

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

CENTRE UNIVERSITAIRE « SALHI AHMED » DE NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

MEMOIRE DE MASTER

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Energétique

Intitulé du Mémoire

Etude de la séparation de l'azote de l'air

Présenté par :

Youb amel

Soutenu publiquement le : 2 juillet 2019 devant le jury :

Mr. Badaoui abdehamid	MCB	CU Naama	Président
Mr. Bendaho Djelloul	MCB	CU Naama	Encadreur
Mr. Khatir Tawfiq	MCB	CU Naama	Examineur

Année universitaire 2018-2019

Remerciements

En premier lieu je tiens à remercier mon DIEU, notre créateur, pour m'avoir donné la force d'accomplir ce travail

Nous adressons nos profonds remerciements à notre promoteur :

Dr. Bendahou djelloul pour ses encouragements, ses conseils, ainsi que

la mise en disposition de tous les moyens dont il dispose.

Nous remercions également les membres de jury, président et examinateurs, d'avoir accepté de juger notre modeste travail.

J'adresse avec tout mon respect mon remerciements aux L'ensemble des

enseignements du département : "Génie des mécanique"

Nous remercions aussi tout ce qui nous a contribués de prés ou de loin.

Dédicace

J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail, comme
un geste de gratitude :

A celle qui m'a enfanté dans la douleur et de la joie, mon
symbole d'amour :

Ma très chère mère

A celui qui je chère et j'apprécie fort son soutien continu tout le long
de mes études :

Mon très cher père

A mes frères et sœurs ainsi que toute ma famille.

A mes amis et amies

Résumé

Le but de ce travail est l'étude thermodynamique et énergétique des différentes étapes du procédé de liquéfaction et séparation des gaz de l'air, des bilans thermodynamique on été calculé ainsi que le rendement . Le cycle cryogénique de LINDE est appliqué à la liquéfaction des divers gaz industriels comme l'air, azote et l'oxygène, hélium. Le travail suivant vise à simuler le cycle cryogénique de LINDE à l'aide de l'outil HYSYS tous les calculs ont été fait à l'équilibre, et des résultats par conséquent ont été obtenus.

Mots clés : cryogénie, séparation de l'air ; hémodynamique, cycle de Linde

Abstract

The aim of this work is the thermodynamic and energetic study of various stages of the process of liquefaction and separation of air gases. Both thermodynamics assessment and outcomes are calculated . the cryogenic cycle of LINDE is applied to the liquefaction of various industrial gases like air, nitrogen,oxygen, and helium. The following work aims at simulating the cryogenic cycle of LINDE using HYSYS tools. All calculations are made in a balanced way, and results were consequently obtained.

Key words : cryogenics, air separation, therodynamic, Linde's cycle

المخلص

هدف هذا العمل هو دراسة الديناميكا الحرارية والطاقة في مختلف مراحل عملية تسييل و فصل الغازات الجوية تقييمها تم كل من الديناميك الحرارية ونتائجها. تم تطبيق الدورة LINDE احتسابها

لاساله الغازات الجوية المختلفه مثل الهواء و النيتروجين و الاكسجين والهيليوم . يهدف العمل التالي

في محاكاة الدورة المبردة LINDE

باستخدام HYSYS

الكلمات الرئيسية: فزياء درجات الحرارة المتدنية و فصل الهواء و الديناميكا الحرارية ودورة LINDE

Nomenclature

Glossaire LETTRES LATINES NON INDICEES		
Symbole	Désignation	Unité
C	Compresseur	-
E	échangeur	-
X	turbine	-
A	Absorbeur	-
D	Séparateur	-
T	Colonne de distillation	-
P	Pompe	-
E_T	Energie totale	KJ
U	Energie interne	KJ
E_C	Energie cinétique	KJ
E_P	Energie potentielle	KJ
M	masse	Kg
C	vitesse	m/s
G	Gravité	m/s^2
Z	Hauteur	M
V	Volume	m^3
P	Pression	Bar
T	Température	K
W	Travail par unité de masse	KJ/Kg
W_t	Travail technique	KJ
φ	Chaleur	KJ
\dot{W}_t	Puissance technique	KW
$\dot{\varphi}_t$	Puissance thermique	KW

Nomenclature

\dot{m}	Débit massique	Kg/s
\dot{m}_V	Débit massique de vapeur	Kg/s
\dot{m}_L	Débite massique de liquide	Kg/s
H	Enthalpie massique	KJ/Kg
h_T	Enthalpie massique totale	KJ/Kg
h_L	Enthalpie de liquide	KJ/Kg
X	Fraction de vapeur	Sans dimension
Y	Fraction de liquide	Sans dimension
C_p	La chaleur spécifique du gaz à pression constante	
m_F	Masse du gaz liquéfiée	
W/m_F	Le travail nécessaire par unité de masse de gaz liquéfiée	
W/m	Le travail nécessaire par unité de masse de gaz Comprimée	
FOM	Figure Of Merit	
E	Efficacité	
PFD	Process flow diagram	
h_V	Enthalpie massique de vapeur	

LETTRES GRECS

Symbole	Désignation	Unité
μ_{JT}	coefficient de joule-Thomson	Sans dimension

Nomenclature

Indices		
Symbole	Désignation	Unité
GAP	Gaz de l'air pur	-
GAN	Gaz nitrogène	-
GOX	Gaz oxygène	-
LAP	Liquide de l'air pur	-
LIN	Liquide nitrogène	-
LOX	Liquide oxygène	-
PGAN	Gaz nitrogène pur	-
IPGAN	Gaz nitrogène impure	-
MLOX	Mélange riche en liquide oxygène	-
MLIN	Mélange riche en liquide nitrogène	-
MLAP	Mélange l'air liquide pur	-

Liste des tableaux

Tableau I-1 : % de vapeur d'eau Pour une pression d'air de 1 013 hPa dans Température de l'air.....	20
Tableau I-2 : d'autres gaz.....	20
Tableau IV.1: les paramètres d'entrée et de sortie au niveau du compresseur (C1161).....	62
Tableau IV.2: les paramètres d'entrée et de sortie au niveau du l'Échangeur (E1121).....	62
Tableau IV.3: les paramètres d'entrée et de sortie au niveau du séparateur (D2431).....	63
Tableau IV.4: les paramètres d'entrée et de sortie au niveau du l'adsorbeur (A2626).....	63
Tableau IV.5 : les paramètres d'entrée et de sortie au niveau du compresseur C1461.....	63
Tableau IV.6: les paramètres d'entrée et de sortie au niveau du l'Échangeur (E1421).....	64
Tableau IV.7: les paramètres d'entre et de sortie au niveau du compresseur (C3461).....	64
Tableau IV.8: les paramètres d'entrée et de sortie au niveau du l'Échangeur (E3421).....	65
Tableau IV.9: les paramètres d'entrée et de sortie au niveau du l'Échangeur (E3427).....	65
Tableau IV.10: les paramètres d'entrée et de sortie au niveau du l'Echangeur principale (E3116).....	66
Tableau IV.11: les paramètres d'entrée et de sortie au niveau de la turbine (X3471).....	66
Tableau IV.12: les paramètres d'entre et de sortie au niveau de la Vanne de détente.....	67
Tableau IV.13: les paramètres d'entrée et de sortie au niveau de la colonne de distillation moyenne pression (T3211).....	68
Tableau IV.14: les paramètres d'entrée et de sortie au niveau de la pompe (P3366).....	68
Tableau IV.15: les paramètres d'entre et de sortie au niveau du l'Echangeur (E3216).....	69
Tableau IV.16: les paramètres d'entre et de sortie au niveau du l'Echangeur (E3316)	69
Tableau IV.17: les paramètres d'entre et de sortie au niveau de la vanne de détente.....	70
Tableau IV.18: les paramètres d'entre et de sortie au niveau de la vanne de détente.....	70
Tableau IV.19: les paramètres d'entre et de sortie au niveau de la turbine	71
Tableau IV.20: les paramètres d'entre et de sortie au niveau du Colonne de distillation base pression (T3212).....	72
Tableau IV.21: Résultat de simulation par Hysys pour l'azote.....	76

Liste des figures

Figure I-1 : Echelle de température thermodynamique.....	5
Figure I-2 : Turbocompresseur de la centrale à oxygène.....	14
Figure I-3 : Colonne de lavage et de refroidissement de la centrale à oxygène.....	15
Figure I-4 : schéma des tamis moléculaires.....	16
Figure I-5 : schéma des échangeurs de chaleur réversibles de la centrale.....	17
Figure I-6 : Emplacement de la double colonne (C1, C2).....	18
Figure I-7 : les cigares de stockage des O ₂ et N ₂ gaz.....	19
Figure I-8 : composition de l'air.....	21
Figure I-9 : Points d'ébullition des gaz de l'air.....	22
Figure I-10 : les moyens de stockage et de transport des liquides cryogéniques.....	25
Figure II-1 : Schéma de séparation de l'air.....	27
Figure II-2 : La grille de sélection des procédés de production d'Oxygène.....	28
Figure II-3 : la grille de sélection des procédés de production d'Azote	29
Figure II-4 : les étapes de bases de séparation cryogénique de l'air.....	33
Figure II-5 :Fonctionnement du processus principal d'une séparation cryogénique de l'air..	34
Figure II-6 : procédé du Linde pour l'air liquide.....	36
Figure II-7 : production de froid à l'aide d'une valve d'expansion.....	37
Figure II-8 : Cycle du Linde.....	37
Figure II-9 : Cycle de Linde : diagramme T-S.....	38
Figure II-10 : Cycle de Linde : diagramme T-S.....	38
Figure II-11 : Cycle de Linde.....	39
Figure II-12 : Cycle de Brayton inverse.....	39
Figure II-13 : Schéma de cycle de Linde et de cycle de Brayton inverse.....	39
Figure II-14 : Schéma de principe de cycle de Claude.....	40
Figure II-15 : Diagramme (T-S) de cycle de Claude.....	41
Figure II-16 (a) : Une colonne de distillation normale.....	42

Liste des figures

Figure II-16 (b) : Double colonne de Linde (sans argon).....	42
Figure II-17 : Un compresseur à vis lubrifié le schéma du modèle avec les conditions limite.....	43
Figure II-18 : Schéma d'un échangeur a plaques et ailettes en aluminium.....	44
Figure II-19 : Les différents types de régénérateurs.....	45
Figure II-20 : Une turbine à gaz cryogénique.....	46
Figure III-1 : Système ouvert à plusieurs entrées (i) et sortie (j).....	51
Figure III-2 : Compresseur.....	51
Figure III-3 : Pompe.....	51
Figure III-4 : Turbine.....	52
Figure III-5 : Echangeur de chaleur.....	52
Figure III-6 : le Séparateur.....	53
Figure III-7 : Adsorbeur à tamis moléculaire.....	54
Figure III-8 : Vanne de détente.....	54
Figure III-9 : Colonne de distillation.....	55
Figure III-10 : Schéma de quelques organes de détente de joule – Thomson.....	56
Figure III-11 : Détente de joule Thomson.....	57
Figure III.12.a : Les lignes Isenthalpique dans le diagramme T-P.....	58
Figure III.12.b : Notion du point d'inversion.....	58
Figure IV.1 : Cycle de Linde PED (Process Flow Diagram) pour la liquéfaction de l'Azote.....	75
Figure IV.2 : Diagramme flux de chaleur en fonction de l'Enthalpie.....	77

Sommaire

Sommaire

Liste de figures

Liste des tableaux

Glossaire

Introduction générale

Objectif du thème

Partie théorique

Chapitre I : Les produits de séparation de l'Air et leurs applications

I .1. Introduction.....	4
I .2. Définition.....	4
I .3. Historique de la cryogénie.....	6
I .4. Les propriétés physiques aux basses températures.....	7
I .4.1. Les propriétés des fluides cryogéniques.....	7
I .4.2. Les propriétés des matériaux.....	7
I .4.2.1 Propriétés thermiques :.....	7
a) Capacité thermique massique.....	7
b) Conductivité thermique.....	8
c) Dilatation thermique.....	9
I .4.3. Propriétés mécaniques :.....	9
I .5. Stockage cryogéniques :.....	9
I .6. Domaine d'utilisation de la cryogénie :.....	10
I .7. Importance et utilisation des gaz liquéfiés :.....	11
I .7.1. Obtention des gaz purs :.....	11
I .7.2. Facilité et économie du transport.....	12
I .7.3. Usage des basses températures.....	12
I .8. Application.....	12
I .9. Processus de fonctionnement d'unité de fractionnement d'air.....	13
I .9.1. Aspiration.....	13

Sommaire

I .9.2. Compression.....	13
I .9.3. Pré refroidissement.....	14
I .9.4. Séchage de l'air et élimination de gaz carbonique.....	15
I .9.5. Refroidissement.....	16
I .9.6. Fractionnement d'air (C1/C2).....	17
I .10. Généralités sur l'air.....	19
I .10.1. Composition de l'air.....	19
I .10.2. Points d'ébullition des composants de l'air.....	21
I .10.3. Les principaux composants de l'air et leurs applications.....	22
I .11. Généralités sur les composants de l'air (l'oxygène et azote).....	22
I .11.1. Propriétés physiques & chimiques et utilisations de l'oxygène.....	22
I .11.1. 1. Principales applications de l'Oxygène.....	23
I .11.2. Propriétés et utilisations de L'azote.....	23
a) Propriétés physiques & chimiques.....	24
b) Principales applications de L'azote.....	24
I .12. Utilisation industrielle, Stockage et le transport.....	24
Chapitre II : Séparation cryogénique de l'Air	
II.1. Introduction.....	26
II.2 .Les technologies de séparation de l'air.....	26
II.3. Risques et précautions d'emplois liés à l'utilisation des gaz industriels.....	29
II.3.1. Gaz industriels.....	29
II.3.2 Récipients cryogéniques mobiles.....	29
II.3.3 Les principales propriétés et caractéristiques des gaz sont les suivantes.....	29
II.3.3.1 Gaz asphyxiants inertes.....	29
II.3.3.2 Gaz comburants et Gaz combustibles – inflammables.....	29
II.4 .Précautions générales relatives au risque d'incendie, d'explosion et de toxicité.....	29
II.4.1. Gaz inflammable.....	29

Sommaire

II.4.2 .Gaz toxiques.....	30
II.5 .Risques, précautions générales lies à l'état physique du gaz.....	30
II.5.1 .Gaz plus lourds ou plus légers que l'air.....	30
II.5.2 .Gaz cryogéniques et Gaz liquéfiés.....	30
II.5.2.1 .Gaz cryogéniques.....	30
II.5.2.2 .Gaz liquéfiés.....	31
II.6. Les étapes de base de la séparation cryogénique de l'air.....	31
II.7. Schéma de principe d'une séparation cryogénique de l'air.....	33
II.7.1. Aspiration et compression de l'air ambiant.....	33
II.7.2. Pré-refroidissement avec de l'eau froide.....	33
II.7.3. L'épuration de l'air.....	34
II.7.4. Le refroidissement de l'air.....	34
II.7.5. La liquéfaction de l'air et la production du froid.....	34
II.7.6. La distillation et la séparation.....	34
II.8 .Les différents types de systèmes de liquéfaction.....	35
II.8.1. Cycle de Linde pour la liquéfaction de l'air.....	35
II.8.1.1. Principe et fonctionnement.....	35
II.8.1.2. Diagramme P-V pour cycle de Linde.....	37
II.8.1.3. Diagramme T-S pour cycle de Linde.....	38
II.8.2. Cycle de liquéfaction avec travail extérieur : Cycle de Brayton inverse.....	38
II.8.3. Cycle de Claude pour la liquéfaction.....	39
II.8.3.1. Principe de fonctionnement.....	39
II.8.3.2 .Diagramme T-S pour cycle de Claude.....	40
II.8.4. Techniques générales utilisées pour la distillation.....	41
(a) La colonne de distillation normale.....	41
(b) Double colonne de linde (sans argon).....	41
II.9. Equipements utilisés dans la séparation cryogénique de l'air.....	42

Sommaire

II.9.1 .Compresseurs cryogéniques.....	42
II.9.2. Les échangeurs.....	43
II.9.3. Les régénérateurs.....	43
II.9.4 Machines de détente cryogénique.....	45
a) Le détendeur alternatif.....	45
b) Les turbines à paliers à gaz hydrostatiques ou hydrodynamiques.....	45
II.9.5. Autres composants.....	46
Chapitre III : Modélisation thermodynamique du procédé de séparation de l’Air	
III .1.Introduction.....	47
III .2.Définition générales.....	47
III.2.1. Notion de Système.....	47
III.3.Premier principe de la thermodynamique.....	47
III.3.1.Premier principe de la Thermodynamique pour un système ouvert.....	47
II.4. Bilan énergétique des systèmes ouverts en régime permanent.....	50
III.5.Application pour quelques machines en régime permanent.....	51
III.5.1 Compresseur et pompe.....	51
III.5.2.Turbine.....	52
III.5.3.Echangeur de chaleur.....	52
III.5.4.Le séparateur.....	53
III.5.5.Adsorbeur à tamis moléculaire.....	54
III.5.6.Vanne de détente.....	54
III.5.7.Colonne de distillation.....	55
III.6.Détente de joule Thomson.....	56
III.7.Bilan Enthalpique pour le cycle de Linde.....	58
III.8.Paramètres de performance pour le cycle de linde.....	59
III.8.1.Paramètres de performance d’un système de liquéfaction.....	59
III.8.2.L’effet de l’efficacité de l’échangeur de chaleur sur la performance	

Sommaire

du système.....	60
Chapitre IV : Application au cycle de production des gaz de l'air (Linde)	
IV.1 Bilan énergétique pour un system ouvert en régime permanent.....	62
IV.1.1 Bilan au niveau du Compresseur (C1161 indice du compresseur.....	62
IV.1.2 Bilan au niveau de l'Échangeur (E1121).....	62
IV.1.3 Bilan au niveau du Séparateur (D2431).....	63
IV.1.4 Bilan au niveau de l'Adsorbeur à tamis moléculaire (A2626).....	63
IV.1.5 Bilan au niveau du Compresseur (C1461).....	63
IV.1.6 Bilan au niveau de l'Échangeur (E1421).....	64
IV.1.7 Bilan au niveau du Compresseur (C3461).....	64
IV.1.8 Bilan au niveau de l'Échangeur (E3421).....	65
IV.1.9 Bilan au niveau de l'Échangeur (E3427).....	65
IV.1.10 Bilan au niveau de l'Echangeur principale (E3116).....	66
IV.1.11 Bilan au niveau de la turbine (X3471).....	66
IV.1.12 Bilan au niveau de la vanne de détente.....	67
IV.1.13 Bilan au niveau de la colonne de distillation moyenne pression (T3211).....	68
IV.1.14 Bilan au niveau du la Pompe (P3366).....	68
IV.1.15 Bilan au niveau de l'Echangeur (E3216).....	69
IV.1.16 Bilan au niveau de l'Echangeur (E3316).....	69
IV.1.17 Bilan au niveau de la Vanne de détente.....	70
IV.1.18 Bilan au niveau de la Vanne de détente.....	70
IV.1.19 Bilan au niveau de la Turbine.....	71
IV.1.20 Bilan au niveau de la Colonne de distillation à basse pression (T3212).....	72
IV.2 Application numérique sur les paramètres de performance (cycle de Linde).....	72
IV.2.1 Exemple 1 : liquéfaction de l'air.....	72
IV.2.2 Exemple 2 : la liquéfaction de l'azote.....	73
IV.3 Applications avec le logiciel Aspen-Hysys.....	74

Sommaire

IV.3.1 Introduction.....	74
IV.3.2 Exemple de simulation de l'Azote.....	75
IV.3.2.1. Résultats et discussion.....	76
IV.3.2.2. La variation du flux de chaleur au niveau de l'échangeur E-100.....	76
IV.3.3.Conclusion.....	77

Introduction Générale

Introduction

Introduction

La cryogénie, science et technologie des températures inférieures à 120 K, a entamé son deuxième siècle d'existence elle est le résultat d'une conjonction historique du progrès scientifique (déplacement progressif de la thermodynamique au cours du XIXe siècle, de la théorie macroscopique de l'énergie de J.Joule et S.Carnot, à la mécanique statistique des particules microscopique de L.Boltzman et J.W.Gibbs, et du progrès technologique (poursuite de la liquéfaction des gaz atmosphériques jusque là considérés comme « non condensables », faisant appel aux études des propriétés des substances chimiques pures et de leurs mélanges, les appareils de compression, l'écoulement et les transferts de chaleur des fluides et les techniques d'isolation thermique) [5].

L'histoire de la séparation d'air est connue depuis long temps, à l'échelle de la recherche et au niveau du laboratoire la première liquéfaction de l'air [L. Cailletet et R. Pictet, 1877] et la première séparation de l'oxygène et de l'azote [K. Olszewski et S. Wroblewski, 1883] furent rapidement suivies par la liquéfaction de l'hydrogène, rendue possible par l'invention d'un réservoir isolé sous vide avec écran de rayonnement [J. Dewar, 1898]. Cependant, ce fut la première liquéfaction de l'hélium [H. Kamerlingh Onnes, 1908] qui ouvrit la voie de la recherche sur la matière condensée aux basses températures [5].

En 1895 la première liquéfaction du l'air au monde dans des unités pilotes et aussi leurs première production et commercialisation.

La première usine de séparation de l'air fut naitre en 1904, depuis cette date une série d'évolution a été remarquée jusqu'à en 1984 la plus grande usine de séparation d'air au monde sise à VAROX avec l'ajustement variable de demande de l'oxygène. L'année 1991 la plus grande usine de séparation de l'air du monde avec les colonnes emballées. En 1992 les usines de séparation d'air produisent les méga purs gaz, et 1997 Linde fait une nouvelle et importante étape dans l'histoire de séparation d'air. Quatre trains de génération d'azote sont fournis, chacun d'eux constitue la plus grande usine de séparation d'air jamais construite. Capacité d'azote 1.200 MMSCFD (40.000 t/d).

En 2000 développement d'un condensateur sous forme de bain à multi-étapes.

L'une des principales applications de la cryogénie est la production des gaz industrielles qui sont ; à l'heure actuelle aussi essentielles que l'eau et de l'électricité même dans la vie quotidienne, et une telle nécessité est favorisée par la diversité de leurs provenances (Séparation de l'air, Production chimique, Sources naturelles, Rejets industriels) .

On désigne par Gaz Industriels les gaz présents dans l'air oxygène, azote, argon, xénon, néon, krypton, dioxyde de carbone CO₂, hélium ainsi que l'acétylène et l'hydrogène sans oublier les mélanges de tous ces gaz. Ces derniers sont produits à grande échelle industrielle et deviennent essentiels dans beaucoup de procédés de fabrication de produits de la vie quotidienne.

De larges quantités de produits de l'air avec une grande pureté sont employées dans plusieurs industries, à savoir la production de l'acier, produit de raffinage, les produits chimiques et les

Introduction

semi-conducteurs et aussi dans l'aéronautique, traitement de produits alimentaires, ainsi que l'industrie médicales.

L'air à basses températures (-196°C) devient liquide et ainsi nous pouvons réaliser la distillation de l'air et ses composants. La distillation de l'air est actuellement la technique la plus utilisée pour la production de l'oxygène pur, de l'azote et de l'argon à l'échelle industrielle.

L'avancement technologiques a permis d'améliorer l'efficacité de la productivité des équipements de séparation de l'air.

Parmi les gaz industriels on trouve que l'Oxygène et l'Azote qui prédominent, due à leur vaste et diverses utilisations, dans notre présente étude ont s'intéresse à la production de ces deux gaz à partir de l'air (plus précisément par la liquéfaction de l'air) de l'usine de linde gaz de Regaia et Hassi Messaoud.

Pour ce la notre travail est devisé en quatre partie , La premier partie est consacré pour les produits de s'séparation de l'air et leurs utilisation , La deuxième partie et une étude sur les techniques de s'séparation de l'air ,La troisième partie est une étude thermodynamique et énergétique sur l'installation l'usine de linde gaz , La quatrième partie et consacré au la calcul des bilans énergétiques et l'application dans le logiciel HYSYS ,

En termine par une conclusion générale qui résume l'essentiel de ce travail.

Introduction

Objectif du thème

Parmi les gaz industriels on trouve que l'Oxygène et l'Azote qui prédominent, due à leur vaste et diverse utilisations, dans notre présente étude nous s'intéresse à la production de ces deux gaz par à partir de l'air (plus précisément par la liquéfaction de l'air).

L'objectif de cette étude est :

La recherche des paramètres appliqués sur le cycle de Linde pour la liquéfaction et la séparation de l'air pour obtenir une meilleure performance.

Notre travail aussi vise à décrire le procédé de séparation d'air comprenant l'échange thermique et distillation cryogénique.

Etude et analyse de l'influence de différents paramètres de processus sur l'efficacité de la distillation en utilisant la simulation de la liquéfaction cryogénique de l'air et l'azote par HYSYS.

