

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

Université M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté de Technologie
Département Génie Mécanique

Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en :

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

THEME

**Etude du processus de liquéfaction et séparation des gaz
de l'air.**

Présenté par :

BENTITRAOUI Tahar

Promotrice : M^{me} GUEMMADI

Promotion 2021- 2022

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A ma très chère mère décédée, qui n'a jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.

A mon très cher père tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager, ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

Remerciements

Je remercie en premier lieu dieu tout puissant de m'avoir accordé la puissance et la volonté pour achever ce travail.

Je tiens à remercier tout d'abord mon encadrant, monsieur khellaf, et ma promotrice, madame Guemmadi, pour sa patience et surtout pour sa confiance, ses remarques et ses conseils, sa disponibilité et sa bienveillance.

Je voudrais également remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour toutes leurs remarques et critiques, ainsi que le personnel et les enseignants de Université M'Hamed Bougara - Faculté de Technologie.

Je tiens aussi à remercier monsieur le chef du département CHELLIL Ahmed ainsi que tout le personnel et les enseignants du département pour leur soutien inestimable.

Mes remerciements vont également à tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin, par leurs conseils, leurs suggestions et par leurs encouragements, à la réalisation de ce travail.

Merci à vous tous.

Résumé :

L'air est un mélange de plusieurs gaz, chaque de ces gaz a des utilisations, la séparation d'air en ses Gaz constituants devient très importante de côté commercial. Pour séparer l'air il est nécessaire de le liquéfier.

Notre travail est basé sur l'étude et la simulation de procédé de liquéfaction et la séparation des gaz de l'air de Linde Gaz, à l'aide de l'outil de simulation HYSYS. Et nous avons pu observer les différents paramètres qu'influence la pureté des produits.

Abstract :

Air is a mixture of several gases, each of these gases has uses, the separation of air into its constituent gases becomes very important on the commercial side. To separate the air it is necessary to liquefy it. Our work is based on the study and simulation of liquefaction process and separation of gases from the air of Linde Gaz, using the HYSYS simulation tool. And we have previously observed the different parameters that influence the purity of the products.

ملخص:

الهواء هو خليط من عدة غازات، كل من هذه الغازات له استخدامات، ويصبح فصل الهواء إلى الغازات المكونة له مهما جدا على ا لجانب التجاري. لفصل الهواء، من الضروري تسييله.
يعتمد عملنا على دراسة ومحاكاة عملية التسييل وفصل الغازات عن هواء Linde Gaz باستخدام أداة محاكاة HYSYS. وبعد ما تمت الدراسة قد تم استخلاص عدة عوامل تساهم في نقاء المنتجات والمكونات.

Nomenclature

Glossaire LETTRES LATINES NON INDICEES

Symbole	Désignation	Unité
U	Energie interne	KJ
M	Masse	KG
V	Volume	M ³
P	Pression	Bar
T	Température	K
W	Travaille par unité de masse	KJ/KG
H	Enthalpie	KJ/KG
CP	La chaleur spécifique du gaz à pression constante	$\frac{KJ}{Kg.k}$
Cv	La chaleur spécifique du gaz a volume constante	$\frac{KJ}{Kg.k}$
PFD	Process flow Diagram	Kg
W/m _f	Le travail nécessaire par unité de masse du gaz liquéfiée	KJ/KG

LETTRES GRECS

Symbole	Désignation	Unité
μ _{JT}	Coefficient de Joule-Thomson	Sans dimension

Indices

Symbole	Désignation	Unité
GAP	Gaz de l'air pur	-
GAN	Gaz nitrogène	-
GOX	Gaz oxygène	-
GAR	Argon gazeux	-
GCO2	Co2 gaz	-
LOX	Liquide oxygène	-
LAR	Liquide argon	-
LIN	Liquide nitrogène	-
LAP	Liquide de l'air pure	-
C2H2	Acétylène	-
LIC	Co2 liquide	-
PGAN	Gaz nitrogène pur	-
IPGAN	Gaz nitrogène impure	-
MLIN	Mélange riche on liquide nitrogène	-
MLOX	Mélange riche on liquide oxygène	-
MLAP	Mélange de l'air liquide pur	-

Sommaire

Dédicace.....	2
Remerciements.....	3
Résumé	4
Introduction générale	1
Chapitre I :Généralités sur la cryogénie et Etude bibliographique.....	2
I. Introduction	3
I.1 Définition de la cryogénie.....	3
I.2 Domaine d'utilisation de la cryogénie	5
I.3 Techniques de production des basses températures	6
I.3.1 Détente de Joule (ou Joule-Gay Lussac)	6
I.3.2 Effet de Joule Thompson ou Joule-Kelvin	8
I.3.3 Détente adiabatique.....	11
I.3.4 Température d'inversion	12
I.4 Définition de la liquéfaction	13
I.5 Cycles de liquéfaction cryogénique	13
I.5.1 Cycle idéal de liquéfaction d'un gaz.....	14
I.5.2 Cycle de Linde –Hampson	15
I.5.3 Cycle de liquéfaction de Linde avec pré-refroidissement.....	16
I.5.4 Cycle de Linde à détente étagée.....	17
I.5.5 Cycle de Claude	17
I.5.6 Système de liquéfaction de KAPITZA	18
I.6 Etude bibliographique	19
Chapitre II : Présentation de l'entreprise et description du procédé de séparation et liquéfaction des gaz del'air.....	21
II. Présentation de l'entreprise.....	22
II.1.1 Présentation générale de Linde Gas Algérie (LGA)	22
II.1.2 Unité de Réghaia	23
II.1.3 Vue globale	23
II.1.4 L'organigramme de LGA	26
II.2 Introduction.....	27
II.3 Principe de distillation	27
II.3.1 Distillation simple	28
II.3.2 Rectification.....	28
II.4 Procédés de séparation des gaz de l'air.....	31
II.4.1 Gaz de l'air	31

Sommaire

II.4.1.1	définition de l'air.....	31
II.4.1.2	compositions de l'air.....	31
II.4.1.3	Points d'ébullition des composants de l'air.....	32
II.4.2	Propriétés des composants de l'air (l'oxygène, l'azote et l'argon).....	33
II.4.2.1	Propriétés et utilisations de L'oxygène	33
II.4.2.2	Propriétés et utilisations de L'Azote	35
II.4.2.3	Propriétés et utilisations de L'argon	36
II.4.3	Processus du Linde Gaz de séparation et liquéfaction de l'air	37
II.4.3.1	Aspiration et compression de l'air ambiant	38
II.4.3.2	Pré-refroidissement avec de l'eau froide.....	39
II.4.3.3	L'épuration de l'air.....	39
II.4.3.4	Le refroidissement de l'air	41
II.4.3.5	Fractionnement d'air et stockage des gaz	42
II.5	Equipements utilisés dans la séparation cryogénique de l'air	45
II.5.1	Compresseur d'air de processus centrifuge.....	45
II.5.2	Groupe surpresseur - turbine (turbocompresseur)	45
II.5.3	Refroidisseurs	45
II.5.4	Echangeurs de chaleur.....	46
II.5.5	Condenseurs/rebouilleurs	47
Chapitre III	:Présentation de logiciel Aspen HYSYS.....	48
III.	Introduction	49
III.1	Définition du logiciel Aspen HYSYS	49
III.2	Les modèles thermodynamiques de HYSYS	49
III.3	Choix des composés	51
III.4	Utilisation de la simulation	51
III.5	Concepts et caractéristiques du simulateur HYSYS.....	51
III.5.1	Concepts de base du simulateur HYSYS	51
III.5.2	Environnement de simulation	53
III.5.3	Caractéristiques principales de HYSYS	54
III.6	Les étapes d'utilisation du logiciel HYSYS	55
III.7	Les différents équipements de HYSYS	56
III.7.1	Equipements de canalisations	56
III.7.1.1	Mixeur (mélangeur).....	56
III.7.1.2	Vanne (ou vanne de Joule-Thomson)	57
III.7.2	Equipements de rotation	58

Sommaire

III.7.2.1 Compresseur.....	58
III.7.2.2 Détendeur (Turbine)	59
III.7.3 Equipements de séparation	60
III.7.3.1 Séparateur	60
III.7.3.2 Colonne de distillation (ShortCut Column)	61
III.7.4 Equipements de transfert de chaleur	63
III.7.4.1 Cooler /Heater	63
III.7.4.2 Echangeur de chaleur LNG « LNG Exchanger »	64
III.7.5 Opérations logiques.....	65
III.7.5.1 Recycle.....	65
Chapitre IV :Simulation sous HYSYS et discussion des résultats.....	67
IV. Introduction	68
IV.1 Les étapes de simulation de procédé	68
IV.1.1 Introduction des compositions	68
IV.1.2 Choix du modèle d'équation d'état	69
IV.1.3 Description du procédé	70
IV.2 Résultat, et discussion	82
IV.2.1 Présentation et interprétation des profils du procédés.....	82
IV.2.1.1 Au niveau de l'échangeur	82
IV.2.1.2 Au niveau de colonne de distillation.....	83
IV.2.1.2.1 profils de la température.....	83
IV.2.1.2.2 Profils de débits molaires	83
IV.2.1.2.3 Profils des composition phase (vapeur et liquide).....	84
IV.2.1.2.4 Interprétation des profils.....	85
IV.2.2 Les résultats obtenus.....	85
Conclusion générale	87
Liste des références.....	89

Liste des tableaux

Tableau II-1 Généralités sur LGA	24
Tableau II-2 Production des gaz par site.....	25
Tableau II-3 Liste des abréviations	25
Tableau II-4 Les propriétés chimiques de l'oxygène	33
Tableau II-5 Les propriétés chimiques de l'Azote	35
Tableau II-6 Les propriétés chimiques de l'Azote	36
Tableau II-7 Caractéristiques d'un compresseur	45
Tableau II-8 Caractéristiques d'un Groupe surpresseur	45
Tableau II-9 Caractéristiques d'un Refroidisseur	46
Tableau II-10 Caractéristiques d'un Echangeurs de chaleur	46
Tableau II-11 Caractéristiques d'un Condenseurs	47

Liste des figures

Figure I-1 Différentes étapes vers les basses températures et leurs acteurs	4
Figure I-2 Détente de Joule (ou Joule-Gay Lussac)	6
Figure I-3 Principe de l'expérience de Joule – Thomson.....	8
Figure I-4 Diagramme de la température d'inversion	12
Figure I-5 Cycle idéal de liquéfaction d'un gaz (a) Représentation schématique (b) Diagramme T-s ...	14
Figure I-6 Cycle réel de Linde-Hampson (a) Représentation schématique (b) Diagramme T-s.....	15
Figure I-7 Cycle de liquéfaction de Linde avec pré-refroidissement.....	16
Figure I-8 cycle de Linde à détente étagée	17
Figure I-9 Le cycle de Claude (a) Représentation schématique (b) Diagramme T-s.....	18
Figure I-10 Le cycle de Kapitza (c) Représentation schématique (b) Diagramme T-s	19
Figure II-1 Gamme de production des gaz par site en Algérie	25
Figure II-2 schémas de la distillation	27
Figure II-3 représentation simplifiée d'une colonne de rectification.....	29
Figure II-4 Exemples de distillation (l'alcool et l'eau)	30
Figure II-5 Les compositions de l'air	32
Figure II-6 Points d'ébullition de gaz d'air	32
Figure II-7 PFD du procédé	38
Figure II-8 Aspiration et compression de l'air	39
Figure II-9 tamis moléculaire	40
Figure II-10 Refroidissement de l'air	41
Figure II-11 Colonne de distillation.....	43
Figure II-12 Séparations des gaz de l'air	44
Figure III-1 Environnements de développement dans HYSYS	53
Figure III-2 Organigramme des environnements dans la hiérarchie.....	55
Figure III-3 Présentations d'un mixeur	56
Figure III-4 Représentation d'une vanne	57
Figure III-5 Représentation d'un compresseur	58
Figure III-6 Représentation d'une turbine.	59
Figure III-7 présentations d'un séparateur	60
Figure III-8 Représentation d'une colonne de distillation.....	61
Figure III-9 Représentation d'une Cooler /Heater	63
Figure III-10 Représentation d'un échangeur	64
Figure III-11 Représentation d'un recycleur.	65
Figure IV-1 Liste des composants chimiques.....	68
Figure IV-2 La composition du gaz de l'air	69
Figure IV-3 Choix de l'équation d'état pour le modèle.....	69
Figure IV-4 Schéma général du procédé de liquéfaction et séparation des gaz de l'air par le logiciel HYSYS	70
Figure IV-5 Paramètres d'entrée-sortie de compresseur C1161	71
Figure IV-6 Paramètres d'entrée-sortie de refroidisseur E1121	72
Figure IV-7 Paramètres d'entrée-sortie de refroidisseur E2418	72
Figure IV-8 Paramètres d'entrée-sortie du mixeur.....	73
Figure IV-9 Paramètres d'entrée-sortie de compresseur de recyclage	74
Figure IV-10 Paramètres d'entrée-sortie de refroidisseur E1421.....	74
Figure IV-11 Paramètres d'entrée-sortie de compresseur C3461	75
Figure IV-12 Paramètres d'entrée-sortie de refroidisseur E3427	75

Liste des figures

Figure IV-13 Paramètres d'entrée-sortie de l'échangeur principal.....	76
Figure IV-14 Paramètres d'entrée-sortie de la turbine de détente	77
Figure IV-15 les paramètres d'entrée-sortie du séparateur	77
Figure IV-16 Paramètres d'entrée- sortie de la vanne de joule Thomson (J-T).....	78
Figure IV-17 Page de connexion de la colonne de distillation	79
Figure IV-18 Paramètres d'entrée- sortie de la colonne de distillation	79
Figure IV-19 la composition de LIN.....	80
Figure IV-20 la composition de GAN.....	80
Figure IV-21 la composition de RESIDU	81
Figure IV-22 variations du flux de chaleur en fonction de la température	82
Figure IV-24 variations des débits molaires dans la colonne de distillation	83
Figure IV-25 variations des compositions de la phase vapeur dans la colonne de distillation	84
Figure IV-26 variations des compositions de la phase liquide dans la colonne de distillation.....	84

Introduction générale

La cryogénie vient du mot grec "Kyros" qui signifie "froid". C'est la zone où les matériaux sont produits, stockés, transportés et utilisés à des températures ultra-basses. Le froid extrême peut déclencher des réactions chimiques intéressantes. Par exemple, une substance passe d'un état gazeux à un état liquide. Elle est le résultat d'une conjonction historique du progrès scientifique 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).

Au début du 20^{ème} siècle, la première liquéfaction de l'air est réalisée indépendamment en 1877 par le français Paul Louis Cailletet (1832-1913) et le genevois Raoul Pictet (1846- 1929). Une température d'environ 90 K (-183.15 °C) est alors atteinte. Cette première liquéfaction de l'air marque la naissance d'une nouvelle science qui aura pour objectif l'étude des basses températures et de ses effets

La liquéfaction d'un gaz consiste à lui retirer de l'énergie afin de le refroidir depuis la température ambiante jusqu'au niveau de son point de rosée puis à condenser la vapeur saturée. Parmi les techniques les plus utilisées pour la production du froid : la vanne de Joule-Thomson et la détente adiabatique (la turbine). C'est à l'aide de la distillation qu'on a pu réaliser la séparation des gaz de l'air par l'intermédiaire des colonnes de distillation cryogénique.

L'objectif de notre travail est d'étudier et simuler à partir de logiciel HYSYS, le procédé de liquéfaction des gaz de l'air Linde GAZ, afin d'avoir l'azote liquide et d'observer les différents paramètres qui affecte la pureté.

Pour ce faire, notre mémoire est organisé comme suit :

- Le premier chapitre est consacré à présenter quelques techniques de production des basses températures, des généralités sur la cryogénie et les cycles de la liquéfaction.
- Le deuxième chapitre comporte une présentation de l'entreprise suivie par le principe de distillation, les propriétés des gaz de l'air et l'étude du procédé de Linde Gas.
- Le troisième chapitre constitue une présentation globale du logiciel HYSYS qui est l'outil de simulation qu'on exploitera dans le quatrième chapitre.
- Le dernier chapitre sera consacré aux applications ainsi qu'à la présentation des résultats de simulation de cycle de liquéfaction étudiés.

Nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I:

Généralités sur la cryogénie et Etude bibliographique

I. Introduction :

Avoir des très basses températures c'était l'objectif de grands nombres de chercheurs scientifiques et des physiciens. Dans ce chapitre on va présenter quelques techniques de productions des basses températures, des généralités sur la cryogénie, les cycles de la liquéfaction en fin les colonnes de distillations.

I.1 Définition de la cryogénie :

La cryogénie est l'ensemble des applications et des sciences faisant intervenir les basses températures, c'est-à-dire les températures inférieures à 120 K (-153.15°C). Cette limite de 120 K correspond à la température à partir de laquelle les gaz contenus dans l'air commencent à se liquéfier. Aujourd'hui, la recherche dans le domaine de la cryogénie arrive à atteindre des températures de quelques dizaines de m_k; sachant qu'il est impossible d'aller au-delà des 0 K car c'est la température pour laquelle les molécules sont privées de tout mouvement (la matière est inerte), et donc l'énergie est nulle. La cryogénie possède de très nombreuses applications notamment dans les secteurs alimentaire, médical, industriel, physique et de l'élevage. [1]

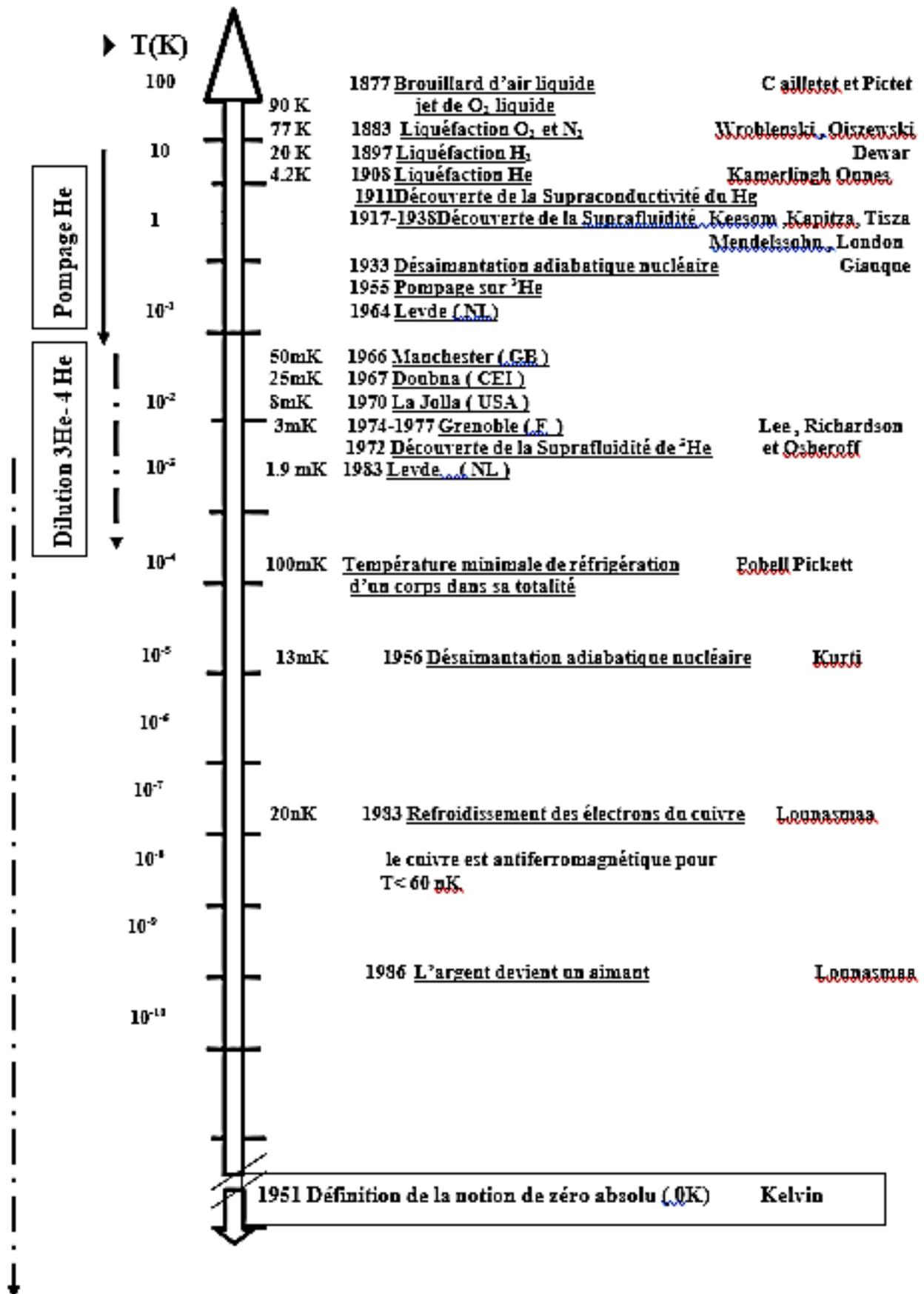


Figure I-1 Différentes étapes vers les basses températures et leurs acteurs

I.2 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 températures ou qui exigent d'y travailler : supraconductivité, physique nucléaire, magnétisme, technique des gyroscopes de haute précision, électronique appliquée, etc...
- L'industrie chimique fait un usage croissant de l'oxygène pour les réactions et surtout de l'azote pour l'inertage des atmosphères. La production en quantité massive de l'éthylène ne peut se faire qu'à l'aide des basses températures pour sa séparation et sa purification finale.
- La biologie utilise le froid pour conserver divers produits (par Lyophilisation), pour la préparation de produits pharmaceutiques et pour de nombreuses autres opérations.
- La médecine et la chirurgie emploient depuis longtemps des produits de base préparés grâce à la cryogénie : oxygène, protoxyde d'azote, plasma sanguin, etc...
- Les liquides cryogéniques usuels tels que l'oxygène et l'azote et les gaz rares de l'air sont employés en quantités massives dans la sidérurgie et la métallurgie (notamment argon/hélium pour la soudure).
- Quant aux industries spatiales, on sait que l'oxygène, l'hydrogène, l'azote et l'hélium liquide sont à la base même de leur existence. L'oxygène et l'hydrogène liquides assurent la propulsion des fusées, l'azote et l'hélium sont indispensables pour assurer l'inertage et le bon fonctionnement notamment des pompes d'alimentation à grand débit des moteurs de fusées.
- L'utilisation du froid pour le traitement, la production ou la transformation des gaz constitue donc actuellement un des fondements essentiels de l'industrie moderne.
- L'étude de superfluidité (absence de viscosité pour un liquide).
- La transformation en une fine poudre de toutes sortes de matières.
- La récupération de plus de 90% des gaz destructeurs de la couche d'ozone.
- La création, à partir d'azote liquide, de toutes sortes de neiges.
- Le transport sur de longues distances de gaz naturel à un cout réaliste. [2]

I.3 Techniques de production des basses températures :

L'Homme des pays tempérés s'est rapidement rendu compte que les denrées périssables pouvaient être conservées dans de bien meilleures conditions l'hiver que l'été. L'utilisation du (froid naturel) s'est faite très tôt et aussi très longtemps puisqu'au début du 20ème siècle le marché de la glace naturelle était encore plus important que celui de la glace artificielle. La glace produite naturellement, sans machines, était :

- Soit issue, de façon permanente, de régions froides et transportée sur de longues distances.
- Soit issue, de manière discontinue, des pièces d'eau des régions tempérées gelées par le froid hivernal. Il était nécessaire de conserver cette glace dans des édifices particuliers les (glacières) dont les parois devaient être thermiquement isolantes.
- Soit produite, toujours de manière naturelle, mais à l'instigation de l'homme, quand cela était possible. Ainsi, dans les pays au ciel très clair, on a pu produire de la glace dans des bassins largement ouverts vers le ciel. Le rayonnement thermique de l'eau permettait, dans certaines conditions atmosphériques, un refroidissement suffisant pour former de la glace. [3]

Il existe plusieurs techniques de production des basses températures, et parmi ces techniques :

I.3.1 Détente de Joule (ou Joule-Gay Lussac) :

La détente de Joule (parfois appelée détente de Joule-Gay Lussac) est un processus irréversible où on fait se détendre un gaz en mettant l'enceinte dans laquelle il est contenu en communication avec une enceinte vide. La détente est le processus où le gaz remplit l'autre enceinte. On va chercher ici à évaluer le changement de température qui subit le gaz au cours de cette détente.

