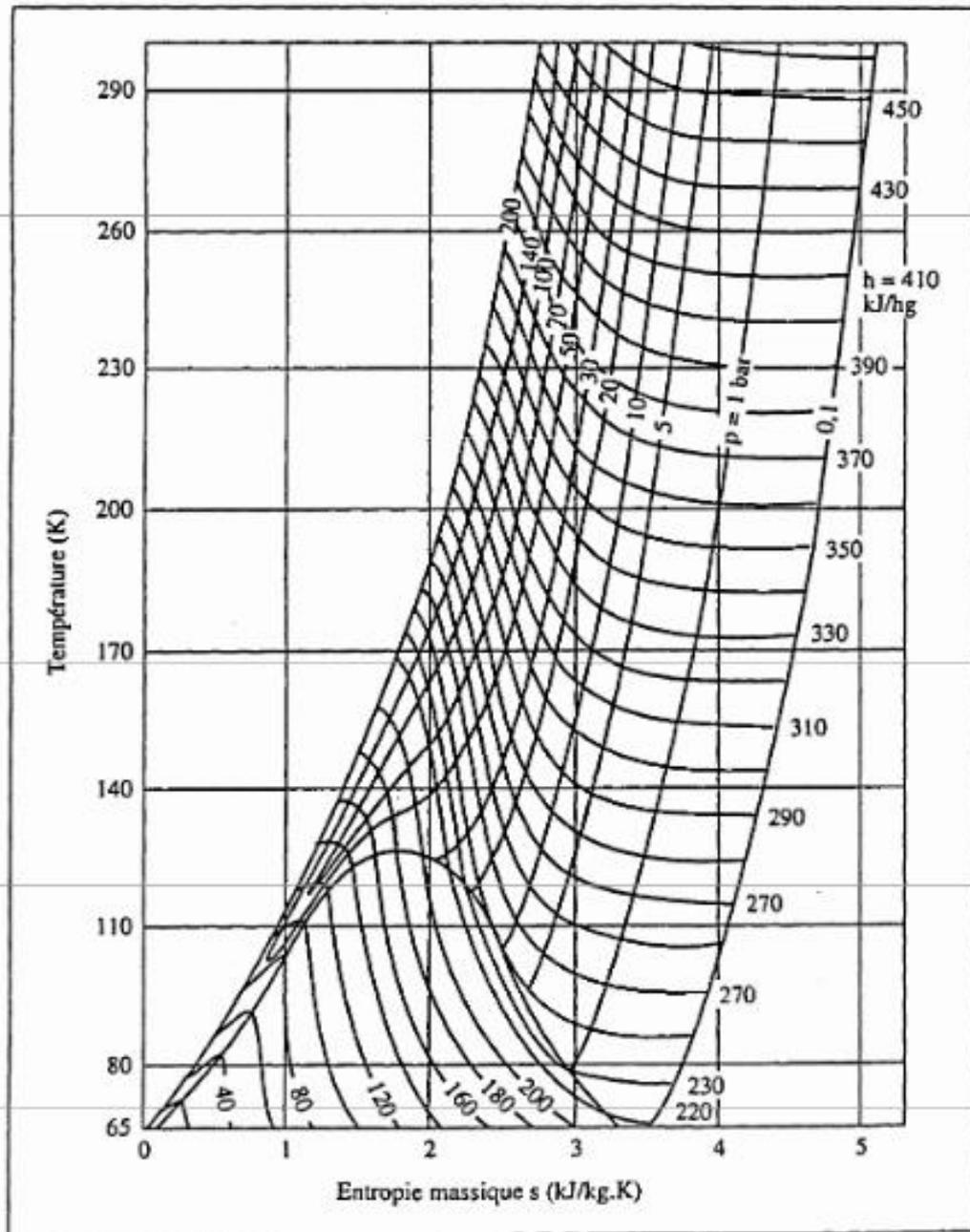


Diagramme de l'azote.