Chapitre I

Les produits de séparation de l'air et leur application

I.1. Introduction

Le mot cryogénie signifie production de froid glacial, mais aujourd'hui, il est synonyme de basses températures. Sur l'échelle de température, il n'y a pas de distinction claire lorsque la plage de réfrigération ordinaire se termine et que la cryogénie commence. Cependant, le National Bureau of Standards de Boulder (Colorado) considère que la température est inférieure à 123K en tant que température de fonctionnement cryogénique. Cela peut être accepté parce que la température d'ébullition des gaz permanents comme l'hélium (He), l'hydrogène (H), le néon (Ne), etc. sont inférieures à 123K

L'ingénierie cryogénique traite du développement et de l'amélioration des techniques, procédés et équipements à basse température. Il traite de l'utilisation des phénomènes à basse température. En général, le système cryogénique se réfère à un groupe de composants interagissant impliquant une température basse.[1]

Les gaz de l'air, plus communément appelés « gaz industriels » font partie de notre vie quotidienne et concernent toutes les industries. Tout a commencé avec l'électrolyse de l'eau afin d'en extraire l'oxygène pour une utilisation médicale et alors la première clientèle était donc constituée de pharmaciens et cela s'est passé dans les années 1890. Peu de temps après 1895, deux méthodes développées en parallèle par CARLVAN LINDE et GEORGES CLAUDE ont abouti à la production industrielle d'air liquide puis des gaz qui le constitue (d'azote et d'oxygène...). [2]

I.2. Définition

La cryogénie, science et technologie des températures inférieures à 120 K, a entamé son deuxième siècle d'existence elle est le résultat d'une conjonction historique du progrès scientifique (déplacement progressif de la thermodynamique au cours du XIXe siècle, de la théorie macroscopique de l'énergie de J.Joule et S.Carnot, à la mécanique statistique des particules microscopique de L.Boltzman et J.W.Gibbs, et du progrès technologique (poursuite de la liquéfaction des gaz atmosphériques jusque là considérés comme « non condensables », faisant appel aux études des propriétés des substances chimiques pures et de leurs mélanges, les appareils de compression, l'écoulement et les transferts de chaleur des fluides et les techniques d'isolation thermique [3]

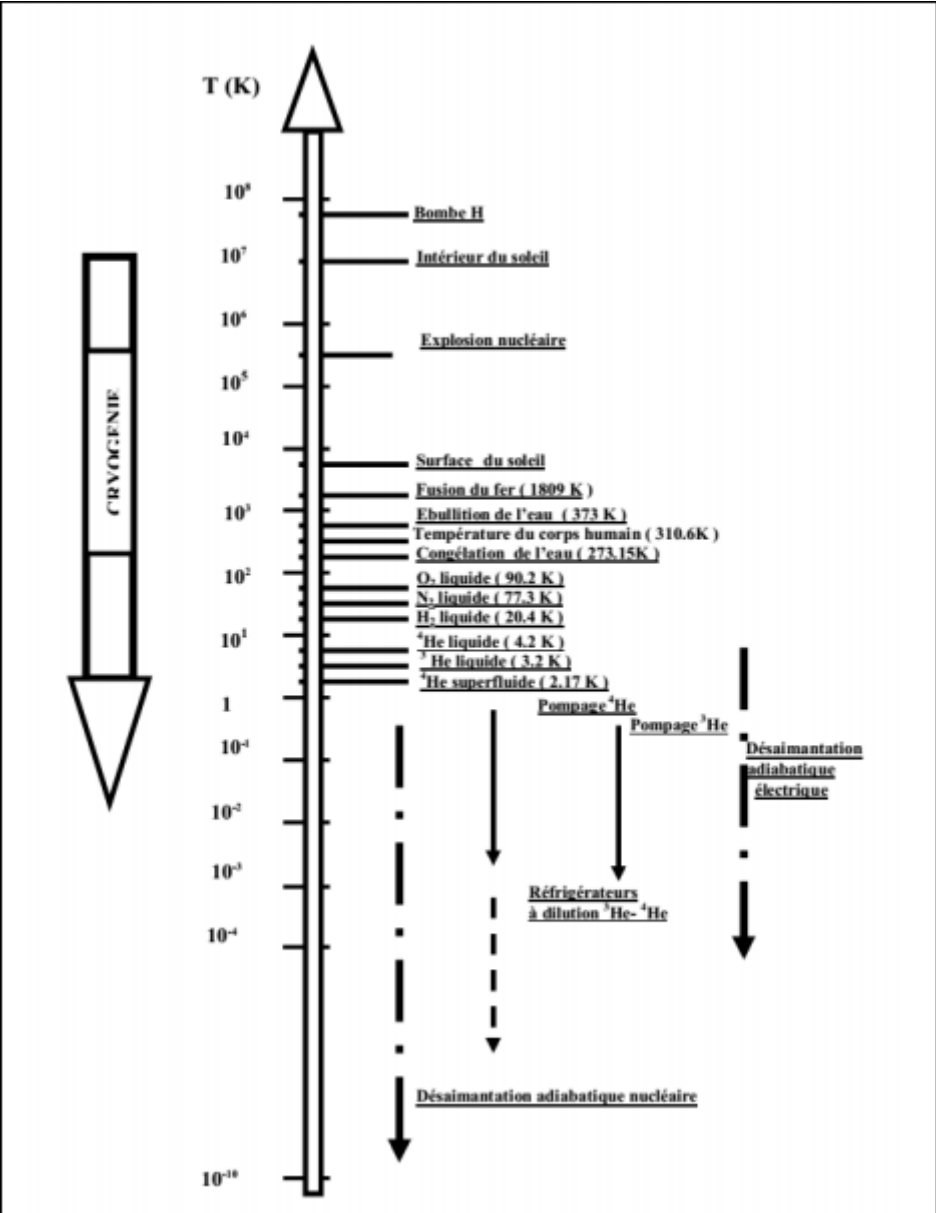


Figure I-1 : Echelle de température thermodynamique

I.3. Historique de la cryogénie

Avoir de très basses températures, c'était l'objectif de grands nombres de chercheurs scientifiques et des 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. En avril 1883, Wroblewski et Olszewski obtinrent de l'azote liquéfié et de l'oxygène au laboratoire de l'Université de Cracovie, en Pologne.

En 1892, Dewar a développé un récipient isolé sous vide pour le stockage de fluide cryogénique. En 1907, Linde a installé la première usine de liquéfaction d'air en Amérique. En 1908, H.Kamerlingh Onnes liquéfie l'hélium. En 1916, la première production commerciale 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. En 1966, un réfrigérateur à dilution utilisant des mélanges He3-He4 a été développé. En 1975, la température de transition super élevée record (23K) a été atteinte pour la première fois.

I.4. Les propriétés physiques aux basses températures

I.4.1. Les propriétés des fluides cryogéniques

Les liquides cryogéniques ont des caractéristiques spécifiques, qui nécessitent une attention toute particulière mais qui offrent également de nouvelles possibilités d'utilisation. Au vu de leurs faibles températures critiques et de leurs pressions critiques modérées, les cryogènes sont souvent utilisés dans le domaine supercritique ; avec une transition continue de la phase liquide à la phase gazeuse et une divergence de certaines propriétés thermodynamiques au point critique. [4]

I.4.2. Les propriétés des matériaux

Les techniques de réalisation des matériaux cryogéniques et la préparation d'ensembles expérimentaux aux basses températures mettent en œuvre des matériaux très variés : Matériaux isolants, conducteurs, voire surproducteurs électriques, Matériaux de structure

I.4.2.1 Propriétés thermiques :

Les Propriétés thermiques sont associées aux vibrations des atomes autour de leur position d'équilibre, aux mouvements des électrons, etc. L'amplitude des vibrations diminue avec la température. D'autres effets peuvent aussi contribuer aux propriétés thermiques (caractéristiques magnétiques, état supraconducteur, etc.)

a) Capacité thermique massique: la Capacité thermique massique d'un matériaux peut être considérée comme la somme de plusieurs contributions (contribution associée au réseau cristallin, cristaux isolants, contribution associée aux électrons libres c'est le cas des métaux conducteurs), telle que : $C = \sum_i C_i(T) = C_{ph} + C_e$

C_{ph} : la capacité thermique massique associée au réseau cristallin en fonction de la température de DEBYE. A basse température, elle varie comme le cube de la température [5]

$$C_{ph} = \beta.T^3$$

Avec T : température absolue

$$\beta = \frac{12.\pi^4.R}{5.\theta_D^3}$$

Où R : Constante universelle des gaz parfaits.

θ_D : Température de Debye qui est une caractéristique des matériaux et qui est

obtenue généralement par voie expérimentale, son expression théorique est donnée par :

$$\theta_D = \frac{h.v}{\sigma} \left(\frac{3.N}{3.\pi.V} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Où

h : Constante de PLANCK,

σ : Constante de STEFAN –BOLTZMANN.

v : Vitesse du son dans le solide.

N/V : nombre d'atomes par unité de volume du solide.

b) Conductivité thermique:

On définit deux conductivités thermiques :

K_{ph} : la Conductivité thermique du réseau.

K_e : la Conductivité électronique.

Et la Conductivité thermique peut être représentée par la somme des deux contributions

$$K = K_{ph} + K_e$$

Avec :

$$K_{ph} = \frac{1}{3} . C_{ph} . V . L_{ph} . \rho$$

V : vitesse du son dans le solide.

ρ : Masse volumique

L_{ph} : libre parcours moyen des phonons

A basse température ($T \ll \theta_D$), V, ρ et L_{ph} peuvent être considérés comme constants et

$$K_{ph} / T^3 = cte$$

ET

$$K_e = \left(\frac{1}{3} \right) C_e . V_F . L_e . \rho = \pi^2 . n . K_B^2 . T . (\tau / 3 . m_e)$$

m_e : Masse de l'électron.

n : nombre d'électrons libre par unité de volume.

V_F : la vitesse de fermi

L_e : le parcours moyen des électrons

τ : Temps moyen de diffusion ($\tau = L_e / V_F$)

A basse température $\tau = \text{cte}$, donc $K_e \propto T$

c) Dilatation thermique :

A basse température, l'existence de contraintes thermiques différentielles peut être la source d'efforts mécaniques pouvant entraîner des ruptures d'assemblage.

Le coefficient de dilatation linéaire α est défini par :

$$\alpha = \frac{1}{L} \left(\frac{dL}{dT} \right)$$

D'après la définition de α , on peut en déduire la variation de longueur relative

$$\Delta L / L = \int_n^{T_f} \alpha(T) dT$$

A haute température, cette variation est proportionnelle à T , par contre à basse température, elle est proportionnelle à T^4

I.4.3. Propriétés mécaniques :

Lorsqu'on construit une « structure » cryogénique, il est essentiel de prendre en compte les propriétés mécaniques des matériaux utilisés à la température de fonctionnement.

La plupart des matériaux ductiles à température ordinaire deviennent fragiles à basse température.

Le comportement aux basses températures des différents métaux et alliages dépend de leur structure cristalline. Parmi les systèmes cubiques à face centrées (C.F.C) on peut citer le cuivre, nickel et ses alliages, l'aluminium et ses alliages, les aciers inoxydables (série 300), l'argent, le plomb, le laiton, L'or, le platine, en général ils restent ductiles jusqu'aux très basses températures.

I.5. Stockage cryogéniques :

Les liquides sont stockés dans les réservoirs cryogéniques à basse pression suivant la température du produit. Ils sont installés tout près de leur unité de Production et sont dotés de pompe pour remplissage des citernes cryogéniques.

Les réservoirs de stockage sont disposés en face d'un espace pour permettre aux camions citernes de faire les manœuvres nécessaires pour être en position idéale de remplissage, et Près de la mer pour de faciliter le processus de pompage du produit dans les navires.

➤ **Les réservoirs adaptés au stockage cryogénique :**

Les réservoirs cryogéniques utilisés pour stocker les fluides cryogéniques, appelés quelque fois cryostats, sont des systèmes à double paroi métallique avec une isolation au sein de cette double paroi.

Cependant une grande attention doit être portée au design du réservoir afin d'assurer la protection contre tout échange possible de chaleur, et empêcher ainsi l'évaporation de d'azote (phénomène de « boil-off »). Ce phénomène ne peut être évité, mais seulement minimisé.[6]

➤ **Isolation des réservoirs de Stockage :**

L'isolation thermique des vases ou réservoirs de stockage est d'autant plus importante que L'enthalpie de vaporisation des fluides cryogéniques est faible. Pour isoler les réservoirs cryogéniques, on dispose d'un nombre important de matériaux isolants.

La conductivité thermique du matériau étant un facteur prépondérant ainsi que d'autres Critères doivent aussi être examinés pour le choix d'un isolant : la facilité de mise en œuvre, la durée de vie, la fiabilité de l'isolation réalisée, le prix, l'inflammabilité, la masse, les caractéristiques mécanique, les caractéristiques physiques, etc. [6]

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

De très nombreuses branches d'activité scientifiques et techniques utilisent actuellement la cryogénie

- les sciences physiques étudient des phénomènes spécifiques des basses température sou 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.

I.7. Importance et utilisation des gaz liquéfiés :

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

- obtention de gaz purs à partir d'un mélange de gaz.
- facilité et économie de transport des gaz.
- usage des basses températures.

I.7.1. Obtention des gaz purs :

Le but initial de la liquéfaction des gaz était la séparation des mélanges gazeux et l'obtention de gaz pur.

Les travaux des premiers chercheurs s'appliquaient à la séparation des fractions gazeuses de L'industrie chimique, par ailleurs, ils cherchaient également à séparer les composants de l'air (Oxygène, azote, gaz rares).

- L'importance de gaz pur :
- Lois d'ébullition des fluides purs

- Sous une même pression, le liquide pur commence toujours à bouillir à la même température.
- Pendant toute la durée de l'ébullition, la température reste constante si la pression reste constante.

- Lois de condensation des fluides purs

- Sous une même pression, la vapeur commence toujours à se condenser à la même température.
- Pendant toute la durée de la condensation, la température reste constante si la pression reste constante.

I.7.2. Facilité et économie du transport :

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

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

I.7.3. Usage des basses températures

Sous certaines conditions, la plupart des gaz ont des températures de condensation inférieures à la température ambiante et même inférieures à 0°.

Les gaz liquéfiés peuvent donc se trouver à de basses températures et les applications y sont nombreuses. Outre l'utilisation des gaz liquéfiés pour les besoins de la réfrigération et de la climatisation, leur usage est également important dans l'industrie et dans les laboratoires de recherche où on a besoin d'effectuer des opérations et des expériences diverses à très basse température.

I.8. Application :

Parmi les importantes applications industrielles de la cryogénie, on trouve à grande échelle la production d'oxygène et d'azote à partir de l'air.

L'oxygène peut être utilisé de différentes façons ; par exemple, dans les moteurs des fusées, dans les chalumeaux à couper et à souder et dans le soufflage des fourneaux. L'azote concerne la fabrication de l'ammoniac des engrais et il est utilisé dans le conditionnement des aliments congelés.

La cryogénie a aussi rendu possible le transport commercial des gaz naturels liquéfiés. Les appareils à infrarouge, les lasers peuvent également employer les températures cryogéniques.

La chirurgie cryogénique ou la cryochirurgie est utilisée dans le traitement de la maladie de PARKINSON, aussi il est employé pour détruire des tumeurs du Cerveau et pour inhiber le développement du cancer cervical.

I.9. Processus de fonctionnement d'unité de fractionnement d'air :

Dans l'installation de fractionnement d'air de l'usine d'El-hadjar, les différents constituants de l'air sont séparés par un procédé physique – on parle aussi de distillation/rectification à basse température – ce qui permet d'obtenir de l'azote, de l'oxygène et de l'argon de haute pureté sous forme liquide et gazeuse. Le système de production est assuré par différentes installations on prend comme

exemple la COX₃ puisque elle produise les trois produits O₂, N₂, Ar dont on essayera de décrire et d'expliquer les différentes étapes de fonctionnement :

- Aspiration de l'air / Filtre.
- Compresseur d'air.
- Refroidissement d'air par processus/ Tamis moléculaire.
- Echangeur de chaleur.
- Colonne de séparation N₂/O₂.
- Colonne de séparation Ar.
- Compresseur en circuit.
- Cuve de stockage azote.
- Cuve de stockage oxygène.
- Cuve de stockage argon.

I.9.1. Aspiration :

L'air aspiré de l'atmosphère à travers une cheminée mise en contact avec de l'atmosphère est pré purifié avec deux filtres; filtre à rouleau retient toutes les particules solides d'une dimension supérieure à 5 microns, et un filtre à poches pour éliminer les plus fines particules.

I.9.2. Compression :

Après avoir été filtré l'air est comprimé à (5.1 à 5.3bar et à 80°C) dans un turbocompresseur centrifuge à cinq étages (TC1), entre chaque étage un réfrigérant à eau est installé dont le but d'abaisser la température d'air sortant de chaque étage, le rôle de celle-ci est d'aspirer et comprimer de façon poly tropique et puis refouler l'air.

L'air sortant de compresseur sera acheminé vers la colonne de lavage pour baisser sa température au but de favoriser l'adsorption au niveau de l'adsorbent (R01, R02) .

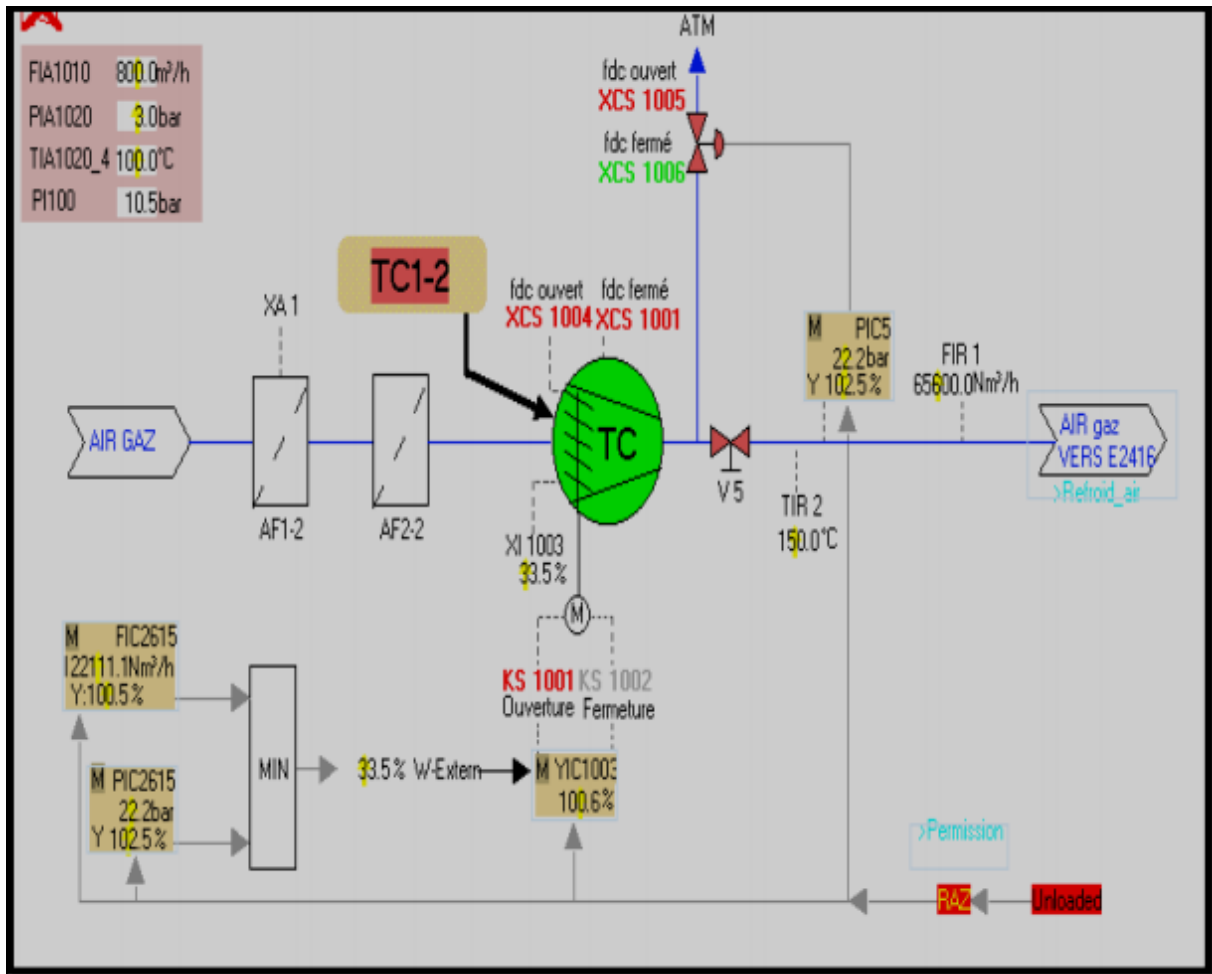


Figure I.2 : Turbocompresseur de la centrale à oxygène.

Compresseurs centrifuges : les compresseurs centrifuges sont utilisés lorsque la demande est relativement constante et élevée (entre 7.000 Nm³/h et 35.000 Nm³/h), ils sont refroidis par l'eau et sont équipés de 2,3 ou 4 étages de compression, l'air délivré est de qualité car les compresseurs sont exempts d'huile.

I.9.3. Pré refroidissement :

L'air comprimé est pré refroidi dans une tour de lavage (E2416) par de l'eau refroidi par l'azote impure (E2417) ; l'eau de refroidissement est injectée dans la colonne sous une pression de 10 bars afin d'éviter l'entraînement de l'eau dans l'air, un système est monté à la sortie de l'air assurant l'arrêt des dernières gouttelettes d'eau contenues dans l'air sortant.

Ensuite l'air sortant à 19°C entre dans une colonne à tamis moléculaire pour être débarrassé des impuretés qu'il contient (dioxyde de carbone, vapeur d'eau et hydrocarbures).

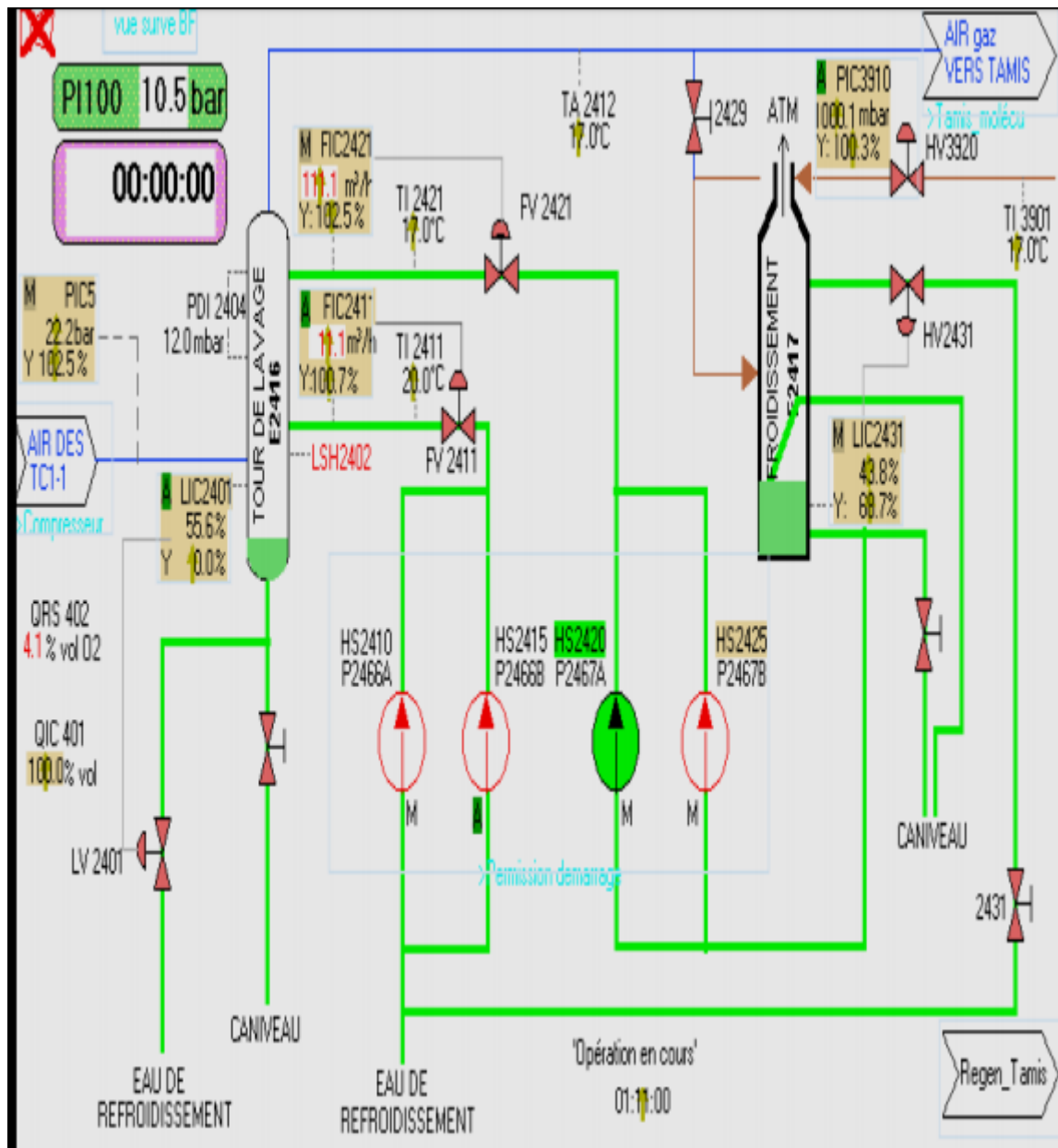


Figure I.3 : Colonne de lavage et de refroidissement de la centrale à oxygène.

I.9.4. Séchage de l'air et élimination de gaz carbonique :

l'air ambiante n'est pas pur, il est nécessaire de le purifier afin d'éviter la formation de bouchons de neige carbonique et de glace lors de refroidissement, d'autre part, l'oxygène réagit chimiquement à la présence des hydrocarbures (risque d'explosion), on réalise un premier niveau d'épuration avec des filtres, une seconde étape avoir lieu par un tamis moléculaire d'alumine et zéolite, pour accélérer l'opération deux tamis fonctionnent en alternance. L'air saturé en eau après avoir passé par la tour de lavage, pénètre à présent dans l'un des deux adsorbants à tamis moléculaires, l'humidité, CO₂ et les HC sont adsorbés dans les tamis. [7]

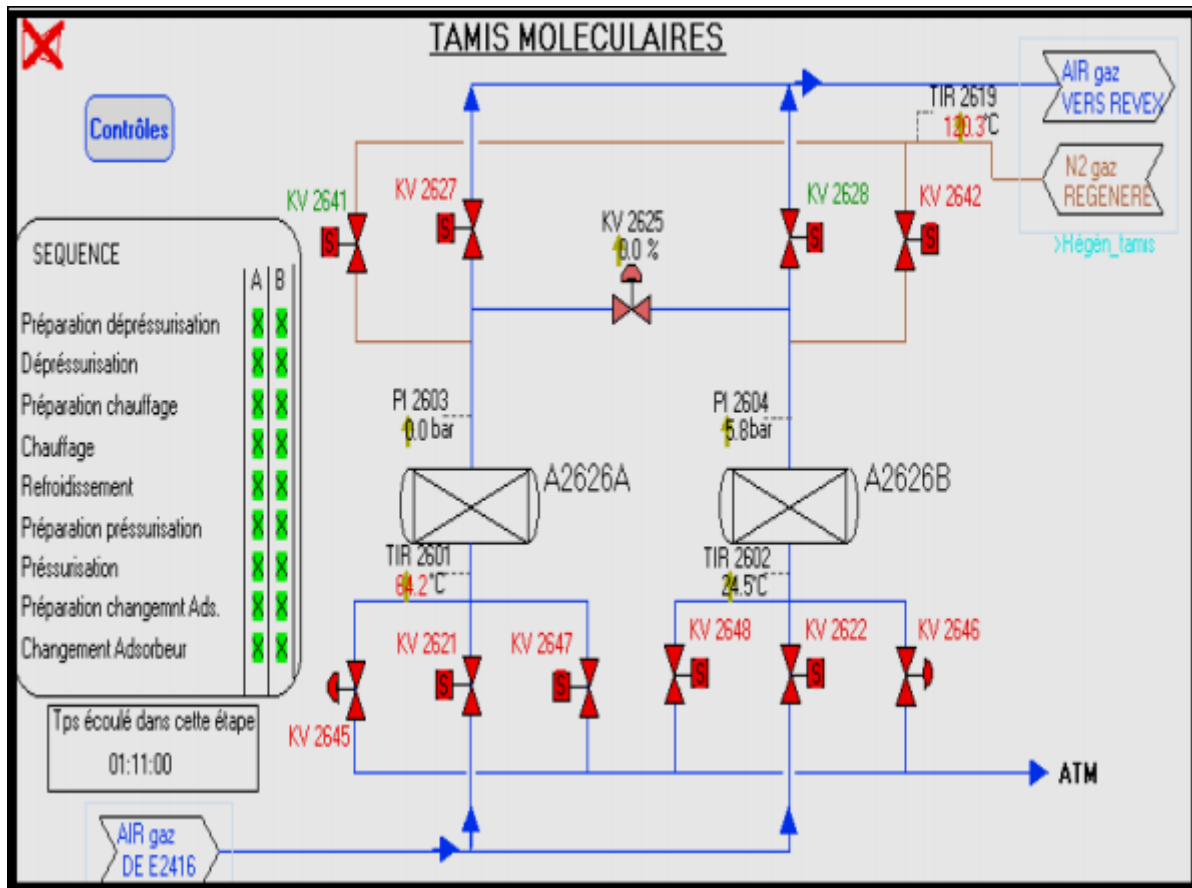


Figure I.4 : schéma des tamis moléculaires

I.9.5. Refroidissement :

L'air est refroidi jusqu'à -160 °C dans un échangeur de chaleur (revex), par des produit gazeux déjà froid, qui viennent de la boîte froide (C1/C2). Le refroidissement se poursuit dans une turbine d'expansion (T1/2) où la température de l'air s'abaisse jusqu'à une valeur de -190 °C et se liquéfie alors partiellement.