Au cours d'une telle détente, aucun travail n'est effectué ($\delta W=0$). L'enceinte étant isolée thermiquement de l'extérieur, aucun échange de chaleur avec extérieur n'a lieu ($\delta Q=0$). [4]

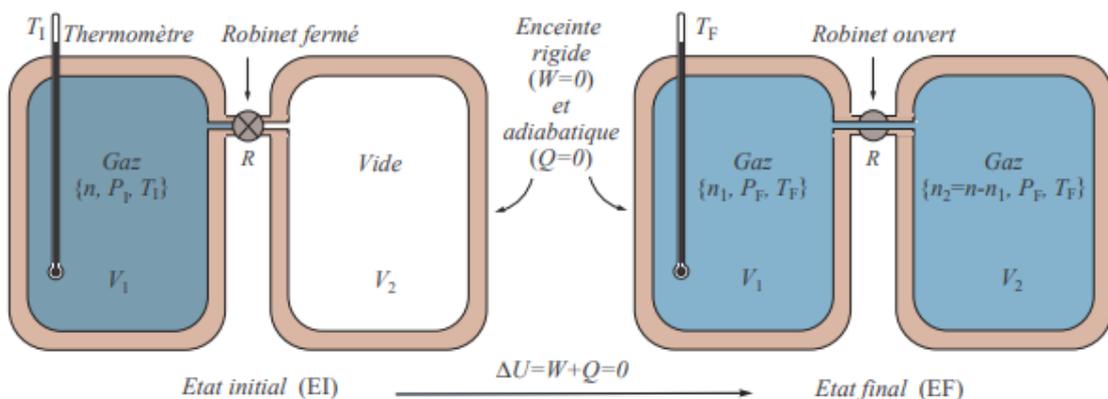


Figure I-2 Détente de Joule (ou Joule-Gay Lussac)

Le premier principe impose $dU=0$. Donc l'énergie totale U du gaz dans l'enceinte est conservée au cours de la détente. Par contre, l'entropie va augmenter au cours de cette détente. Pour déterminer la variation de température du gaz quand on le détend, nous introduisons le coefficient de Joule qui mesure ce changement à U constant :

$$\mu_J = \left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_U \quad \text{I.1}$$

μ_J : Coefficient de Joule.

De sorte que le changement de température au cours de la détente s'exprime :

$$\Delta T = \int_{V_1}^{V_2} \mu_J dV \quad \text{I.2}$$

Ce coefficient ne se calcule pas directement pour un gaz de van der Waals, car la condition (U constant) n'est pas simple à traduire. Il serait plus commode de faire apparaître des coefficients mesurables par ailleurs. On va faire apparaître le coefficient de dilatation isochore (à volume fixé) $\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V$ et la capacité thermique du gaz à volume fixé C_V :

$$\mu_J = \left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_U = - \left(\frac{\partial T}{\partial U}\right)_V \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = - \frac{1}{c_V} \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T \quad \text{I.3}$$

Où on a utilisé :

$$\left(\frac{\partial x}{\partial y}\right)_z = - \left(\frac{\partial x}{\partial z}\right)_y \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)_x \quad \text{I.4}$$

$$dU = TdS - pdV \rightarrow \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = T \left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_{T-P} \quad \text{I.5}$$

$$\mu_J = - \frac{1}{c_V} \left(T \left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_{T-P}\right) \quad \text{I.6}$$

On utilise enfin la relation de Maxwell $\left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T = \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V$

$$\mu_J = - \frac{1}{c_V} \left(T \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_{T-P}\right) \quad \text{I.7}$$

- Pour un gaz parfait $PV = nRT$ donc :

$$\mu_J = - \frac{1}{c_V} \left(T \frac{nR}{V} - p\right) = - \frac{1}{c_V} (p - p) = 0 \quad \text{I.8}$$

Il n'y a pas de changement de température lors de la détente de Joule.

- Pour un gaz de Van der Waals, en l'exprimant avec le volume molaire V_m

$$P = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a}{V_m^2} \text{ donc } \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V = \frac{R}{V_m} \quad \text{I.9}$$

$$\mu_J = - \frac{1}{c_V} \left(T \frac{R}{V_m - b} - p\right) = - \frac{1}{c_V} \left(T \frac{R}{V_m - b} - \frac{RT}{V_m - b} + \frac{a}{V_m^2}\right) = - \frac{1}{c_V} \frac{a}{V_m^2} \quad \text{I.10}$$

Donc si on augmente le volume de V_1 à V_2 , il apparaît un changement de température

$$\Delta T = \int_{V_2}^{V_1} \mu_J dV = \int_{V_2}^{V_1} -\frac{1}{c_v} \frac{a}{V_m^2} dV = \frac{a}{c_v} \left(\frac{1}{V_2} - \frac{1}{V_1} \right) < 0 \quad \text{I.11}$$

Le gaz se refroidit lors de la détente. Physiquement, cela vient de ce que le gaz réel par rapport au gaz parfait présente des interactions attractives de type van der Waals entre ses molécules ou atomes. Quand on détend le gaz, la distance entre molécules augmente. Cela force le gaz à effectuer un travail contre les interactions attractives. L'énergie totale étant constante, ce travail s'effectue au détriment de son énergie cinétique : les molécules vont ralentir car elles doivent travailler contre les interactions. Qui dit ralentissement des molécules dit finalement réduction de la température. [4]

I.3.2 Effet de Joule Thompson ou Joule-Kelvin :

L'effet Joule-Thomson J-T est le terme utilisé pour désigner la chute de température d'un gaz comprimé causée par une expansion libre. Celle-ci se définit par un gaz de haute pression qui passe à travers un étranglement important (bouchon poreux, verre fritté, coton tassé, robinet à pointeau, ...).

Le phénomène J-T est irréversible puisque le système n'est pas à l'équilibre. La figure ci-dessous présente un exemple d'une expansion J-T. [4],[5]

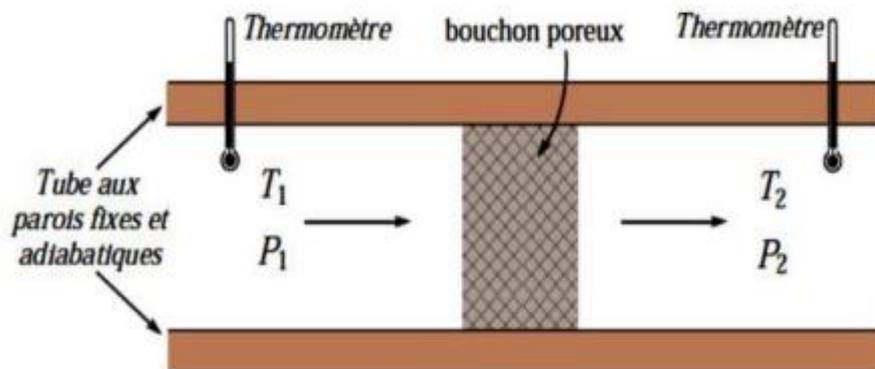


Figure I-3 Principe de l'expérience de Joule – Thomson

Dans ce système, la membrane qui sépare les deux sections, une remplie de gaz et l'autre vide, est rompue pour laisser le gaz passer de la zone de haute pression à la zone de basse pression.

- Les parois du tuyau sont rigides et adiabatiques.

- La pression P1 en amont du tampon est plus forte que la pression P2 en aval (cette baisse de pression pouvant être comprise par l'existence de forces de frottements à la traversée du bouchon poreux provoquant un ralentissement du gaz et une diminution de pression).

La détente de Joule-Thomson intervient lors d'un écoulement gazeux irréversible lent et adiabatique à travers un orifice ou une paroi poreuse. La pression passe de P1 en amont à P2 en aval de la paroi. Le premier principe appliqué à la transformation adiabatique (lorsque le fluide passe de l'état 1 à l'état 2).

Le travail de transvasement est :

$$W = -P_2V_2 - P_1V_1 \quad \text{I.12}$$

La variation d'énergie interne est alors :

$$U_2 - U_1 = -W = P_1V_1 - P_2V_2 \quad \text{I.13}$$

$$U_2 + P_2V_2 = U_1 + P_1V_1 \quad \text{I.14}$$

$$H_2 = H_1 \quad \text{I.15}$$

L'enthalpie du gaz n'a pas donc varié, la détente JOULE THOMSON est isenthalpique $dH = 0$

L'abaissement de température en fonction de la pression peut être caractérisé par un coefficient

μ_{J-t} tel que $\mu_{J-t} = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)$ coefficient JOULE -THOMSON qui se calcul comme suit :

$$dH = d(U + PV) = dU + PdV + VdP = 0 \quad \text{I.16}$$

L'expression $dU + PdV$ représente ∂Q (principe de l'équivalence), d'où :

$$dH = \partial Q + VdP = 0 \quad \text{I.17}$$

Par ailleurs, en prenant T et P comme variables indépendantes, on a :

$$\partial Q = C_p dT + hdp \quad \text{I.18}$$

Avec : $C_p = \left(\frac{\partial Q}{\partial T}\right)_p$: Chaleur spécifique à pression constante I.19

$$h = \left(\frac{\partial Q}{\partial P}\right)_p : \text{Chaleur de compression isotherme} \quad \text{I.20}$$

D'où : $C_v dT + (H + V) dP = 0 \quad \text{I.21}$

Et : $\mu_{J-t} = -\frac{h+V}{C_p} \quad \text{I.22}$

Le coefficient h peut s'exprimer de différentes façons, et notamment :

$$h = -T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p \quad \text{I.23}$$

D'où l'expression du coefficient μ_{j-t} :

$$\mu_{J-t} = \frac{-T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p - V}{C_p} \quad \text{I.24}$$

Les gaz réels, leur coefficient est en général positif et les gaz se refroidissent par détente, mais l'inverse peut être vrai selon les valeurs respectives de $T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p$ et de V. [4],[5]

I.3.3 Détente adiabatique :

La troisième méthode pour produire les basses températures ; c'est la détente adiabatique du gaz à travers une machine d'expansion, pour ce cas idéal la détente est réversible et adiabatique (isentropique), on définit alors un coefficient de détente isentropique : $\mu_S = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_S$

Qui exprime le changement de la température dû au changement de la pression à entropie constante. Ce coefficient se calcule comme suit :

$$\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_S = - \left(\frac{\partial T}{\partial S}\right)_P \left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T \quad \text{I.25}$$

$$\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_P = \frac{\partial Q}{T} \frac{1}{dT} = \frac{1}{T} \left(\frac{\partial Q}{\partial T}\right)_P = \frac{C_P}{T} \quad \text{I.26}$$

D'où :
$$\left(\frac{\partial T}{\partial S}\right)_P = T \left(\frac{\partial T}{\partial Q}\right)_P = \frac{T}{C_P} \quad \text{I.27}$$

$$\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T = \frac{\partial Q}{T} \frac{1}{\partial P} = \frac{1}{T} \left(\frac{\partial Q}{\partial P}\right)_T \quad \text{I.28}$$

Le terme
$$\left(\frac{\partial Q}{\partial P}\right)_T = h = -T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P \quad \text{I.29}$$

D'où :
$$\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T = - \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P \quad \text{I.30}$$

$$\mu_J = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_S \frac{T}{C_P} \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P \quad \text{I.31}$$

Les deux facteurs $\frac{T}{C_P}$ et $\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$ sont toujours positifs donc μ_S est toujours positif ; la détente avec travail extérieur provoque toujours, à l'inverse de la précédente, le refroidissement du gaz traité. On pouvait d'ailleurs s'y attendre car le travail produit par le système est, en vertu du principe de l'équivalence compensé par diminution d'énergie interne, donc de la température. La détente isentropique, pour une même température de départ et entre deux pressions données, provoque un abaissement de température plus important que la détente isenthalpique.

(Le coefficient J-T : $\mu_{J-t} = \frac{V}{C_P} - \frac{T}{C_P} \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$ est plus petit que le coefficient $\mu_S = \frac{T}{C_P} \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$)

Elle est donc plus intéressante, mais son emploi est toujours combiné avec celle-ci car il n'est pas possible, pour des raisons technologiques, d'admettre la présence de liquide dans les machines de détente. [6],[7]

I.3.4 Température d'inversion :

On appelle coefficient de Joule-Thompson la pente d'une courbe isenthalpique dans le diagramme (T, P) du fluide considéré. Il mesure la variation élémentaire dT de la température que provoque une variation élémentaire dp de la pression pendant une détente élémentaire isenthalpique du fluide : $\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_H$

Ainsi, pour une DJT élémentaire, lorsque

$$\mu_{JT} \begin{cases} < 0 : \text{La température du fluide croit.} \\ = 0 : \text{La température du fluide est constante.} \\ > 0 : \text{La température du fluide décroît.} \end{cases}$$

Pour savoir si la température d'un fluide augmente ou diminue à la suite d'une DJT, il faut tracer les courbes correspondant à une enthalpie constante dans le diagramme (T, P). [5]

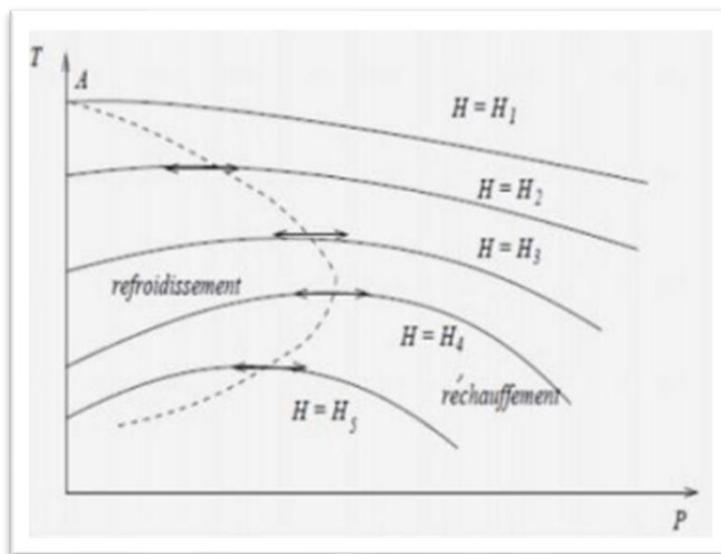


Figure I-4 Diagramme de la température d'inversion

Les courbes $T = f(P)$ passent par un maximum nommé point d'inversion. C'est-à-dire un point où la pente est nulle : $\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_H = 0$

- La courbe en pointillé qui relie ces points maximaux est appelée la (courbe d'inversion), et la température en ces points (température d'inversion).
- La température au point où la courbe d'inversion intercepte l'ordonnée ($P = 0$) est appelée la (température d'inversion maximale).
- On remarque que le coefficient de Joule-Thompson (la pente d'une courbe isenthalpique) est négatif à droite de la courbe d'inversion ($\mu_{JT} < 0$) et positif à gauche ($\mu_{JT} > 0$).

- Une détente isenthalpique se produit lorsqu'elle parcourt une courbe isenthalpique dans un diagramme (T, P) de la droite vers la gauche. Par conséquent, la température du fluide augmente durant une détente qui se produit du côté droit de la courbe d'inversion. La température du fluide diminue durant une détente qui se produit du côté gauche de la courbe d'inversion.
- L'effet de refroidissement ne peut donc être réalisé à moins que la température du fluide soit inférieure à la température d'inversion maximale. [5]

I.4 Définition de la liquéfaction :

La liquéfaction est un changement d'état qui fait passer un corps de l'état gazeux à l'état liquide. Elle est la transformation inverse de la vaporisation. L'usage vulgaire appelle parfois cette transformation condensation liquide. Elle peut se produire par compression ou refroidissement d'un gaz. La première industrialisation du procédé est due à Carl von Linde. [8]

I.5 Cycles de liquéfaction cryogénique :

Les cycles de réfrigération cryogénique et de liquéfaction impliquent une combinaison de compression isotherme secondaire, de refroidissement, de régénération thermique et d'expansion isenthalpique ou adiabatique des fluides.

Quatre principaux processus thermodynamiques à basse température peuvent être distingués :

- 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).
- Les cascades classiques ou intégrées. [9]

I.5.1 Cycle idéal de liquéfaction d'un gaz :

Le cycle idéal de liquéfaction correspond à celui mis en jeu dans un processus idéal, composé des transformations : [10]

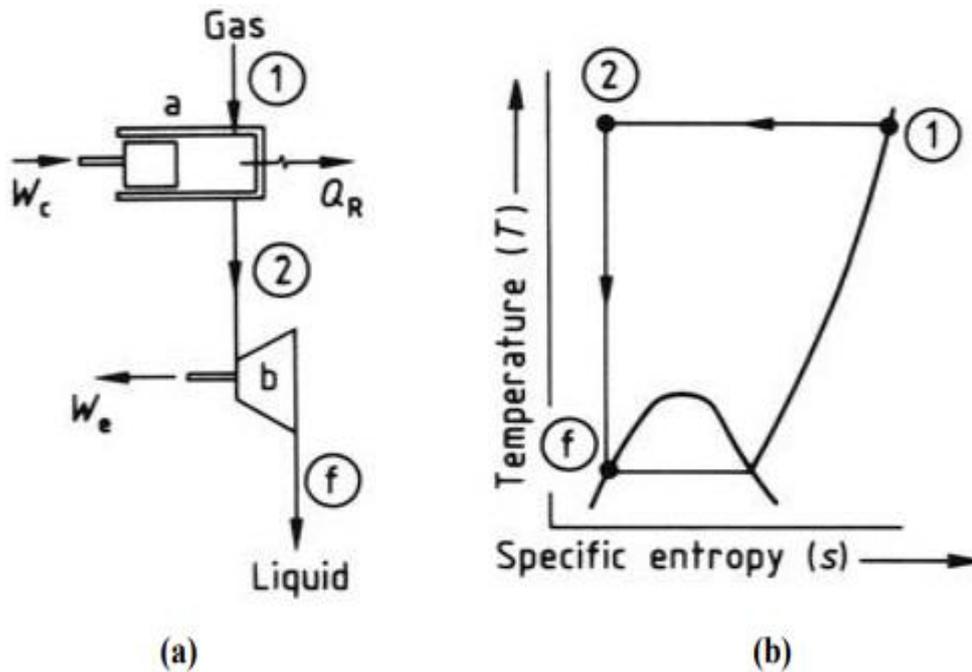


Figure I-5 Cycle idéal de liquéfaction d'un gaz (a) Représentation schématique (b) Diagramme T-s

- 1-2 : Une compression réversible et isotherme du gaz de la température ambiante (point 1) à une haute pression (point 2) pour assurer que le gaz deviendra un liquide saturé.
- 2-f : Une détente réversible et isentropique jusqu'au point f. La pression finale au point f est égale à la pression au point 1.

I.5.2 Cycle de Linde –Hampson :

Le cycle Linde-Hampson est utilisé dans la liquéfaction des gaz, en particulier pour la séparation de l'air.

Le système Hampson-Linde introduit un refroidissement par récupération. L'agencement de l'échangeur de chaleur permet aller au-delà d'une seule étape de refroidissement, et d'atteindre les basses températures nécessaires pour liquéfier le gaz.