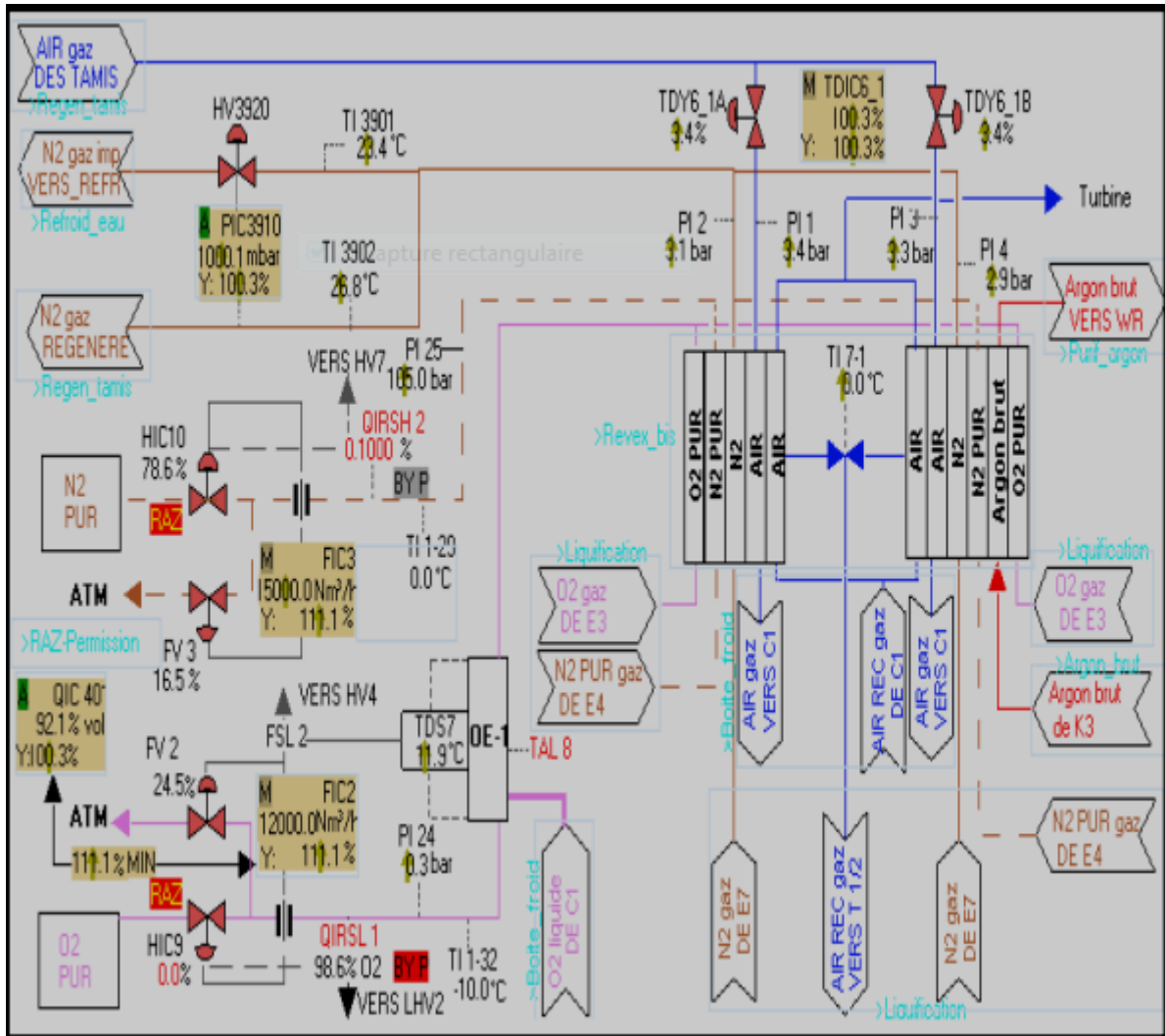


Figure I.5 : schéma des échangeurs de chaleur réversibles de la centrale

I.9.6. Fractionnement d'air (C1/C2):

Pour fractionner l'air liquéfié, on met à profit le fait que ses constituants ont des points d'ébullition différents. Le principe du procédé est comparable à celui de la distillation de l'alcool. Comme les températures d'ébullition des composants de l'air sont relativement proches (oxygène: $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$, azote: $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$), la séparation doit avoir lieu en plusieurs étapes dans des colonnes de distillation. Celles-ci contiennent des tamis et des garnissages dont la structure assure une grande surface de contact. Pendant le déplacement à contre-courant, le gaz ascendant s'enrichit en azote et le liquide qui ruisselle vers le bas en oxygène et en argon. Dans la colonne de séparation de l'argon, l'argon est séparé de l'oxygène restant.

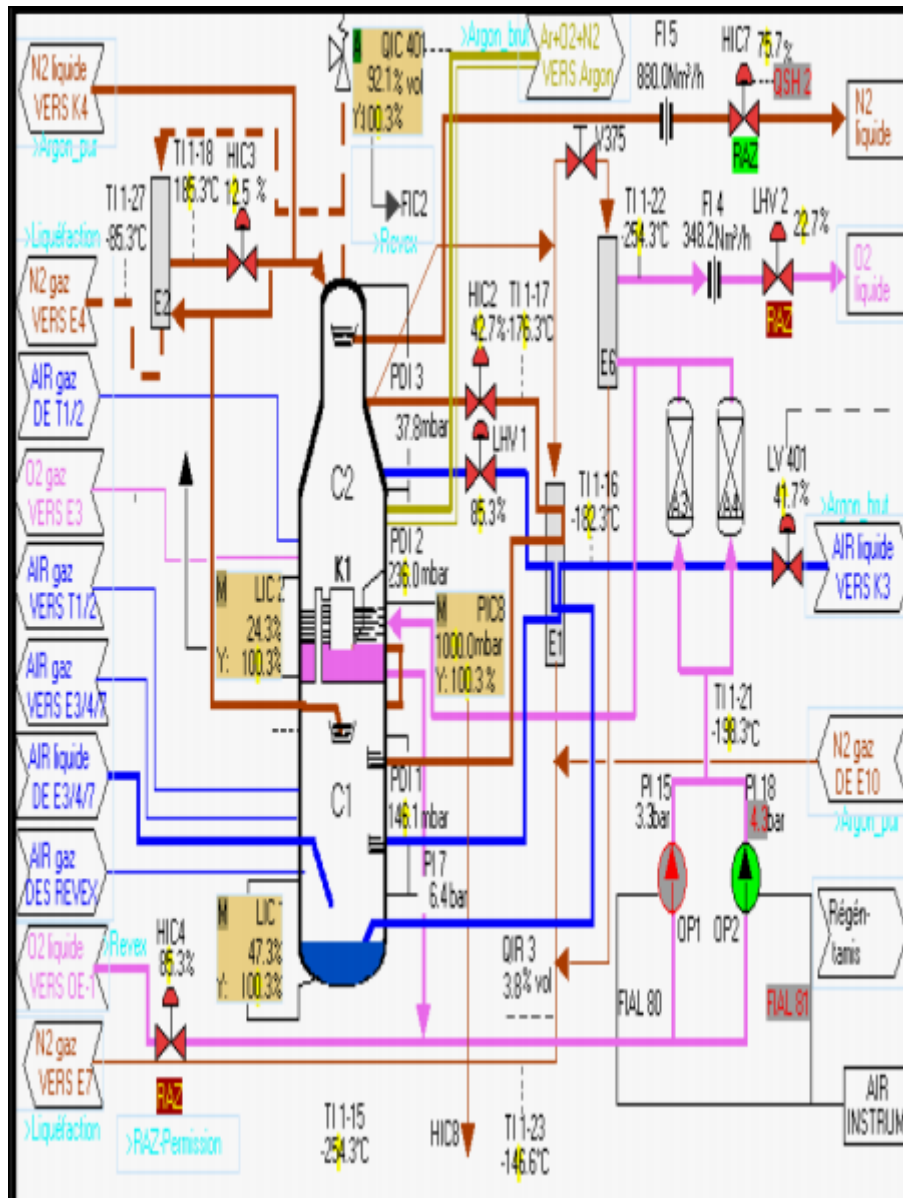


Figure I.6 : Emplacement de la double colonne (C1, C2)

Les gaz sont prélevés dans les colonnes de séparation et conservés dans des cuves de stockage en vue de leur utilisation ultérieure. L'azote est prélevé directement sous forme gazeuse pendant le processus et acheminé par pipeline chez les clients implantés à proximité.



Figure I.7 : les cigares de stockage des O₂ et N₂ gaz

I .10. Généralités sur l'air

Le terme « air » désigne le fluide gazeux parfait, incolore, inodore et invisible qui constitue l'atmosphère terrestre. On l'associe plus généralement à la troposphère, la couche de l'atmosphère de la Terre la plus proche de la surface du globe .En contact direct avec cette dernière, l'air est donc sensible à l'évaporation des océans, à la photosynthèse ou encore aux activités humaines.

I .10.1. Composition de l'air

Ces proportions -- même si la concentration de l'air diminue avec l'altitude -- sont identiques quel que soit le lieu et jusqu'à une altitude de 100 kilomètres. Au-delà, il n'y a pas quasiment plus d'air.

L'air est un mélange de plusieurs gaz, constitué, en volume, de :

- 21 % de dioxygène
- 78 % de diazote
- moins de 1 % d'autres gaz dont :
 - les gaz rares principalement de l'argon 0,93 %, mais aussi du néon 0,0018 % (18 ppmv), du krypton 0,00012 % (1,1 ppmv), du xénon 0,00009 % (0,9 ppmv),
 - le dioxyde de carbone 0,0400 % (400 ppmv),
 - le méthane 0,000172 % (1,72 ppmv).

La plupart du temps, l'air de l'environnement terrestre est humide car il contient de la vapeur d'eau. Au voisinage du sol, la quantité de vapeur d'eau est très variable. Elle dépend des conditions climatiques, et en particulier de la température. La pression partielle de vapeur d'eau dans l'air est limitée par sa pression de vapeur saturante qui varie fortement avec la température :

Température de l'air	-10 °C	0 °C	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C
% de vapeur d'eau	0 à 0,2 %	0 à 0,6 %	0 à 1,2 %	0 à 2,4 %	0 à 4,2 %	0 à 7,6 %
Pour une pression d'air de 1 013 hPa						

Tableau I-1 : % de vapeur d'eau Pour une pression d'air de 1 013 hPa dans Température de l'air

Nom	Formule	Proportion
Argon	Ar	0,934 %mol ¹
Diazote	N ₂	78,08 %mol ¹
Dihydrogène	H ₂	0,5 ppmv ¹
Dioxyde d'azote	NO ₂	0,02 ppmv ¹
Dioxyde de carbone	CO ₂	0,04 %mol (400 ppmv)
Dioxygène	O ₂	20,95 %mol ¹
Hélium	He	5,24 ppmv ¹

Krypton	Kr	1,14 ppmv1
Méthane	CH ₄	1,7 ppmv
Monoxyde d'azote	NO	5 ppmv1
Néon	Ne	18,18 ppmv1
Ozone	O ₃	0-0,01 ppmv1
Protoxyde d'azote	N ₂ O	0,5 ppmv1
Radon	Rn	6,0×10 ⁻¹⁴ ppmv1
Xénon	Xe	0,087 ppmv1

Tableau I-2 : d'autres gaz



Figure I-8: composition de l'air.

I.10.2. Points d'ébullition des composants de l'air

Sont données dans la figure I-2, ces points d'ébullition sont mesurés à la pression atmosphérique et il faut noter que les points d'ébullition changent de pression. La balance de Kelvin est zéro, au point zéro absolu, qui est la plus basse température qui peut exister dans l'univers. Degrés zéro de Kelvin = -273,15°C. 7.

Les unités de Kelvin sont employées couramment dans la science et la technologie cryogéniques car elles sont beaucoup plus pratiques. On peut voir beaucoup plus facilement qui est le plus froid ou le plus chaud, par exemple le point d'ébullition de l'Azote liquide est plus froid que le Argon liquide, qui est plus froid que l'oxygène liquide.

Les différences des points d'ébullition ont l'influence essentielle sur la séparation des liquides par distillation.

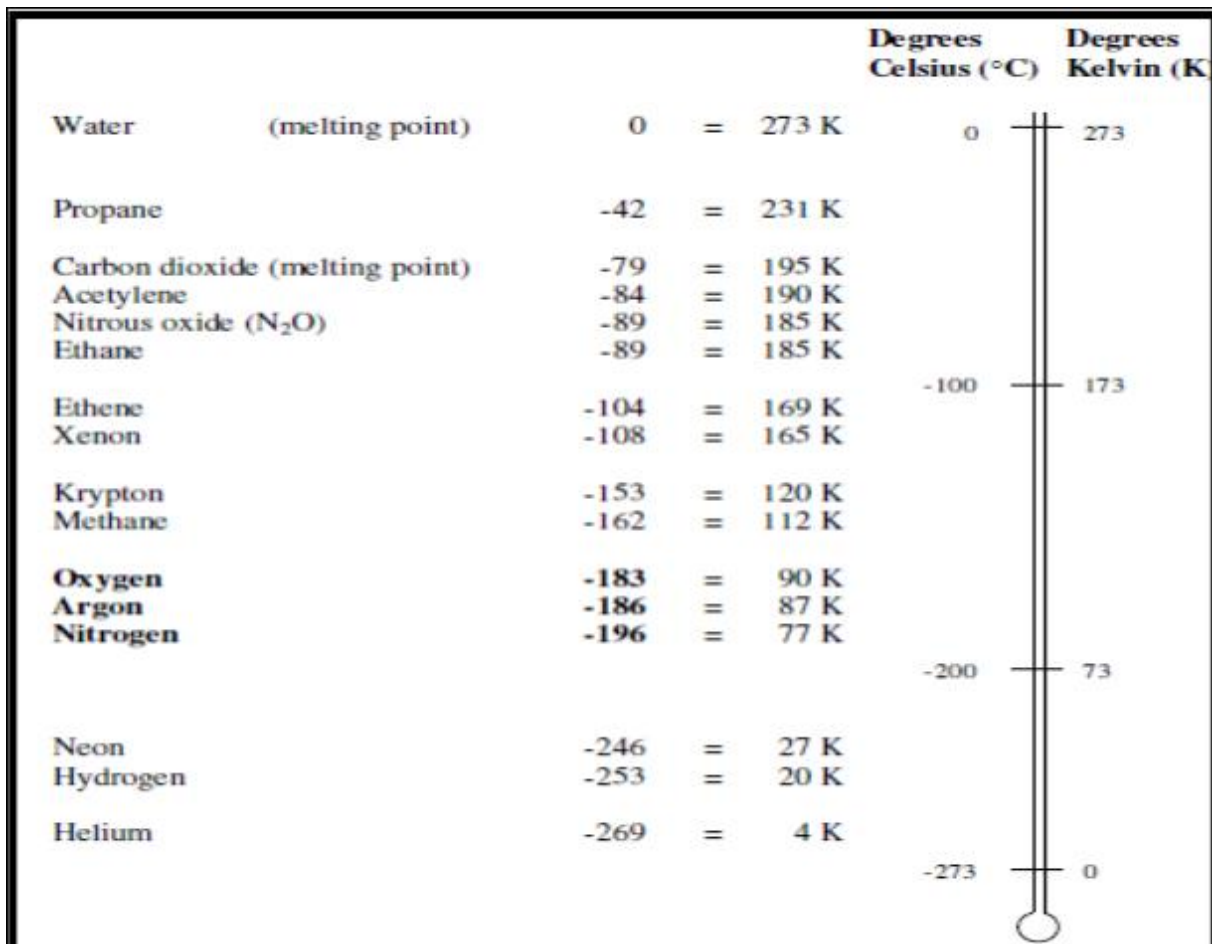


Figure I-9 : Points d'ébullition des gaz de l'air

I.10.3. Les principaux composants de l'air et leurs applications [3]

Les composants majeurs dans l'air sont l'azote, l'oxygène l'argon avec un pourcentage de 78% et 21% et 0.9% successivement, on va définir leurs propriétés ainsi que leurs utilisations ci après.

I.11. Généralités sur les composants de l'air (l'oxygène et azote) [2]

Comme nous avons vu, les deux composants les plus dominants sont l'Oxygène et l'Azote, nous allons détailler ci-après leurs propriétés ainsi que leurs applications.

I.11.1. Propriétés physiques & chimiques et utilisations de l'oxygène

C'est un gaz dans les conditions normales, incolore, sans saveur, indispensable à la vie et qui réagit vivement en présence d'autre corps chimiques, sa formule chimique O_2 , Numéro atomique $Z = 8$ et sa Masse molaire est 31.9987 g / mole. Point d'ébullition : - 183 °C, Point de congélation : - 219 °C. L'oxygène intervient dans la plupart des procédés industriels dans lesquels des combustions ou réactions chimiques jouent un rôle, depuis le recuit d'acier jusqu'au traitement d'eau Il est principalement utilisé en :

- 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 d'efficace et aussi d'augmenter la capacité des bassins pendant les expansions.
- Dans le domaine biologique : mélange à d'autre gaz, il sert à la réalisation d'atmosphère respirable.

Extraction : Séparation d'air

Ressources : 20,9 % dans l'air ; 50,5 % dans l'ensemble de l'atmosphère, l'hydrosphère, la biosphère et la lithosphère Plus de la moitié, à savoir précisément 50,5 % des parties de notre planète accessibles à l'homme, sont composés d'oxygène. C'est le pourcentage de cet élément dans l'atmosphère, l'hydrosphère (les eaux) et la lithosphère jusqu'à une profondeur de 16 kilomètres.

I .11.1. 1.Principales applications de l'Oxygène

La circulation sanguine, dans notre corps, absorbe l'oxygène de l'air dans nos poumons pour alimenter les cellules. Les fournisseurs de soins de santé emploient l'oxygène médical pour des patients dans la chirurgie et pour ceux qui ont des difficultés respiratoires. L'oxygène médical joue un rôle important en tant que gaz respirable.

L'oxygène favorise la combustion, ainsi il aide les fabricants d'économiser l'énergie de montagne et réduisent l'émission des gaz tels que l'anhydride carbonique, l'oxyde d'azote ou l'oxyde de soufre.

I .11.2. Propriétés et utilisations de L'azote :

L'azote est un gaz dans les conditions ordinaires 15 °c et 760 mmHg. L'azote est un gaz incolore, sans odeur et sans saveur. C'est le composant principal de l'air (78.08 % en volume) A la pression atmosphérique, pour des températures à - 196°C ; c'est un liquide incolore, un peu plus léger que l'eau.

L'azote ne peut entraîner ni la respiration, ni la combustion, mais joue un rôle essentiel en tant qu'élément de la matière. C'est un gaz ininflammable.

L'azote est livré soit gazeux sous pression dans des bouteilles, soit liquide à basse température sous sa propre pression de vapeur saturante.

Son nom allemand (Stickstoff = matière étouffante) vient du fait qu'il est capable d'étouffer aussi bien des flammes que tout être vivant. Le nom scientifique Nitrogenium est dérivé du mot grec « nitros » qui veut dire nitrate de potassium, molécule à partir de laquelle l'azote était extrait avant l'invention de la séparation d'air.

c) Propriétés physiques & chimiques :

- Formule chimique N_2
- Numéro atomique $Z=7$
- Masse molaire 28.0134 g / mole

Point d'ébullition : $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, Point de congélation : $-210\text{ }^{\circ}\text{C}$

En condensant, l'azote moléculaire neutre à l'odeur et au goût devient un liquide incolore. Il est extrêmement peu réactif, ne se dissout pratiquement pas dans l'eau et est ininflammable.

Ressource:

Présent à environ 78 % en volume, l'azote est le composant le plus important de l'air, sa fraction massique par rapport à la lithosphère est de 0,03 %. 99 pour cent de l'azote de la terre se trouvent dans l'air. La plupart des plantes consomment de l'azote à partir de composés présents dans les terres arables. C'est pourquoi, plus de 80 pour cent de la production d'azote mondiale (environ 40 millions tonnes par an) sont utilisés uniquement pour la fabrication d'engrais chimique.

Extraction : Séparation d'air.

d) Principales applications de L'azote

L'azote est un composant essentiel des aminoacides et, en tant que tel, un élément de base de toute forme de vie. Sans cet élément dont le symbole chimique est N, il n'y aurait pas de métabolisme, pas de protéines et pas d'ADN, ni pour les plantes ni pour les animaux ou les hommes. L'azote représente presque 2 kg du poids d'un adulte de 70 kg.

De l'azote pur est entre autres utilisé pour gonfler les pneus des avions de sorte que les roues ne prennent pas feu lors du décollage et de l'atterrissage suite au fort développement de chaleur. L'azote fait aussi fonction de gaz propulseur, un gaz de protection (exemple l'emballage de produits alimentaires).

L'azote liquide est utilisé en cryogénie comme moyen de refroidissement, par exemple pour stocker des produits alimentaires ou pour la surgélation rapide.

I.12. Utilisation industrielle, Stockage et le transport

L'oxygène généralement se trouve soit comme gaz à haute pression soit comme un liquide froid. Souvent le stockage des grandes quantités de l'oxygène se fait en forme liquide, parce qu'il occupe beaucoup moins d'espace, et selon la quantité à utiliser sera le moyen du stockage dans les cylindres ou des tubes à haute pression.

Le stockage et la manipulation des cylindres de gaz comprimé sont régît par les normes industrielles.



Figure I-10 : les moyens de stockage et de transport des liquides cryogéniques.

Chapitre II
Séparation cryogénique de l'Air

II.1. Introduction

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

Même si elle est en compétition avec des procédés de séparation non cryogéniques, la liquéfaction des gaz est sans pareil lorsque la purification est critique ou difficile, par exemple pour la séparation et la récupération du tritium, ou lorsque le produit final doit être conservé à une densité maximale (stockage, transport et l'utilisation à l'état liquide) [1]

Les liquides cryogéniques sont des gaz liquéfiés conservés à l'état liquide à basse température. Le terme « cryogénique » signifie « produisant du froid » ou « en rapport avec les basses températures »; tous les liquides cryogéniques sont extrêmement froids. Les points d'ébullition des liquides cryogéniques sont inférieurs à -150 °C (-238 °F) (le gaz carbonique et l'oxyde nitreux, qui ont cependant des points d'ébullition légèrement plus élevés, sont parfois classés dans cette catégorie). Tous les liquides cryogéniques sont des gaz aux températures et pressions normales. Il faut les refroidir sous la température ambiante avant de pouvoir les liquéfier par compression. Les divers gaz cryogéniques se liquéfient dans différentes conditions de température et de pression, mais tous ont les deux propriétés suivantes : ils sont extrêmement froids et de petites quantités de liquide peuvent occuper de très grands volumes en passant à l'état gazeux.

II.2 .Les technologies de séparation de l'air

L'air est séparé pour la production de l'oxygène, de l'azote, de l'argon et dans certain cas spéciaux d'autres gaz rares (krypton, xénon, hélium, néon) par la distillation cryogénique d'air.

Les usines de séparation d'air sont conçues pour produire de l'oxygène, et de l'azote par le processus de la compression, du refroidissement, de la liquéfaction et de la distillation de l'air. Les produits peuvent être fabriqués en forme gazeuse pour l'approvisionnement en canalisation (pipelines) ou en tant que liquide cryogénique pour le stockage et la distribution au près des sites d'utilisation par des camions citernes.

Un des plus grands producteurs des usines de séparation d'air est la compagnie Linde, elle a construit approximativement 2800 usines cryogéniques de séparation d'air dans plus de 80 pays et elle domine le marché mondial de fabrications des usines de séparation de l'air. [2]

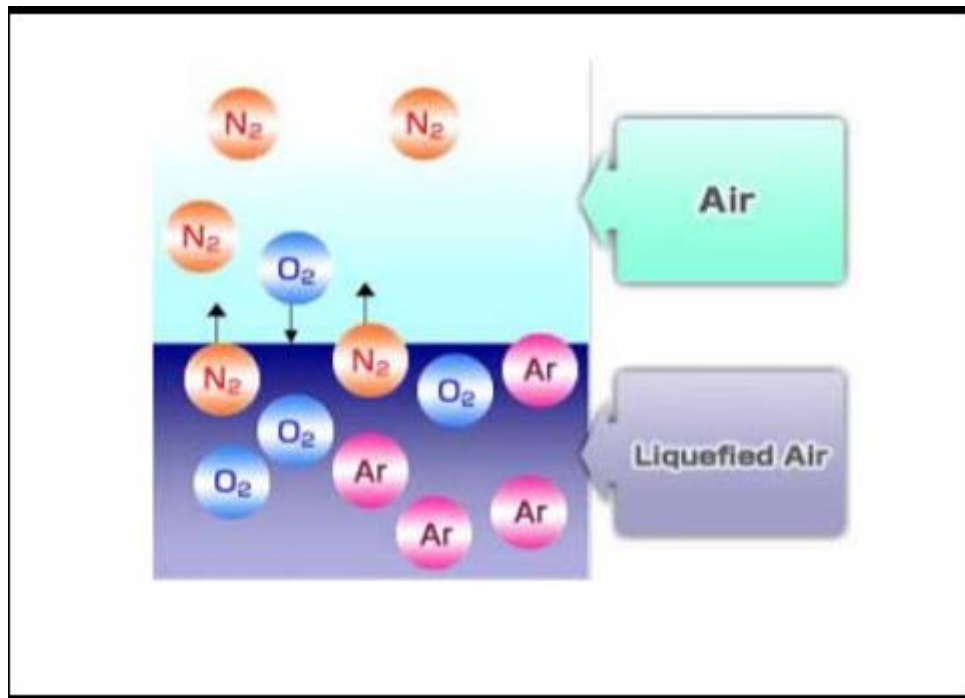


Figure II-1: Schéma de séparation de l'air.

L'air peut être séparé dans ses composants au moyen de distillation dans les unités spéciales. Les usines dites celle de fractionnement ou de séparation de l'air utilisent un processus thermique connu sous le nom de rectification cryogénique pour séparer les différents composants les uns des autres afin de produire l'azote et l'oxygène de haute pureté sous forme liquide et gazeuse.

Les différentes technologies de séparation de l'air qui ont été développées sont :

- la séparation cryogénique
- la séparation par membrane
- la séparation par adsorption
- et autres

Ces différentes technologies s'appliquent selon les différentes conditions sur la quantité et la pureté des produits. [2]

La figure II.2 montre la grille de choix de processus de fabrication de l'oxygène.

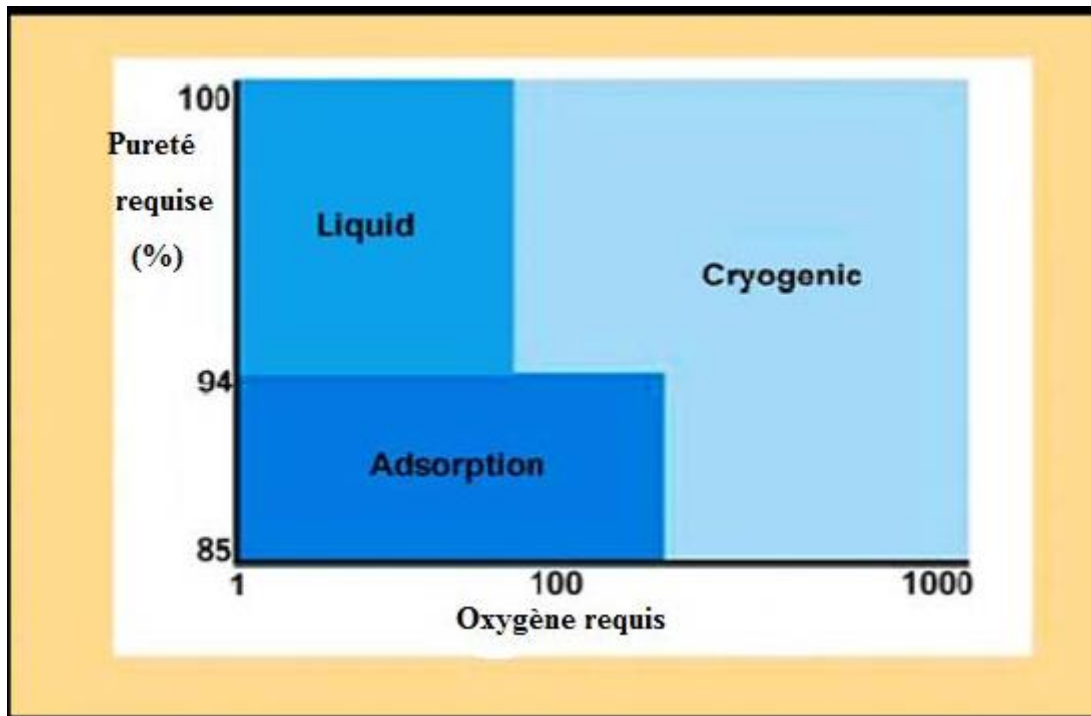


Figure II-2 : La grille de sélection des procédés de production d'Oxygène. [2]

Un graphique semblable décrivant les gammes pour lesquelles les différents procédés appliqués pour la production de l'azote, voir **figure II.3**

Les méthodes telles que la séparation par membrane sont également disponibles mais elles sont actuellement moins employées que les autres qui sont dominantes.

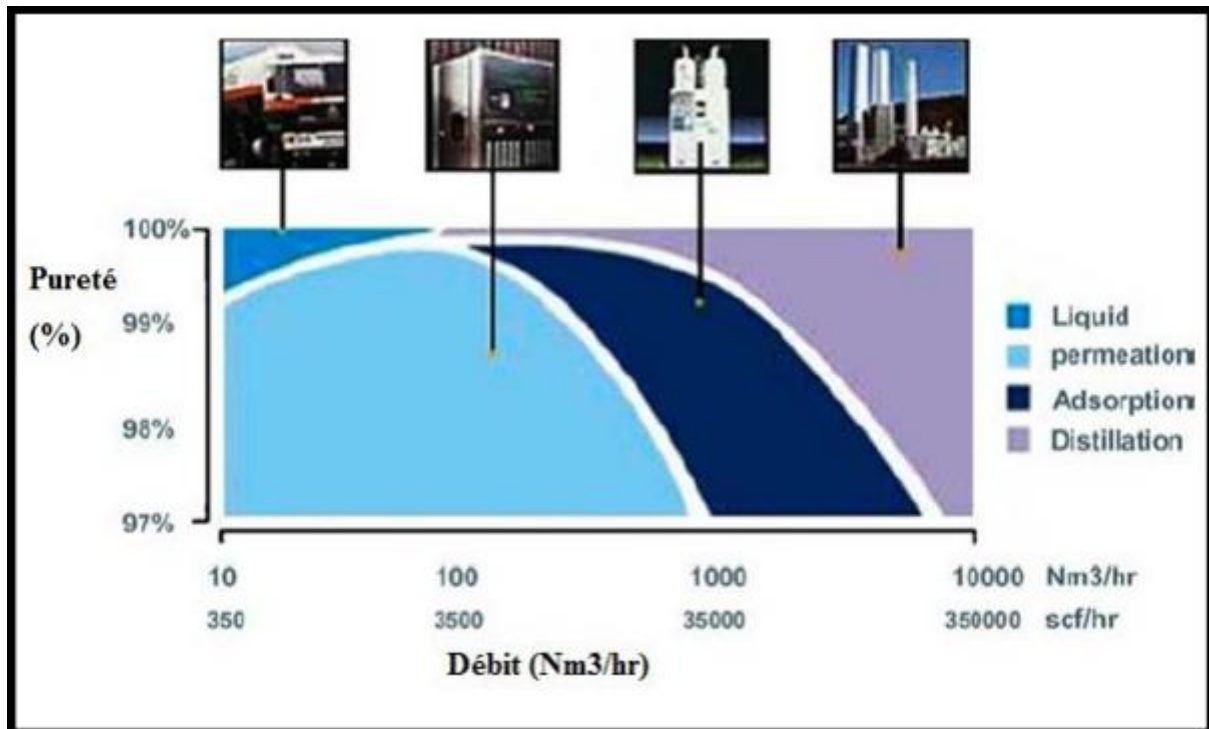


Figure II-3 : la grille de sélection des procédés de production d'Azote. [2]

Les méthodes telles que la séparation par membrane sont également disponibles mais elles sont actuellement moins employées que les autres qui sont dominantes.

II.3. Risques et précautions d'emplois liés à l'utilisation des gaz industriels

II.3.1. Gaz industriels :

Les gaz industriels sont des produits qui se présentent sous des états physiques particuliers : gaz comprimé sous pression (oxygène, air,...), gaz liquéfié sous pression (protoxyde d'azote, dioxyde de carbone,...) gaz liquéfié réfrigéré (oxygène liquide, azote liquide, ...). Ils sont disponibles soit sous forme de récipients mobiles (bouteilles notamment) lourds, réutilisables et de maniement complexe, soit sous forme de centrales d'approvisionnement avec réseau de canalisations et prises murales.

II.3.2 Récipients cryogéniques mobiles:

Les récipients cryogéniques mobiles contiennent un gaz à l'état liquide et qui est soutiré à l'état liquide. Il s'agit le plus souvent de petits récipients portables d'oxygène liquide, essentiellement utilisés par les patients en oxygénothérapie à domicile. Dans les établissements de santé, il existe aussi des récipients de gaz liquides, azote liquide par exemple, dont on utilise les très basses températures en cryochirurgie / cryothérapie, ou pour la conservation d'organes (récipients dits Dewar). Les récipients cryogéniques d'azote liquide, auto-pressurisés ou à pression atmosphérique, ont le statut de dispositif médical.

II.3.3 Les principales propriétés et caractéristiques des gaz sont les suivantes :

- gaz asphyxiants, inertes et non inertes gaz combustible ou inflammable.
- gaz comburant ou oxydant.
- gaz toxique, gaz corrosif, gaz cryogénique, gaz liquéfié, gaz sous pression.

Les risques, avec les précautions générales à prendre et la conduite à tenir en cas d'incident, sont listés selon qu'ils sont liés à la nature du gaz, à **son** état physique, au stockage, au transport, à la manutention et aux conditions d'utilisation.

II.4 .Précautions générales relatives au risque d'incendie, d'explosion et de toxicité :

II.4.1. Gaz inflammable :

• Si l'aération du local de stockage est indispensable, la propreté du lieu de stockage est nécessaire pour réduire les risques d'inflammation. Aucune substance inflammable ne doit être présente. Toute source de feu est à prohiber : moteur, étincelles, circuit électrique, cigarette, flamme nue, et fumer à proximité est interdit.

- La température du local ne doit pas excéder 50°C.
- Des appareils de lutte contre l'incendie sont présents et en bon état de fonctionnement. Ils sont à vérifier périodiquement.

II.4.2 .Gaz toxiques :

Les gaz toxiques, au sens de la réglementation sur les matières dangereuses, tels que le monoxyde de carbone et le chlore utilisés dans les laboratoires. Ils nécessitent des précautions très particulières notamment en raison des risques de fuite.

II.5 .Risques, précautions générales liés à l'état physique du gaz :

Selon la quantité de gaz introduite dans les récipients qui les contiennent, la température interne et l'isolation, les gaz se présentent soit à l'état gazeux, soit à l'état liquide. On distingue ainsi les gaz cryogéniques, les gaz liquéfiés et les gaz comprimés selon les termes standards de la Pharmacopée européenne. La réglementation du transport des matières dangereuses par route (ADR) distingue respectivement les gaz liquéfiés réfrigérés, les gaz liquéfiés sous pression et les gaz comprimés). La plupart des gaz sont incolores et inodores. Par conséquent, ni une odeur particulière ni des vapeurs colorées ne permettent d'identifier un gaz et de signaler sa présence dans l'air ambiant.

II.5.1 .Gaz plus lourds ou plus légers que l'air :

Un gaz plus lourd que l'air aura tendance à descendre et à rester au sol, et en l'absence d'aération, à s'accumuler sans se diluer dans l'air. Ainsi, le protoxyde d'azote, le dioxyde de carbone, et l'argon sont responsables d'un risque d'asphyxie dans les sous-sols mal aérés ou les locaux confinés. Les vapeurs gazeuses provenant de l'évaporation de gaz cryogéniques par fuites ou déversement accidentel (oxygène et azote liquide par exemple) sont très denses, car

à très basses températures, et elles forment, par condensation de l'humidité atmosphérique, un brouillard blanc situé audessus du niveau du sol,

s'étendant rapidement et pouvant s'introduire dans tout point bas. Les gaz plus légers que l'air, par exemple l'hydrogène, l'hélium, le gaz naturel, auront tendance à se concentrer au niveau du plafond d'où un risque d'asphyxie par déplacement de l'oxygène dans les locaux bas de plafond, voire à occuper tout le volume des locaux en cas de vaporisation massive de gaz cryogénique.

II.5.2 .Gaz cryogéniques et Gaz liquéfiés :

II.5.2.1 .Gaz cryogéniques :

Les gaz cryogéniques sont à l'état de liquides à très basse température, et sont contenus dans des récipients dits cryogéniques, parfois mobiles. Le risque des gaz cryogéniques est multiple pour le manipulateur :

- risque de brûlures (ou de gelures) par le froid en cas de déversement ou de projection de liquide.

- risque d'éclatement du récipient par surpression en cas d'obturation du dispositif de mise à l'air libre ou de l'évent avec projection d'éclats du récipient et du liquide cryogénique.

- risques liés à la nature du gaz en cas de vaporisation massive, - risque de fragilisation et de bris des matériaux non adaptés au contact avec l'azote liquide.

=> **Cas particulier de l'oxygène liquide** : En s'évaporant à température ambiante, l'oxygène liquide peut augmenter de plusieurs centaines de fois son volume. Le dégagement peut se produire lors des transferts et il sera d'autant plus important en cas de renversement accidentel. Du fait de son pouvoir comburant, le risque est celui d'une inflammation des vêtements ou de toute autre matière inflammable à la moindre étincelle (interrupteur,...), d'où un risque de brûlures en cas d'inflammation ou d'incendie.

=> **Cas particulier de l'azote liquide** : En s'évaporant à température ambiante, l'azote liquide peut augmenter de plusieurs centaines de fois son volume. Le dégagement peut se produire lors des transferts et il sera d'autant plus important en cas de renversement accidentel. Du fait de son caractère inerte, il y a un risque d'asphyxie, notamment dans les sous-sols mal aérés ou dans les locaux confinés.

II.5.2.2 .Gaz liquéfiés :

Les gaz liquéfiés sont à l'état liquide à température ambiante et sous pression. La phase liquide est surmontée d'une phase gazeuse elle-même sous pression. Ils sont généralement conditionnés en bouteilles identiques à celles des gaz sous pression. Lors de l'utilisation, le soutirage du liquide entraîne une évaporation instantanée avec un refroidissement intense. Le risque de brûlures (ou des gelures) par le froid peut se produire en cas de projection de liquide lors de l'ouverture du robinet. Ce risque est aggravé si la bouteille est couchée ou si elle est équipée d'un tube plongeur.

II.8.1. Les étapes de base de la séparation cryogénique de l'air

La figure II.4 montre les étapes de base de la séparation cryogénique d'air. Les étapes de base de cette technologie sont décrites comme : [2]



Compression d'air : De l'air ambiant est absorbé, filtré et comprimé approximativement à 5-6 bar par un compresseur.



Pré-refroidissement de l'air : Dans un premier temps, l'air comprimé est pré-refrigéré avec de l'eau généralement jusqu'à une température ambiante.



Purification d'air : des impuretés telles que la vapeur d'eau et l'anhydride carbonique sont alors enlevées de l'air par les tamis moléculaires.



Refroidissement d'air : puisque les gaz qui composent l'air sont liquéfiés à très basses températures, l'air épuré est refroidi dans l'échangeur de chaleur principal



Séparation d'air : La séparation d'air dans l'oxygène pur et l'azote pur est effectuée dans deux colonnes, les colonnes à moyenne et basse pression. La différence des points d'ébullition des constituants de l'air est exploitée pour réaliser la séparation. L'oxygène devient liquide à -183°C et l'azote à -196°C .



Retrait et stockage : L'oxygène et l'azote gazeux sont introduits dans des canalisations pour transport aux utilisateurs. En forme liquide, l'oxygène, l'azote sont stockés dans les réservoirs et transportés aux clients par des camions-citernes [2]

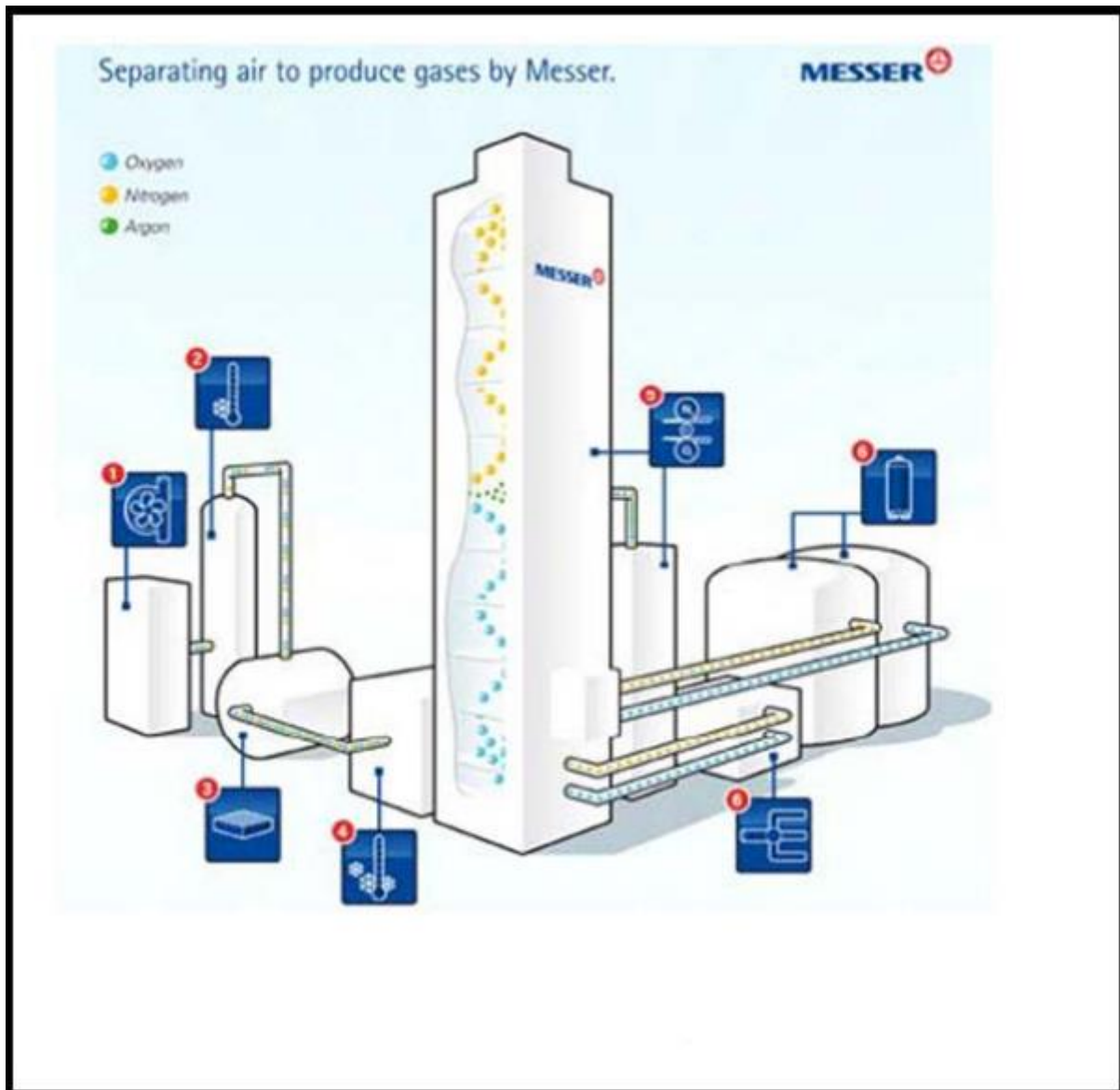


Figure II-4 : les étapes de bases de séparation cryogénique de l'air

II.8.2. Schéma de principe d'une séparation cryogénique de l'air . [2]

Le procédé de la séparation de l'air comporte les opérations suivantes : [3]

- la compression
- l'épuration
- le refroidissement
- la liquéfaction
- la distillation

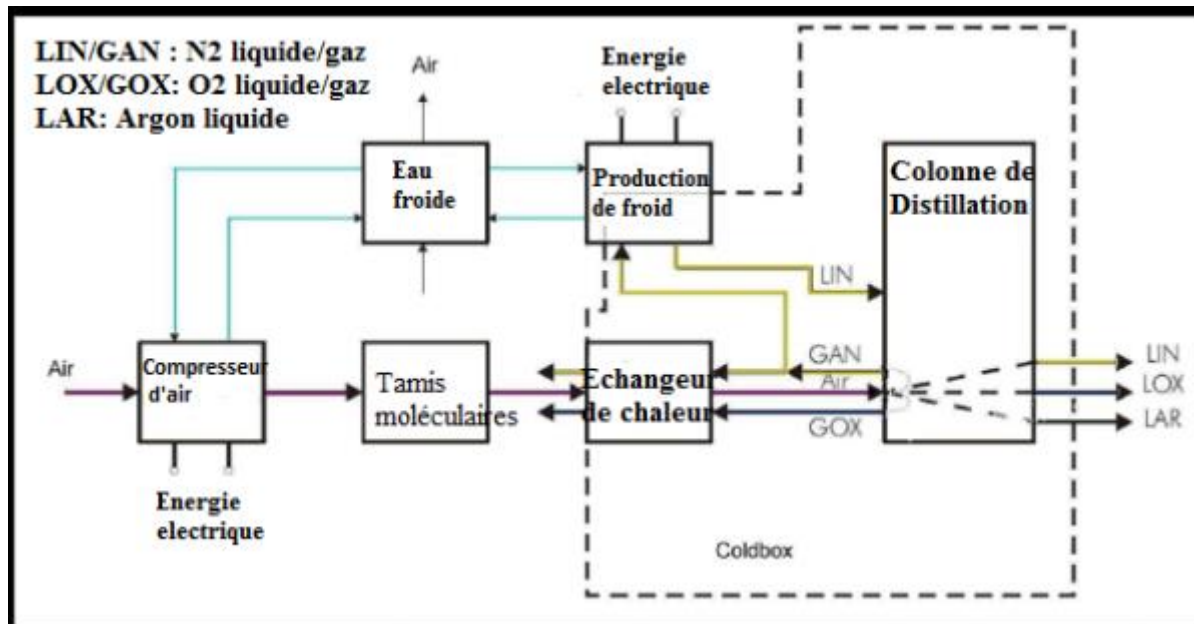


Figure II-5 Fonctionnement du processus principal d'une séparation cryogénique de l'air . [2]

II.8.2.1. Aspiration et compression de l'air ambiant

La première étape à n'importe quelle usine de séparation cryogénique de l'air est la filtration et la compression de l'air. C'est l'une des parties les plus importantes de l'installation ; l'air est aspiré grâce à un turbocompresseur avec le filtre (généralement avant la compression, un premier niveau de filtration est réalisé grâce à des filtres retenant les particules de plus de 2 μ tels que les poussières).

II.8.2.2. Pré-refroidissement avec de l'eau froide

Après la filtration, l'air comprimé est pré-refroidie pour atteindre la température approximativement ambiante par le passage dans les échangeurs de chaleur refroidis à l'eau ou l'air refroidi. Dans certains cas il est refroidi dans un système de réfrigération mécanique à une température beaucoup plus basse. Ceci mène à une meilleure élimination d'impureté, et également une minimisation de puissance d'énergie, causant moins de variation dans la performance d'usine due aux changements de la température atmosphérique de façon saisonnière.

II.8.2.3. L'épuration de l'air

L'air ambiant contient d'autres contaminants (humidité, dioxyde de carbone, hydrocarbures, et autres...), qui doivent toujours être 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 contaminant 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. C'est pour ces raisons une seconde étape aura lieu, l'air est filtré par un tamis moléculaire 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.

II.8.2.4. Le refroidissement de l'air

La troisième étape dans la séparation cryogénique d'air est le transfert de la chaleur additionnelle (refroidissement de l'air), il se fait dans des échangeurs de chaleur à contre courant, dans l'échangeur de chaleur l'air est refroidi près du point de condensation par les gaz séparés froids, qui viennent de la colonne de distillation. Si un convenablement et assez grand échangeur de chaleur est employé les gaz froids peuvent être chauffés à une température juste sous de celle de d'air entrant, de sorte que les pertes froides deviennent acceptables.

II.8.2.5. La liquéfaction de l'air et la production du froid

Une partie de l'air est liquéfiée dans la ligne d'échange, la production de froid nécessaire est obtenue par détente avec travail extérieur dans une turbine ou pour les faibles débits, dans un détendeur à piston, cette détente est toujours limitée aux conditions thermodynamiques qui évitent l'apparition du liquide.

La production des produits liquides exige le froid et d'ailleurs les pertes froides se produisent par isolation d'équipement et dans l'échangeur de chaleur. Ce froid est produit dans un cycle

continu (réutilisation) en comprimant, en refroidissant et par expansion de l'azote à son état liquide. C'est une réutilisation par ce que le gaz qui ne se condense pas est réchauffé et est alimenté de nouveau au compresseur encore.

II.8.2.6. La distillation et la séparation

Les gaz froids sont alimentés par l'échangeur de chaleur et sont chauffés vers le haut tandis que les liquides sont introduits dans le réservoir.

Cette étape comporte l'utilisation des colonnes de distillation pour séparer l'air dans les produits désirés. Par exemple, le système de distillation pour l'oxygène a des colonnes de « haute » et « basse » pression.

Pour effectuer la séparation, il faut porter l'air à la température de rosée ou le point de condensation (au niveau de l'échangeur) grâce à une récupération du froid des gaz sortant des colonnes de distillation.

II.9 .Les différents types de systèmes de liquéfaction

Pour les gaz dont la température critique est inférieure a la température ambiante les premier essais de liquéfaction furent réalisés par Cailletet (France) et Pietet (Suisse) en 1877. en 1895, Linde réussit à fabriquer pour premier fois de grandes quantités d'air liquide. La machine de Linde sera perfectionnée par Claude en 1905. Ces machines utilisent des cycles à détente

On peut distinguer trois grandes familles de procédés thermodynamiques cryogénique ($T < 125K$)

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

II.9.1. Cycle de Linde pour la liquéfaction de l'air

II.9.1.1. Principe et fonctionnement

A la fin du 1800's, Karl Von Linde en Allemagne était le premier qui a commencé la production industrielle des gaz d'air. Son invention comme nous avons vu était la double colonne et le procédé qui porte son nom pour la liquéfaction de l'air.

Voir la figure II-6 le processus de Linde pour l'air liquide. [2]

Il a utilisé un compresseur à une pression de 200 bar, un échangeur de chaleur, une valve d'expansion et un réservoir de collection pour l'air liquide.