Le cycle Linde- Hampson est décrit par le fluide est constitué de quatre transformations successives qui ont es propriétés suivantes :

- 1-2 : Une compression isotherme du mélange (gaz d'appoint et gaz non condensé du cycle précédent) dans le compresseur.
- 2-3 : Un refroidissement isobare dans un échangeur de chaleur par le gaz non condensé du cycle précédent.
- 3-4 : Une détente isenthalpique dans la vanne de Joule-Thomson.
- 4-g-1 : Un réchauffement isobare de la fraction vapeur non liquéfiée dans l'échangeur de chaleur (l'état g) pour refroidir le gaz pressurisé avant qu'il ne s'engage dans le détendeur et mélangée au gaz d'appoint.
- 4-f : La fraction liquide du mélange liquide-vapeur résultant est recueillie (l'état f). [10]

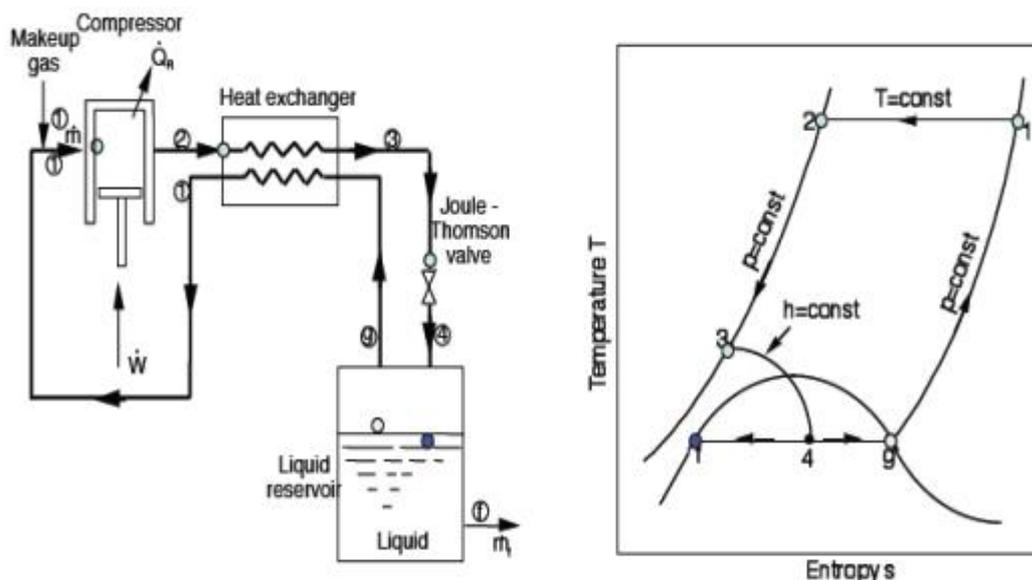


Figure I-6 Cycle réel de Linde-Hampson (a) Représentation schématique (b) Diagramme T-s

I.5.4 Cycle de Linde à détente étagée :

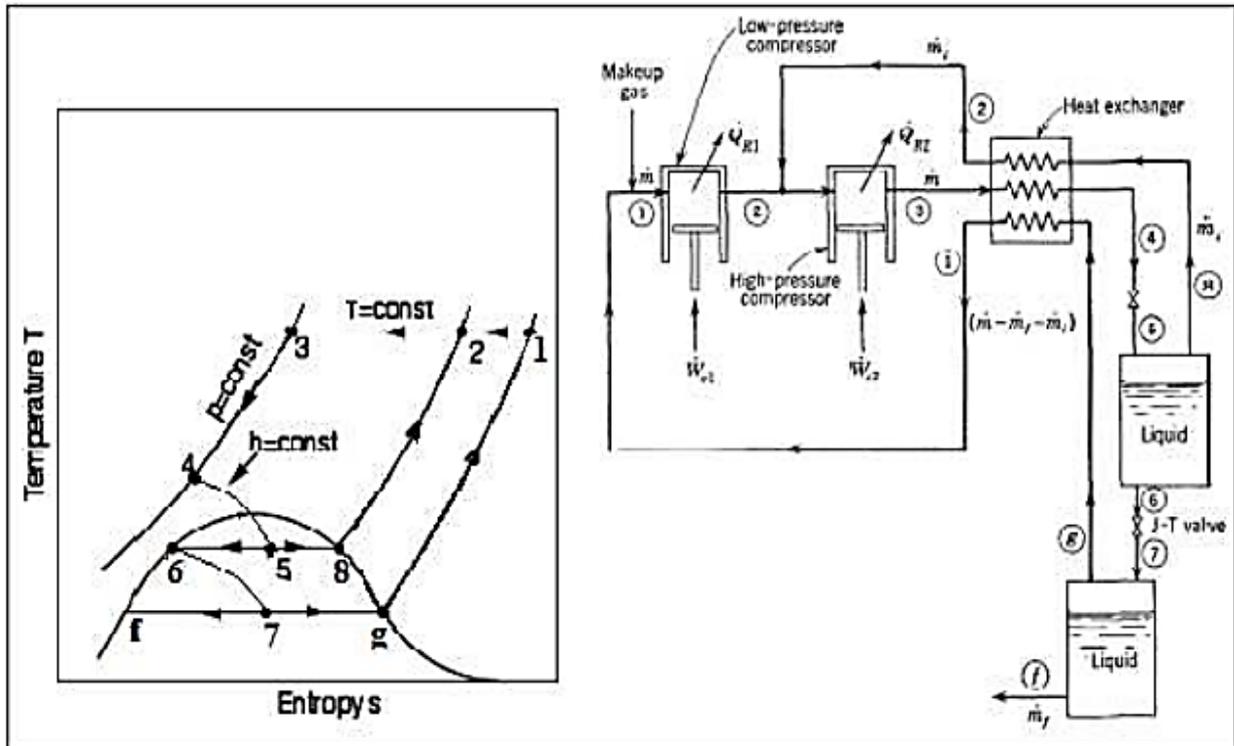


Figure I-8 cycle de Linde à détente étagée

I.5.5 Cycle de Claude :

- Le cycle de Claude associe deux détente, une isenthalpique et l'autre isentropique.
- Après une compression isotherme, le gaz est refroidi dans un premier échangeur (2-3).
- A la sortie de l'échangeur, une fraction de gaz haute pression refroidi (point 3) est envoyée dans la turbine servant à détendre isentropique d'un grand pourcentage du gaz pressurisé.
- Ce gaz, maintenant à très basse température (point 7), est dévié vers le deuxième échangeur de chaleur en (point 7), ou rejoint la ligne montante des gaz frais (refus de liquéfaction) pour pré-refroidir le gaz à haute pression. [10]

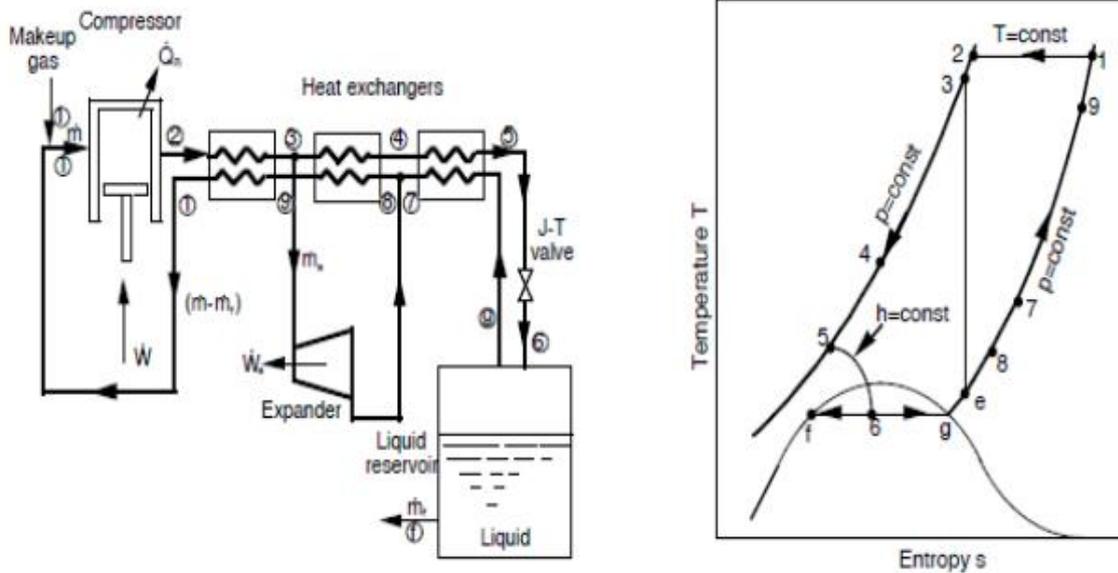


Figure I-9 Le cycle de Claude (a) Représentation schématique (b) Diagramme T-s

I.5.6 Système de liquéfaction de KAPITZA :

- Le cycle Kapitza est une version modifiée du cycle Claude dans laquelle le troisième échangeur de chaleur à basse température (BT) est supprimé du système.
- Le premier échangeur de chaleur est en fait un régénérateur qui combine le processus de pré-refroidissement avec le processus de purification.
- Une autre modification pratique notable par rapport au cycle Claude est que la turbine à mouvement alternatif est remplacée par un moteur d'expansion rotatif.
- Les états de haute pression (HP) de cycle 4 et 5 et les états de basse pression (BP) 7 et 8 sont identiques.
- Les performances des cycles de Claude et Kapitza sont généralement étudiées pour l'air, l'azote, l'oxygène, l'argon, le fluor et méthane.
- L'état d'entrée du compresseur est pris à 25 ° C et 1 atm pour les deux cycles mais la pression de sortie du compresseur est prise 40 atm pour le cycle Claude et 7 atm pour le cycle Kapitza.
- Les détendeurs sont supposés être isentropiques. [10]

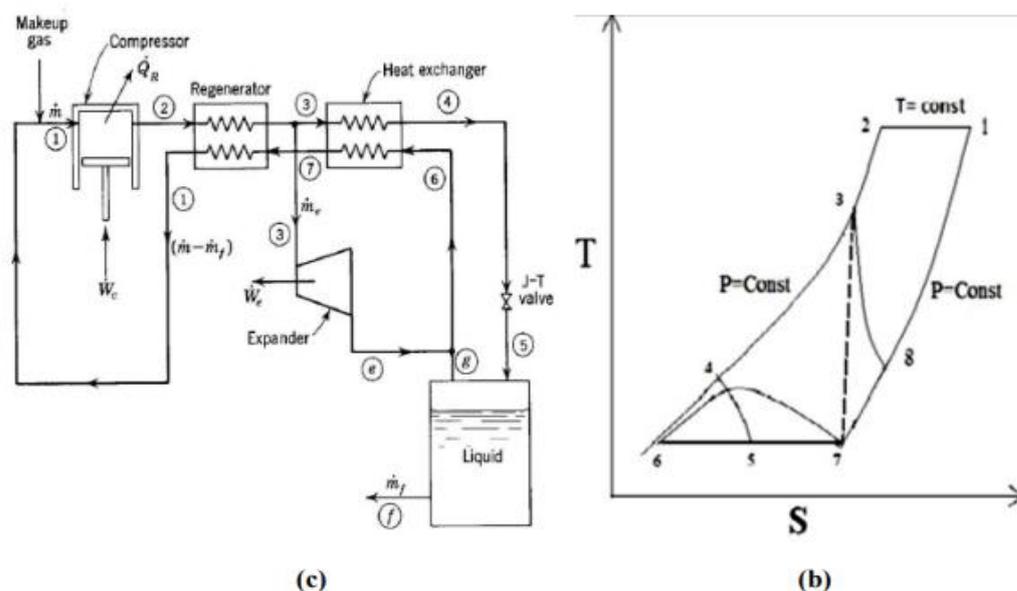


Figure I-10 Le cycle de Kapitza (c) Représentation schématique (b) Diagramme T-s

I.6 Etude bibliographique :

Plusieurs études théoriques et expérimentales se sont intéressées à l'optimisation et l'étude des cycles de liquéfaction des gaz de l'air, la première liquéfaction de l'air réalisée indépendamment en 1877 par le français Paul Louis Cailletet et le genevois Raoul Pictet. Une température d'environ 90 K ($-183,15\text{ }^\circ\text{C}$) est alors atteinte. Cette première liquéfaction de l'air marque la naissance d'une nouvelle science qui aura pour objectif l'étude des basses températures.

En 2006, DJELLOUL AMEL [1] a étudié les systèmes de liquéfaction des gaz est la recherche des paramètres appliqués sur le cycle de Claude pour la liquéfaction de l'air, l'azote et l'oxygène pour obtenir une meilleure performance.

En 2009, MILES ADEL [11] s'est basé sur le procédé de liquéfaction de gaz naturel et la simulation, plus le calcul du procédé PRICO établit avec HYSYS® et faire une comparaison entre le calcul donné par AspenTech HYSYS® et les données réelles de l'installation de liquéfaction.

En 2013, LAÏFA et al [12] ont étudié la comparative entre deux procédés de liquéfaction de gaz naturel, à savoir les procédés PRICO et APCI, en particulier la liquéfaction par les deux

procédés cités précédemment et Une étude technique comparative entre appareils représentatifs Spécifique à chaque procédé (échangeur, compresseur, turbine, etc...).

En 2015, Mohamedet et all [13] ont fait une représentation sur les différents types de capteurs industriels de par leur principe physique et leurs caractéristiques spécifique, et le rôle des capteurs dans l'unité Linde Gas.

En 2016, Zioui et all [14] ont étudié le système simple de Linde, en particulier sur la notion d'énergie avec son expression pour les différents porteurs ainsi que sur les bilans exégétiques des principaux composants du système et l'efficacité de l'échangeur, le travail de compression et la fraction de gaz liquéfiée.

En 2016, AYAD et all [15] ont fait une étude et simulation à partir de logiciel Aspen Hysys des cycles cryogéniques. En particulier les cycles de Linde et de Claude et ce pour différentes substances à savoir l'Azote, l'Oxygène, l'Argon et l'Air et comparer les performances des deux.

En 2019, SALHAOUI YOUBA [16] ont étudié et simuler à partir de logiciel Aspen plus le cycle de Linde, afin d'avoir le maximum de la pureté du gaz liquéfié en présenter quelques paramètres appliqués sur le cycle de Linde pour la liquéfaction de l'air, l'azote et l'oxygène pour obtenir une meilleure pureté et rendement

En 2019, BETTAYEB et all [17] ont fait une étude sur la chaîne de production d'hydrogène (production, transport, distribution, stockage), et les risques liés sur ce Chain, après une analyse qualitative des risques moyennant la méthode HAZOP où ils ont constaté que le risque majeur pour cette installation c'est la rupture catastrophique au niveau du ballon de stockage. Puis ils ont modélisé ce phénomène par l'utilisation de logiciel de modélisation des explosions où ils ont calculé les distances d'effet thermique (jet enflammé et boule de feu) et l'effet de surpression par l'utilisation d'un logiciel de modélisation PHAST

En 2020, ABBAS et all [18] ont étudié les paramètres de fonctionnement des boucle MR et propane et discuté les performances du procédé APCI. Aussi, ils ont mené une étude sur les performances de la boucle propane multi-étage de réfrigération par simulation sur le logiciel ASPEN HYSYS. Les performances sur les quels est centrée cette étude sont le débit propane nécessaire, la puissance de compression requise, le coefficient de performance COP et rendement du cycle.

Chapitre II :

Présentation de l'entreprise et description du procédé de séparation et liquéfaction des gaz de l'air

II. Présentation de l'entreprise :

II.1.1 Présentation générale de Linde Gas Algérie (LGA) :

Linde Gas Algérie compte 608 Salariés, 9 Sites de production, 3 au Centre (Alger, Bouira et Ouargla), 3 à l'Ouest (Arzew, Sidi Bel-Abbes, Oran) et 3 à l'Est (Annaba, Skikda, Constantine), ainsi que 52 Concessionnaires repartis à travers le territoire National.

L'activité principale de Linde Gas Algérie est la production et la commercialisation des Gaz Industriels et Médicaux, ainsi que la satisfaction des besoins générés par l'application de ses gaz dans différents secteurs économiques.

Du Nord au Sud, de l'Est à l'Ouest du pays, Linde Gas Algérie est le principal fournisseur des gaz Médicaux, ces gaz sont principalement : l'Oxygène médical, utilisé dans les insuffisances respiratoires, le Protoxyde d'Azote médicinal utilisé dans l'anesthésie, ainsi que d'autres gaz médicaux qui participent aux soins comme le Dioxyde de Carbone utilisé dans la coelioscopie.

Linde Gas Algérie développe également une activité revente de matériel médical, visant à la mise en œuvre des applications des gaz médicaux. A cela s'ajoute un potentiel commercial et technique proposant des solutions qui s'appuient sur des technologies innovantes.

Grace à sa flotte de citerne cryogénique de différentes capacités et à ses bouteilles haute pression, Linde Gaz Algérie assure l'approvisionnement en gaz médical, aux principales structures hospitalières se trouvant sur l'ensemble du territoire Algérien.

Au sein des établissements hospitaliers, les réseaux pour fluides médicaux distribuent les gaz à usage médical depuis la source du gaz située à l'extérieur de l'établissement (tank de stockage ou bouteilles à gaz) jusqu'au patient, par l'intermédiaire d'accessoires médicaux dans les différents services tel que, blocs opératoires, salles de réveils, chambres...

Linde Gas Algérie apporte son expertise dans la conception et la réalisation de ces systèmes de distribution pour fluides médicaux au sein des établissements hospitaliers qu'ils soient privés ou public, et propose des prestations d'entretien.

Les Gaz médicaux produit par Linde Gas Algérie sont soumis à des contrôles rigoureux, ces contrôles sont effectués à l'aide de chromatographe.

Ainsi, la libération des lots se fait sur la base d'un bulletin d'analyse attestant de la conformité du produit. [19]

II.1.2 Unité de Réghaia :

L'unité de Réghaia est entrée en production en 1978. Elle a été réalisée par la société national de Sidérurgie SNS puis versée dans le patrimoine de l'entreprise national de production et distribution des gaz industriel ENGI placée sous la tutelle du ministère des industrie chimique et pétrochimique de 1983 à 1989 puis suite à la loi de 198 sur l'autonomie des entreprises publiques, ENGI est devenu en SPA en 1989. En 2007 la société Allemande LINDE rentre dans la capitale, elle détient la majorité des parts 66% contre 34% pour l'entreprise nationale Sonatrach.

II.1.3 Vue globale :

Nous commencerons par une présentation complète de l'entreprise, à travers La fiche technique nous donnera plus d'informations et de tableaux sur la LGA. [20]

Nom de l'entreprise	Linde Gas Algérie
Statut juridique	Unité de production appartenant à l'entreprise nationale de gaz industriels.
Date de mise en exploitation	Acétylène : 1950 Hussein dey. Gaz de l'air : 1977 Réghaia. Protoxyde : 1993 Réghaia. Gaz carbonique : 2001 Réghaia
Activité	Production, conditionnement, commercialisation et distribution des Gas industriels alimentaires et Médicaux.
Capacité de production	Acétylène : 100m ³ /heure Gaz carbonique : 2 tonnes/ heure pour 2 lignes. Oxygène : 1650 litre/heure. Azote : 320 litre/heure. Protoxyde : 100 Kg/heure.
Les principaux clients	ENIE, ENIEM, centre de recherches universitaires
Produits	<ul style="list-style-type: none"> • Gaz Médicaux : Oxygène Médical, Protoxyde d'Azote, Oxyde d'éthylène. • Gaz industriels : Azote, Oxygène industriel, Argon, Acétylène, Hydrogène. • Gaz à usage alimentaire : CO₂ alimentaire

	<ul style="list-style-type: none"> • Autres gaz : Fréons, Gaz purs, Mélanges (Argon-CO2, ...).
Services	<ul style="list-style-type: none"> • Inertage à l'azote • Installations pour fluides Médicaux. • Dessalement de l'eau de Mer. • Réfrigération, congélation et emballage des aliments. • Pisciculture.
Distinction	<ul style="list-style-type: none"> • Certification système de management qualité ISO 9001 version 2015 • Certification système environnement ISO 14001 version 2015 • Certification Santé et sécurité au travail, référentiel OHSAS 18001 version 2007 • Certification sécurité alimentaire FSSC 22000 version 2010

Tableau II-1 Généralités sur LGA

Adresse	Le siège est situé au : Zone Industrielle Reghaia, Alger, Alger,16108, Algeria
Tél/Fax	0 23 965 254/0 23 965 360
Site Web	www.linde.com
Logo de l'entreprise	

[20]



Figure II-1 Gamme de production des gaz par site en Algérie

REGIONS	SITES	PRODUCTION							CONDITIONNEMENT						
		LOX	LIN	LAR	LIC	LIN20	C2H2	H2	GOX	GAN	GAR	GC02	C02 Glace	GN20	MIX
CENTRE/SUD	REGHAIA	*	*		*	*			*	*	*	*	*	*	*
	BOUIRA				*		*		*	*	*	*		*	*
	OUARGLA								*			*			
EST	CONSTANTINE					*			*	*		*		*	
	ANNABA						*		*	*		*			
OUEST	SKIKDA	*	*	*	*			*			*				
	SIDI BEL ABBES						*		*	*	*	*		*	*
	ARZEW	*	*		*										
	ORAN								*	*				*	

Tableau II-2 Production des gaz par site

Abréviations	Significations
<ul style="list-style-type: none"> • LOX • LIN • LAR • LIC • C2H2 • H2 • GOX • GAN • GAR • GCO2 • GNO2 • LINO2 • MIX 	<ul style="list-style-type: none"> • Oxygène liquide • Azote liquide • Argon liquide • CO2 liquide • Acétylène • Hydrogène • Oxygène gazeux • Azote gazeux • Argon gazeux • CO2 gaz • Protoxyde d'Azote gaz • Protoxyde d'Azote liquide • Mélange de gaz exemple : hydrogène/azote, azote /CO2...

Tableau II-3 Liste des abréviations

II.1.4 L'organigramme de LGA :

Linde Gas Algérie est organisée comme suit :

- **Direction Plant Manager** : Chaque site a un Plant Manager (Directeur de site) soit :
 - Plant manager Canstantine, Annaba, Skikda, Bouira, Reghaia, Ouergla, Sidi Bel Abbes, Arzew et Oran.
- 1. Direction réalisation** : Elle est composée de trois directions :
 - Bulk
 - Opération PGP
 - Commerciale et marketing
- 2. Direction support** : Elle est composée de six directions :
 - Affaires juridiques
 - Informatique et systèmes d'information
 - Ressources humaines
 - Achats
 - Finance et comptabilité
 - SHEQ

De la direction SHEQ découle des responsables nationaux des différentes composantes soit :

- Un responsable national de qualité et audit SMI au niveau du Siège.
- Responsable national de la sécurité au travail et transport (Siège).
- Responsable environnement (Siège).
- Responsable national d'hygiène et santé, basé à Skikda.
- Responsable national safety process MHRP au niveau de constantine.

- Responsable de sécurité alimentaire, basé à Arzew.

La direction SHEQ de LGA dispose de trois coordinateurs régionaux, soit :

- Un coordinateur centre-sud situé à Reghaia.
- Un coordinateur Ouest situé à Arzew.
- Un coordinateur Est situé au niveau de Skikda. [20]

II.2 Introduction :

Les premières améliorations dans la séparation et la liquéfaction d'air ont porté sur : les rendements d'extraction, la purification de l'air d'alimentation, l'efficacité des échanges thermiques, la régulation optimale des installations, et l'amélioration régulière des performances des turbines et des compresseurs. Plus récemment, ont été introduits : les garnissages pour les colonnes de distillation, les tamis moléculaires pour le pré purification, la simulation pour le contrôle des procédés.

Ce chapitre est consacré à l'étude de ce processus, les propriétés de gaz de l'air et quelque domaine de leur application, ainsi les équipements cryogéniques mis en jeu.

II.3 Principe de distillation :

La distillation est un procédé de séparation d'un mélange de substances liquides dont les températures d'ébullition sont différentes. Elle permet de séparer les constituants d'un mélange homogène. Sous l'effet de la chaleur ou d'une faible pression (loi des gaz parfaits), les substances se vaporisent successivement, et la vapeur obtenue est liquéfiée pour donner le distillat. [21]

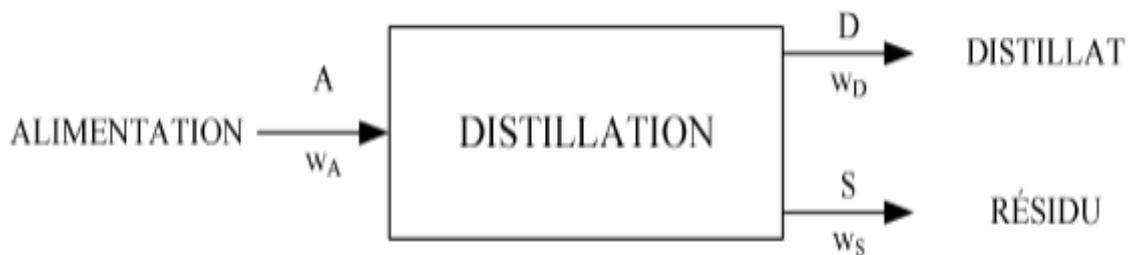


Figure II-2 schémas de la distillation

On peut réaliser l'opération de distillation de deux façons bien distinctes :

II.3.1 Distillation simple :

Dans ce type de distillation, à partir d'un mélange de deux liquides dont la volatilité est différente, un apport de chaleur permet au cours de cette opération de séparer la vapeur produite dès sa formation ; en la condensant, on recueille directement le liquide obtenu sans le laisser retourner dans le bouilleur. [21]

Mécanisme de la distillation simple :

Les vapeurs émises sont aussitôt séparées du mélange : elles sont condensées et éliminées de l'appareil sans retour au bouilleur. Il n'y a en fait qu'un seul contact entre le liquide et la vapeur, à la surface du bouilleur.