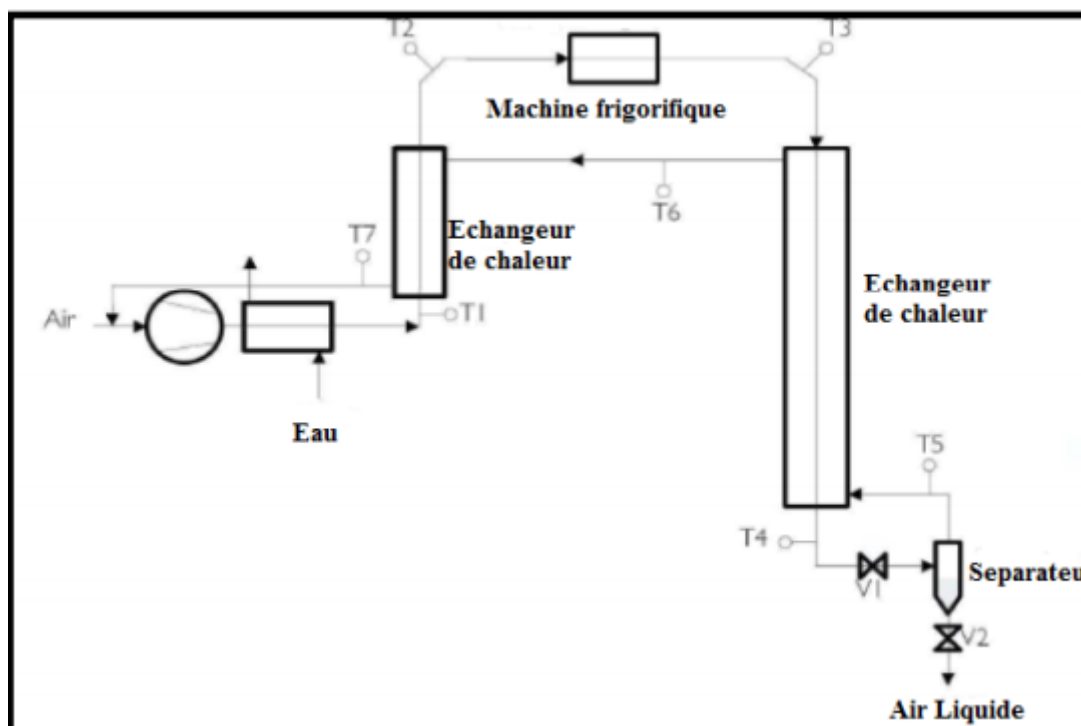


Figure II-6 : procédé du Linde pour l'air liquide. [2]

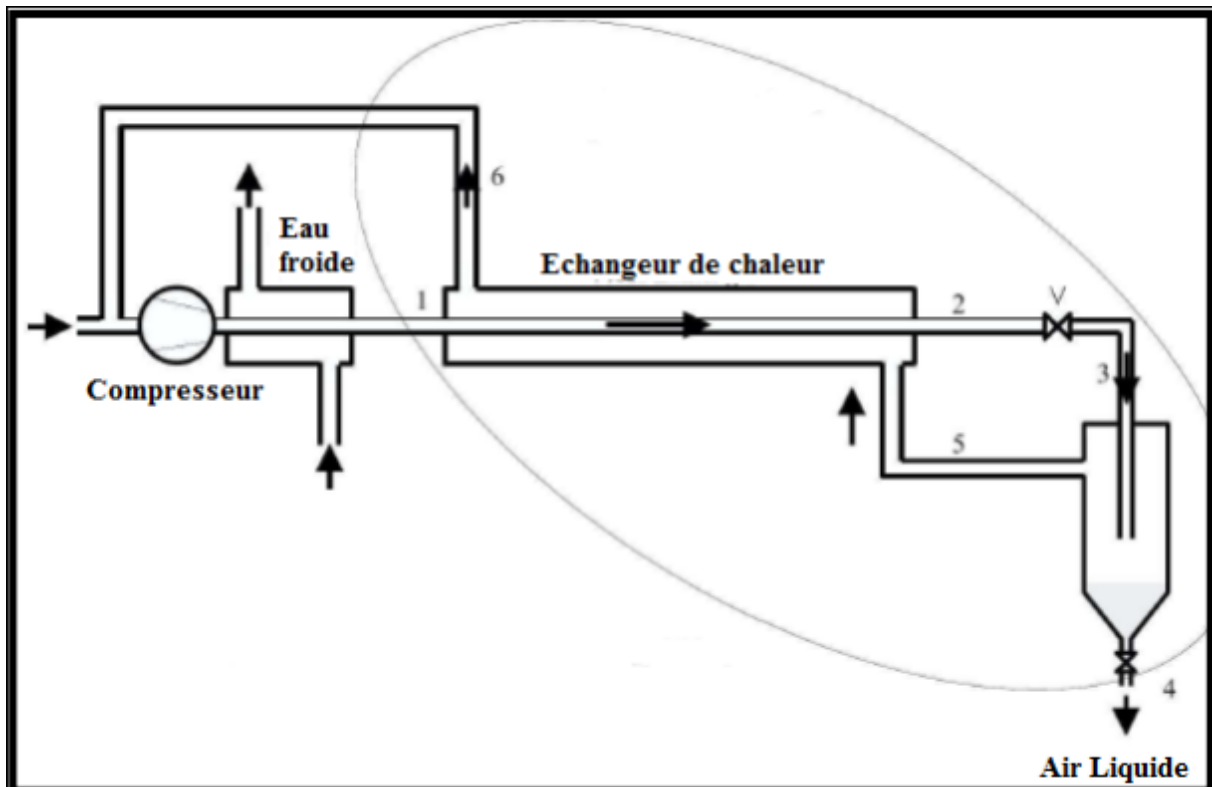


Figure II-7 : production de froid à l'aide d'une valve d'expansion. [2]

Ce cycle comporte un refroidissement préliminaire permettant d'abaisser la température du gaz sous la température d'inversion de Joule-Thomson. Cette température reste néanmoins supérieure à la température critique et ne permet donc pas la liquéfaction du gaz.

Le gaz est ensuite détendu selon le processus de Joule-Thomson permettant d'atteindre une température inférieure à la température critique.

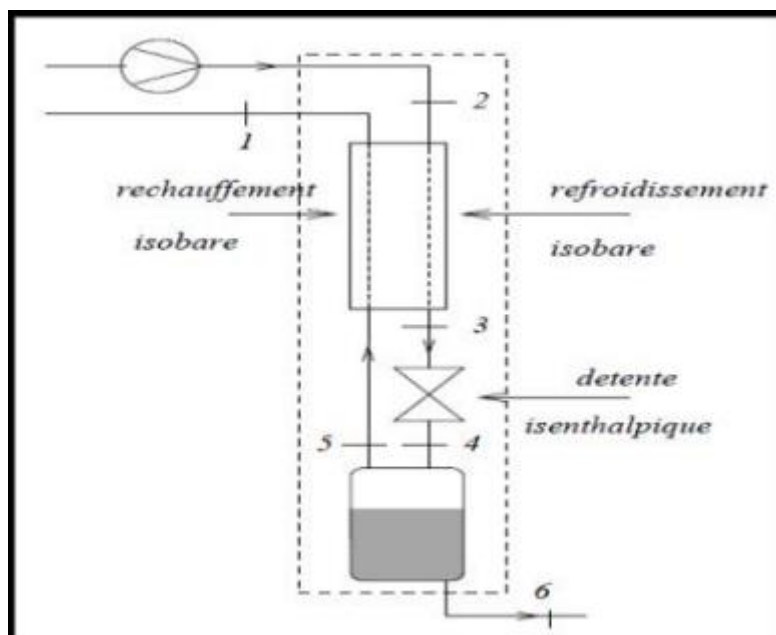


Figure II-8 : Cycle du Linde

II.9.1.2. Diagramme P-V pour cycle de Linde

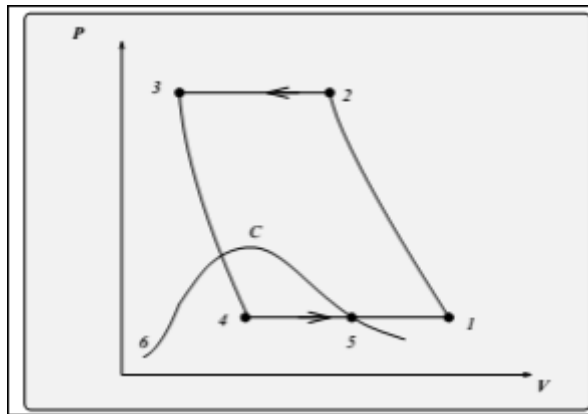


Figure II-9 : Cycle de Linde : diagramme T-S

II.9.1.3. Diagramme T-S pour cycle de Linde

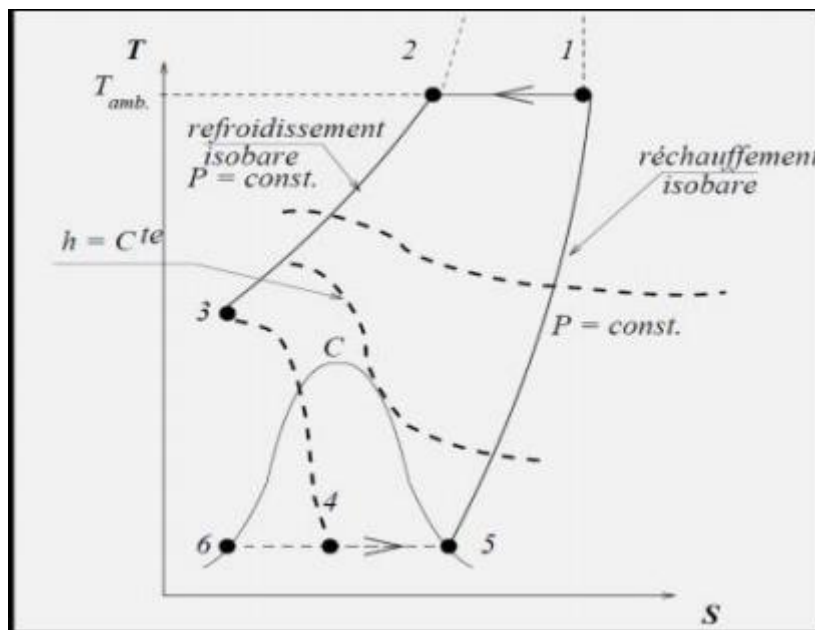


Figure II-10 : Cycle de Linde : diagramme T-S

1==>2 : compression isotherme

3==>4 : détente isenthalpique

2==>3 : refroidissement isobare

5==>1 : réchauffement isobare du gaz non liquéfié

II.9.2. Cycle de liquéfaction avec travail extérieur : Cycle de Brayton inverse

Dans le cycle de Linde, le refroidissement isenthalpique est obtenu au cours d'une détente sans production de travail. On peut imaginer de refroidir le gaz en actionnant une turbine et donc, de fournir en même temps du travail. Si l'on veut se rapprocher d'un cycle idéal (amélioration du rendement), le gaz doit être détendu dans une turbine idéalement réversible. La substitution de la vanne de laminage par une turbine reviendrait à faire fonctionner la turbine en milieu humide, ce qui d'un point de vue technologique est impossible. On ne peut utiliser la turbine que dans une zone de température plus élevée (détente sèche). On obtient alors le cycle de Brayton qui fournit du travail mais ne génère pas de liquide

➤ Comparaison des cycles de Linde et de Brayton inverse

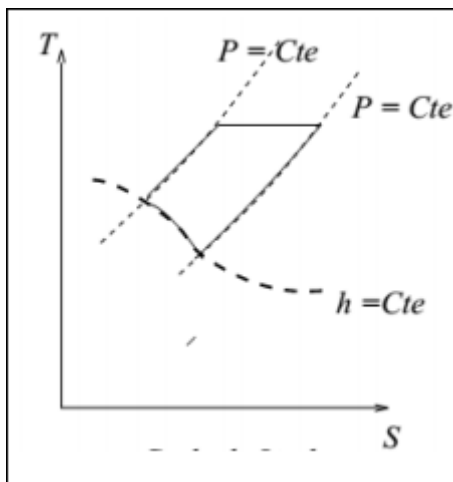


Figure II-11 : Cycle de Linde

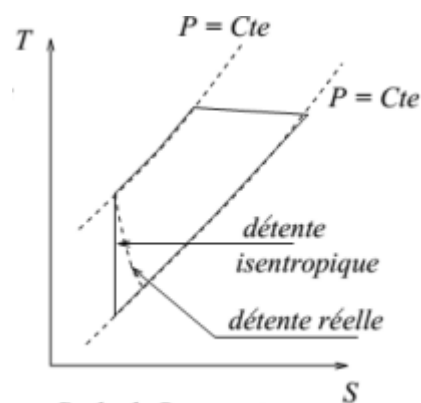


Figure II-12 : Cycle de Brayton inverse

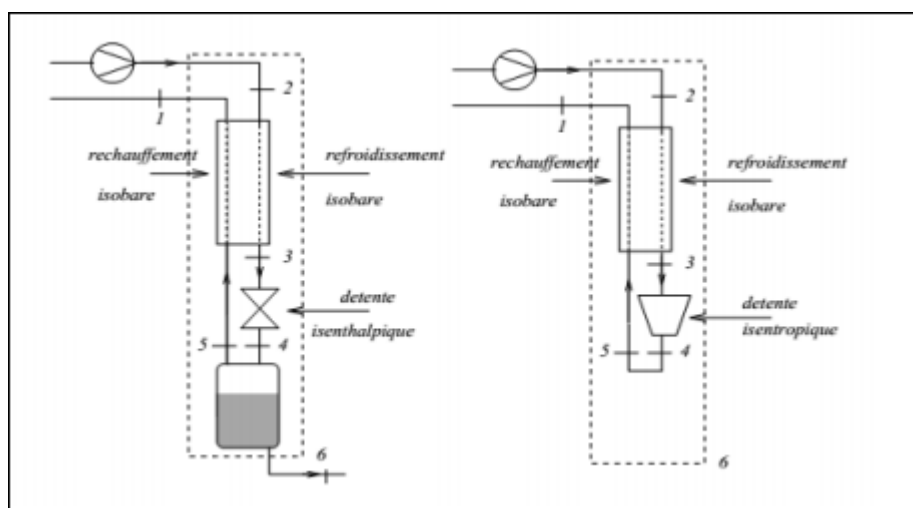


Figure II-13 : Schéma de cycle de Linde et de cycle de Brayton inverse

II.9.3. Cycle de Claude pour la liquéfaction

II.9.3.1. 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 4.1 :

- 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

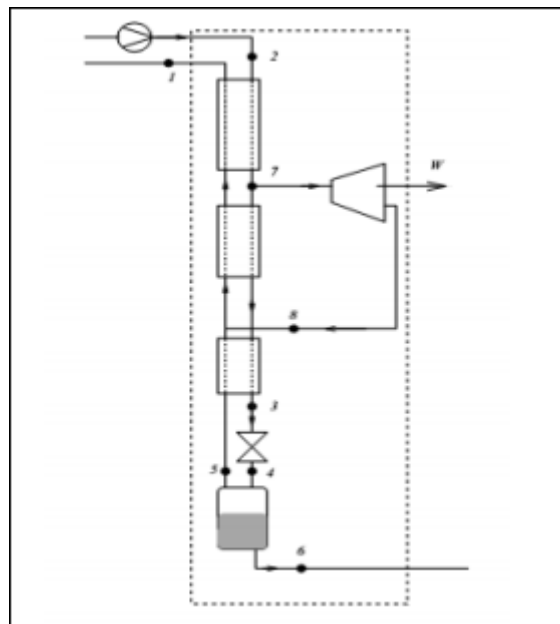


Figure II-14 : Schéma de principe de cycle de Claude

II.9.3.2 .Diagramme T-S pour cycle de Claude

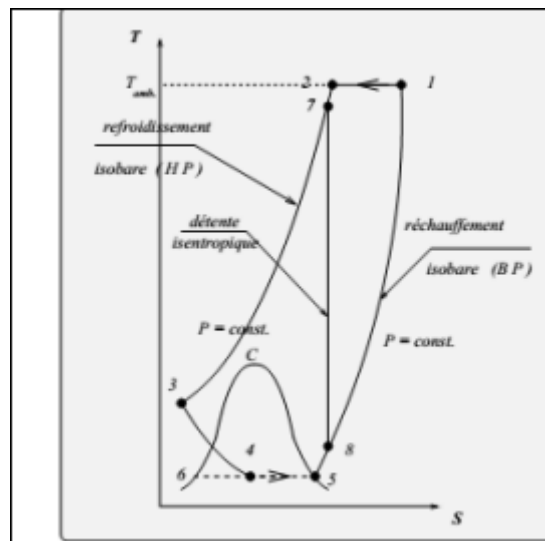


Figure II-15 : Diagramme (T-S) de cycle de Claude

L'objectif de la turbine est double :

- Provoquer un refroidissement important du gaz (point 8), qui permettra par l'intermédiaire d'un échangeur de refroidir, le gaz issu de la compression isotherme (1-2).
- Produire du travail mécanique.

➤ Fonctionnement :

La totalité du gaz issu du compresseur, est refroidit dans un premier échangeur (2-7). Le gaz est séparé en deux fractions. Une fraction x de ce gaz est envoyée dans la turbine (7-8).

En sortie de la turbine, le gaz (refroidi et détendu) rejoint l'étage BP de l'échangeur. Il refroidit alors la fraction $(1 - x)$ de gaz dirigée vers le liquéfacteur.

II.9.4. Techniques générales utilisées pour la distillation

Comme nous vus avant, KARL VON LINDE dans son invention était la double colonne et le processus de fabrication de l'air liquide. Alors il sera primordial de détailler le principe de fonctionnement de la colonne double mais aussi que la colonne de distillation normale ou classique

(a) La colonne de distillation normale [2]

Le type le plus commun d'appareillage de distillation se compose d'une colonne avec :

- Rebouilleur au fond de la colonne pour produire la vapeur qui se lève dans la colonne
- Débouché ou une sortie pour le produit inférieur, en forme liquide
- Une certaine matière d'agrégation de colonne (ce qui forme les plateaux) de sorte que la vapeur puisse entrer en contact intensif avec le liquide.
- Coté alimentation de la charge brut de l'air au centre.

- Débouché ou une sortie pour le produit de vapeur en haut de la colonne.
- Condenseur sert à la condensation de vapeur supérieure au liquide.
- Alimenter de nouveau à la colonne du liquide supérieur après condensation, ce liquide s'appelle le reflux.
- Une partie du liquide est sortie comme produit, qui s'appelle le distillat.

(b) DOUBLE COLONNE de LINDE (sans argon) [2]

Dans la plupart des cas les usines des séparation d'air utilise une combinaison de deux colonnes utilisées. C'était l'idée de KARL VON LINDE (Voir la figure II-8).

La partie inférieure est « demi » de colonne simple avec un condensateur dans le haut et une alimentation d'air par le fond. La partie supérieure est une colonne simple sans condensateur mais avec un rebouilleur.

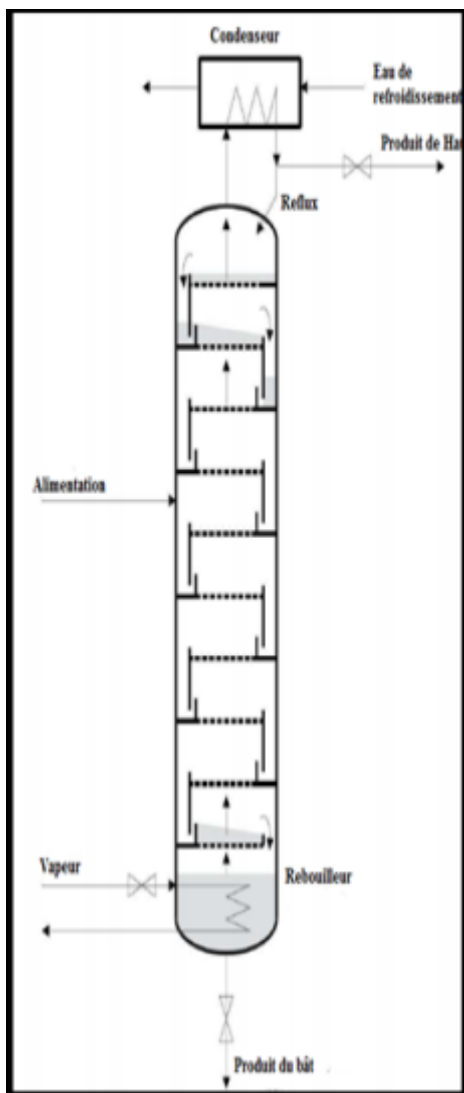


Figure II-16 (a) : Une colonne de distillation Normale [2] .

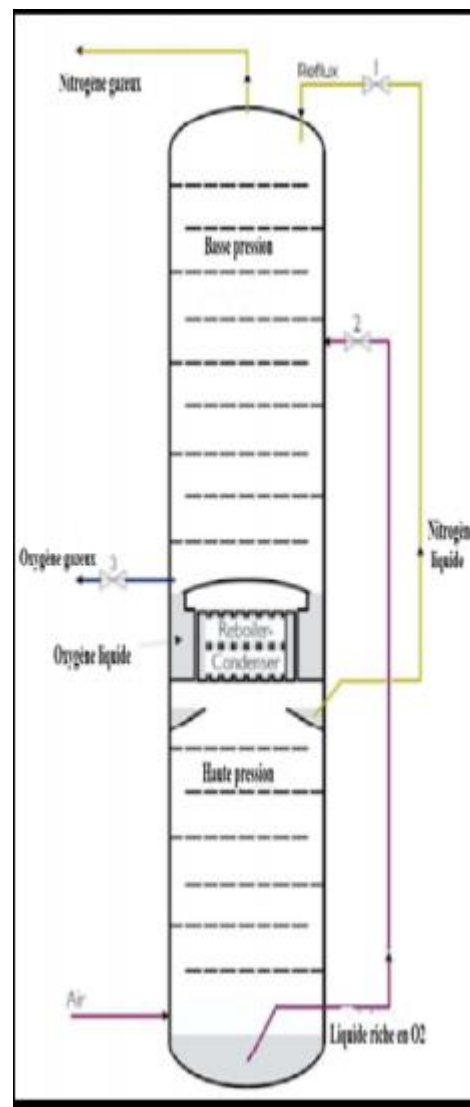


Figure II-16 (b) : Double colonne de linde (sans argon) [2] .

II.10 .Equipements utilisés dans la séparation cryogénique de l'air

II.10.1 .Compresseurs cryogéniques

Les compresseurs cryogéniques peuvent être volumétriques (alternatifs ou rotatifs) ou à impulsion (centrifuges) deux contraintes sévères nous obligent de faire un bon choix d'un type par rapport à un autre. [4] [5] [3]

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

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

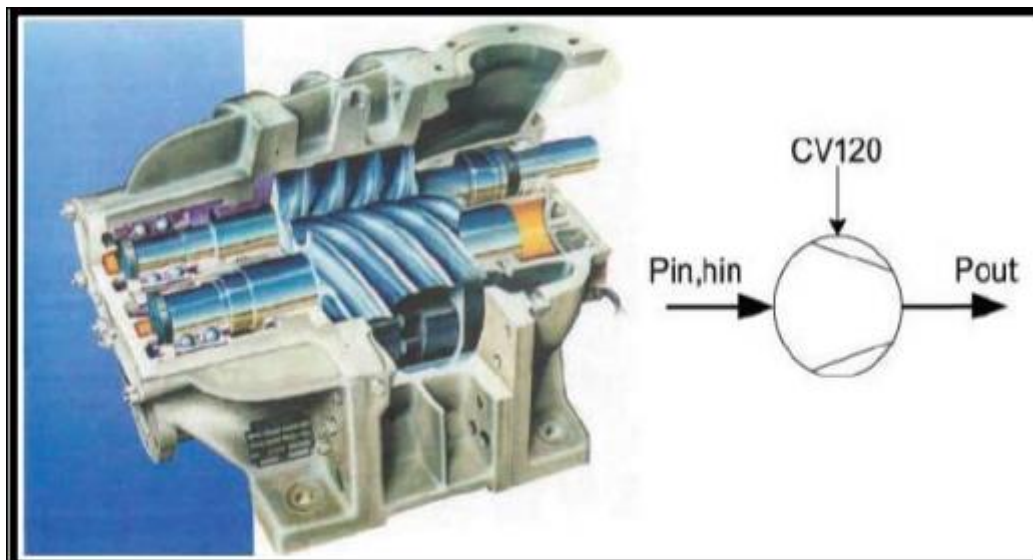


Figure II-17 : Un compresseur à vis lubrifié le schéma du modèle avec les conditions limite. [2]

II.10.2. Les échangeurs

Mis à part les appareils de laboratoire, dont certains utilisent des échangeurs bobinés, les réfrigérateurs modernes sont construits avec des échangeurs à plaques ailettes en alliage d'aluminium, qui sont compacts et efficaces. [4] [5]

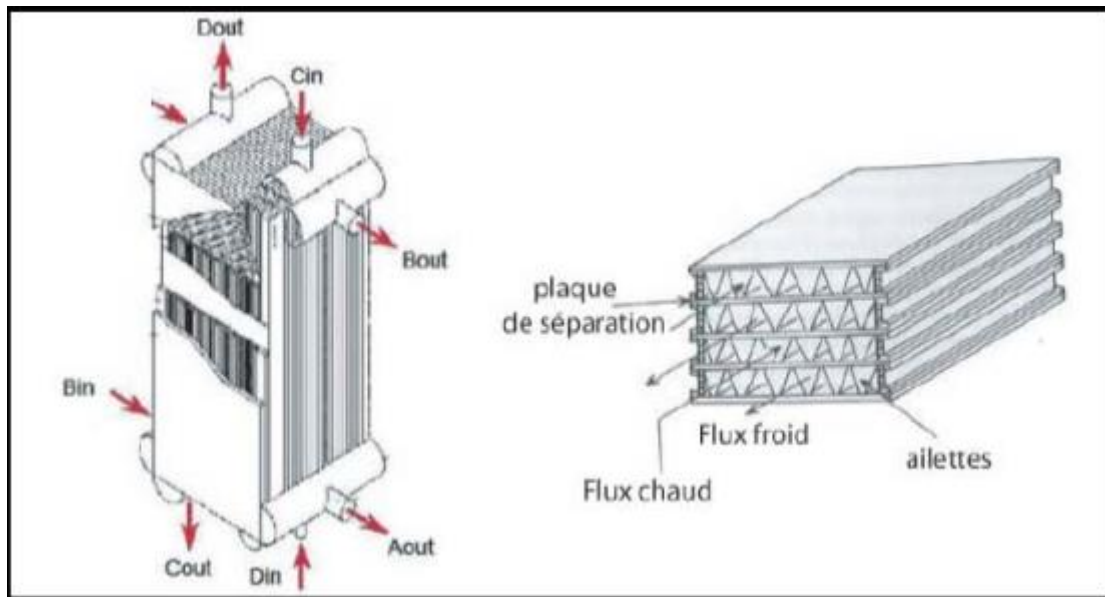


Figure II-18 : Schéma d'un échangeur à plaques et ailettes en aluminium. [4]

II.10.3. Les régénérateurs [4] [5]

Le régénérateur est destiné à stocker momentanément la chaleur cédée par le fluide à haute pression s'écoulant de la température ambiante T_c à la température froide T_f avant de la restituer à ce fluide repassant de T_f à T_c après détente. Il joue un rôle essentiel dans l'efficacité d'un Cryoréfrigérateur à flux alterné, idéalement, ce régénérateur devrait avoir :

- Une capacité thermique infinie par rapport à celle du fluide cryogénique pour limiter ses oscillations en température, lors des alternances de flux.
- Une conduction thermique nulle longitudinalement pour empêcher les apports de chaleur parasite par conduction du bout chaud au bout froid.
- Une conduction thermique infinie dans le sens radial pour assurer une bonne diffusivité thermique lors des échanges ;
- Un volume mort minimal (c'est -à -dire une porosité faible) ;
- Une perte de charge minimale à l'écoulement du fluide cryogénique (transparence élevée) afin de limiter l'énergie de compression non utile au cycle.