On va considérer le cas le plus simple du mélange azéotropique A-B où B est le composé le plus volatil : à l'instant où les premières vapeurs sont dégagées leur composition est plus riche en B que le mélange initial. Au cours du temps, la fraction molaire en B du liquide dans le bouilleur diminue car il s'évapore une proportion plus grande de B que de A. Les vapeurs seront toujours plus riches en B mais leur composition montrera une teneur en B plus faible qu'initialement. On obtient donc un distillat de moins en moins concentré en B. A la fin il ne reste pratiquement que du composé A dans le bouilleur et les vapeurs sont donc pratiquement uniquement composées de A. L'inconvénient de la distillation simple : on aboutit à une mauvaise séparation.

II.3.2 Rectification :

La rectification est assimilée à une distillation répétée et concerne les mélanges à séparer dont les différences de volatilité sont faibles. Cette opération consiste à séparer plusieurs constituants d'un mélange liquide par échange de matière entre une phase vapeur et une phase liquide au moyen d'une série de vaporisations et de condensations entre ce liquide et cette vapeur qui cheminent à contre-courant dans une colonne.

La rectification permet de faire la séparation des composants de mélanges liquides dans un état de pureté très grand.

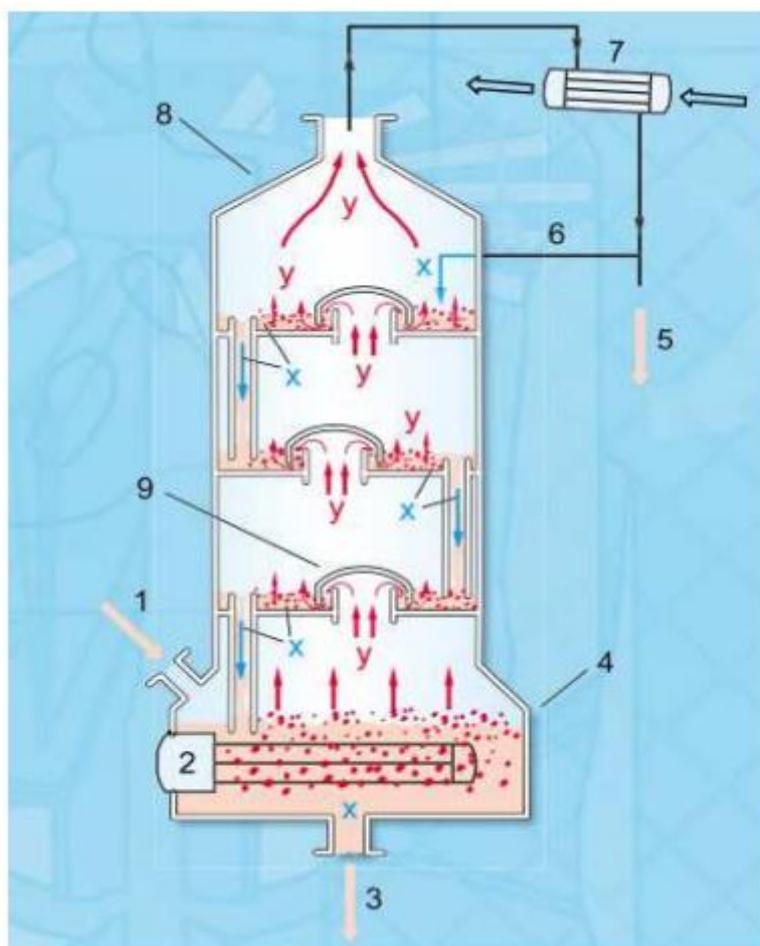


Figure II-3 représentation simplifiée d'une colonne de rectification

1 alimentation, 2 chauffages du bas de colonne, 3 produits de bas de colonne, 4 bas de colonne, 5 produits de tête, 6 reflux, 7 condenseurs, 8 têtes de colonne, 9 plateaux d'échange (ici : plateau à cloches) ; x phase liquide, y phase gazeuse.

Mécanisme de la rectification :

Circulant à contre-courant tout au long de la colonne. La vapeur qui parvient en tête de colonne est entièrement condensée : une partie des condensats est éliminée de la colonne et constitue le distillat. L'autre partie retourne dans la colonne par gravité et constitue le reflux.

Sur chaque plateau un équilibre s'établit entre le liquide qui reflue et la vapeur qui monte. Le liquide s'appauvrit en composé le plus volatil qui se vaporise et la vapeur s'appauvrit en composé le moins volatil qui se condense. On observe donc les évolutions suivantes :

- Le titre en plus volatil augmente dans la phase vapeur quand on monte dans la colonne.
- Le titre en plus volatil diminue dans la phase liquide quand on descend dans la colonne.

- La température diminue quand on monte dans la colonne.

La qualité de la séparation sera donc fonction du :

- Nombre de plateaux de la colonne.
- Le rapport des volatilités des constituants.
- Le taux de reflux dans la colonne.
- Le temps de contact (fonction de la hauteur de la colonne) entre liquide et vapeur.
- L'efficacité du contact liquide-vapeur.

Par exemple, prendre un mélange liquide d'alcool (point d'ébullition 78 ° C) et de l'eau (point d'ébullition 100 ° C). Si nous avons un mélange bouillant avec 50% d'alcool, la vapeur contiendra 80% d'alcool. Pour avoir un alcool encore plus pur, la vapeur doit être séparée et condensée en liquide. Ce liquide doit ensuite être bouilli à nouveau pour obtenir de la vapeur, qui contient une teneur en alcool plus élevée. Le liquide bouillant qui reste contient une quantité réduite d'alcool et d'eau accrue Parce que plus d'alcool que d'eau a été enlevé en tant que vapeur. [21]

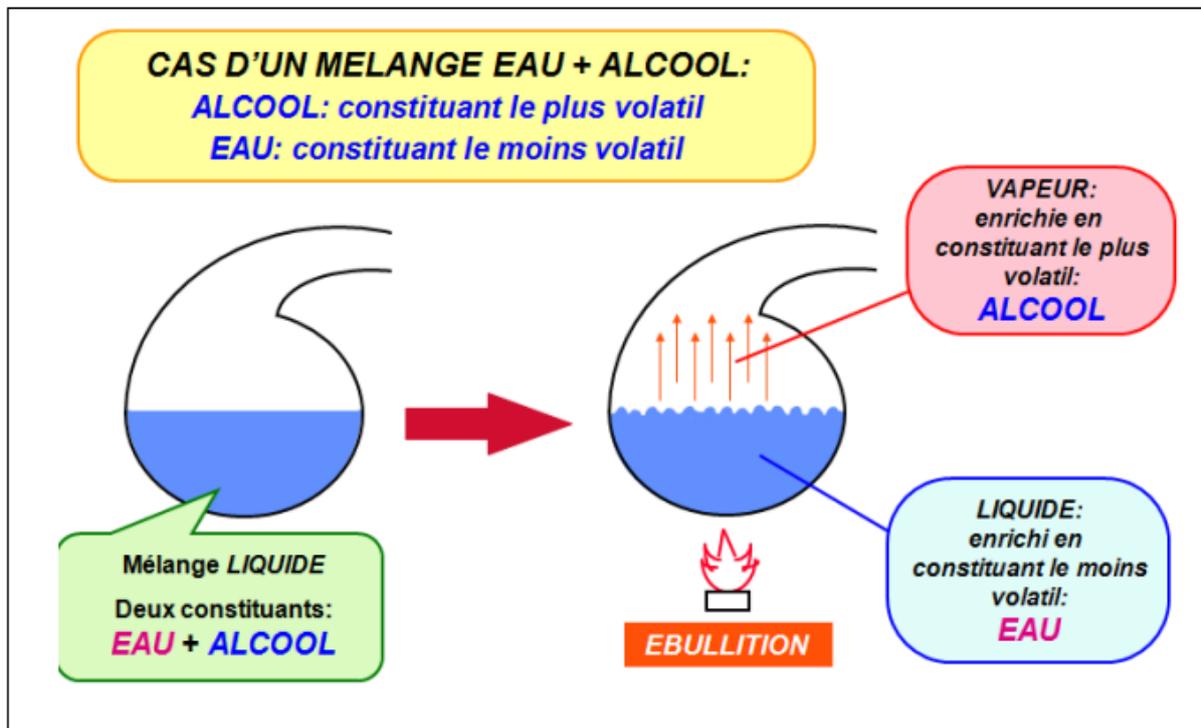


Figure II-4 Exemples de distillation (l'alcool et l'eau)

II.4 Procédés de séparation des gaz de l'air :

II.4.1 Gaz de l'air :

II.4.1.1 définition de 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. L'air n'est pas un élément, c'est une corps composée. Les nuages sont portés dans l'air. L'air et l'aliment de la respiration. [16]

II.4.1.2 compositions de l'air :

L'air est un mélange des différents types de gaz. L'air atmosphérique contient essentiellement de :

- (78,08 %) d'azote.
- (20,95 %) d'oxygène.
- Moins de 1 %, de gaz rares comme :
 - L'argon (0,93 %).
 - Le néon (0,0018 %, 18,18 ppm).
 - Le krypton (1,14 ppm).
 - Le xénon (0,08 ppm).
 - L'hélium (5,24 ppm).
- Dans les basses couches, de la vapeur d'eau, du dioxyde de carbone (actuellement environ 0,04 %, 400 ppm), du protoxyde d'azote (0,5 ppm), du méthane (1,7 ppm). S'y ajoute des traces de dihydrogène (0,000072 %), d'ozone (0,01 ppm), de radon, de divers aérosols (poussières, micro-organismes) et aussi d'autres gaz polluants et particules.

A ne pas oublier la petite quantité de la vapeur d'eau, les polluants (les hydrocarbures tels que méthane, éthane... etc.), les gaz acides tels que (H₂, S₂, SO₂... qui sont des gaz corrosifs), ainsi que les bactéries et les poussières. [16]

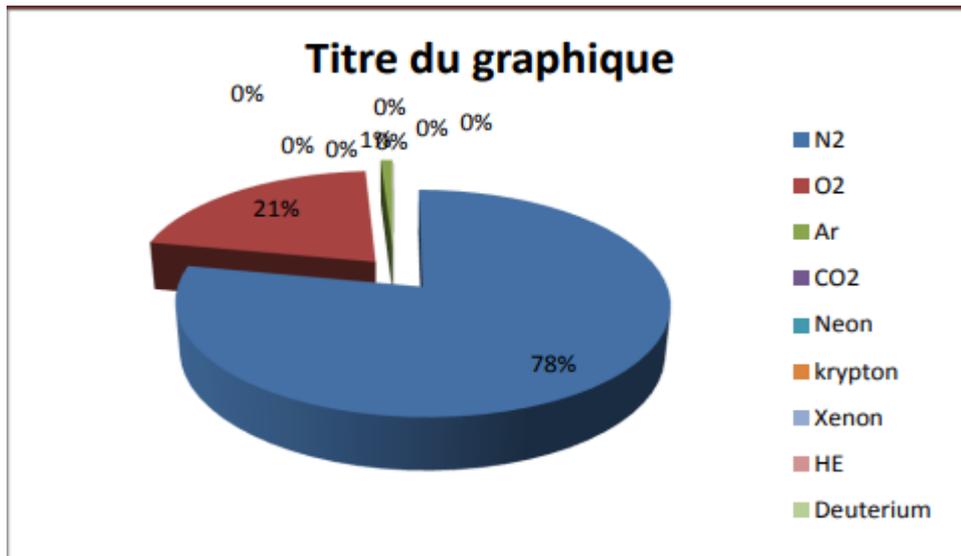


Figure II-5 Les compositions de l'air

II.4.1.3 Points d'ébullition des composants de l'air :

On sait que l'air contient essentiellement de l'oxygène (O₂) et de l'azote (N₂) et parmi les méthodes de séparation : la distillation qui s'est basé essentiellement sur le point d'ébullition. Point d'ébullition : c'est lorsqu' un mélange liquide ou un liquide pur est chauffé progressivement. Cette zone de pression fixe la température pour permettre de s'élever la première bulle de vapeur. [16]

			Degrees Celsius (°C)	Degrees Kelvin (K)
Water	(melting point)	0	=	273 K
Propane		-42	=	231 K
Carbon dioxide	(melting point)	-79	=	195 K
Acetylene		-84	=	190 K
Nitrous oxide (N ₂ O)		-89	=	185 K
Ethane		-89	=	185 K
Ethene		-104	=	169 K
Xenon		-108	=	165 K
Krypton		-153	=	120 K
Methane		-162	=	112 K
Oxygen		-183	=	90 K
Argon		-186	=	87 K
Nitrogen		-196	=	77 K
Neon		-246	=	27 K
Hydrogen		-253	=	20 K
Helium		-269	=	4 K

Figure II-6 Points d'ébullition de gaz d'air

- La température d'ébullition de l'oxygène c'est : -183°C (90°K).
- La température d'ébullition de l'argon c'est : -186°C (87°K).
- La température d'ébullition de l'azote c'est : -196°C (77°K).

II.4.2 Propriétés des composants de l'air (l'oxygène, l'azote et l'argon) :

II.4.2.1 Propriétés et utilisations de L'oxygène :

a. Propriétés physiques & chimiques :

Numéro atomique	8
Masse atomique	15,999 g.mol ⁻¹
Electronégativité de Pauling	3,5
Masse volumique	1.429 kg/m ³ à 20°C
Température de Fusion	-219 °C
Température d'ébullition	-183 °C
Rayon atomique (Van der Waals)	0,074 nm
Rayon ionique	0,14 nm (-2)
Isotopes	2
Configuration électronique	[He] 2s 2 2p 4
Energie de première ionisation	1311 kJ.mol ⁻¹
Energie de deuxième ionisation	kJ.mol ⁻¹
Energie de troisième ionisation	4577 kJ.mol ⁻¹
Découverte :	Le nom de cet élément vient du grec (engendre acide)

Tableau II-4 Les propriétés chimiques de l'oxygène

L'oxygène est un élément chimique et un gaz dans les conditions ordinaires (15°C et 1 bar).
Symbole : O.

Dans les conditions normales, l'oxygène est un gaz sans couleur, inodore et insipide. Il se condense dans un liquide bleu-clair. L'oxygène fait partie d'un petit groupe de gaz littéralement paramagnétique, et il est le plus paramagnétique de tous. L'oxygène liquide est également légèrement paramagnétique.

C'est intéressant parce que c'est un élément essentiel du processus respiratoires de la plupart des cellules vivantes et dans les processus de combustion. C'est l'élément le plus abondant dans la croûte terrestre. Presque un cinquième d'air (en volume) est de l'oxygène. [22]

b. Principales applications de l'Oxygène :

L'oxygène est essentiel pour les processus du secteur industriel comme du secteur médical. De même, l'ozone, une substance à base d'oxygène, est très largement utilisé dans le secteur.

Les applications principales de l'oxygène sont dans l'ordre d'importance :

- Fabrication d'acier et d'autres métaux.
- Fabrication des produits chimiques par oxydation commandée.
- Propulsion de fusée.
- Appui médical et biologique.
- Extraction, production et fabrication des produits en pierre et de verre.
- Accélération des réactions d'oxydation dans différents secteurs et procédés.
- Augmentation des températures de procès dans la métallurgie.
- Accélération des procédés biologiques et biochimiques.

Presque tous les produits chimiques, à part les gaz inertes, se lie avec l'oxygène pour former des composés.

L'eau (H_2O) et la silice (SiO_2), composants principaux du sable, sont les composés binaires de l'oxygène les plus abondants. Parmi les composés qui contiennent plus de deux éléments, les plus abondants sont les silicates, qui forment la plupart des roches et des sols. D'autres composés qui sont abondants dans la nature sont le carbonate de calcium (pierre à chaux et marbre), l'oxyde d'aluminium (bauxite), le sulfate de calcium (gypse) et divers oxydes de fer, qui sont employés comme source du métal.

II.4.2.2 Propriétés et utilisations de L'Azote :

a. Propriétés physiques & chimiques :

Numéro atomique	7
Masse atomique	14,0067 g.mol ⁻¹
Electronégativité de Pauling	3,0
Masse volumique	1,25.10 ⁻³ g.cm ⁻³ à 20°C
Température de Fusion	-210 °C
Température d'ébullition	-195,8 °C
Rayon atomique (Van der Waals)	0,092 nm
Rayon ionique	0,171 nm (-3) 0,011 (+5) 0,016 (+3)
Isotopes	2
Configuration électronique	[He] 2s ² 2p ³
Energie de première ionisation	1402 kJ.mol ⁻¹
Energie de deuxième ionisation	2856 kJ.mol ⁻¹
Energie de troisième ionisation	4577 kJ.mol ⁻¹
Découverte :	En 1772 par Rutherford

Tableau II-5 Les propriétés chimiques de L'Azote

L'azote est un gaz inerte qui est incolore, inodore, insipide et diatomique. A la pression atmosphérique, il devient un liquide qui a la caractéristique d'être très froid. C'est l'une des meilleures sources de liquide très froid parce que d'autres liquides froids sont beaucoup plus coûteux à produire. [22]

L'azote en lui-même n'est pas combustible. C'est-à-dire, il est incapable de supporter la combustion. A des températures élevées, il peut se combiner avec d'autres métaux pour produire des nitrures. En combinaison avec l'azote, l'oxygène produira l'oxyde nitrique et le dioxyde d'azote, il se combine avec l'hydrogène pour produire de l'ammoniac et s'il est combiné avec du soufre, il produira du sulfure d'azote. Avec l'aide de catalyseurs, l'activité biologique à des températures très hautes, permettra à une teneur d'azote de se composer.

b. Principales applications de L'Azote :

L'azote est un composant essentiel des aminoacides et, en tant que, un élément de base de toute forme de vie. Les applications principales de l'oxygène sont : [19]

- L'azote, qui est essentiel dans le secteur de l'aérospatiale et de l'aviation, est utilisé dans les souffleries pour les essais avec un nombre Reynolds élevé, dans les fours de traitement thermique et dans les autoclaves où il sert à créer des matériaux très robustes, mais légers. L'azote est également utilisé pour faciliter le découpage laser.

- Les usines d'assemblage des premiers et deuxièmes niveaux combinent l'azote avec d'autres gaz pour souder les pièces, les châssis...
- L'azote est utilisé comme gaz tampon de protection pour empêcher l'air d'entrer en contact avec les produits et les procédés sensibles.
- L'azote est un cryogène important utilisé dans le refroidissement, la réfrigération et la surgélation des aliments.
- L'azote NF est utilisé comme cryogène pour surgeler et préserver le sang, les tissus et les autres échantillons biologiques, ainsi que pour congeler et détruire les tissus malades en cryochirurgie et en dermatologie. Il est également utilisé pour alimenter les appareils médicaux.
- L'industrie pétrolière et gazière utilise l'azote pour augmenter les stocks de réserves et pour fracturer les formations géologiques contenant des hydrocarbures
- L'azote gazeux est couramment utilisé dans les activités de purge, de transfert de la pression, de mélange et de protection par gaz tampon qui empêchent l'infiltration d'humidité, l'oxydation, la dégradation et la contamination des procédés.

II.4.2.3 Propriétés et utilisations de L'argon :

a. Propriétés physiques & chimiques :

Numéro atomique	18
Masse atomique	39,948 g.mol ⁻¹
Electronégativité de Pauling	
Masse volumique	1,78.10 ⁻³ g.cm ⁻³ à 0°C
Température de fusion	-189°C
Température d'ébullition	-185,7°C
Rayon atomique (Van der Waals)	0,192 nm
Rayon ionique	
Isotopes naturels	3
Configuration électronique	[Ne] 3s23p6
Energie de première ionisation	1520 kJ.mol ⁻¹
Découverte	En 1895 par Ramsay

Tableau II-6 Les propriétés chimiques de L'Azote

L'argon est le troisième gaz noble, dans la période 8, et il compose environ 1% de l'atmosphère de la terre. [22]

L'argon est 2,5 fois plus soluble dans l'eau que l'azote (approximativement la même solubilité que l'oxygène). Cet élément chimiquement inerte est sans couleur et inodore sous ses formes liquide et gazeuse. Il n'y a aucun véritable composé chimique connu qui contient de l'argon.

Les isotopes principaux de l'argon présents sur terre sont l'Ar-40, l'Ar-36, et l'Ar-38. Le K-40, avec une demi-vie de $1,250 \times 10^9$ ans, se décompose naturellement en Ar-40 stable (11,2%) par la capture électronique et par l'émission de positrons, et se décompose également en Ca-40 stable (88,8%) par l'émission de négatons. Ces propriétés et rapports sont employés pour déterminer l'âge des roches.

b. Principales applications de L'argon :

Il est employé dans l'éclairage, puisqu'il ne réagit pas avec le filament de l'ampoule, même à des températures élevées, et dans d'autres cas où l'azote diatomique est un gaz (semi-) inerte peu approprié. L'argon peut aussi être utilisé en tant que bouclier de gaz inerte dans la soudure à l'arc électrique, que couverture non-réactive dans la fabrication du titane et d'autres éléments réactifs et en tant qu'atmosphère protectrice pour le silicium croissant et les cristaux de germanium.

L'Argon-39 a été employé pour un certain nombre d'applications.

- Principalement le dénoyautage de glace.
- Il a été également employé pour dater les eaux souterraines.
- L'argon est également employé dans la technique SCAPHANDRE plongeant pour les combinaisons étanches, dû à sa non-réactivité, et son effet d'isolement de la chaleur.