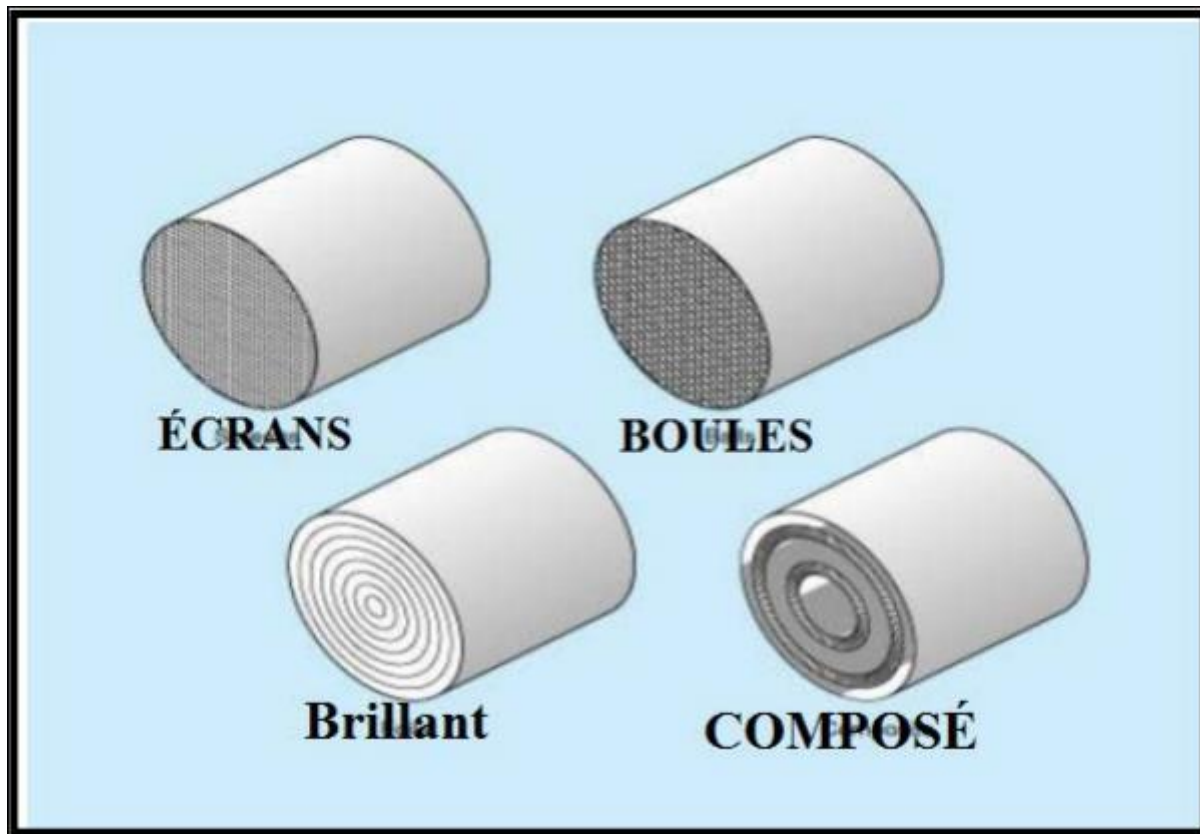


Figure II-19 : Les différents types de régénérateurs. [4]

II.10.4 Machines de détente cryogénique

a) Le détendeur alternatif

Fut la première de détente utilisée. Il est encore apprécié par les opérateurs de petits appareils de laboratoire qui peuvent en assurer facilement l'entretien. Sa vitesse de rotation est limitée à 300 tr/min. Lorsque le débit volumétrique à traiter augmente, il devient rapidement impossible d'augmenter la cylindrée et la vitesse de rotation. Seule la turbine permet d'apporter la fiabilité et l'efficacité requises. [4] [3]

b) Les turbines à paliers à gaz hydrostatiques ou hydrodynamiques

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

Les paliers dynamiques, qui n'ont pas à être alimentés supportent mal les variations rapides des conditions de fonctionnement et ont 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 des 100 KW, autre fois réservée aux seules turbines à paliers à l'huile.

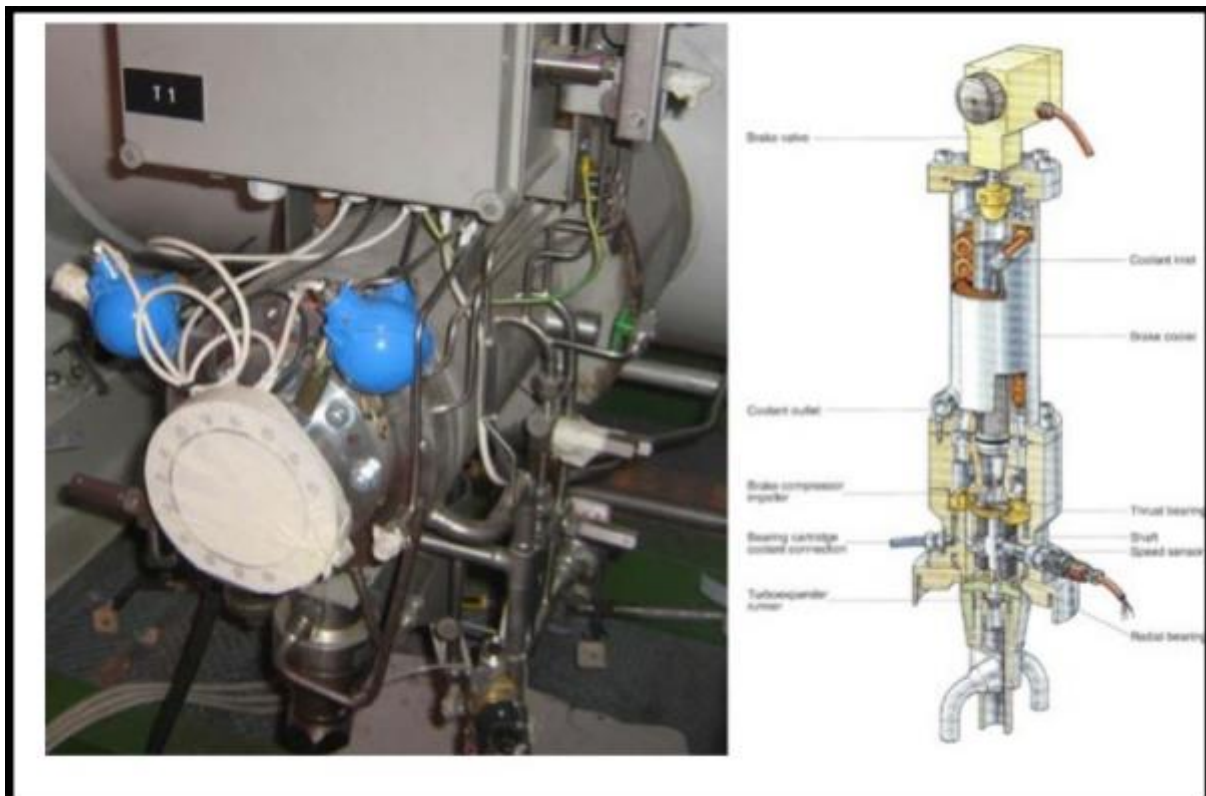


Figure II-20 : Une turbine à gaz cryogénique. [4]

II.10.5. Autres composants

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

- Les vannes cryogéniques.
- Les adsorbants : il est possible que, pendant de longues périodes de fonctionnement, des fuites se déclarent. Les quantités d'impuretés, même à des concentrations très faibles peuvent alors provoquer le bouchage des circuits.

Pour pallier cet inconvénient, une capacité remplie de matériau adsorbant est intercalée dans le circuit haute pression à une température permettant de piéger les impuretés.

Chapitre III

Modélisation thermodynamique du procédé de séparation de l'air

Rappel thermodynamique

III .1.Introduction

La thermodynamique est une discipline transversale de la physique, qui traite des transformations de l'énergie sous toutes ses formes. Elle est fondée sur deux principes fondamentaux :

- le premier principe énonce de façon très générale la conservation de l'énergie : l'énergie peut être stockée par un système sous forme d'énergie interne ou d'énergie cinétique, et peut être échangée avec l'extérieur sous la forme de travail ou de chaleur ;
- le second principe de la thermodynamique traite de l'évolution des systèmes, en introduit la notion essentielle d'entropie.

La conjonction des deux principes permet de définir de façon très rigoureuse des conditions d'équilibre d'un système, c'est-à-dire l'état vers lequel il évoluera en fonction des conditions extérieures qui lui sont imposées. La thermodynamique de l'équilibre est une discipline essentielle pour l'ingénieur, et a des applications dans tous les domaines industriels : toute installation industrielle produit ou consomme de l'énergie, et est le siège de phénomènes physico-chimiques qui évoluent vers un état d'équilibre qui peut être prédit par la thermodynamique.

III .2.Définition générales

III.2.1. Notion de Système

On appelle système la portion de l'espace limitée par une surface réelle ou fictive, où se situe la matière étudiée. Le reste de l'Univers est le milieu extérieur.

Tous les concepts de la thermodynamique s'appliquent à des systèmes matériels. Un système est un ensemble d'objets, défini par une enveloppe géométrique macroscopique (déformable ou non).

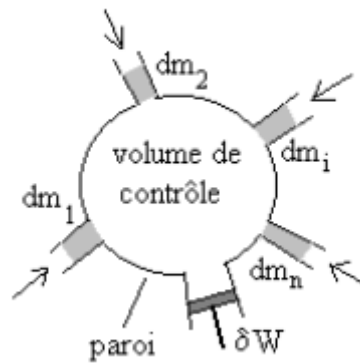
- Un système ouvert échange de la matière et de l'énergie avec le milieu extérieur.
- Un système fermé échange de l'énergie avec le milieu extérieur.
- Un système isolé n'échange ni matière ni énergie avec le milieu extérieur.

III.3.Premier principe de la thermodynamique

III.3.1.Premier principe de la Thermodynamique pour un système ouvert

Outre les échanges d'énergie sous forme de travail des forces d'opérateurs extérieurs et sous forme de chaleur, nous avons noté qu'un système échange de l'énergie par transferts de matière. Le système (appelé aussi volume de contrôle lorsqu'il y a échange de matière) est " augmenté " entre les instants t et $t+dt$ des masses dm_1 (grisées sur le dessin ci-contre) contenues dans les conduites.

Les masses dm_i ont un caractère algébrique, positives si elles entrent effectivement dans le volume de contrôle, négatives si elles en sortent.



Nous appelons $\bar{E}_i = \bar{E}_{ci} + \bar{E}_{pi} + \bar{U}_i$ l'énergie massique de la matière échangée par la conduite i et \bar{V}_i son volume massique.

La variation d'énergie dE du volume de contrôle entre les instants t et $t+dt$ est égale à :

$$dE = dQ + dW_t + \sum_i \bar{E}_i dm_i$$

Le travail dW_t est constitué du travail δW (*) échangé par le système au niveau des parois mobiles (type piston) et du travail du milieu extérieur pour faire " entrer " les masses dm_i dans le système.

$dW_t = dW + \sum_i P_i \bar{V}_i dm_i$ où p_i est la pression de la matière de masse dm_i " entrant " par la conduite i et $\bar{V}_i dm_i$ son volume.

Ainsi :

$$\begin{aligned} dE &= dQ + dW + \sum_i P_i \bar{V}_i dm_i + \sum_i (\bar{E}_{ci} + \bar{E}_{pi} + \bar{U}_i) dm_i \\ &= dQ + dW + \sum_i (\bar{U}_i + p_i \bar{V}_i) dm_i + \sum_i (\bar{E}_{ci} + \bar{E}_{pi}) dm_i \\ &= dQ + dW + \sum_i \bar{H}_i dm_i + \sum_i (\bar{E}_{ci} + \bar{E}_{pi}) dm_i \end{aligned}$$

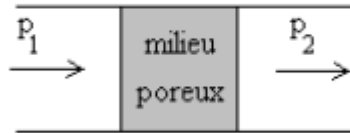
Exemples d'utilisation

Utilisation 1 : L'énergie mécanique est constante ou les variations d'énergie mécanique sont négligeables devant les variations d'enthalpie.

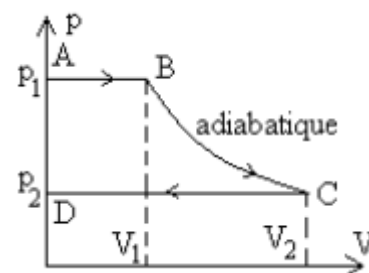
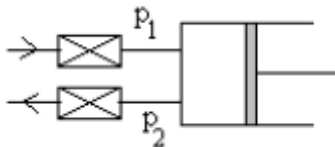
$$0 = dQ + dW + (\bar{H}_1 - \bar{H}_2) dm$$

- Le système n'échange ni travail ($\delta W = 0$) ni chaleur ($\delta Q = 0$)

C'est le cas d'un écoulement à travers un milieu poreux sans énergie mécanique significative avec $p_1 > p_2$. C'est la détente de Joule-Thomson. $\overline{H}_1 = \overline{H}_2$



- Le système n'échange que du travail ($dQ = 0$)



C'est le cas d'un cylindre moteur (sens ABCD) ou d'un compresseur (sens DCBA). Le cycle pour un cylindre moteur est constitué de la phase entrée de matière AB, de la phase détente BC, de la phase sortie de matière CD, si bien

que le travail est
$$W = -p_1 V_1 - \int_B^C p dV + p_2 V_2 = \int_B^C V dp$$

En remarquant que $dH = \delta Q + V dp = V dp$ suivant une

adiabatique, on peut écrire $H_C - H_B = \int_B^C V dp = W$ qui constitue l'expression du travail avec transvasement.

La durée dt d'un cycle est faible, nous raisonnons pour une quantité élémentaire de travail échangé et pour une masse dm de matière si bien que

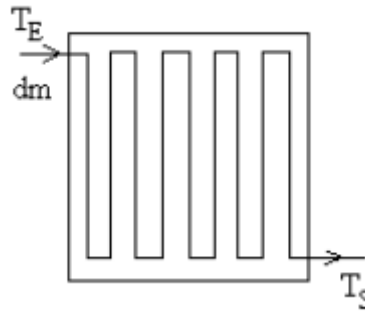
$$dW = (\overline{H}_C - \overline{H}_B) dm \Rightarrow p = \frac{dW}{dt} = \frac{dm}{dt} (\overline{H}_C - \overline{H}_B)$$

P est la puissance motrice du cylindre moteur et $\frac{dm}{dt}$ le débit massique.

Pour un compresseur, on aura

$$dm = (\overline{H}_B - \overline{H}_C) dm \text{ ou } p = \frac{dW}{dt} = \frac{dm}{dt} (\overline{H}_B - \overline{H}_C)$$

- Le système n'échange que de la chaleur ($dW = 0$)



C'est le cas des échangeurs de chaleur, radiateurs, évaporateurs, condenseurs.

$$dQ = (\overline{H}_S - \overline{H}_E) dm = dm \int_{T_E}^{T_S} \overline{C}_p dT = dm \overline{C}_p (T_S - T_E)$$

pour un écoulement à pression constante en considérant \overline{C}_p constant dans l'intervalle de température considéré. Par unité de temps,

$$\frac{dQ}{dt} = \Phi = \frac{dm}{dt} (\overline{H}_S - \overline{H}_E) = \frac{dm}{dt} \overline{C}_p (T_S - T_E)$$

où Φ est le flux de chaleur échangé

La variation d'énergie totale d'un système ouvert résulte des échanges d'énergies avec le milieu extérieur [19]

$$\Delta E_T = \Delta U + \Delta E_C + \Delta E_P = \varphi + W_t + \Delta U_{ij} + \Delta E_{ij} + \Delta E_{P_{ij}} + \Delta W_{t_{ij}} \quad (\text{III.1})$$

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

$$\text{➤ Energie cinétique : } \Delta E_{C_{ij}} = \sum_i \frac{1}{2} m_i C_i^2 - \sum_j \frac{1}{2} m_j C_j^2 \quad (\text{III.3})$$

$$\text{➤ Energie potentielle : } \Delta E_{P_{ij}} = \sum_i m_i g z_i - \sum_j m_j g z_j \quad (\text{III.4})$$

II.4. Bilan énergétique des systèmes ouverts en régime permanent

négligeons toute viscosité du fluide si bien qu'il n'y a pas de perte d'énergie mécanique par frottement entre deux tubes de courant adjacents.

Le premier principe pour un système ouvert s'écrira :

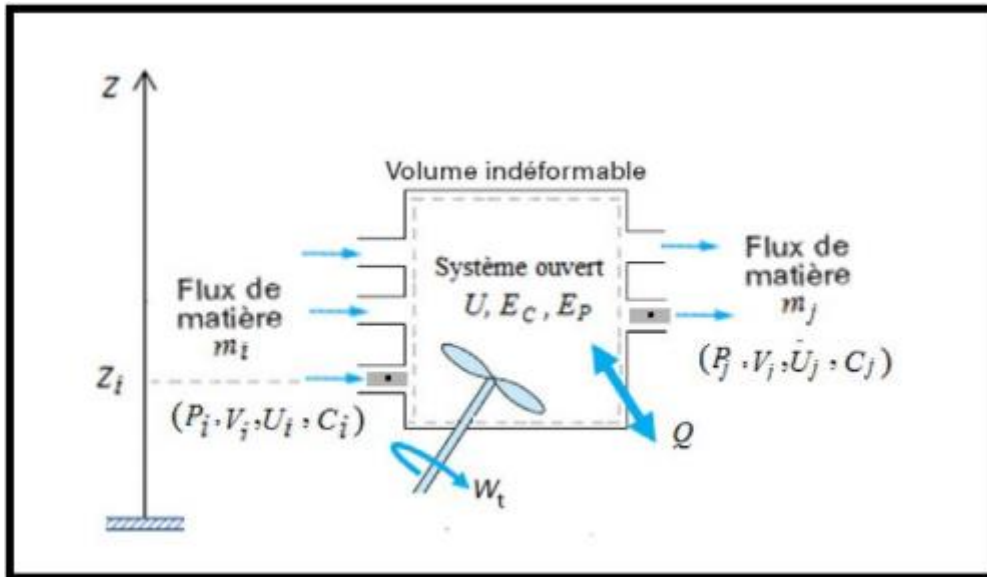


Figure III-1 : Système ouvert à plusieurs entrées (i) et sortie (j)

III.5. Application pour quelques machines en régime permanent

III.5.1 Compresseur et pompe

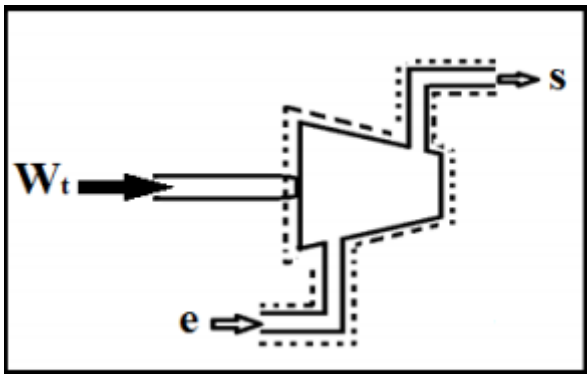


Figure III-2 : Compresseur.

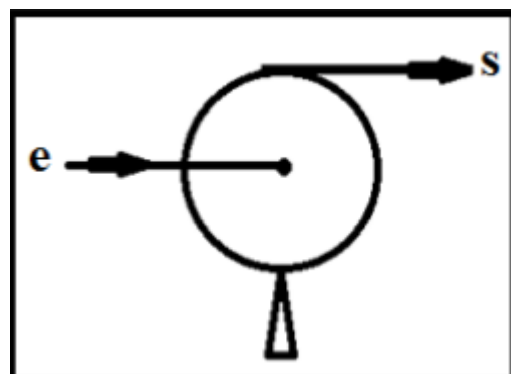


Figure III-3 : Pompe.

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

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

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

$$\dot{W}_t + \sum_i \dot{m}_i (h_T) - \sum_j \dot{m}_j (h_T) = 0 \tag{III.5}$$

$$\dot{W}_t = \dot{m} (h_{T_s} - h_{T_e}) \tag{III.6}$$

III.5.2.Turbine

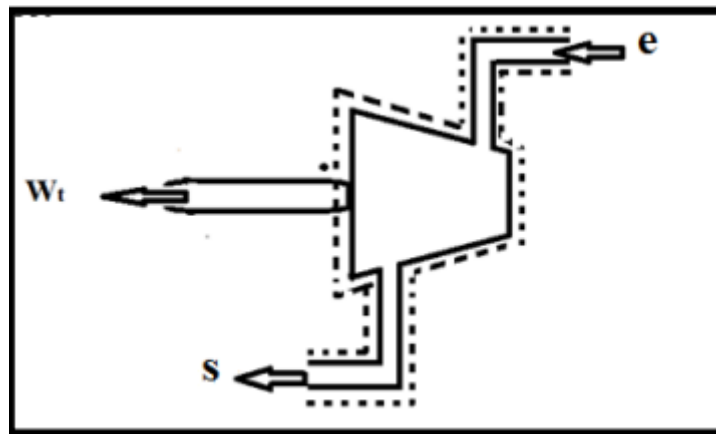


Figure III-4 : Turbine.

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

$$\frac{dE_T}{dt} = \dot{E}_T = 0 \quad , \text{ En Régime permanent}$$

Évolution

$$\dot{\phi} = 0 \quad , \text{ Adiabatique}$$

$$\dot{W}_t = -\dot{m}(h_{T_s} - h_{T_e}) \quad (III.7)$$

$$\dot{W}_t = \dot{m}(h_{T_e} - h_{T_s}) \quad (III.8)$$

III.5.3.Echangeur de chaleur

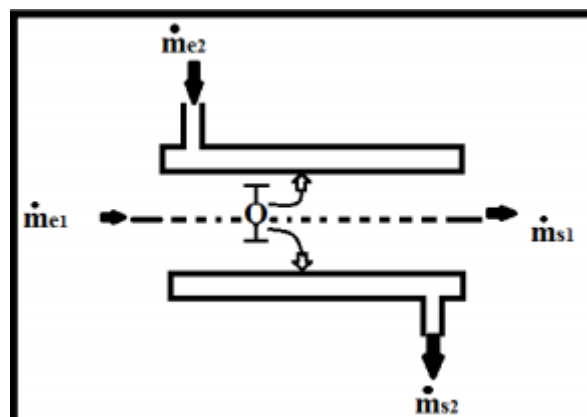


Figure III-5 : Echangeur de chaleur.

\dot{m}_{e1} : Débit de Fluide chaud (\dot{m}_c)

\dot{m}_{e2} : Débit de Fluide froid (\dot{m}_F)

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

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

Évolution

$\dot{\phi} = 0$, Adiabatique

$\dot{W}_t = 0$, parois Indéformable

$$\sum_i \dot{m}_i (h_T) - \sum_j \dot{m}_j (h_T) = 0 \quad (\text{III.9})$$

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

$$\dot{m}_{e1} h_{e1} + \dot{m}_{e2} h_{e2} = \dot{m}_{s1} h_{s1} + \dot{m}_{s2} h_{s2}$$

$$\dot{m}_{e1} = \dot{m}_{s1} = \dot{m}_C \quad (\text{III.10})$$

$$\dot{m}_{e2} = \dot{m}_{s2} = \dot{m}_F$$

$$\dot{m}_c (h_{e1} - h_{s1}) = \dot{m}_F (h_{s2} - h_{e2}) = \dot{\phi} \text{ , chaleur échangé}$$

III.5.4. Le séparateur

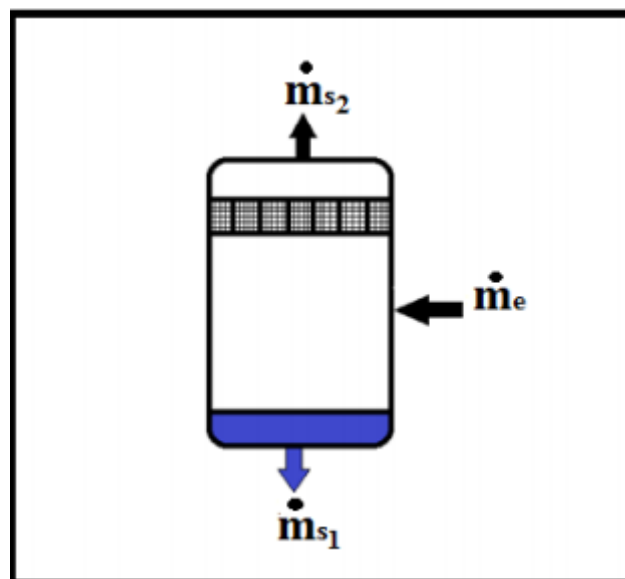


Figure III-6 : le Séparateur.

$$\text{Bilan de matière : } \dot{m}_e = \dot{m}_{s1} + \dot{m}_{s2} \quad (\text{III.11})$$

III.5.5. Adsorbeur à tamis moléculaire

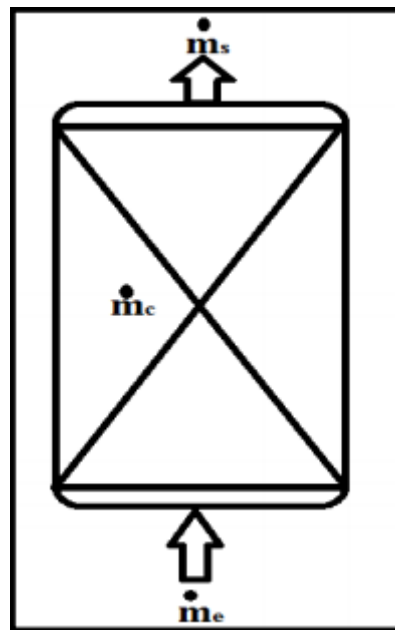


Figure III-7 : Adsorbeur à tamis moléculaire.

Bilan de matière

$$\dot{m}_e = \dot{m}_c + \dot{m}_s$$

$$\dot{m}_c = \dot{m}_e - \dot{m}_s$$

III.5.6. Vanne de détente

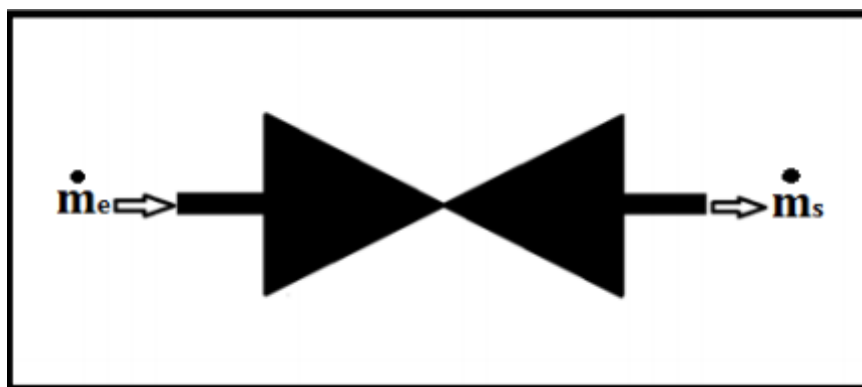


Figure III-8 : Vanne de détente.

$$\dot{m}_e = \dot{m}_s$$

Bilan enthalpique (separateur)

$$\dot{m}_s h_s = \dot{m}_L h_L + \dot{m}_V h_V \quad (\text{III.12})$$

$$\dot{m}_s = \dot{m}_L + \dot{m}_V$$

On obtient l'équation sur \dot{m}

$$h_T = \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}} h_L + \frac{\dot{m}_V}{\dot{m}} h_V; X = \frac{\dot{m}_V}{\dot{m}}; Y = \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}}$$

$$h_T = (1 - X)h_L + Xh_V \quad (\text{III.13})$$

$$X = \frac{h_T - h_L}{h_V - h_L} \quad (\text{III.14})$$

Y: Fraction vapeur ;

$$Y = 1 - X \quad (\text{III.15})$$

Y : Fraction liquide ;

III.5.7.Colonne de distillation

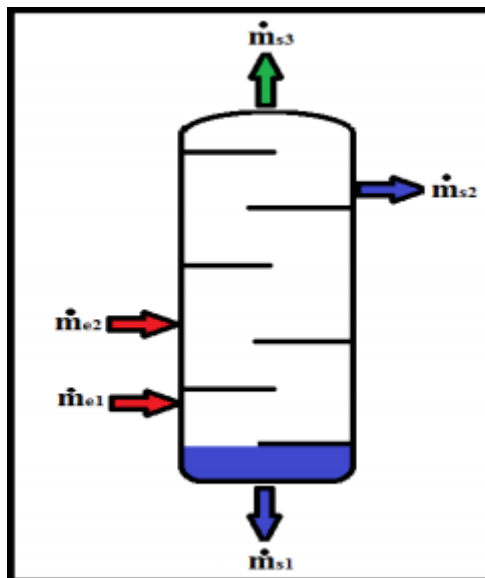


Figure III-9 : Colonne de distillation.

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

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

$$\dot{\phi} = 0, \text{ transformation adiabatique}$$

$$\dot{W}_t = 0, \text{ paroi indéformable}$$

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

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

$$\sum_i \dot{m}_i (h_T) = \dot{m}_{e1} h_{e1} + \dot{m}_{e2} h_{e2}$$

$$\sum_i \dot{m}_i (h_T) = \dot{m}_{s1} h_{s1} + \dot{m}_{s2} h_{s2} + \dot{m}_{s3} h_{s3}$$

$$\dot{m}_{e1} h_{e1} + \dot{m}_{e2} h_{e2} = \dot{m}_{s1} h_{s1} + \dot{m}_{s2} h_{s2} + \dot{m}_{s3} h_{s3}$$

III.6. Détente de joule Thomson

La détente de joule –Thomson est une isenthalpique (à $H=cste$). En pratique, elle est réalisée à l'aide d'une conduite calorifugée ou le gaz, sous certaines conditions thermodynamique, voit sa pression diminuée à la traversé d'un obstacle (paroi poreuse, vanne filtre, orifice.....) voire la figure

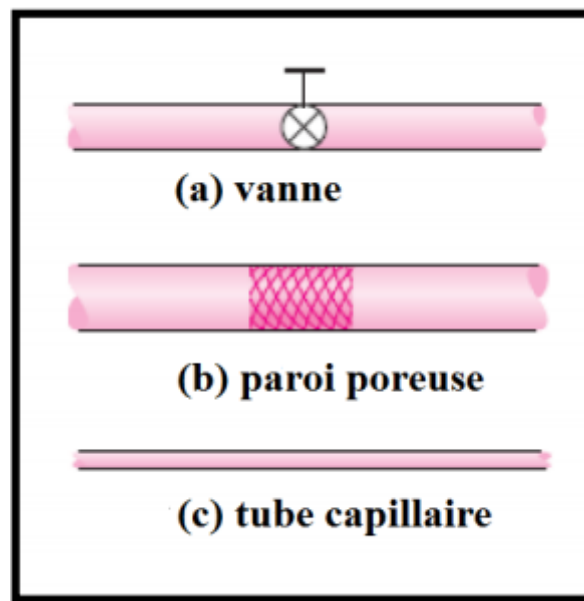


Figure III-10 : Schéma de quelques organes de détente de joule – Thomson.

Démonstration : Ecrivons le 1er principe de la thermodynamique pour le fluide qui traverse la paroi (voir Figure III.11)

$$\varphi + W_t = \Delta H + \Delta E_c + \Delta E_p$$

Comme $\varphi, W_t, \Delta E_c$ et ΔE_p sont nuls :

$$\Delta H = 0 \rightarrow H = cste$$

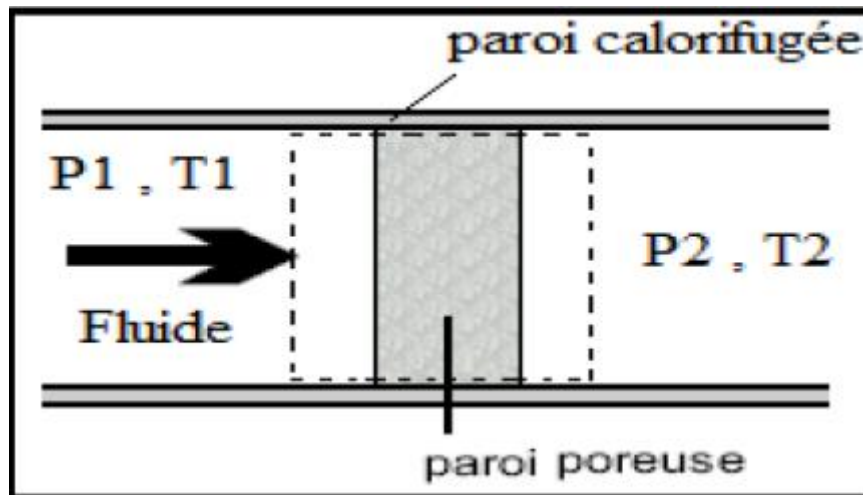


Figure III-11 : Détente de joule Thomson.

La détente de joule Thomson est en effet une transformation isenthalpique. Elle est très utilisée pour la liquéfaction des gaz et dans plusieurs dispositifs de réfrigération. Toutefois, dans certains cas (condition de T et P initiales) la température du fluide à la fin de la détente peut rester constante ou augmenter (situation indésirable). Lors de cette détente on définit le coefficient de joule- Thomson comme suit :

$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_h \quad (\text{III.16})$$

Ce coefficient est une mesure de la variation de la température avec la pression durant un processus isenthalpique (c'est aussi la pente de la courbe $h=\text{cste}$ dans le diagramme T-P).

A partir de la figure, III-12 nous constatons que

$$\mu_{JT} \begin{cases} < 0 \text{ détente avec augmentation de la température } (T_1 < T_2) \\ = 0 \text{ détente sans variation de la température } (T_1 = T_2) \\ > 0 \text{ détente avec diminution de la température } (T_1 > T_2) \end{cases}$$

La courbe d'inversion de l'effet joule Thomson regroupe l'ensemble des points maximums des isenthalpiques, elle est donc donnée par la relation $\mu_{JT} = 0$. Il est tout à fait clair (fig.10.11) 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)

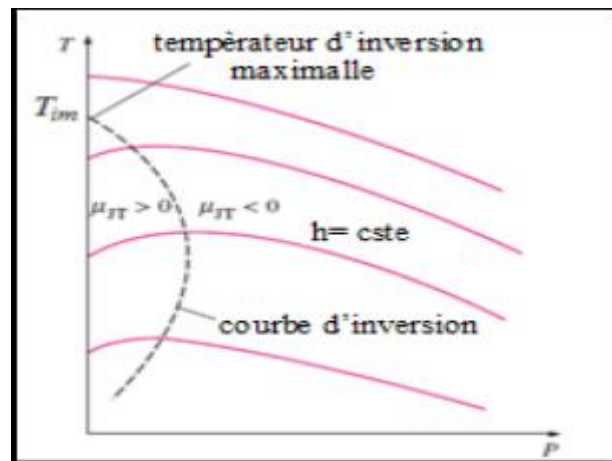


Figure III.12.a : Les lignes Isenthalpique dans le diagramme T-P..

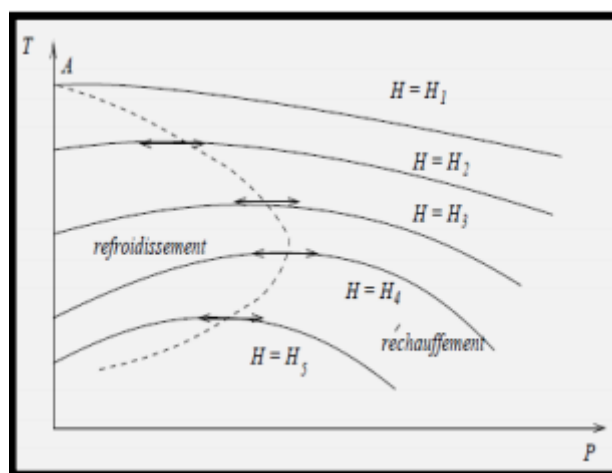


Figure III.12.b : Notion du point d'inversion.

Les courbes $T = f(P)$ passent par un maximum nommé point d'inversion.

La courbe en pointille réunissant les points de pente nulle est appelée la courbe d'inversion.

$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_h = 0$$

A l'intérieur de la courbe d'inversion, est positif : une diminution de la pression entraîne une diminution de la température.

III.7.Bilan Enthalpique pour le cycle de Linde

Considérons le système ouvert limité aux pointilles : ce système n'échange ni travail, ni chaleur avec l'extérieur.

Bilan Enthalpique :

$$q_{m_2} h_2 - q_{m_6} h_6 - q_{m_1} h_1 = 0$$

$$q_{m_1} = q_{m_2} - q_{m_6}$$

$$h_6 = h_{liq}$$

Soit :

$$q_{m_2} h_2 - q_{m_6} h_{liq} - (q_{m_2} - q_{m_6}) h_1 = 0$$

Le taux de liquéfaction est :

$$Y = \frac{q_{m_6}}{q_{m_2}} = \frac{h_2 - h_1}{h_{liq} - h_1}$$

III.8. Paramètres de performance pour le cycle de linde

III.8.1. Paramètres de performance d'un système de liquéfaction

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

1^{ère} fonction : le travail nécessaire a la compression d'une unité de masse du gaz

$$- W/m [1]$$

2^{ème} fonction : le travail nécessaire à la liquéfaction d'une unité de masse du gaz

$$- W/mf [1]$$

3^{ème} fonction : la fraction liquéfiée

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

4^{ème} fonction : le rapport entre le travail théorique minimum et le travail réel nécessaire pour

Le système appelé le rendement thermodynamique

$$FOM = \frac{\left(\frac{w}{m}\right)_{idèel}}{\left(\frac{w}{mf}\right)_{rèel}} \quad 0 < FOM < 1 \quad (III.21)$$

Ce rapport donne la mesure d'approche de performance du système réel au système idéal.

III.8.2.L'effet de l'efficacité de l'échangeur de chaleur sur la performance du système [1]

Pour n'importe quel système de liquéfaction, l'échangeur de chaleur à un rôle important dans sa performance

Efficacité de l'échangeur est donné par :

$$E = \frac{\text{Flux réellement transféré}}{\text{Flux maximum transféré}} \quad (\text{III.22})$$

Donc :

$$E = \left(\frac{h_{C_e} - h_{C_s}}{h_{C_e} - h_{F_e}} \right) = \left(\frac{h_{F_e} - h_{F_s}}{h_{C_e} - h_{F_e}} \right)$$

Avec :

h_{chaud_e} : Enthalpie de fluide chaud à l'entre de l'échangeur.

h_{chaud_s} : Enthalpie de fluide chaud à la sortie de l'échangeur.

h_{froid_e} : Enthalpie de fluide froid à l'entre

h_{froid_s} : Enthalpie de fluide froid à sortie

Nous avons aussi : $h = C_p T = C_p (T_{\text{entrée}} - T_{\text{sortie}})$.

Nous remplaçons cette dernière équation dans la formule de E

Nous obtenons :

$$E = \frac{C_{P_C} \left(\frac{T_{C_e} - T_{C_s}}{T_{C_e} - T_{F_e}} \right)}{C_{P_{\min}} \left(\frac{T_{C_e} - T_{F_e}}{T_{C_e} - T_{F_e}} \right)} = \frac{C_{P_C} \left(\frac{T_{F_e} - T_{F_s}}{T_{C_e} - T_{F_e}} \right)}{C_{P_{\min}} \left(\frac{T_{C_e} - T_{F_e}}{T_{C_e} - T_{F_e}} \right)}$$

Avec :

T_{C_e} : Température de fluide chaud à l'entre de l'échangeur.

T_{C_s} : Température de fluide chaud à la sortie de l'échangeur.

T_{F_e} : Température de fluide froid à l'entre de l'échangeur.

T_{F_s} : Température de fluide froid à la sortie de l'échangeur.

Chapitre IV

*Application au cycle de production des
gaz de l'air (linde)*

Dans ce chapitre nous avons opté pour calcul des bilans énergétiques pour chaque étape de la liquéfaction de l'air décrite dans le processus de liquéfaction mentionné dans l'annexe 1 ; ainsi que les paramètres de performance de ce procédé. Ce model est le même utilisé au niveau des unités de production des gaz de l'Air à Regaia et Hassi Messaoud.

Les paramètres visés pour chaque bilan sont calculés comme suit

Compresseur

- W_t : Le travail par unité de masse. [KJ/Kg]
- \dot{W}_t : La puissance thermique. [KW]

L'échangeur de pré-refroidissement:

- \dot{m} : Les débits d'eau. [Kg /s]

Le séparateur

- \dot{m} : Débit de l'eau éliminée. [Kg /s]

L'absorbeur

- \dot{m} : Les débits des contaminants. [Kg /s]

L'échangeur principal

- ϕ : Flux de chaleur. [KW]

La Turbine

- W_t : Le travail par unité de masse. [KJ/Kg]
- \dot{W}_t : La puissance thermique. [KW]

La pompe

- W_t : Le travail par unité de masse. [KJ/Kg]
- \dot{W}_t : La puissance thermique. [KW]

La vanne de détente

- X : La fraction de vapeur
- Y : La fraction de liquide

La colonne de distillation

- ϕ : Flux de chaleur. [KW]

Remarque :

- Les équipements sont indiqués par des indices .
- Les paramètres (\dot{m} [Kg/s], P [bar], T [K], X [%]) utilisés pour l'application numérique et qui sont donnés dans les tableaux ci-dessous dans les figures T-S mentionnées dans l'annexes II.
- Les valeurs de l'enthalpie h [KJ/Kg] sont déduites d'après les mêmes courbes

IV.1 Bilan énergétique pour un system ouvert en régime permanent .

Il est donne par l'équation suivante :

$$\dot{\phi}_t + \dot{W}_t + \sum_i \dot{m}_i h_i - \sum_j \dot{m}_j h_j = 0$$

IV.1.1 Bilan au niveau du Compresseur (C1161 indice du compresseur)

Tableau IV.1: les paramètres d'entrée et de sortie au niveau du compresseur (C1161).

		\dot{m} [Kg/s]	P [bar]	T [K]	X [%]	h [KJ/Kg]
GAP	Entrée « e »	4.45	1.01	303	1	303
	Sortie « s »	4.45	5.54	368	1	368

$$\dot{W}_t + \sum_i \dot{m}_i h_i - \sum_j \dot{m}_j h_j = 0 \quad ; \quad \dot{\phi}_t = 0$$

$$\dot{W}_t + \dot{m}_e h_e - \dot{m}_s h_s = 0 \quad ; \quad \dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m}_{GAP}$$

$$\text{Donc : } \dot{W}_t = \dot{m}_{GAP} (h_s - h_e)$$

$$\dot{W}_t = 289.25 \text{ KW}$$

$$W = \dot{W}_t / \dot{m}_{GAP} \tag{IV.1}$$

$$W = 65 \text{ KJ / Kg}$$

IV.1.2 Bilan au niveau de l'Échangeur (E1121)

Tableau IV.2: les paramètres d'entrée et de sortie au niveau du l'Échangeur (E1121).

		\dot{m} [Kg/s]	P [bar]	T [K]	X [%]	h [KJ/Kg]
GAP	Entrée « e »	4.45	5.54	368	1	368
	Sortie « s »	4.45	5.3	293	0.978	293

EAU	Entrée « e »	-	6.5	283	1	42.01
	Sortie « s »	-	6.4	293	1	83.96

$$\dot{\phi}_t + \dot{W}_t + \sum_i \dot{m}_i h_i - \sum_j \dot{m}_j h_j = 0 \quad \dot{\phi}_t = 0 \quad \dot{W}_t = 0$$

$$\dot{m}_e h_e + \dot{m}_a h_a - \dot{m}_b h_b = 0$$

Avec :

$$\dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m}_{GAP} \quad \dot{m}_a = \dot{m}_b = \dot{m}_{eau}$$

$$\dot{m}_{eau} = \dot{m}_{GAP} \frac{h_e - h_s}{h_b - h_a}$$

Alors :

$$\dot{m}_{eau} = 7.95 \text{ Kg} / \text{s}$$

IV.1.3 Bilan au niveau du Séparateur (D2431)

Tableau IV.3: les paramètres d'entrée et de sortie au niveau du séparateur (D2431).

		\dot{m} [Kg/s]
GAP	Entrée « e »	4.45
	Sortie « s »	4.39

On applique le bilan de conservation de masse

$$\dot{m}_e = \dot{m}_s + \dot{m}_{eau}$$

$$\dot{m}_{eau} = \dot{m}_e - \dot{m}_s$$

$$\dot{m}_{eau} = 0.06 \text{ Kg} / \text{s}$$

IV.1.4 Bilan au niveau de l'Adsorbent à tamis moléculaire (A2626)

Tableau IV.4: les paramètres d'entrée et de sortie au niveau du l'adsorbent (A2626).

		\dot{m} [Kg/s]
GAP	Entrée « e »	4.39
	Sortie « s »	4.3

Appliquons l'équation de conservation de masse

$$\dot{m}_e = \dot{m}_s + \dot{m}_c$$

$$\dot{m}_c = \dot{m}_e - \dot{m}_s$$

$$\dot{m}_c = 0.09 \text{ Kg} / \text{s}$$

IV.1.5 Bilan au niveau du Compresseur (C1461)

Tableau IV.5 : les paramètres d'entrée et de sortie au niveau du compresseur C1461.

		\dot{m} [Kg/s]	P [bar]	T [K]	X [%]	h[KJ/Kg]
GAP	Entrée « e »	8.71	5.07	304.3	1	304.3
	Sortie « s »	8.71	33.5	398	1	398

$$\dot{W}_t + \sum_i \dot{m}_i h_i - \sum_j \dot{m}_j h_j = 0 \quad ; \quad \dot{\phi}_t = 0$$

$$\dot{W}_t + \dot{m}_e h_e - \dot{m}_s h_s = 0 \quad \dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m}_{GAP}$$

Donc :

$$\dot{W}_t = \dot{m}_{GAP} (h_s - h_e)$$

$$\dot{W}_t = 816.127 \text{ KW}$$

$$W = \dot{W}_t / \dot{m}_{GAP} \quad W = 93.7 \text{ kJ/kg}$$

IV.1.6 Bilan au niveau de l'Échangeur (E1421)

Tableau IV.6: les paramètres d'entrée et de sortie au niveau du l'Échangeur (E1421).

		\dot{m} [Kg/s]	P [bar]	T [K]	X [%]	h[KJ/Kg]
GAP	entrée « e »	8.71	33.5	398	1	398
	sortie « s »	8.71	33.5	322	1	318
EAU	entrée « e »	-	6.5	313	0	167.57
	sortie « s »	-	6.4	323	0	209.33

$$\dot{\phi} + \dot{W}_t + \sum_i \dot{m}_i h_i - \sum_j \dot{m}_j h_j = 0 \quad \dot{\phi}_t = 0 \quad \dot{W}_t = 0$$

$$\dot{m}_e h_e + \dot{m}_a h_a - \dot{m}_s h_s - \dot{m}_b h_b = 0$$

$$\dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m}_{GAP}; \dot{m}_a = \dot{m}_b = \dot{m}_{eau}$$

$$\dot{m}_{eau} = \dot{m}_{GAP} \frac{h_e - h_s}{h_b - h_a}$$

$$\dot{m}_{eau} = 16.68 \text{ Kg} / \text{s}$$

IV.1.7 Bilan au niveau du Compresseur (C3461)

Tableau IV.7: les paramètres d'entre et de sortie au niveau du compresseur (C3461).

		\dot{m} [Kg/s]	P [bar]	T [K]	X [%]	h[KJ/Kg]
GAP	entrée «e »	8.72	33.5	322	1	318
	sortie « s »	8.72	49.44	376.7	1	375

$$\dot{W}_t + \sum_i \dot{m}_i h_i - \sum_j \dot{m}_j h_j = 0 \quad ; \dot{\phi}_t = 0$$

$$\dot{W}_t + \dot{m}_e h_e - \dot{m}_s h_s = 0; \dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m}_{GAP}$$

$$\text{Donc : } \dot{W}_t = \dot{m}_{GAP} (h_s - h_e)$$

$$\dot{W}_t = 497.04 \text{ KW}$$

$$W = \dot{W} / \dot{m}_{air}$$

$$W = 57 \text{ KJ} / \text{Kg}$$

IV.1.8 Bilan au niveau de l'Échangeur (E3421)

Tableau IV.8: les paramètres d'entrée et de sortie au niveau du l'Échangeur (E3421).

		\dot{m} [Kg/s]	P [bar]	T [K]	X [%]	h[KJ/Kg]
GAP	Entrée «e »	8.72	49.44	376.7	1	375
	Sortie « s »	8.72	49.32	322	1	318
EAU	Entrée «e »	-	6.5	313	0	167.57
	Sortie « s »	-	6.4	323	0	209.33

$$\dot{\phi}_t + \dot{W}_t + \sum_i \dot{m}_i h_i - \sum_j \dot{m}_j h_j = 0; \dot{\phi} = 0; \dot{W}_t = 0$$

$$\dot{m}_e h_e + \dot{m}_a h_a - \dot{m}_s h_s - \dot{m}_b h_b = 0$$

$$\dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m}_{GAP}; \dot{m}_a = \dot{m}_b = \dot{m}_{eau}$$

$$\dot{m}_{eau} = \dot{m}_{GAP} \frac{h_e - h_s}{h_b - h_a}$$

$$\dot{m}_{eau} = 11.90 \text{ Kg} / \text{s}$$

IV.1.9 Bilan au niveau de l'Échangeur (E3427)

Tableau IV.9: les paramètres d'entrée et de sortie au niveau du l'Échangeur (E3427).

		\dot{m} [Kg/s]	P [bar]	T [K]	X [%]	h[KJ/Kg]
GAP	Entrée « e »	8.72	49.32	322	1	318
	Sortie « s »	8.72	49.11	305	1	297
EAU	Entrée « e »	-	4	283	0	42.01
	Sortie « s »	-	3.9	293	0	83.96

$$\dot{\phi}_t + \dot{W}_t + \sum_i \dot{m}_i h_i - \sum_j \dot{m}_j h_j = 0; \dot{\phi}_t = 0; \dot{W}_t = 0$$

$$\dot{m}_e h_e + \dot{m}_a h_a - \dot{m}_s h_s - \dot{m}_b h_b = 0$$

$$\dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m}_{GAP}; \dot{m}_a = \dot{m}_b = \dot{m}_{eau}$$

$$\dot{m}_{eau} = \dot{m}_{GAP} \frac{h_e - h_s}{h_b - h_a}$$

$$\dot{m}_{eau} = 4.36 \text{ Kg} / \text{s}$$

IV.1.10 Bilan au niveau de l'Echangeur principale (E3116)

Tableau IV.10: les paramètres d'entrée et de sortie au niveau du l'Echangeur principale (E3116)

		\dot{m} [Kg/s]	P [bar]	T [K]	X [%]	h[KJ/Kg]
GAP1	Entrée« e »	8.64	49.11	305	1	297
	Sortie «s ₁ »	6.57	48.74	204.5	1	172
	Sortie «s ₂ »	2.07	48.59	113	0	-60
GAP2	Entrée« e »	4.41	5.34	116.6	1	100
	Sortie «s»	4.41	5.07	303	1	303
GAN	Entrée« e »	1.07	1.28	97.4	1	98
	Sortie «s»	1.07	1.22	303.7	1	322
IPGAN	Entrée« e »	1.23	1.28	97.4	1	98
	Sortie «s»	1.23	1.22	303.7	1	322
PGAN	Entrée« e »	0.034	5.22	94.5	1	90
	Sortie «s»	0.034	5.18	303.7	1	303
GOX	Entrée« e »	0.64	1.32	92.7	1	85
	Sortie «s»	0.64	1.21	303.7	1	303

$$\dot{\phi}_t + \dot{W}_t + \sum_i \dot{m}_i h_i - \sum_j \dot{m}_j h_j = 0; \dot{\phi}_t = 0; \dot{W}_t = 0$$

$$\text{Donc } \sum_i \dot{m}_i h_i = \sum_j \dot{m}_j h_j$$

$$\sum_i \dot{m}_i h_i = \dot{m}_{eGAP1} h_{eGAP1} + \dot{m}_{eGAP2} h_{eGAP2} + \dot{m}_{eGAN} h_{eGAN} + \dot{m}_{eIPGAN} h_{eIPGAN} + \dot{m}_{ePGAN} h_{ePGAN} + \dot{m}_{eGOX} h_{eGOX}$$

$$\sum_j \dot{m}_j h_j = \dot{m}_{s1GAP1} h_{s1GAP1} + \dot{m}_{s2LAP1} h_{s2LAP1} + \dot{m}_{sGAP2} h_{sGAP2} + \dot{m}_{sIPGAN} h_{sIPGAN} + \dot{m}_{sIPGAN} h_{sIPGAN} + \dot{m}_{sPGAN} h_{sPGAN} + \dot{m}_{sGOX} h_{sGOX}$$

$$\sum_i \dot{m}_i h_i = \sum_j \dot{m}_j h_j = 3289.94 \text{ KW}$$

IV.1.11 Bilan au niveau de la turbine (X3471)**Tableau IV.11: les paramètres d'entrée et de sortie au niveau de la turbine (X3471).**

		\dot{m} [Kg/s]	P [bar]	T [K]	X [%]	h[KJ/Kg]
GAP	Entrée « e »	6.57	48.47	204.5	1	172
	Sortie « s »	6.57	5.34	116.6	1	93

$$\dot{W}_t + \sum_i \dot{m}_i h_i - \sum_j \dot{m}_j h_j = 0; \dot{\phi}_t = 0$$

$$\dot{W}_t + \dot{m}_e h_e - \dot{m}_s h_s = 0; \dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m}_{GAP}$$

$$\text{Donc : } \dot{W}_t = \dot{m}_{GAP} (h_e - h_s)$$

$$\dot{W}_t = -519.03 \text{ KW}$$

$$W = \dot{W}_t / \dot{m}_{GAP}$$

$$W = -79 \text{ kJ / kg}$$

IV.1.12 Bilan au niveau de la vanne de détente**Tableau IV.12: les paramètres d'entre et de sortie au niveau de la Vanne de détente.**

	h_{GAP}	h_V	h_L
h [KJ/Kg]	-60	90	-98

Bilan Enthalpique

$$\dot{m}_{GAP} h_{GAP} = \dot{m}_L h_L + \dot{m}_V h_V$$

$$\dot{m}_{GAP} = \dot{m}_L + \dot{m}_V$$

On divise l'équation sur \dot{m}_{GAP}

$$h_{GAP} = \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_{GAP}} h_L + \frac{\dot{m}_V}{\dot{m}_{GAP}} h_V; X = \frac{\dot{m}_V}{\dot{m}_{GAP}}; Y = \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_{GAP}}$$

$$h_{GAP} = (1 - X) h_L + X h_V$$

$$X = \frac{h_{GAP} - h_L}{h_V - h_L}$$

$$X = 0.2 = 20\% \text{ (Faction vapeur)}$$

$$Y = 1 - X$$

$$Y = 0.8 = 80\% \text{ (Faction liquide)}$$

IV.1.13 Bilan au niveau de la colonne de distillation moyenne pression (T3211)

Tableau IV.13: les paramètres d'entrée et de sortie au niveau de la colonne de distillation moyenne pression (T3211).