II.4.3 Processus du Linde Gaz de séparation et liquéfaction de l'air :

Dans une unité de séparation d'air, les différents composants de l'air sont séparés Par procédé physique - on parle aussi de distillation/rectification cryogénique permet d'obtenir de l'azote, de l'oxygène et de l'argon de haute pureté sous forme liquide, et Carbonaté. [23]

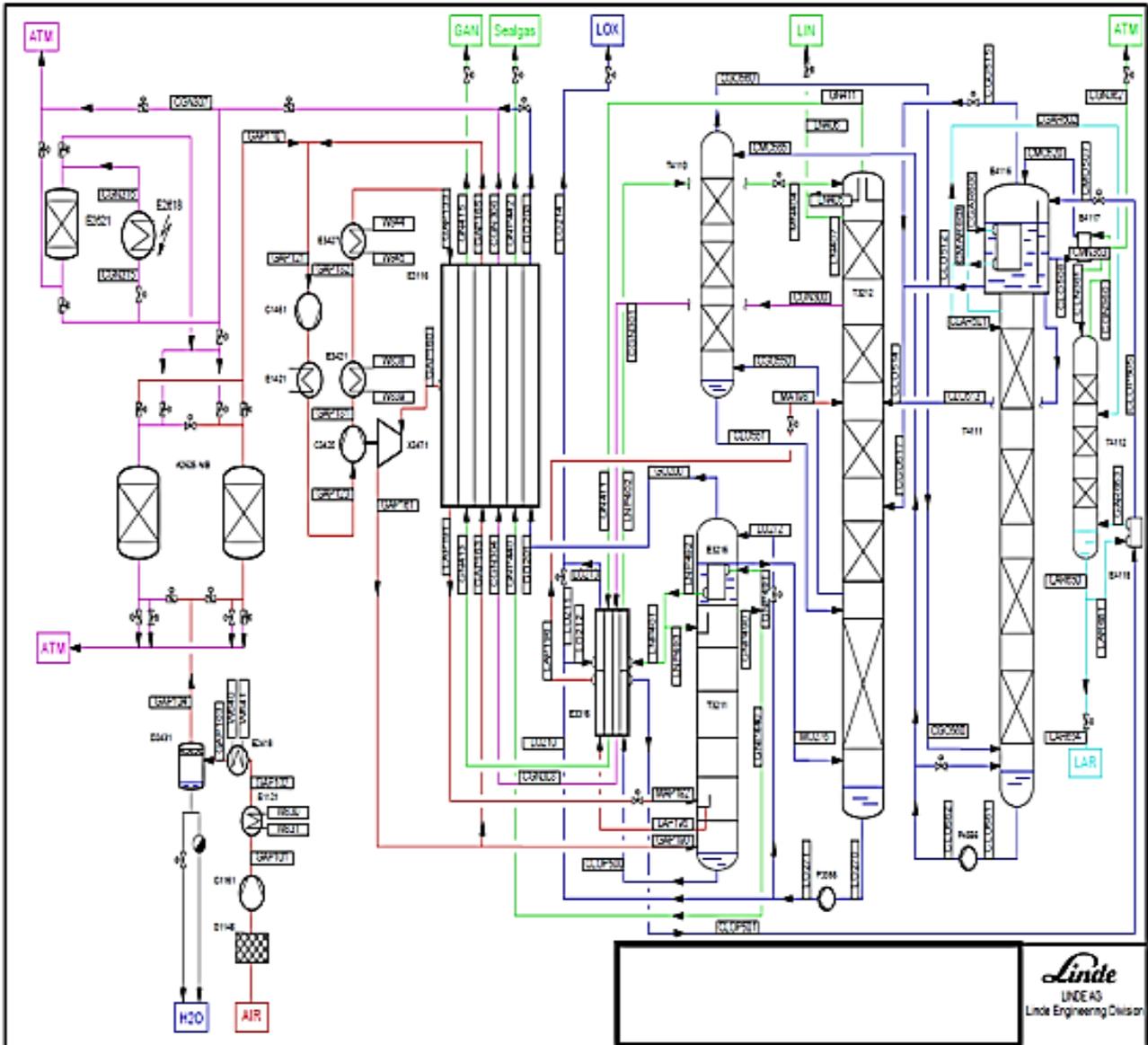


Figure II-7 PFD du procédé

II.4.3.1 Aspiration et compression de l'air ambiant :

La poussière et d'autres particules contenues dans l'air de processus sont éliminées grâce à un système de filtre d'air (S1146) avant que l'air pénètre dans le compresseur d'air.

Le compresseur d'air (C1161) qui est entraîné par un moteur électrique comprime l'air de processus à environ 5 bar. [23]

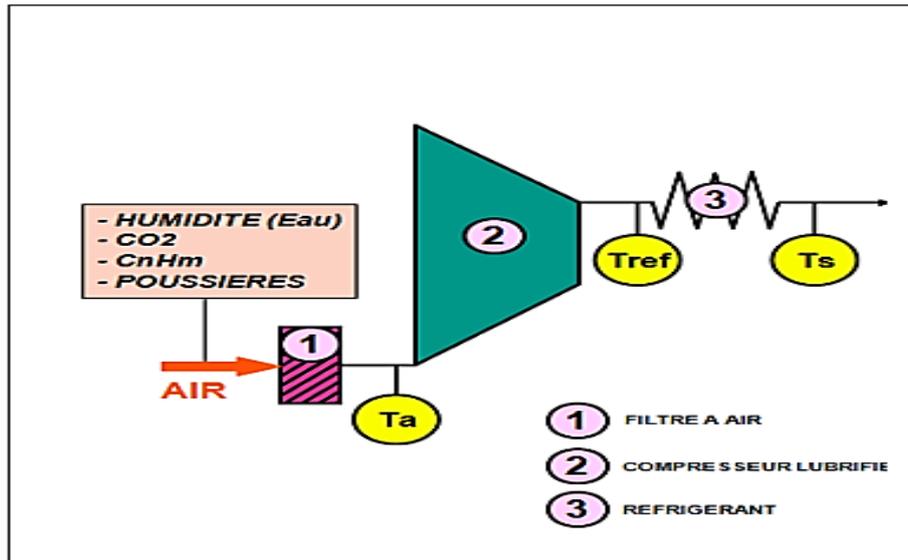


Figure II-8 Aspiration et compression de l'air

II.4.3.2 Pré-refroidissement avec de l'eau froide :

L'air de processus après le 3^{ème} étage est refroidi dans un refroidisseur de sortie (E1121), Puis refroidi encore à environ 20°C dans un refroidisseur d'air de processus (E2418) par l'eau refroidie de l'unité de réfrigération (K2476).

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. [23]

II.4.3.3 L'épuration de l'air :

L'eau condensée est éliminée de l'air de processus par un séparateur d'eau (D2431) en aval de l'unité de réfrigération, un treillis en haut de la cuve du séparateur (D2431) élimine l'eau atomisée de l'air de processus.

Après le séparateur d'eau, l'air de processus traverse l'un des adsorbants à tamis moléculaires (A2626A/B) où sont éliminés le CO2, les hydrocarbures potentiellement dangereux et la vapeur d'eau résiduelle. L'un des deux adsorbants fonctionne pendant que l'autre est en cours de régénération.

De l'azote impure provenant de la boîte froide est utilisé pour la régénération des adsorbants, ce gaz est chauffé dans le chauffage électrique (E2618) et traverse l'adsorbant.

Le cycle de chauffage est assisté par un accumulateur de chaleur (E2621) qui est chargé durant les étapes de refroidissement, de pressurisation de changement et de dépressurisation.

Durant le cycle de refroidissement, l'adsorbeur est refroidi par l'azote résiduaire. Une fois la séquence de régénération terminée, l'adsorbeur est pressurisé avant de passer au cycle d'adsorption. [23]

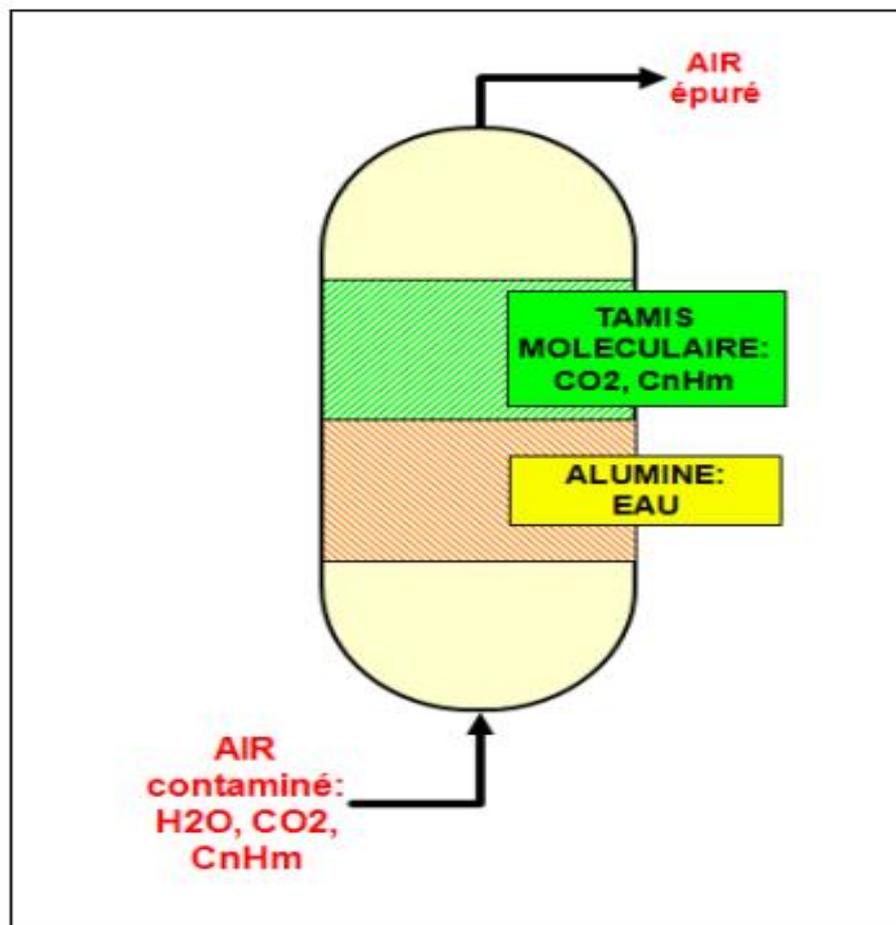


Figure II-9 tamis moléculaire

II.4.3.4 Le refroidissement de l'air :

En aval de l'adsorbeur à tamis moléculaires, la quantité totale de l'air de processus et l'air recyclé provenant de la boîte sont ensuite comprimés à 33 bar par un turbocompresseur d'air de recyclage à 3 étages avec refroidissement intermédiaire (C1461).

Après le dernier étage du compresseur de recyclage, l'air est refroidi dans un refroidisseur de sortie (E1421), puis comprimé encore à 49,6 bar par l'unité de compresseur / surpresseur à turbine de détente (C3461). Le flux de recyclage en aval du compresseur - surpresseur est ensuite refroidi dans un refroidisseur de sortie (E3421) par de l'eau de refroidissement, puis refroidi encore par l'eau refroidie de l'unité de réfrigération (K2476) dans le refroidisseur (E3427).

La quantité totale d'air de processus comprimé pénètre dans la boîte froide où il est refroidi par les flux de produit froids en tant qu'azote résiduaire, azote basse pression et sous pression, oxygène et une partie d'air de recyclage dans le principal échangeur de chaleur (E3116).

Une partie de l'air comprimé quitte le centre de l'échangeur de chaleur avec une température de -70.0°C . Ce flux est détendu dans la turbine de détente et génère la réfrigération requise pour le processus cryogénique. En aval de la turbine de détente, ce flux est divisé. Une partie est dirigée vers la colonne de pression (T3211) et l'autre partie est recyclée vers le compresseur de recyclage (C1461). L'autre partie de l'air comprimé est ensuite encore refroidie jusqu'à sa température de liquéfaction et directement détendue vers la colonne de pression (T3211). [23]

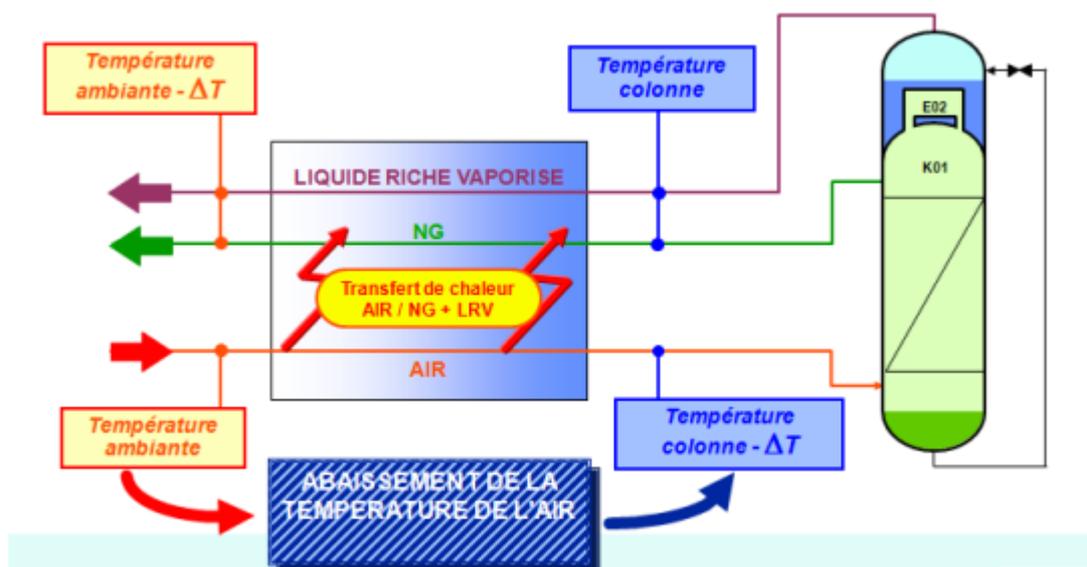


Figure II-10 Refroidissement de l'air

II.4.3.5 Fractionnement d'air et stockage des gaz :

a. Récupération d'oxygène et d'azote :

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 °C , azote : -196 °C), la séparation doit avoir lieu en plusieurs étapes dans des colonnes de distillation.

Les produits traversant l'échangeur de chaleur principal (E3116) sont chauffés à environ 30 °C par l'air de processus à contre-courant. Dans la colonne de pression (T3211), l'air de processus est pré-séparé en liquide enrichi en oxygène en bas (au fond) et en azote pur en haut. Le reflux requis pour la rectification est généré par la condensation de l'azote gazeux contre l'oxygène bouillant dans le condenseur (E3216). Une partie de l'azote liquide sert de reflux pour la colonne de pression, la partie restante est sous-refroidie dans le sous-refroidisseur E3316 et alimentée dans la colonne basse pression (T3212) dans laquelle elle sert de reflux pour la colonne basse pression.

L'azote liquide en excédent est dévié du haut de la colonne basse pression et envoyé dans le réservoir de stockage de LIN D7310.

Une petite partie de l'azote gazeux sous pression est prélevée en haut de la colonne de pression et sert de gaz de purge et d'étanchéité pour l'ASU elle-même.

Une partie d'air liquide est prélevée d'un collecteur séparé dans la colonne de pression, puis est sous-refroidie et sert à améliorer la rectification dans la colonne basse pression.

Le liquide enrichi en oxygène du fond de la colonne de pression est également sous-refroidi dans le sous-refroidisseur (E3316) et l'évaporateur d'argon (E4118), puis est détendu dans le condenseur d'argon brut (E4116). Le liquide enrichi en oxygène sert de réfrigérant pour le condenseur d'argon brut (E4116) et pour le condenseur d'argon pur (E4117). Le liquide en excédent du condenseur d'argon brut s'écoule par le trop-plein dans la colonne basse pression en tant qu'alimentation d'oxygène.

Dans la colonne basse pression, la séparation finale en oxygène liquide pur a lieu, en tant que produit inférieur et azote gazeux en haut de la colonne.

Le produit d'oxygène liquide prélevé au fond de (T3212) est pompé par une pompe cryogénique (P3366) et divisé en deux flux.

L'un des flux est directement dirigé via le sous-refroidisseur (E3316) vers le réservoir de stockage de LOX D7110.

L'autre flux est alimenté dans le condenseur (E3216) et vaporisé contre l'azote en condensation. L'oxygène gazeux prélevé dans le condenseur est divisé en gaz résiduaire d'oxygène (GOX) et en oxygène alimenté dans la colonne basse pression.

Le gaz d'azote pur en haut de la colonne basse pression est réchauffé dans le sous-refroidisseur (E3316) et l'échangeur de chaleur principal (E3116), puis quitte la boîte froide en tant que produit LP-GAN.

b. Récupération d'argon brut et pur

Le gaz d'argon enrichi est dévié de la colonne basse pression et alimenté dans le bas de la colonne d'argon brut (T4110) où le gaz est séparé en liquide enrichi en oxygène en bas et en gaz enrichi en argon en haut. Le liquide dans le fond retourne dans la colonne basse pression. Le gaz d'argon brut en haut va vers la colonne (T4111) et se liquéfie pour la plupart dans le condenseur (E4116) contre l'air liquide enrichi en oxygène provenant de la colonne de pression. Le liquide d'argon brut sert de reflux pour la colonne d'argon brut (T4111). Le liquide du fond de (T4111) est pompé vers la colonne d'argon brut (T4110) par (P4566) où il sert également de reflux. Environ 3,4 % du gaz d'argon brut en haut est dévié en tant que gaz et est ensuite dirigé vers la colonne d'argon pur (T4112). La concentration d'oxygène de l'argon brut répond déjà aux spécifications pour le produit argon (< 1 vpm O₂).

Dans la colonne d'argon pur T4112, l'azote est séparé de l'argon brut. L'argon gazeux contenant de l'azote se liquéfie dans le condenseur (E4117) contre l'air liquide enrichi du condenseur d'argon brut. L'azote est évacué dans l'atmosphère, l'argon liquéfié sert de reflux pour la colonne d'argon pur. En bas de (T4112), l'argon pur liquide est rebouilli dans l'évaporateur (E4118) et sert de gaz ascendant dans la colonne d'argon pur. Le liquide en excédent est dévié en tant qu'argon liquide (LAR) vers le réservoir de produit (D7531). [23]

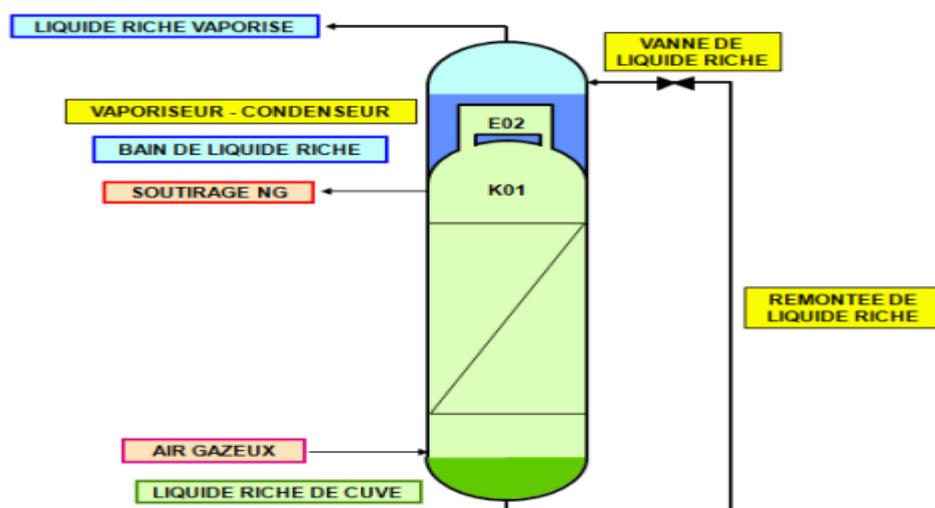


Figure II-11 Colonne de distillation

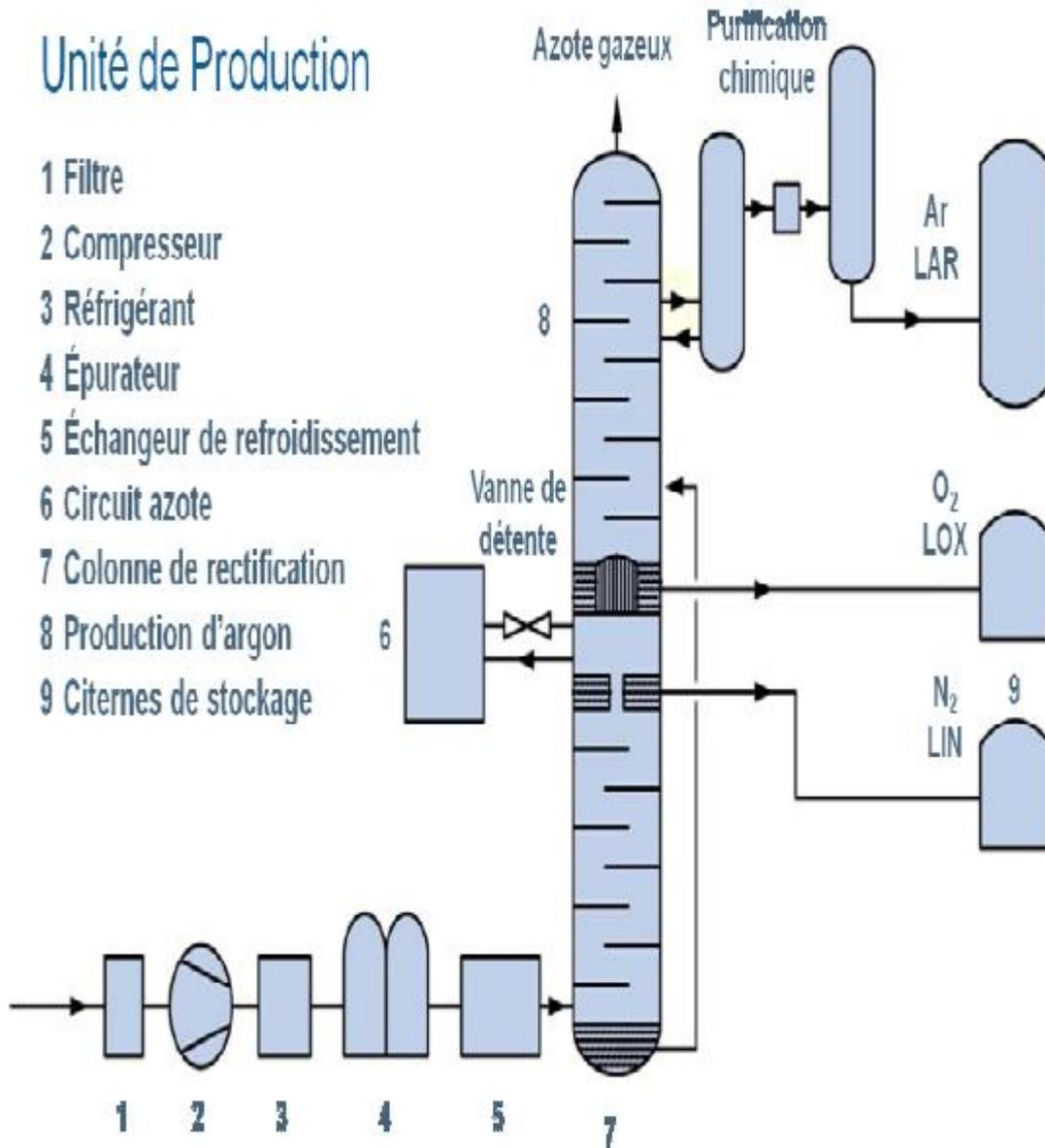


Figure II-12 Séparations des gaz de l'air

II.5 Equipements utilisés dans la séparation cryogénique de l'air :

II.5.1 Compresseur d'air de processus centrifuge :

Tâche :	Compression de l'air de processus à la pression requise de fonctionnement.
Construction :	Le compresseur comporte trois étages et fonctionne à vitesse constante. Chaque étage se compose d'un rotor à ailettes monté sur son propre arbre tournant dans un corps commun en fonte.
Mode de fonctionnement :	Le compresseur centrifuge est entraîné par un moteur électrique.

Tableau II-7 Caractéristiques d'un compresseur [23]

II.5.2 Groupe surpresseur - turbine (turbocompresseur) :

Tâche :	Détente de l'air gazeux pour produire la source froide nécessaire au processus.
Construction :	Il contient un certain nombre de disques à aubes appelés roues, qui ressemble à une hélice ou un ventilateur. Habituellement la roue est logée dans un diffuseur en forme de conque.
Mode de fonctionnement :	Le surpresseur est entraîné par l'énergie de la turbine de détente.

Tableau II-8 Caractéristiques d'un Groupe surpresseur [23]

II.5.3 Refroidisseurs :

Tâche :	Refroidissement des fluides chauds, par exemple l'air, l'huile, etc.
Construction :	Refroidisseurs sont des échangeurs de chaleur tubulaires ou à plaques-ailettes. Les détails de la conception dépendent de la taille et de l'usage du refroidisseur.
Mode de fonctionnement :	La chaleur s'échange entre le fluide chaud et l'eau de refroidissement. Le flux chaud est refroidi à environ la température de l'eau de refroidissement.

	<p>Normalement, l'eau s'écoule dans les tubes et le gaz à l'extérieur des tubes.</p> <p>Un séparateur qui retire l'eau de condensation de l'air ou du gaz est normalement inclus le refroidisseur ou est raccordé en série, selon le cas.</p>
--	---

Tableau II-9 Caractéristiques d'un Refroidisseur [23]

II.5.4 Echangeurs de chaleur :

Tâche :	Echange de chaleur entre deux ou plusieurs flux de gaz ou de liquides.
Construction :	Voir schéma. Les échangeurs de chaleur à ailettes -plaques ont une Construction stratifiée. Les flux de gaz ou de liquides se répartissent entre les différents passages qui sont séparés les uns des autres par des plaques planes
Mode de fonctionnement :	L'échangeur thermique dispose de réseaux parallèles à travers lesquels circulent les fluides à des températures différentes. Ces derniers sont séparés par une paroi aux capacités conductrices optimales. C'est l'écart de température entre les deux fluides qui permet l'échange de chaleur. En effet, le plus chaud va naturellement se diriger vers le plus froid, le réchauffant immédiatement, tout en perdant des calories.

Tableau II-10 Caractéristiques d'un Echangeurs de chaleur [23]

II.5.5 Condenseurs/rebouilleurs :

Tâche :	Liquéfaction d'un gaz en même temps que l'évaporation d'un liquide pour maintenir la rectification dans une colonne.
Conception :	Il existe deux types de condenseurs selon les besoins particuliers
Condenseur tubulaire :	La surface de chauffage consiste en un faisceau de tubes droits raccordés à chaque extrémité à une plaque tubulaire
Condenseurs à plaques :	La surface de chauffage consiste en un ou plusieurs blocs d'échangeurs à plaques

Tableau II-11 Caractéristiques d'un Condenseurs [23]

Chapitre III :

Présentation de logiciel Aspen HYSYS

III. Introduction :

La simulation est un outil utilisé dans différents domaines de l'ingénierie et de la recherche. En général, le comportement du système peut être analysé avant la mise en œuvre, et optimiser son fonctionnement en testant différentes solutions et différentes conditions de fonctionnement. Il repose sur le développement d'un modèle de système et permet la mise en œuvre de scénarios et de déduire le comportement du système physique analysé.

Les modèles ne sont pas des représentations exactes de la réalité physique, mais seulement une capacité à récupérer les caractéristiques les plus importantes du système analysé.

III.1 Définition du logiciel Aspen HYSYS :

Le logiciel HYSYS permet la simulation des procédés industriels de l'industrie gazière, de raffinage et de la pétrochimie en mode stationnaire et dynamique.

- L'utilisateur doit spécifier les constituants du gaz, du liquide ou du mélange.
- Il choisit un modèle thermodynamique.
- Il doit aussi spécifier les paramètres nécessaires pour le calcul de chaque opération unitaire.
- HYSYS résout le schéma de procédé et peut aussi dimensionner quelques équipements. [24]

III.2 Les modèles thermodynamiques de HYSYS :

- **Les équations d'état :**

Les modèles basés sur les équations d'état (RK, SRK, PR....etc.) ; sont souvent utilisés pour le calcul des systèmes d'hydrocarbures et des systèmes presque idéaux.

Leurs avantages par rapport aux autres modèles résident dans le fait de l'utilisation des coefficients d'interaction-binaire. En générale les équations d'état permettent de calculer l'ensemble des propriétés des produits par rapport à la température et aux fractions molaires. [24]

- **Equation de REDLICH-K WONG (RK) :**

Considérer comme la plus simple des équations d'état, elle est très utilisée pour prédire l'état de la phase vapeur.

$$P = \frac{RT}{V-B} - \frac{a}{\sqrt{T} V(V+B)} \quad \text{III.1}$$

- **Equation de SOAVE-REDLICH-KWONG (SRK) :**

Cette équation modifiée celle de REDLICH-KWONG, par l'introduction d'une fonction $a(T)$ qui dépend du facteur acentrique.

L'équation de SOAVE est de la même forme générale que l'équation (III.1).

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a(T)}{V(V+b)} \quad \text{III.2}$$

SOAVE a introduit les relations suivantes pour exprimer la fonction $a(T)$:

$$a(T) = a_c a(T_R) \quad \text{III.3}$$

Avec :

$$a(T_R) = [1 + m(1 - \sqrt{T_R})] \quad \text{III.4}$$

Le coefficient m est calculé en fonction du facteur acentrique ω :

$$m = 0.480 + 1.574\omega - 0.1761\omega^2 \quad \text{III.5}$$

- **Equation de PMG-ROBINSON :**

L'équation de PENG-ROBINSON diffère de l'équation de SOAVE par l'expression du terme d'attraction. Elle a été introduite en vue d'améliorer les résultats obtenus par l'équation de SAOVE, notamment en ce qui concerne le calcul des densités en phase liquide, sans modifier le nombre de paramètres :

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a(T)}{V(V+B)+b(V-b)} \quad \text{III.6}$$

Les termes $a(T)$ et b sont définis comme suit :

$$a = 0.45724 \frac{R^2 T_c^2}{p_c} a(T_R) \quad \text{III.7}$$

Le terme $a(T_R)$ présente la même forme générale que dans le cas de l'équation de SOAVE. Il suit la relation (III.4), mais la fonction reliant le paramètre m au facteur acentrique ω est différente :

$$m = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2 \quad \text{III.8}$$

Ces équations sont très largement utilisées dans les modèles de simulation, en production et traitement de gaz. L'équation la plus recommandée pour les systèmes d'hydrocarbures est l'équation de PENG ROBINSON, car elle résout correctement les problèmes d'équilibre et permet de prédire des densités liquides plus en accord avec les valeurs réelles que les autres équations. [24]

III.3 Choix des composés :

Il y a beaucoup de composés dans la bibliothèque et ils sont classés en groupes. Lorsqu'il est possible, les composés peuvent être trouvés en utilisant des filtres et ajoutés à la liste des composés du procédé à simuler. Des difficultés peuvent se produire lorsque :

- a. Le fluide ne peut pas être séparé en composés individuels, comme dans le cas du pétrole.
- b. Le composé n'est pas dans la bibliothèque du logiciel. Dans ces cas, les difficultés peuvent souvent être surmontées en définissant un composé hypothétique, avec une quantité minimale de propriétés de base spécifiées par l'utilisateur. L'ensemble complet des propriétés pour le composé sera alors estimé par le logiciel. Dans ces cas, l'utilisateur doit être vigilant pour s'assurer que les composés se comportent correctement dans la simulation. [24]

III.4 Utilisation de la simulation :

Les différentes tâches que le simulateur de processus doit effectuer sont :

Dans la conception (engineering) :

- Aborde la matière et l'équilibre énergétique.
- Le dimensionnement des équipements.
- Evaluation économique du procédé.
- Optimisation du processus.

Dans le Suivi des processus :

- Réajuster les paramètres de fonctionnement lorsque des changements se produisent Composition du régime.
- Mesure des performances des équipements.

III.5 Concepts et caractéristiques du simulateur HYSYS

III.5.1 Concepts de base du simulateur HYSYS :

HYSYS est un compilateur de fabrication orientée-objets. Tout changement formelle sur un élément est répercuté dans tout le modèle. C'est un plan de faux-semblant conversationnel intégrant la conduite d'événements (Event Driven) :

C'est-à-dire qu'à tout moment, un accès instantané à l'statistiques est possible, de même que toute nouveaux statistiques est traitée sur demande et que les calculs qui en découlent s'effectuent de manière automatique. Deuxièmement, il allie le concept d'opérations modulaires à celui de résolution non-séquentielle. Non seulement toute nouveaux statistiques est traitée dès son arrivée mais elle est propagée tout au long du Flowsheet. [25]

Dans ce qui suit, on définit les principaux concepts de base et vocabulaires associés, qui sont utilisés pendant les étapes de construction d'un modèle dans le simulateur HYSYS :

- **Flowsheet** : c'est un ensemble d'objets « Flowsheet Elements » (courants de matière, d'énergie, d'opérations unitaires, de variables opératoires) qui constituent tout ou une partie du procédé simulé et qui utilisent la même base de données thermodynamique « Fluid Package ». Ce simulateur possède une Architecture MultiFlowsheet : il n'y a pas de limite par rapport au nombre de Flowsheets. Il possède un certain nombre d'entités particulières :
 - Un « Process Flow Diagram » (PFD).
 - Un « Workbook ».
- **Fluid Package** : il permet de définir les composants chimiques présents dans le procédé simulé et leurs affecte les propriétés chimiques et physiques contenues dans la base de données des corps purs. Il permet aussi de définir les modèles thermodynamiques qui seront utilisés pour le calcul des propriétés des mélanges et de définir les cinétiques des réactions chimiques mises en jeu dans le procédé.
- **Process Flow Diagram** : ce diagramme permet de visualiser les courants et les opérations unitaires, représentées par des symboles dans le « Flowsheet », ainsi que la connectivité entre les courants, les opérations unitaires et les tableaux des propriétés des courants.
- **Workbook** : il permet d'avoir accès à l'information sur les courants et les opérations unitaires sous forme de tableau de données.
- **Desktop** : c'est l'espace principal de HYSYS pour visualiser les fenêtres lors de la conception.
- **Property view** : il contient l'information décrivant un objet (opération ou courant).
- **Simulation Case** : c'est l'ensemble des (Fluid Packages), (Flowsheets) et (Flowsheet Elements) qui constituent le modèle. [24]

III.5.2 Environnement de simulation :

Il existe 5 environnements de développement pour manipuler et mettre en forme l'information dans le simulateur : [25]

- 1) **Environnement (Basis Manager)** : cet environnement permet de créer et modifier le (Fluid Package).
- 2) **Environnement (Oil Characterization)** : il est utilisé pour caractériser les fluides de type pétrolier.
- 3) **Environnement (Main Flowsheet)** : il permet de définir la topologie du Flowsheet principal de la simulation. Il est utilisé pour placer et définir les différents courants, opérations unitaires et (Sub-Flowsheets) qui constituent le procédé simulé.
- 4) **Environnement (Sub-Flowsheet)** : la permet de définir la topologie d'un sous-ensemble particulier du schéma principal (un courant ou une opération particulière et des autres Sub-Flowsheets).
- 5) **Environnement (Column)** : c'est un objet particulier permettant de définir la topologie de l'opération unitaire colonne à distiller. Il possède ses propres (Flowsheet), (Fluid Package), (PFD) et (Workbook).

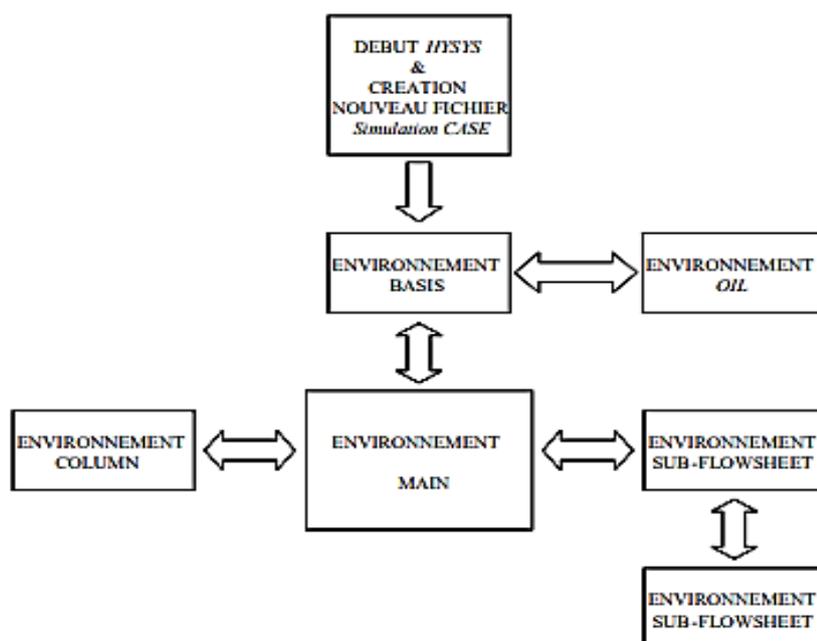


Figure III-1 Environnements de développement dans HYSYS

III.5.3 Caractéristiques principales de HYSYS :

Cette partie décrit brièvement les caractéristiques importantes qui font de HYSYS une plateforme de simulation et de développement très puissant.

- (The Integrated Engineering Environment) : Toutes les applications nécessaires sont utilisées dans un environnement de simulation commun.
- Il intègre la possibilité d'une modélisation dans un état stable ou stationnaire et en régime dynamique.
- Programmation de HYSYS : HYSYS contient un Interna Macro Engine qui supporte la même syntaxe que Microsoft Visual Basic. On peut automatiser différentes tâches dans HYSYS sans avoir besoin d'un autre programme.

Voici quelques caractéristiques de HYSYS sur la manière dont sont réalisés les calculs :

- **Gestion des événements (Event Driven)** : HYSYS combine le calcul interactif (les calculs sont exécutés automatiquement chaque fois que l'on fournit une nouvelle information) avec un accès instantané à l'information (à tout moment on peut avoir accès à l'information depuis n'importe quel environnement de simulation).
- **Gestion intelligente de l'information (Built-in Intelligence)** : Les calculs des propriétés thermodynamiques s'effectuent instantanément et automatiquement dès qu'une nouvelle information est disponible.
- **Opérations Modulaires** : Chaque courant ou unité d'opération peut réaliser tous les calculs nécessaires, en utilisant l'information soit indiquée dans l'opération ou communiquée depuis un courant. L'information est transmise dans les deux directions à travers les Flowsheets.
- **Algorithme de résolution non séquentielle** : on peut construire des Flowsheets dans n'importe quel ordre.

Voici les caractéristiques de HYSYS sur comment opèrent les environnements :

Lorsque l'on effectue des développements dans un Flowsheet particulier, seul ce Flowsheet et les autres situés au-dessous dans la description hiérarchique, seront modifiés. Par exemple, si l'on considère la Figure 2-3 et que l'on suppose que l'on désire faire des changements dans le SubFlowsheet D, on se place dans son environnement pour y effectuer ces changements. Puisque D est au-dessus de E dans la hiérarchie, tous les Flowsheets autres que D et E resteront inchangés. Dès que les calculs dans D seront effectués, il est possible alors de se déplacer dans l'environnement Main Flowsheet pour recalculer toutes les autres parties du modèle contenues dans les autres SubFlowsheets. [25]

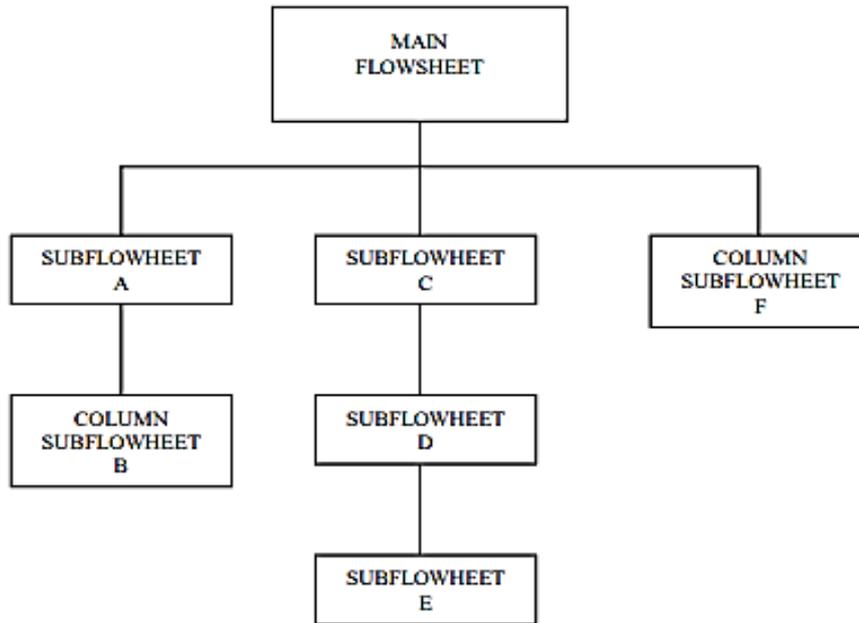


Figure III-2 Organigramme des environnements dans la hiérarchie

III.6 Les étapes d'utilisation du logiciel HYSYS :

Pour réaliser une simulation en HYSYS, les pas suivants sont nécessaires :

- 1) Choix des composés.
- 2) Sélection d'un modèle thermodynamique.
- 3) Construction du PFD.
- 4) Spécification des courants et des unités.
- 5) Exécution du programme de simulation.
- 6) Interprétation des résultats.

III.7 Les différents équipements de HYSYS :

III.7.1 Equipements de canalisations :

III.7.1.1 Mixeur (mélangeur) :

L'utilisateur peut choisir le mixeur, pour fixer la valeur de pression à la sortie, entre :

- La pression de sortie égale à la pression la plus faible des flux d'alimentation.
- Toutes les pressions sont identiques. [15]

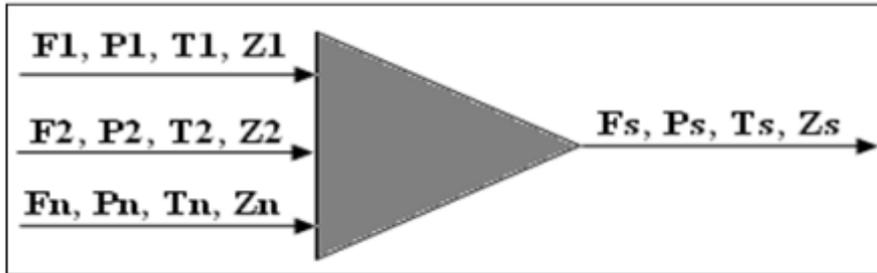
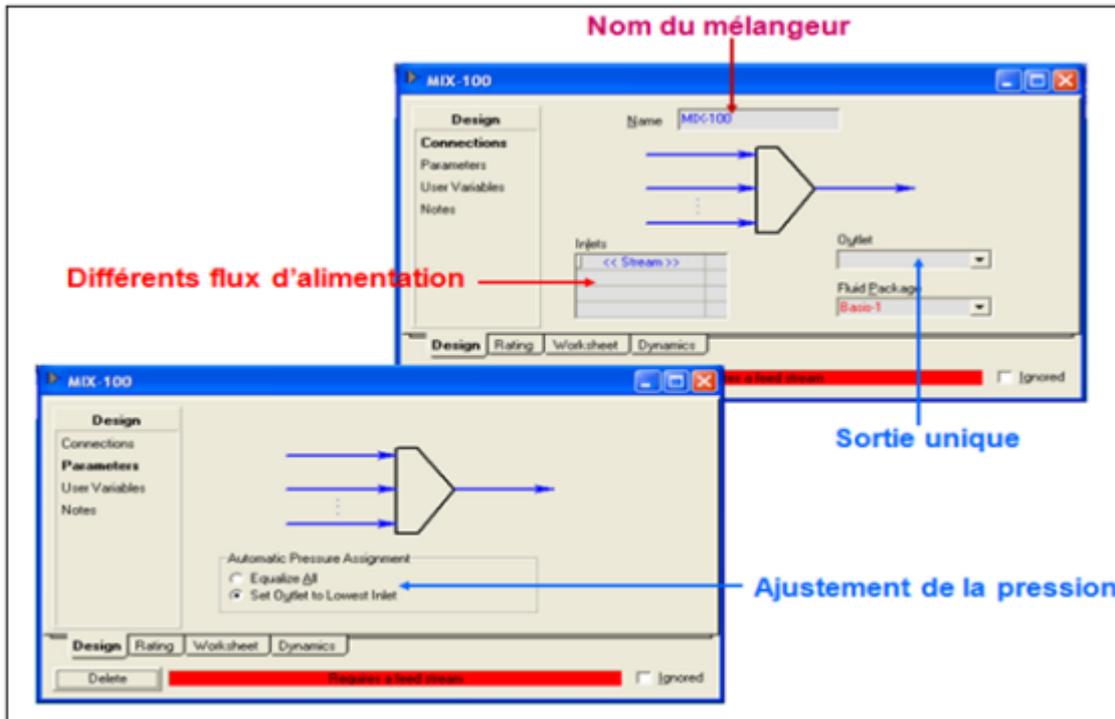


Figure III-3 Présentations d'un mixeur

Installation d'un mélangeur :



III.7.1.2 Vanne (ou vanne de Joule-Thomson) :

La vanne permet de réaliser une détente isenthalpique. $H(T_1, P_1) = H(T_2, P_2)$

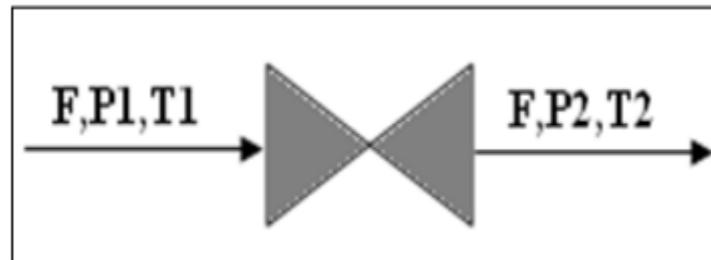
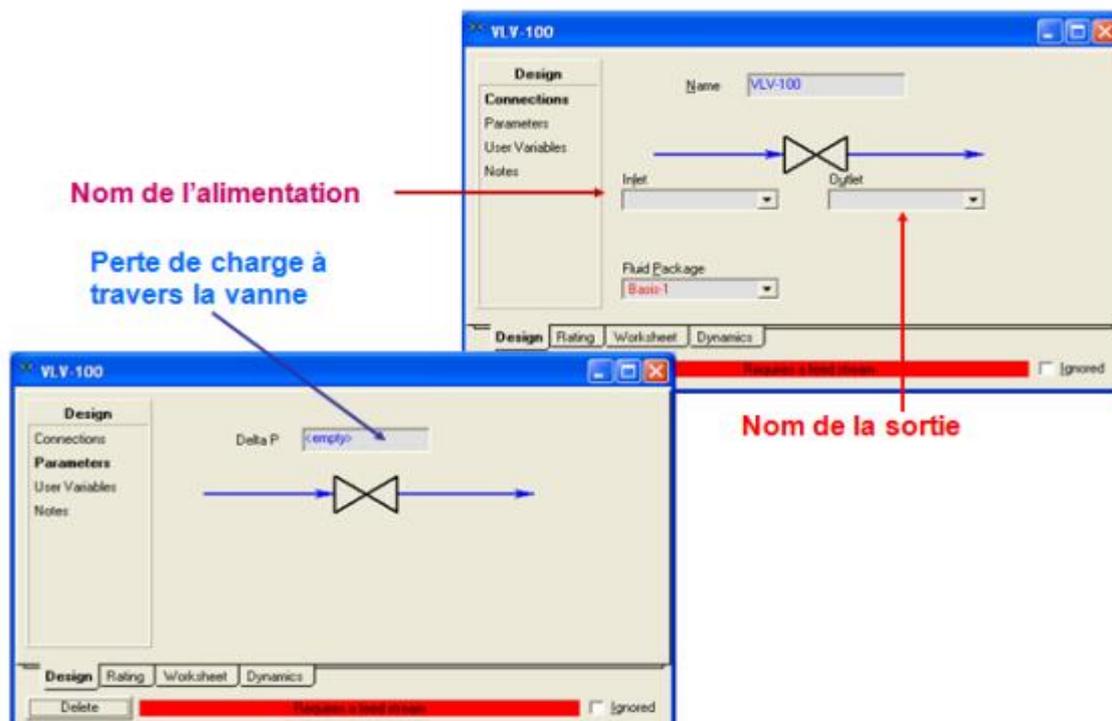


Figure III-4 Représentation d'une vanne

Pour le calcul d'une vanne, il est nécessaire de spécifier soit :

- La perte de charge.
- Ou la pression de sortie.
- Ou la température de sortie. [15]

Installation d'une vanne (Design) :



III.7.2 Equipements de rotation :

III.7.2.1 Compresseur :

Un compresseur est une machine qui a pour fonction d'élever la pression d'un fluide compressible qui le traverse.