		\dot{m} [Kg/s]	P [bar]	T [K]	X [%]	h[KJ/Kg]
GAP	Entrée « e »	2.16	5.34	116.6	1	110
MAP	Entrée « e »	2.07	5.34	97.1	0.2	-60
LIN	Entrée « e »	1.61	5.22	94.5	0	-85.5
LAP	Sortie « s »	0.71	5.33	96.9	0	-90
LOX	Sortie « s »	2.20	5.34	98.3	0	-90
GAN	Sortie « s »	2.93	5.22	94.5	1	80

$$\dot{\phi}_t + \dot{W}_t + \sum_i \dot{m}_i h_i - \sum_j \dot{m}_j h_j = 0; \dot{\phi}_t = 0; \dot{W}_t = 0$$

$$\text{Donc } \sum_i \dot{m}_i h_i = \sum_j \dot{m}_j h_j$$

$$\sum_i \dot{m}_i h_i = \dot{m}_{GAP} h_{GAP} + \dot{m}_{MAP} h_{MAP} + \dot{m}_{LIN} h_{LIN}$$

$$\sum_j \dot{m}_j h_j = \dot{m}_{LAP} h_{LAP} = \dot{m}_{LOX} h_{LOX} = \dot{m}_{GAN} h_{GAN}$$

$$\sum_i \dot{m}_i h_i = \sum_j \dot{m}_j h_j = -24 \text{KW}$$

IV.1.14 Bilan au niveau du la Pompe (P3366)

Tableau IV.14: les paramètres d'entrée et de sortie au niveau de la pompe (P3366).

		\dot{m} [Kg/s]	P [bar]	T [K]	X [%]	h[KJ/Kg]
LOX	Entrée «e »	2.48	1.32	92.7	0	-131
	Sortie « s »	2.48	4	92.9	0	-129

$$\dot{\phi}_t + \dot{W}_t + \sum_i \dot{m}_i h_i - \sum_j \dot{m}_j h_j = 0; \dot{\phi}_t = 0$$

$$\dot{W}_t + \sum_i \dot{m}_i h_i - \sum_j \dot{m}_j h_j = 0$$

$$\dot{W}_t + \dot{m}_e h_e - \dot{m}_s h_s = 0; \dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m}_{LOX}$$

$$\dot{W}_t = \dot{m}_{LOX} (h_s - h_e)$$

$$\text{Donc } \dot{W}_t = 4.96 \text{KW}$$

$$W = \dot{W}_t / \dot{m}_{LOX}$$

$$W = 2 \text{KJ} / \text{Kg}$$

IV.1.15 Bilan au niveau de l'Echangeur (E3216)

Tableau IV.15: les paramètres d'entre et de sortie au niveau du l'Echangeur (E3216).

		\dot{m} [Kg/s]	P [bar]	T [K]	X [%]	h[KJ/Kg]
LOX	Entrée« e »	2.41	4	92.9	0	-111
	Sortie« s ₁ »	0.64	1.31	92.78	1	87

	Sortie« s ₂ »	1.77	1.32	92.7	0.982	78
GAN	Entrée« e »	2.9	5.22	94.5	1	80
	Sortie« s »	2.9	5.22	94.5	0	-80

$$\dot{\varphi}_t + \dot{W}_t + \sum_i \dot{m}_i h_i - \sum_j \dot{m}_j h_j = 0; \dot{\varphi}_t = 0; \dot{W}_t = 0$$

$$\sum_i \dot{m}_i h_i = \dot{m}_{GAN} h_{GAN} + \dot{m}_{LOX} h_{LOX}$$

$$\sum_i \dot{m}_i h_i = \dot{m}_{LIN} h_{LIN} + \dot{m}_{GOX} h_{GOX} + \dot{m}_{MLOX} h_{MLOX}$$

$$\sum_i \dot{m}_i h_i = \sum_j \dot{m}_j h_j = -36KW$$

IV.1.16 Bilan au niveau de l'Echangeur (E3316)

Tableau IV.16: les paramètres d'entre et de sortie au niveau du l'Echangeur (E3316)

		\dot{m} [Kg/s]	P [bar]	T [K]	X [%]	h[KJ/Kg]
LAP	Entrée« e »	0.71	5.33	96.9	0	-90
	Sortie « s »	0.71	5.32	96.3	0	-90
LOX	Entrée« e »	0.024	4	92.9	0	-129
	Sortie « s »	0.024	3.92	83.3	0	-125
LIN	Entrée« e »	1.28	5.22	94.5	0	-85.5
	Sortie « s »	1.28	5.17	83.3	0	-118
IPGAN	Entrée« e »	1.23	1.30	82	1	80
	Sortie « s »	1.23	1.28	97.4	1	98
GAN	Entrée« e »	1.07	5.22	94.5	1	80
	Sortie « s »	1.07	1.28	97.4	1	98
LOX	Entrée« e »	1.074	5.34	98.3	0	-90
	Sortie « s »	1.074	5.34	96.3	0	-90

$$\dot{\phi}_t + \dot{W}_t + \sum_i \dot{m}_i h_i - \sum_j \dot{m}_j h_j = 0; \dot{\phi}_t = 0; \dot{W}_t = 0$$

$$\sum_i \dot{m}_i h_i = \sum_j \dot{m}_j h_j$$

$$\sum_i \dot{m}_i h_i = \dot{m}_{eLAP} h_{eLAP} + \dot{m}_{eLOX} h_{eLOX} + \dot{m}_{eLIN} h_{eLIN} + \dot{m}_{eIPGAN} h_{eIPGAN} + \dot{m}_{eGAN} h_{eGAN} + \dot{m}_{eLOX} h_{eLOX}$$

$$\sum_j \dot{m}_j h_j = \dot{m}_{sLAP} h_{sLAP} + \dot{m}_{sLOX} h_{sLOX} + \dot{m}_{sLIN} h_{sLIN} + \dot{m}_{sIPGAN} h_{sIPGAN} + \dot{m}_{sGAN} h_{sGAN} + \dot{m}_{sLOX} h_{sLOX}$$

$$\sum_i \dot{m}_i h_i = \sum_j \dot{m}_j h_j = -90 \text{KW}$$

IV.1.17 Bilan au niveau de la Vanne de détente

Tableau IV.17: les paramètres d'entre et de sortie au niveau de la vanne de détente.

	h_{GAP}	h_V	h_L
h [KJ/Kg]	-90	80	-124

Bilan enthalpique

$$\dot{m}_{S_{GAP}} h_{GAP} = \dot{m}_L h_L + \dot{m}_V h_V$$

$$\dot{m}_{S_{GAP}} = \dot{m}_L + \dot{m}_V$$

On divise l'équation sur \dot{m}_{air}

$$h_{GAP} = \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_{S_{GAP}}} h_L + \frac{\dot{m}_V}{\dot{m}_{S_{GAP}}} h_V; X = \frac{\dot{m}_V}{\dot{m}_{S_{GAP}}}; Y = \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_{S_{GAP}}}$$

$$h_{GAP} = (1 - X) h_L + X h_V$$

$$X = \frac{h_{GAP} - h_L}{h_V - h_L}$$

$X = 0.16 = 16\%$ (Fraction vapeur)

$$Y = 1 - X$$

$Y = 0.84 = 84\%$ (Fraction liquide)

IV.1.18 Bilan au niveau de la Vanne de détente**Tableau IV.18: les paramètres d'entre et de sortie au niveau de la vanne de détente.**

	h_{LIN}	h_v	h_L
h [KJ/Kg]	-130	82	-140

Bilan Enthalpique :

$$\dot{m}_{S_{LIN}} h_{LIN} = \dot{m}_L h_L + \dot{m}_v h_v$$

$$\dot{m}_{S_{LIN}} = \dot{m}_L + \dot{m}_v$$

On divise l'équation sur $\dot{m}_{S_{LIN}}$

$$h_{LIN} = \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_{S_{LIN}}} h_L + \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_{S_{LIN}}} h_v; X = \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_{S_{LIN}}}; Y = \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_{S_{LIN}}}$$

$$h_{LIN} = (1 - X) h_L + X h_v$$

$$X = \frac{h_{LIN} - h_L}{h_v - h_L}$$

$$X = 0.045 = 4.5\% \text{ (Fraction vapeur)}$$

$$Y = 1 - X$$

$$Y = 0.955 = 95.5\% \text{ (Fraction liquide)}$$

IV.1.19 Bilan au niveau de la Turbine**Tableau IV.19: les paramètres d'entre et de sortie au niveau de la turbine**

		\dot{m} [Kg/s]	P [bar]	T [K]	X [%]	h[KJ/Kg]
LOX	Entrée « e »	1.074	5.34	96.3	0	-90
	Sortie « s »	1.074	1.51	83.9	0	-120

$$\dot{W}_t + \sum_i \dot{m}_i h_i - \sum_j \dot{m}_j h_j = 0; \dot{\phi}_t = 0$$

$$\dot{W}_t + \dot{m}_e h_e - \dot{m}_s h_s = 0; \dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m}_{LOX}$$

$$\text{Donc : } \dot{W}_t = \dot{m}_{LOX} (h_s - h_e)$$

$$\dot{W}_t = -32.22 \text{ KW}$$

$$W = \dot{W}_t / \dot{m}_{LOX}$$

IV.1.20 Bilan au niveau de la Colonne de distillation à basse pression (T3212)

Tableau IV.20: les paramètres d'entre et de sortie au niveau la Colonne de distillation à basse pression (T3212).

		\dot{m} [Kg/s]	P [bar]	T [K]	X [%]	h[KJ/Kg]
MLAP	Entrée « e »	0.71	1.3	81.3	0.16	-90
MLOX	Entrée « e »	1.77	1.32	92.7	0.982	78
MLOX	Entrée « e »	1.09	1.51	83.9	0	-121
MLIN	Entrée « e »	1.28	1.29	79.4	0.04	-117
LOX	Sortie « s »	2.49	1.32	92.7	0	-131
GOX	Sortie « s »	0.64	1.32	92.7	1	85
LIN	Sortie « s »	1.22	1.29	79.4	0	-106
GAN	Sortie « s »	1.07	1.29	81.3	1	78
IPGAN	Sortie « s »	1.23	1.30	82	1	90

$$\dot{\phi}_t + \dot{W}_t + \sum_i \dot{m}_i h_i - \sum_j \dot{m}_j h_j = 0; \dot{\phi}_t = 0; \dot{W}_t = 0$$

$$\sum_i \dot{m}_i h_i = \sum_j \dot{m}_j h_j$$

$$\sum_i \dot{m}_i h_i = \dot{m}_{eMLAP} h_{eMLAP} + \dot{m}_{eMLOX} h_{eMLOX} + \dot{m}_{eMLOX} h_{eMLOX} + \dot{m}_{eMLIN} h_{eMLIN} \sum_j \dot{m}_j h_j =$$

$$\dot{m}_{sLOX} h_{sLOX} + \dot{m}_{sGOX} h_{sGOX} + \dot{m}_{sLIN} h_{sLIN} + \dot{m}_{sGAN} h_{sGAN} + \dot{m}_{sIPGAN} h_{sIPGAN}$$

$$\sum_i \dot{m}_i h_i = \sum_j \dot{m}_j h_j = -207 \text{ KW}$$

IV.2 Application numérique sur les paramètres de performance (cycle de Linde) [1]

IV.2.1 Exemple 1 : liquéfaction de l'air

Calcul du FOM

$$FOM = \frac{\left(-\frac{w}{m}\right)_{idéal}}{\left(-\frac{w}{mf}\right)_{réel}} \text{ (le rendement thermodynamique du compresseur)}$$

Le travail idéal de liquéfaction de l'air à T=300 K et P=1 bar

$$\left(-\frac{w}{m}\right)_{idéal} = 738.9 \text{ KJ / Kg}$$

Le travail réel de cycle Linde pour liquéfaction de l'air

$$\left(-\frac{w}{mf}\right)_{réel} = 10449 \text{ KJ / Kg}$$

Donc :

Le rendement thermodynamique du compresseur est :

$$FOM = 0.0707 = 7.07\%$$

Calcul E : efficacité de l'échangeur principale

$$E = \frac{C_{P_c} \left(\frac{T_{C_e} - T_{C_s}}{T_{C_e} - T_{F_e}} \right)}{C_{P_{\min}} \left(\frac{T_{F_e} - T_{F_s}}{T_{C_e} - T_{C_{F_e}}} \right)}$$

$$C_{P_c} = 1.259 \frac{KJ}{Kg.K}$$

$$C_{P_f} = 1.010 \frac{KJ}{Kg.K}$$

$$C_{P_{\min}} = C_{P_f} = 1.010 \frac{KJ}{Kg.K}$$

$$E = \frac{1.259 \left(\frac{26.85 - (-102.3)}{26.85 - (-189.9)} \right)}{1.010 \left(\frac{26.85 - (-189.9)}{26.85 - (-189.9)} \right)}$$

$$COP = 0.74 = 74\%$$

IV.2.2 Exemple 2 : la liquéfaction de l'azote

$$FOM = \frac{\left(-\frac{w}{m} \right)_{idéal}}{\left(-\frac{w}{mf} \right)_{réel}}$$

Le travail idéal de liquéfaction de nitrogène à T=300 K et P=1 bar (voir Annexe 3)

$$\left(-\frac{w}{m} \right)_{idéal} = 768.1 KJ / Kg$$

Le travail réel de cycle Linde pour liquéfaction de l'air

$$\left(-\frac{w}{mf} \right)_{réel} = 1393 KJ / Kg$$

Donc :

Le rendement thermodynamique du compresseur est :

FOM = 55 % Calcul de COP : efficacité de l'échangeur principale

Calcul de COP : efficacité de l'échangeur principale

$$E = \frac{C_{P_c} \left(\frac{T_{C_e} - T_{C_s}}{T_{C_e} - T_{F_e}} \right)}{C_{P_{\min}}} = \frac{C_{P_f} \left(\frac{T_{F_e} - T_{F_s}}{T_{C_e} - T_{F_e}} \right)}{C_{P_{\min}}}$$

$$C_{P_c} = 1.33 \frac{KJ}{Kg.K}$$

$$C_{P_f} = 1.03 \frac{KJ}{Kg.K}$$

$$C_{P_{\min}} = C_{P_f} = 1.03 \frac{KJ}{Kg.K}$$

$$E = \frac{1.33 \left(\frac{16.85 - (-115.1)}{16.85 - (-195.9)} \right)}{1.03}$$

$$E = 0.80 = 80\%$$

IV.3 Applications avec le logiciel Aspen-Hysys

IV.3.1 Introduction

Nous avons opté à un exemples de simulation sur Hysys, en prenant compte un model simplifié de procédé de liquéfaction basé sur le cycle de Linde pour la liquéfaction de l'Azote. A fin de réaliser une telle simulation nous devons procéder aux étapes suivantes : Tout d'abord il faut choisir un mode approprié pour ce mode de travail (fluide package Basis-1). Il faut aussi fixer la composition du fluide. Lancer ce qu'on appel Aspen-Hysys simulation tout en choisissant les équipements et outils nécessaires :

- 1- Mixeur
- 2- compresseur
- 3- système de pre-refroidissement.
- 4- échangeur
- 5- vanne de détente.
- 6- séparateur
- 7- Système de recyclage

IV.3.2 Exemple de simulation de l'Azote

La figure ci-dessous montre le model de cycle de Linde pour la liquéfaction de l'Azote , Les conditions choisies pour le fonctionnement du procès sont données dans le Tableau

- Entrée du compresseur
Débit massique du l'air $\dot{m} = 3600 \text{ kg/h}$
Pression (Kpa). $P=100 \text{ KPa}$
- Sortie du compresseur
Pression (Kpa). $P=20000 \text{ KPa}$
- Entrée du mixeur (1) :
Température (C). $T = 16.850 \text{ C}$

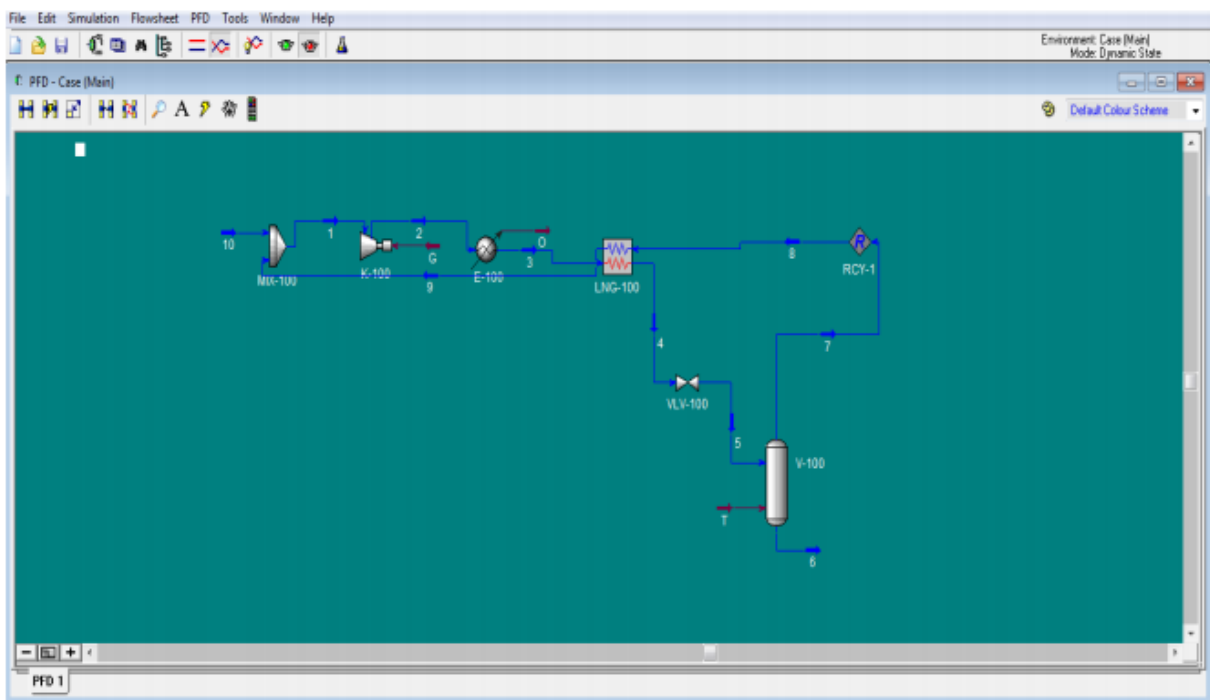


Figure IV.1 : Cycle de Linde PED (Process Flow Diagram) pour la liquéfaction de l'Azote.

TABLEAU IV.21 : Résultat de simulation par Hysys pour l'Azote.

Name	1	2	3	4	8	9	5	7	6	10
Vapour Fraction	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,8316	1,0000	0,0000	1,0000
Temperature [C]	16,85	1221	16,85	-115,1	-195,9	53,17	-195,9	-195,9	-195,9	16,85
Pressure [kPa]	100,0	2,000e+004	2,000e+004	2,000e+004	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Molar Flow [kgmole/h]	128,5	128,5	128,5	128,5	106,9	106,9	128,5	106,9	21,64	21,64
Mass Flow [kg/h]	3600	3600	3600	3600	2994	2994	3600	2994	606,1	606,1
Liquid Volume Flow [m3/h]	4,464	4,464	4,464	4,464	3,713	3,713	4,464	3,713	0,7516	0,7516
Heat Flow [kJ/h]	-3,154e+004	4,904e+006	-1,708e+005	-9,389e+005	-6,808e+005	8,728e+004	-9,389e+005	-6,808e+005	-2,581e+005	-1,188e+005

IV.3.2.1. Résultats et discussion

La valeur de la fraction liquide obtenue après la liquéfaction de l'azote est donnée par la colonne [6]. Le débit de l'Azote liquéfié : 606. Kg/hr.

Les autres paramètres à la sortie du séparateur (fraction liquide) sont

- Pression : 100 Kpa.
- La température : -195.9 0 C.
- Fraction de vapeur : 0

Le taux de liquéfaction est donné ci-après

$$\eta = \frac{\text{Debit massique de l' air liquifi é}}{\text{Debit massique de l' air totale}} = (606.1 / 3600) = 0.1683 = 16.83\%$$

IV.3.2.2. La variation du flux de chaleur au niveau de l'échangeur E-100

Le changement de flux de chaleur en fonction de l'enthalpie est donné par le graphe ci-dessous. Tel qu'on remarque que flux de chaleur augmente proportionnellement en fonction de la température.

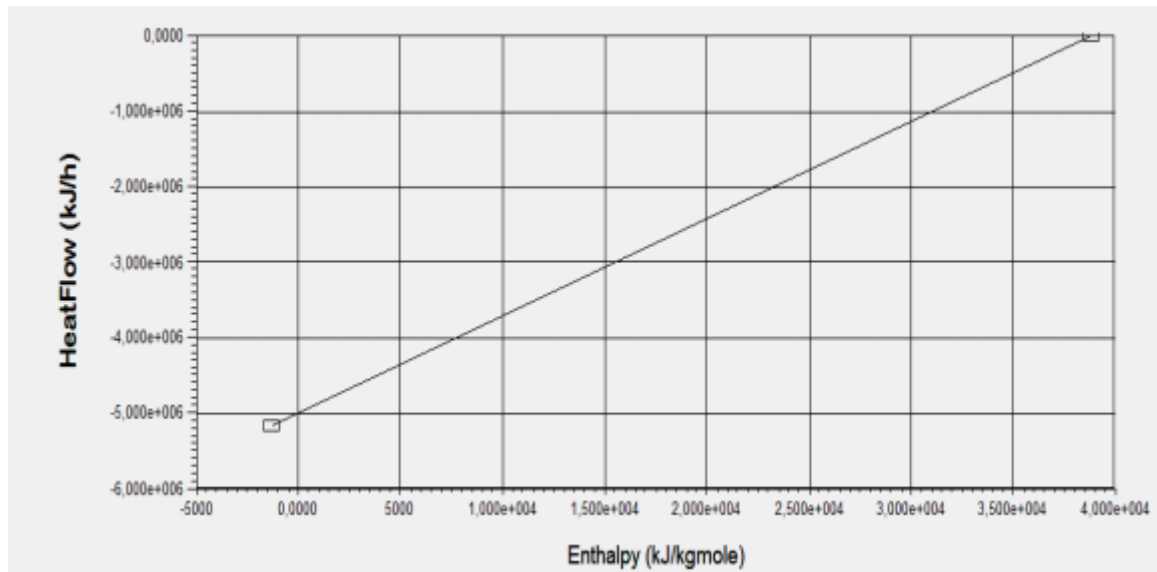


Figure IV.2 : Diagramme flux de chaleur en fonction de l'Enthalpie

IV.3.3. Conclusion

D'après les deux exemples de simulations par Hysys du cycle cryogénique de Linde pour la liquéfaction de l'Air et de L'Azote, nous avons obtenu un taux de liquéfaction de 14.78% et 17% respectivement. L'utilisation de la simulation sur HYSYS nous a permis d'analyser l'influence des différents paramètres de processus sur l'efficacité du cycle de Linde pour la production de l'air liquide et de l'azote. Cette étude aide à la recherche des paramètres prépondérants à appliquer dans le cycle de Linde pour la liquéfaction et la séparation de l'air à fin d'obtenir une meilleure performance.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale :

D'après l'étude thermodynamique effectuée sur cette installation on peut tirer quelques conclusions intéressantes ;

Le cycle de liquéfaction de l'air de Linde gaz et l'un des plus performant aux monde, car il à monter son efficacité sa rémunération dans le domaine de production de l'air liquide, oxygène liquides, argon.... Etc.

Cette étude nous a permis de nous familiariser avec les procédés de séparation de l'air de ces composants essentiels l'azote l'oxygène et l'argon et la technologie utilisée pour leurs liquéfactions.

L'analyse thermodynamique et énergétique effectuée nous a permis d'évaluer les énergies échangées au cours de toutes les transformations existantes dans le cycle, (travail, chaleur, fraction massique, rendement)

Savoir l'état de la substance liquide gazeuse ou diphasique à la sortie de chaque élément nous donne un aperçu général sur le procédé de liquéfaction de l'air, afin de prévoir une amélioration de la production, en faisant appel à des techniques très avancé pour augmenter le rendement de l'installation.

Les résultats obtenus sont satisfaisant ont les comparons avec ceux trouves sur site, le calcul des bilans énergétique on été fait pour chaque éléments de ce procédés, ont exploitants les données fournit par l'entreprise.

L'exemple réaliser sur le logiciel HYSYS est une étude du procédés de production de l'air liquide et de nitrogène liquide ont utilisant le cycle de Linde idéal, nous avons simulé la quantité de liquéfaction de ces gaz en faisant varier les paramètres d'entrée de l'installation, savoir la quantité d'Air liquéfier nous donne des informations primordiales sur le rendement de l'installation ainsi les besoins énergétique (puissance électrique, puissance mécanique) à fournir et d'évaluer la quantité à fournir à fin de satisfaire les besoins du consommateur(clients).

Références

Références

Référence Chapitre I

1. Barron, R.F. 1985: Clarendon Press.
2. Djelloul, A., *Simulation de cycle de Claude pour la liquéfaction de l'air, de l'azote et de l'oxygène*. 2006.
3. Data, H., *Air Liquide*. Paris, France, 2001.
4. Barron, R.F., *Cryogenic systems*. 1985: Clarendon Press.
5. Lebrun, P., La cryogénie, clé de la science et de la technologie *avancées*. Bulletin de l'IIF-n, 2003: p. 6.
6. Weisend, J.G. and J. Weisend, *Handbook of cryogenic engineering*. Vol. 325. 1998: Taylor & Francis Philadelphia, PA.
7. Haselden, G.G., *Cryogenic fundamentals*. 1971.
8. Hermosilla-Lara, G., *Stockage de l'hydrogène par adsorption sur charbon actif: Etude des effets thermiques lors de la charge dynamique d'un réservoir à lit fixe adsorbant*. 2007, Université Joseph-Fourier-Grenoble I.
9. Mokhtar, B., LICENCE ACADEMIQUE.

Référence chapitre II

1. Lebrun, P., *La cryogénie, clé de la science et de la technologie avancées*. Bulletin de l'IIF-n, 2003: p. 6.
2. Medjdoul, H. and S. Chekroune, *SEPARATION CRYOGENIQUE DE L'AIR*. 2015, univ-bouira.
3. Djelloul, A., *Simulation de cycle de Claude pour la liquéfaction de l'air, de l'azote et de l'oxygène*. 2006.
4. Petit, P., *Séparation et liquéfaction des gaz*. 1995: Ed. Techniques Ingénieur.
5. BOISSIN, J.-C., et al., *Cryogénie. Mise en oeuvre des basses températures*. Techniques de l'ingénieur. Génie énergétique, 1993. 4(B2382): p. B2382. 1-B2382. 35.

Référence chapitre III

1. Djelloul, A., *Simulation de cycle de Claude pour la liquéfaction de l'air, de l'azote et de l'oxygène*. 2006.
2. Data, H., *Air Liquide*. Paris, France, 2001.
3. Barron, R.F., *Cryogenic systems*. 1985: Clarendon Press.
4. Lebrun, P., La cryogénie, clé de la science et de la technologie *avancées*. Bulletin de l'IIF-n, 2003: p. 6.
5. Weisend, J.G. and J. Weisend, *Handbook of cryogenic engineering*. Vol. 325. 1998: Taylor & Francis Philadelphia, PA.

Référence Chapitre IV

1. Djelloul, A., *Simulation de cycle de Claude pour la liquéfaction de l'air, de l'azote et de l'oxygène*. 2006.
2. Haselden, G.G., *Cryogenic fundamentals*. 1971.
3. Hermosilla-Lara, G., *Stockage de l'hydrogène par adsorption sur charbon actif: Etude des effets thermiques lors de la charge dynamique d'un réservoir à lit fixe adsorbant*. 2007, Université Joseph-Fourier-Grenoble I.
4. Mokhtar, B., LICENCE ACADEMIQUE.