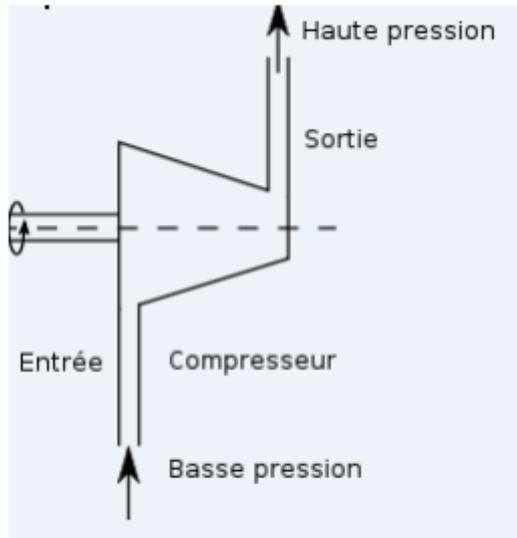
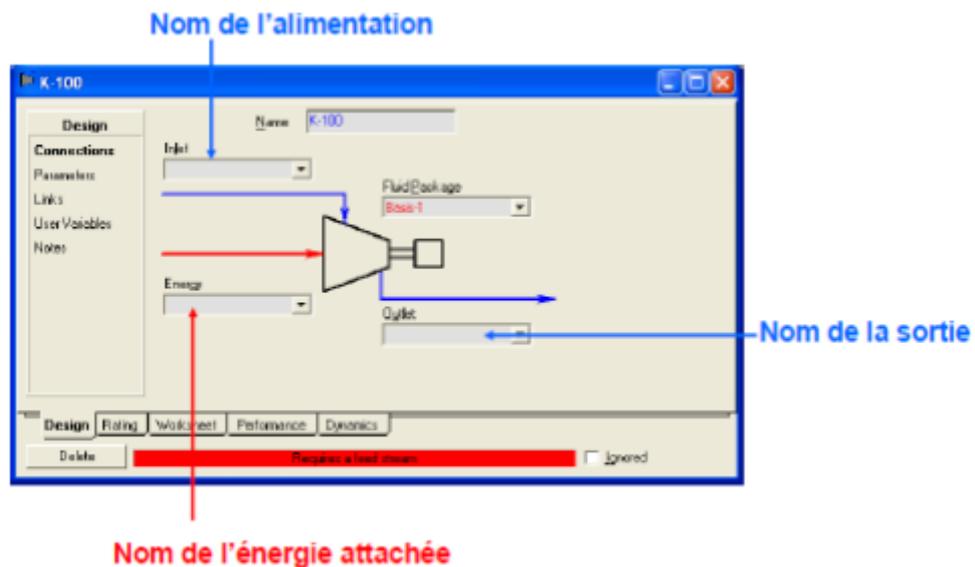


Figure III-5 Représentation d'un compresseur

Installation d'un compresseur :

Selon la méthode de résolution et les données disponibles, l'utilisateur peut spécifier :

- Le rendement adiabatique ou poly tropique (efficiency).
- La puissance absorbée (ou fournie dans le cas d'un Expandre) par l'appareil (Duty).
- Si l'appareil installé est un compresseur, l'utilisateur peut choisir entre un compresseur centrifuge et compresseur alternatif. [15]



III.7.2.2 Détendeur (Turbine) :

Les turbines permettent de refroidir un fluide cryogénique en extrayant l'énergie d'un écoulement de gaz sous forme de travail mécanique en faisant tourner une pale sur un arbre mécanique. [15]

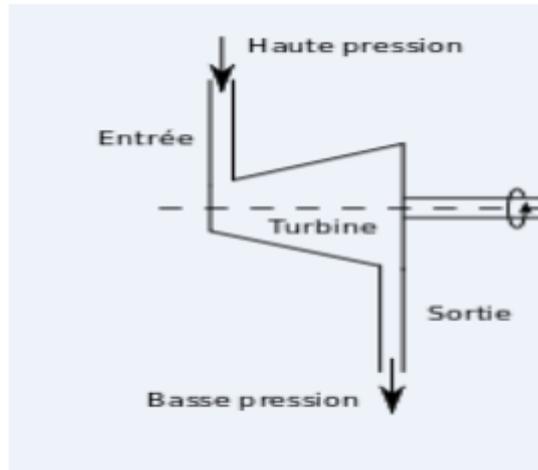
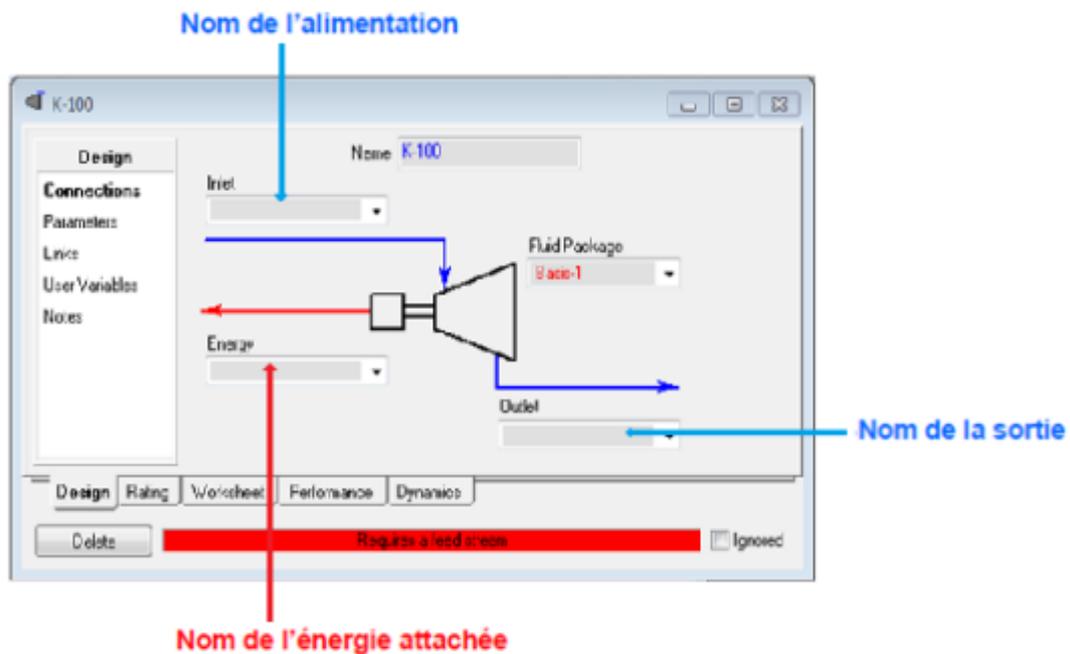


Figure III-6 Représentation d'une turbine.

Installation d'une Turbine :



III.7.3 Equipements de séparation :

III.7.3.1 Séparateur :

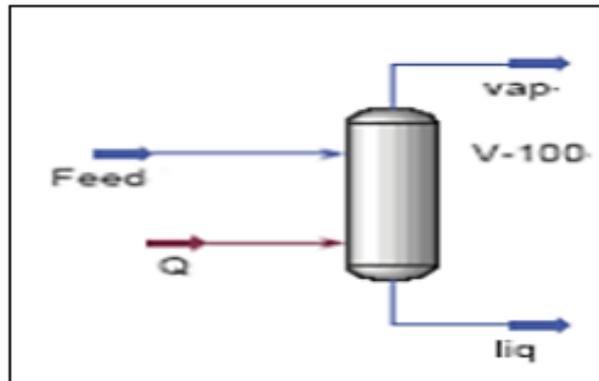


Figure III-7 présentations d'un séparateur

Installation d'un séparateur :

La page **Design\Connections** est conçue pour la connexion des flux d'alimentations et des produits.

The top screenshot shows the 'Design\Connections' page for vessel V-100. It features a central diagram of the vessel with 'Vapour Outlet' and 'Liquid Outlet' labels. The left sidebar has 'Connections' selected. The bottom of the window has a red bar that says 'Requires a feed stream'.

The bottom screenshot shows the 'Design\Parameters' page for vessel V-100. A table for 'Delta P' is highlighted with a green circle:

Delta P	
Inlet [kPa]	0.0000
Vapour outlet [kPa]	0.0000

Other parameters shown include 'Liquid Level' at 50.00% and 'Type' set to 'Separator'. A red bar at the bottom also says 'Requires a feed stream'.

L'utilisateur spécifie dans la page **Parameters** la chute de pression à travers le ballon de séparation.

Delta P : Chute de pression à travers le séparateur.

- Inlet :

$$P = P_v - P_L = P_{\text{Feed}} - \text{Delta}P$$

III.9

Avec :

- P : Pression dans le séparateur.
- P_v : Pression du produit vapeur.
- P_L : Pression du produit liquide.
- P_{Feed} : Pression de l'alimentation.
- ΔP : Chute de pression dans le séparateur. [15]

• **Vapeur Outlet :**

$$P_v = P_L - \Delta P \text{ (vapeur outlet)}$$

III.10

III.7.3.2 Colonne de distillation (ShortCut Column) :

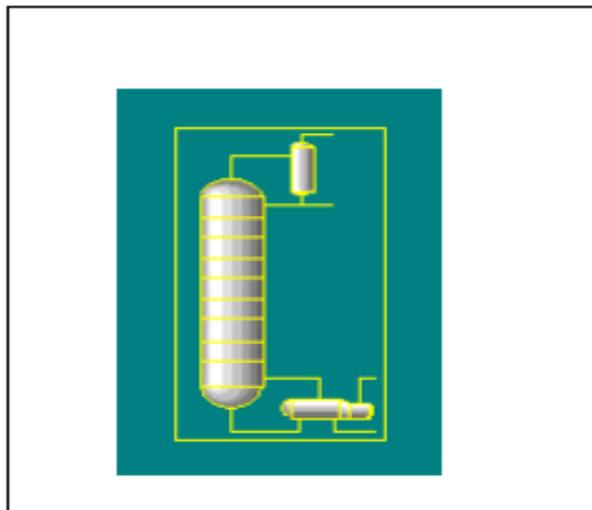
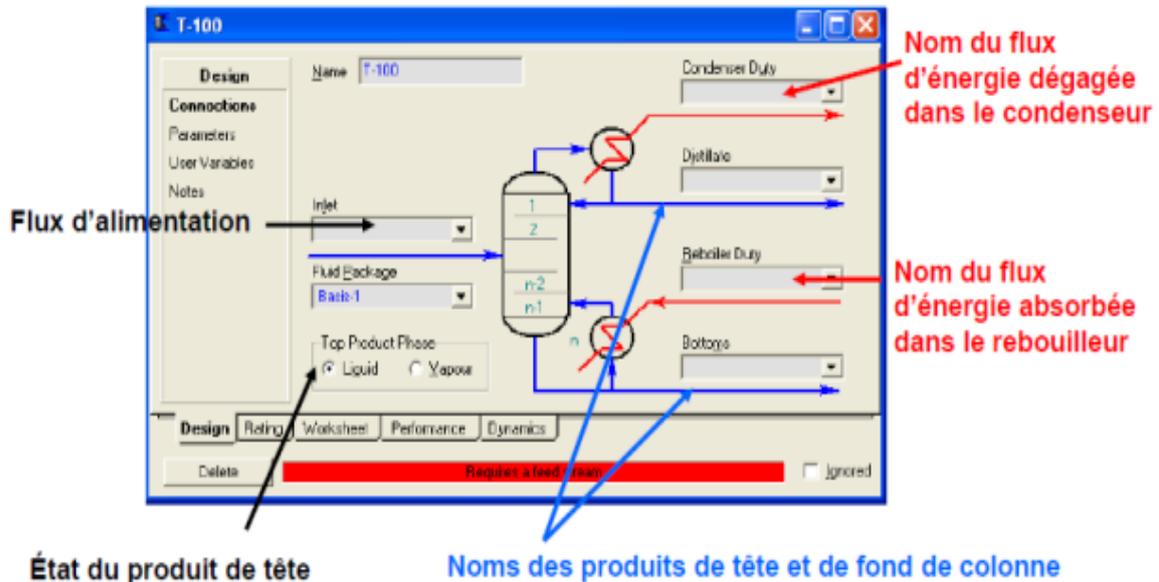


Figure III-8 Représentation d'une colonne de distillation

Installation de la colonne de distillation :



1. On spécifie la **clé légère** dans le résidu et la **clé lourde** dans le distillat ;

2. On spécifie les deux pressions : **pression dans le condenseur et dans le rebouilleur** ;

3. Hysys détermine le **taux de reflux minimal** ;

4. Pour déterminer le reste de calcul (nombre de plateaux, différentes températures... etc.), l'utilisateur doit spécifier « External Reflux Ratio » qui sera, obligatoirement, supérieur au taux de reflux minimum. [15]

III.7.4 Equipements de transfert de chaleur :

III.7.4.1 Cooler /Heater :

Les deux opérations “Cooler/Heater” sont des échangeurs avec un seul flux de matière. Le flux d’alimentation est refroidi ou chauffé, selon les spécifications de l’utilisateur jusqu’à l’atteinte des conditions de sortie.

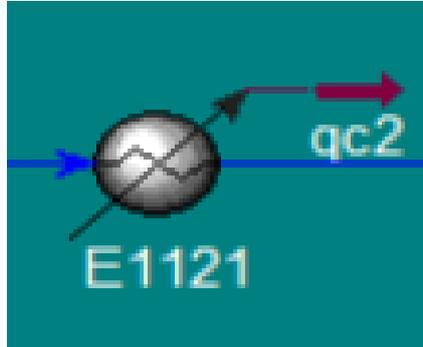


Figure III-9 Représentation d’une Cooler /Heater

Installation d’un (Heater / Cooler) :

L’utilisateur doit spécifier pour une alimentation donnée :

- La pression de sortie (Poutlet) ou la perte de charge à travers l’échangeur.
- La température de sortie (Toutlet) ou la quantité d’énergie échangée (Duty). [15]

Flux d'alimentation

Perte de charge à travers l'échangeur

Nom du flux d'énergie

Flux de sortie

Quantité d'énergie échangée

III.7.4.2 Echangeur de chaleur LNG « LNG Exchanger » :

L'échangeur LNG (Liquefied Natural Gas) résout les bilans d'énergie et de matière pour un échangeur qui peut être alimenté par plusieurs flux (Cas des échangeurs à plaques).

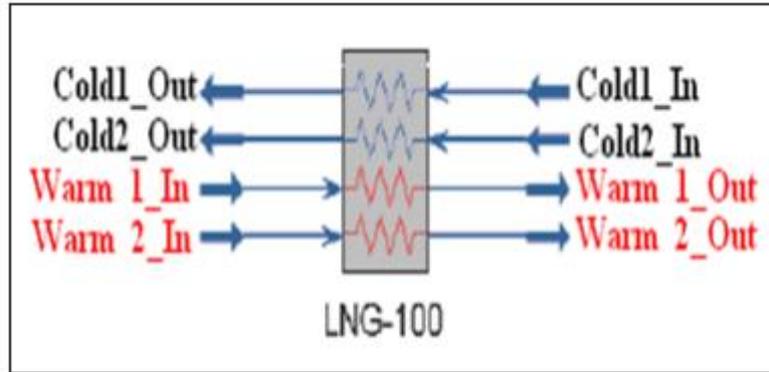


Figure III-10 Représentation d'un échangeur

Installation d'un échangeur LNG (Design\ Connections) :

Inlet Streams	Outlet Streams	Pressure Drop	Hot/Cold
cold1_in	cold1_out	50.0000	Cold
cold2_in	cold2_out	50.0000	Cold
warm1_in	warm1_out	50.0000	Hot
warm2_in	warm2_out	50.0000	Hot

Noms des alimentations

Noms des sorties

Pertes de charge à travers l'échangeur données pour chaque passe

III.7.5 Opérations logiques :

III.7.5.1 Recycle :

L'opération (Recycle) est installée, par l'utilisateur, dans le but de simuler le recyclage d'un flux de matière. Dans cette opération, le flux d'alimentation est nommé (Calculated recycle stream) et le produit est appelé (Assumed recycle stream). Les étapes suivantes auront lieu pendant la procédure de convergence :

1. Hysys utilise les conditions de (Assumed Stream) et résout le procédé jusqu'au (calculated stream).
2. Hysys compare les résultats du flux calculé (Calculated stream) à ceux du flux assumé (Assumed stream).
3. Selon la différence entre les résultats, Hysys modifie les conditions dans (Calculated stream) et transfère les valeurs modifiées au (Assumed stream).
4. Le calcul se répète jusqu'à ce que la différence entre les résultats des deux flux soit inférieure ou égale à la tolérance choisie. [15]

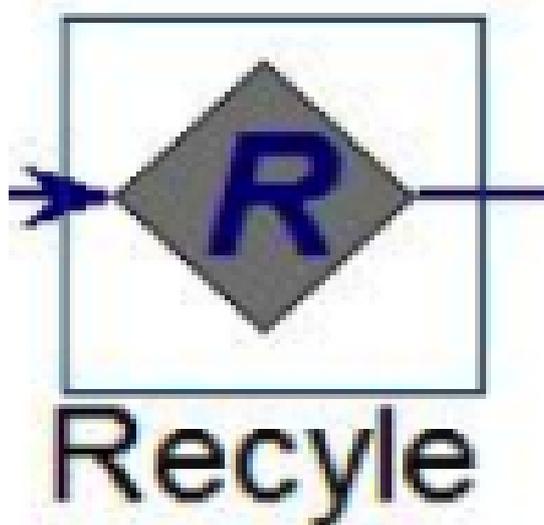
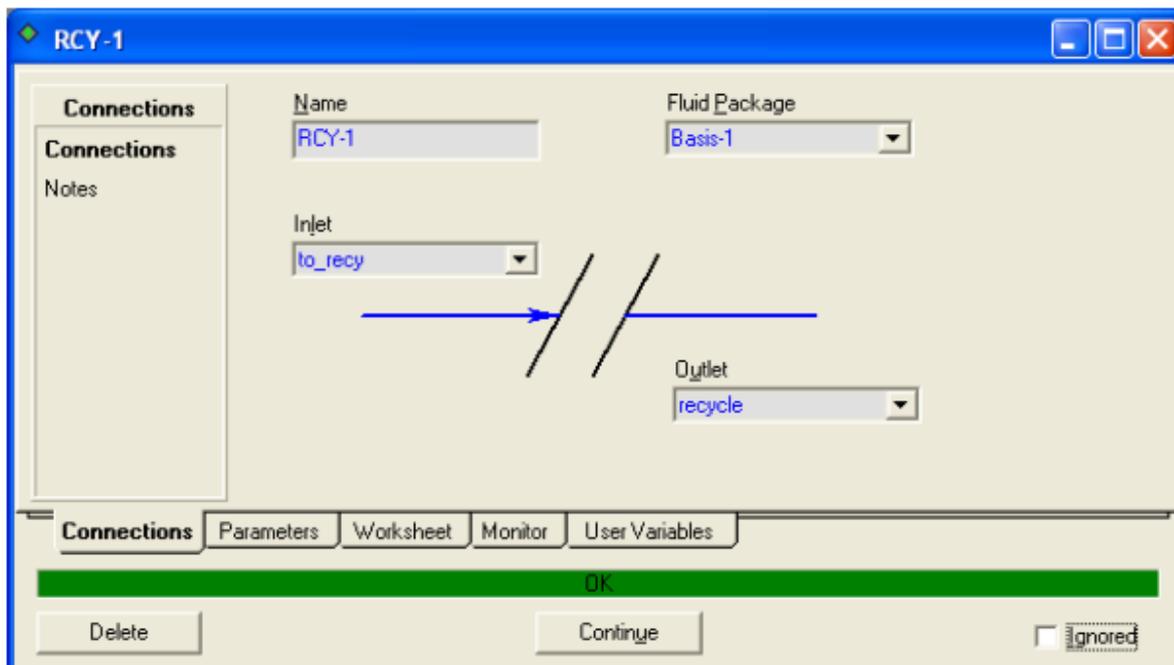


Figure III-11 Représentation d'un recycleur.

Installation d'une opération (Recycle) :



Chapitre IV :

Simulation sous HYSYS et discussion des résultats

IV. Introduction :

Dans ce chapitre, on va effectuer la simulation du procédé de liquéfaction et séparation des gaz de l'air. Cela se fera avec logiciel HYSYS.

En premier lieu on va utiliser le simulateur HYSYS pour réaliser le procédé tout en expliquant les étapes suivies. Ensuite on va discuter les résultats obtenus.

IV.1 Les étapes de simulation de procédé :

Pour réaliser la simulation du procédé par le simulateur HYSYS il faut suivre les étapes suivantes :

IV.1.1 Introduction des compositions :

Au début il faut préciser à HYSYS la composition chimique des fluides utilisés, dans ce cas il faut donner la composition de l'air traité. Dans notre cas les composants de l'air traité sont comme suit : (nitrogène, oxygène et argon).

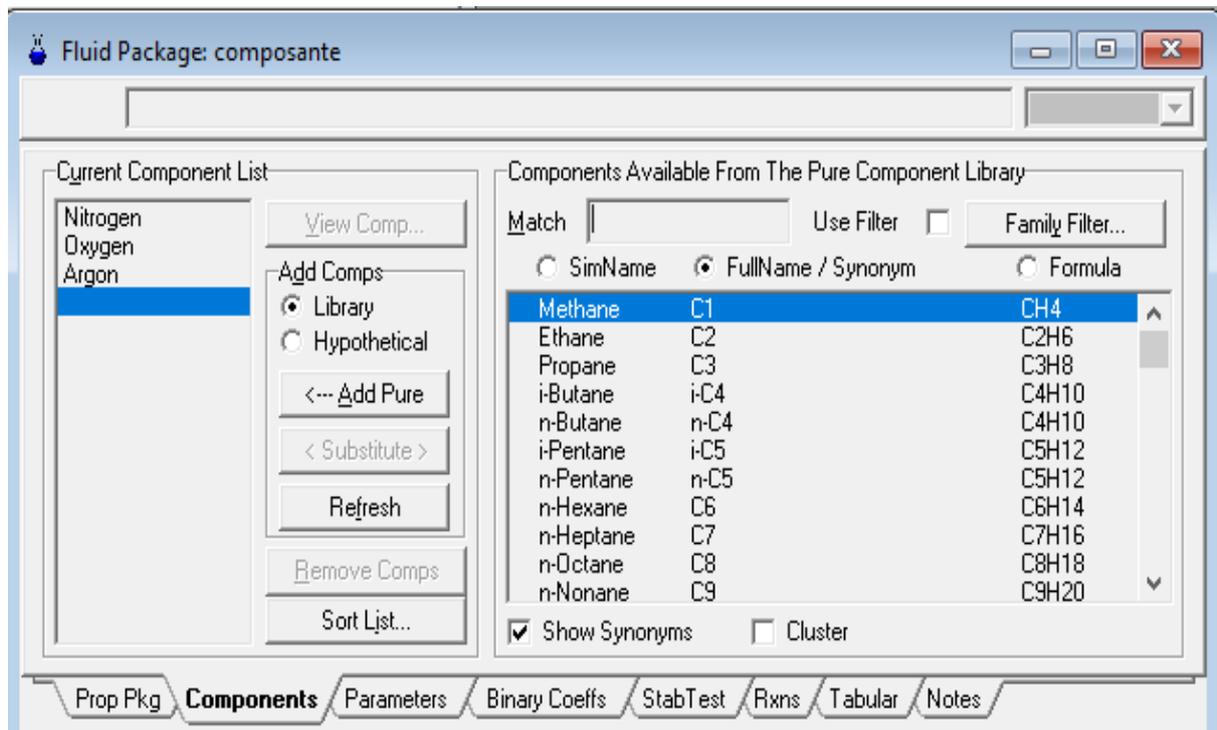


Figure IV-1 Liste des composants chimiques

➤ **Etape 1 :**

Le compresseur absorbe l'air à basse pression à (30 °C ;1.013 bar) et la refoule à (203.8 °C ;4.5 bar) ver les refroidisseurs (E1121 ET E2418).

Worksheet	Name	Air	1	q
Conditions	Vapour	1.0000	1.0000	<empt
	Temperature [C]	30.00	203.8	<empt
Properties	Pressure [bar]	1.010	4.500	<empt
	Molar Flow [kgmole/h]	516.0	516.0	<empt
Composition	Mass Flow [kg/h]	1.495e+004	1.495e+004	<empt
	LiqVol Flow [m3/h]	17.18	17.18	<empt
PF Specs	Molar Enthalpy [kcal/kgmo	32.89	1262	<empt
	Molar Entropy [kJ/kgmole-0	156.4	157.4	<empt
	Heat Flow [kcal/h]	1.697e+004	6.514e+005	6.344e+0

Figure IV-5 Paramètres d'entrée-sortie de compresseur C1161

➤ **Etape 2 :**

L'air qui sort du compresseur rentre aux refroidisseurs qui a pour but d'abaisser la température de l'air de (203.08 °C ;4.5 bar) jusqu'à (60 °C ;4.5 bar), et de (60 °C ; 4.5 bar) a (35 °C ; 4.5 bar).

Worksheet		1	2	
Name				
Vapour		1.0000	1.0000	<er
Temperature [C]		203.8	60.00	<er
Pressure [bar]		4.500	4.500	<er
Molar Flow [kgmole/h]		516.0	516.0	<er
Mass Flow [kg/h]		1.495e+004	1.495e+004	<er
LiqVol Flow [m3/h]		17.18	17.18	<er
Molar Enthalpy [kcal/kgmo		1262	237.3	<er
Molar Entropy [kJ/kgmole-0		157.4	146.7	<er
Heat Flow [kcal/h]		6.514e+005	1.224e+005	5.290e

Figure IV-6 Paramètres d'entrée-sortie de refroidisseur E1121

Worksheet		2	3	
Name				
Vapour		1.0000	1.0000	<er
Temperature [C]		60.00	35.00	<er
Pressure [bar]		4.500	4.500	<er
Molar Flow [kgmole/h]		516.0	516.0	<er
Mass Flow [kg/h]		1.495e+004	1.495e+004	<er
LiqVol Flow [m3/h]		17.18	17.18	<er
Molar Enthalpy [kcal/kgmo		237.3	61.49	<er
Molar Entropy [kJ/kgmole-0		146.7	144.4	<er
Heat Flow [kcal/h]		1.224e+005	3.173e+004	9.070e

Figure IV-7 Paramètres d'entrée-sortie de refroidisseur E2418

➤ **Etape 3 :**

L'air sortie des refroidisseurs entre dans un mélangeur avec recyclage pour mélanger les deux fluides, un débit recyclé et un autre aspiré. La pression de sortie et d'entrée est la même $p=4.5$ bar et l'estimation de la température à la sortie est de 30.46 °C.

Worksheet		Name	recy	3	
Conditions Properties Composition PF Specs	Vapour	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	Temperature [C]	19.18	35.00		30.46
	Pressure [bar]	4.500	4.500		4.500
	Molar Flow [kgmole/h]	208.0	516.0		724.0
	Mass Flow [kg/h]	6026	1.495e+004		2.097e+004
	LiqVol Flow [m3/h]	6.925	17.18		24.10
	Molar Enthalpy [kcal/kgmo]	-49.46	61.49		5.51
	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	142.8	144.4		143.6
	Heat Flow [kcal/h]	-1.029e+004	3.173e+004		2.144e+004

Figure IV-8 Paramètres d'entrée-sortie du mixeur

➤ **Etape 4 :**

La quantité totale de l'air de processus et l'air recyclé provenant de la boîte froide sont ensuite comprimé a 33 bar par un compresseur d'air de recyclage avec refroidissement intermédiaire C1461 qui fait descendre la température de 330.8 °C à 50 °C.

Worksheet		Name	4	q
Conditions	Vapour	1.0000	1.0000	<empt
	Temperature [C]	30.46	330.8	<empt
Properties	Pressure [bar]	4.500	33.00	<empt
	Molar Flow [kgmole/h]	724.0	724.0	<empt
Composition	Mass Flow [kg/h]	2.097e+004	2.097e+004	<empt
	Liq/Vol Flow [m3/h]	24.10	24.10	<empt
PF Specs	Molar Enthalpy [kcal/kgmo	29.61	2188	<empt
	Molar Entropy [kJ/kgmole-0	143.9	147.9	<empt
	Heat Flow [kcal/h]	2.144e+004	1.584e+006	1.562e+0

Figure IV-9 Paramètres d'entrée-sortie de compresseur de recyclage

Worksheet		Name	4	5	
Conditions	Vapour	1.0000	1.0000	1.0000	<er
	Temperature [C]	330.8	50.00		<er
Properties	Pressure [bar]	33.00	33.00		<er
	Molar Flow [kgmole/h]	724.0	724.0		<er
Composition	Mass Flow [kg/h]	2.097e+004	2.097e+004		<er
	Liq/Vol Flow [m3/h]	24.10	24.10		<er
PF Specs	Molar Enthalpy [kcal/kgmo	2188	122.9		<er
	Molar Entropy [kJ/kgmole-0	147.9	128.7		<er
	Heat Flow [kcal/h]	1.584e+006	8.896e+004	1.495e	

Figure IV-10 Paramètres d'entrée-sortie de refroidisseur E1421

➤ **Etape 5 :**

Après le dernier étage du compresseur et après être refroidi on va le comprimé encore a 49.6 bar par le compresseur est ensuit refroidi dans un refroidisseur de sortie E3421 de 102.7 °C à 46 °C.

Worksheet		5	5'	
Conditions	Name	1.0000	1.0000	<empt
	Vapour	1.0000	1.0000	<empt
Properties	Temperature [C]	50.00	102.7	<empt
	Pressure [bar]	33.00	49.60	<empt
Composition	Molar Flow [kgmole/h]	724.0	724.0	<empt
	Mass Flow [kg/h]	2.097e+004	2.097e+004	<empt
PF Specs	LiqVol Flow [m3/h]	24.10	24.10	<empt
	Molar Enthalpy [kcal/kgmo]	122.9	491.7	<empt
	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	128.7	129.7	<empt
	Heat Flow [kcal/h]	8.896e+004	3.560e+005	2.670e+0

Figure IV-11 Paramètres d'entrée-sortie de compresseur C3461

Worksheet		5'	6	
Conditions	Name	1.0000	1.0000	<er
	Vapour	1.0000	1.0000	<er
Properties	Temperature [C]	102.7	46.00	<er
	Pressure [bar]	49.60	49.60	<er
Composition	Molar Flow [kgmole/h]	724.0	724.0	<er
	Mass Flow [kg/h]	2.097e+004	2.097e+004	<er
PF Specs	LiqVol Flow [m3/h]	24.10	24.10	<er
	Molar Enthalpy [kcal/kgmo]	491.7	69.16	<er
	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	129.7	124.6	<er
	Heat Flow [kcal/h]	3.560e+005	5.007e+004	3.059e

Figure IV-12 Paramètres d'entrée-sortie de refroidisseur E3427

➤ **Etape 6 :**

On sépare le débit total de l'air en deux parties avec un pourcentage voulu puis les introduit dans l'échangeur de chaleur qui utilise trois fluides : deux fluides caloporteurs (chaud) cède une quantité de chaleur pour le fluide froid.

Worksheet	Name	8	7	10	van	turbi
Conditions	Vapour	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	Temperature [C]	46.00	46.00	-178.2	-111.0	32.00
	Pressure [bar]	49.60	49.60	4.500	49.60	49.60
	Molar Flow [kgmole/h]	208.0	516.0	208.0	208.0	516.0
	Mass Flow [kg/h]	5997	1.488e+004	5928	5997	1.488e+004
	LiqVol Flow [m3/h]	6.968	17.29	7.076	6.968	17.29
	Molar Enthalpy [kcal/kgmo]	69.94	69.94	-1445	-1250	-35.49
	Molar Entropy [kJ/kgmole-0]	123.8	123.8	106.1	99.43	122.4
	Heat Flow [kcal/h]	1.455e+004	3.609e+004	-3.006e+005	-2.599e+005	-1.831e+004
	Name	11				
Vapour	1.0000					
Temperature [C]	45.56					
Pressure [bar]	4.500					
Molar Flow [kgmole/h]	208.0					
Mass Flow [kg/h]	5928					
LiqVol Flow [m3/h]	7.076					
Molar Enthalpy [kcal/kgmo]	135.9					
Molar Entropy [kJ/kgmole-0]	142.1					
Heat Flow [kcal/h]	2.827e+004					

Figure IV-13 Paramètres d'entrée-sortie de l'échangeur principal

A la sortie de l'échangeur les deux fluides après avoir cédé une quantité de chaleur pour le fluide froid l'un va à la turbine de détente et l'autre à La vanne de Joule- Thomson.

➤ **Etape 7 :**

La turbine de détente est pour un rôle de détendre la pression des gaz de (49.6 bar à 4.5 bar) afin de les mettre dans la colonne à basse pression et basse température de (-179°C) à la sortie on aura un mélange bi-phasique (liquide-vapeur). Après la turbine on a mais un séparateur pour obtenir deux phases à la sortie, phase vapeur à recycler et phase liquide qui sera séparé par distillation.

turbine de détente

Worksheet	Name	turbi	9	qc7
Vapour		1.0000	0.0000	<empty>
Conditions	Temperature [C]	32.00	-179.0	<empty>
Properties	Pressure [bar]	49.60	4.500	<empty>
Composition	Molar Flow [kgmole/h]	516.0	516.0	<empty>
PF Specs	Mass Flow [kg/h]	1.488e+004	1.488e+004	<empty>
	LiqVol Flow [m3/h]	17.29	17.29	<empty>
	Molar Enthalpy [kcal/kgmo]	-35.49	-2691	<empty>
	Molar Entropy [kJ/kgmole-0]	122.4	53.76	<empty>
	Heat Flow [kcal/h]	-1.831e+004	-1.388e+006	1.370e+006

Design Rating **Worksheet** Performance Dynamics

Delete OK Ignored

Figure IV-14 Paramètres d'entrée-sortie de la turbine de détente

séparateur

Worksheet	Name	9	turbine	10
Vapour		0.0000	0.0000	1.0000
Conditions	Temperature [C]	-179.0	-178.2	-178.2
Properties	Pressure [bar]	4.500	4.500	4.500
Composition	Molar Flow [kgmole/h]	516.0	308.0	208.0
PF Specs	Mass Flow [kg/h]	1.488e+004	8951	5928
	LiqVol Flow [m3/h]	17.29	10.21	7.076
	Molar Enthalpy [kcal/kgmo]	-2691	-2699	-1445
	Molar Entropy [kJ/kgmole-0]	53.76	55.23	106.1
	Heat Flow [kcal/h]	-1.388e+006	-8.313e+005	-3.006e+005

Design Reactions Rating **Worksheet** Dynamics

Delete OK Ignored

Figure IV-15 les paramètres d'entrée-sortie du séparateur

Worksheet	Name	van	vanne J-T
Conditions	Vapour	1.0000	1.0000
	Temperature [C]	-111.0	-151.8
Properties	Pressure [bar]	49.60	4.500
Composition	Molar Flow [kgmole/h]	208.0	208.0
	Mass Flow [kg/h]	5997	5997
PF Specs	LiqVol Flow [m3/h]	6.968	6.968
	Molar Enthalpy [kcal/kgmo]	-1250	-1250
	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	99.43	116.1
	Heat Flow [kcal/h]	-2.599e+005	-2.599e+005

Design Rating **Worksheet** Dynamics

Delete OK Ignored

Figure IV-16 Paramètres d'entrée- sortie de la vanne de joule Thomson (J-T)

La vanne de détente Joule-Thomson sert à détente le gaz provenant de l'échangeur de chaleur de (49.6 bar a 4.5 bar).

➤ **Etape 8 :**

Le rôle de la colonne de distillation est la récupération d'azote liquide en haut de la colonne, et l'azote gazeux en tête de la colonne. Au fond de la colonne on a un bouilleur qui sert à provoquer l'évaporation d'azote, et en haut de la colonne on a un condenseur qui fait condenser l'azote gazeux a sa température de condensation.

Dans une colonne de distillation a 15plateaux, dans le plateau n° 6 et 7 on n'a envoyé l'air avec un débit massiques de (8951 kg/h et 5997 kg/h), température de (-178.2 °C et -151.8 °C) avec une pression de (4.5 bar).

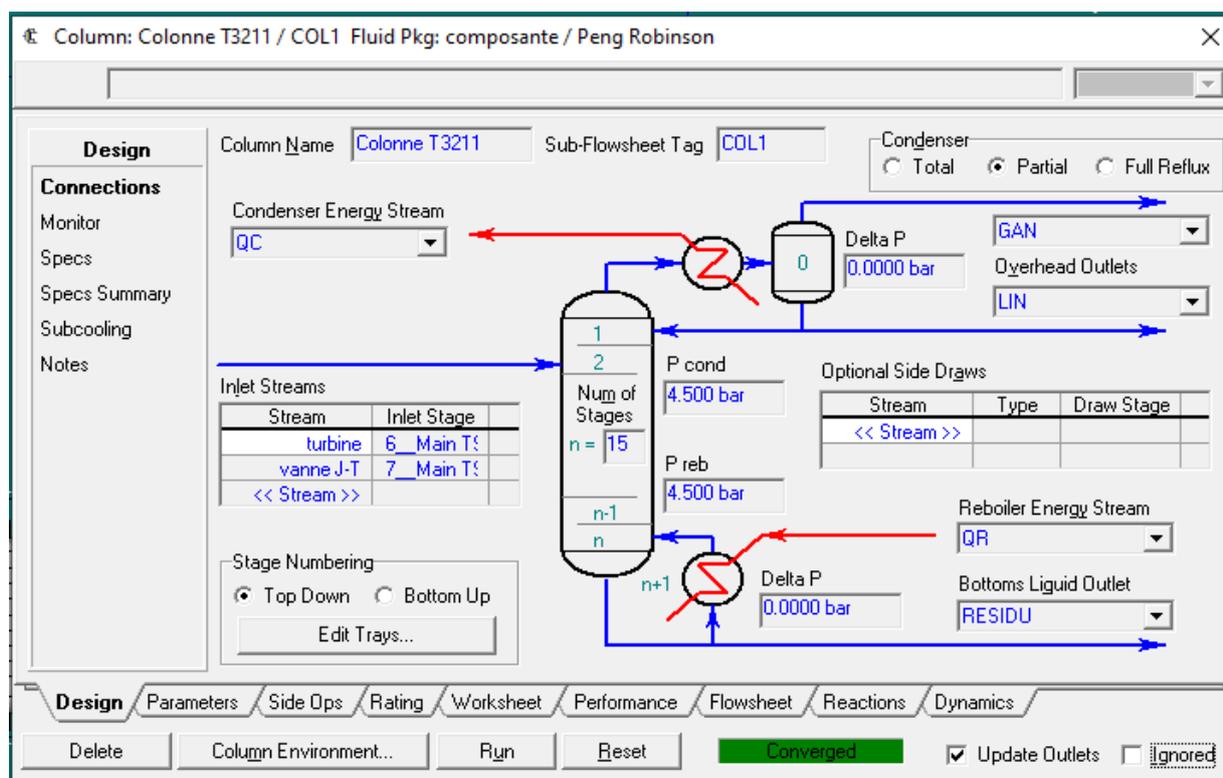


Figure IV-18 Page de connexion de la colonne de distillation

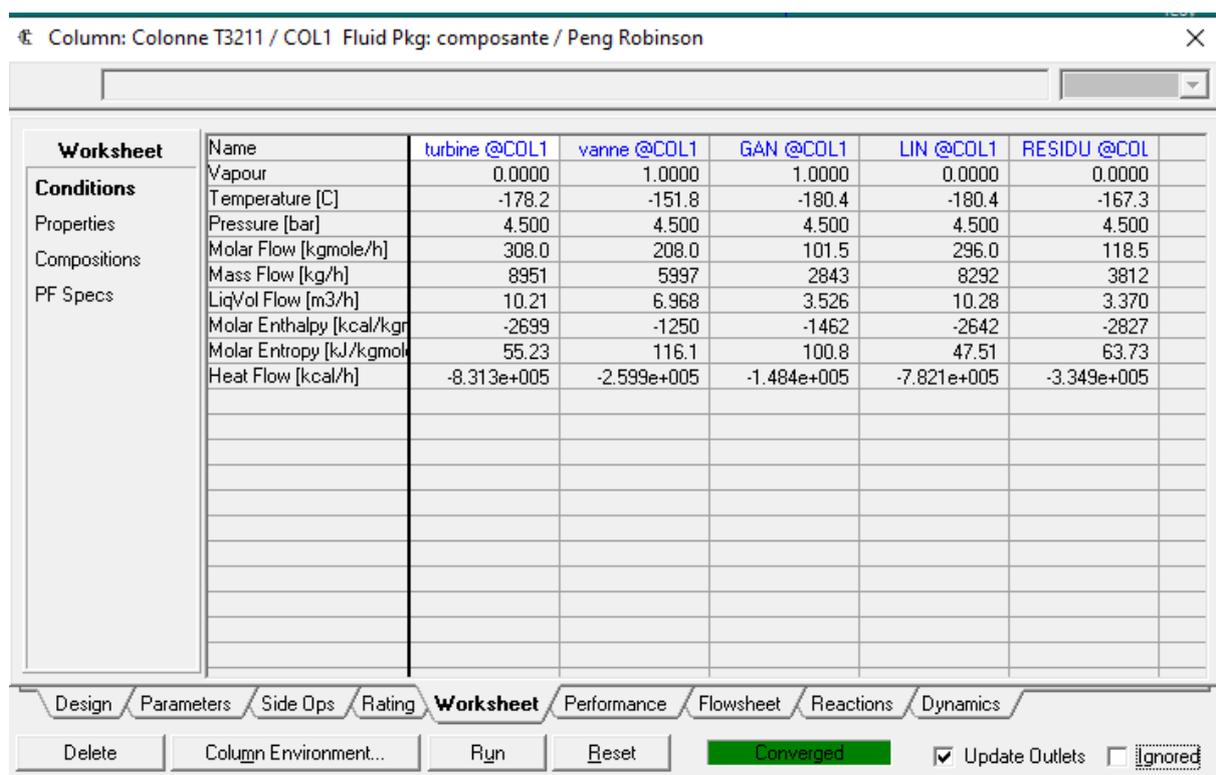


Figure IV-17 Paramètres d'entrée- sortie de la colonne de distillation

The screenshot shows the 'RESIDU' stream composition window. The 'Worksheet' tab is selected, showing a table with the following data:

	Mole Fractions
Nitrogen	0.041791
Oxygen	0.914655
Argon	0.043554
Total	
	1.00000

Below the table, there are buttons for 'Edit...' and 'Basjs...'. At the bottom of the window, there are tabs for 'Worksheet', 'Attachments', 'Dynamics', and 'User Variables', along with 'Delete', 'Define from Other Stream...', and navigation arrows.

Figure IV-21 la composition de RESIDU

Les fractions des débits produits :

Les fractions des débits massiques pour chaque produit de la colonne sont données par la formule suivante :

$$Y_{GAN} = \frac{\text{Débit massique de l'azote gazeux}}{\text{débit massique total}}$$

$$Y_{GAN} = \frac{2843}{14947} = 0.19 = 19\%$$

$$Y_{LIN} = \frac{8292}{14947} = 0.555 = 55.5\%$$

$$Y_{résidu} = \frac{3812}{14947} = 0.255 = 25.5\%$$

On a produit 55.5% d'azote liquide du débit total de la colonne ce qui fait (8292.395 kg/h), 19% d'azote gazeux (2843.106 kg/h) et 25.5% pour le mélange liquide (oxygène+ argon) (3812.173 kg/h).

IV.2 Résultat, et discussion :

Après l'introduction des différentes données de simulation, le simulateur est convergé vers la solution optimale, voici un résultat de simulation en mode stationnaire :

IV.2.1 Présentation et interprétation des profils du procédé :

IV.2.1.1 Au niveau de l'échangeur :

Avec le HYSYS on n'a obtenu au niveau de l'échangeur principale la variation du flux de chaleur en fonction de la température.

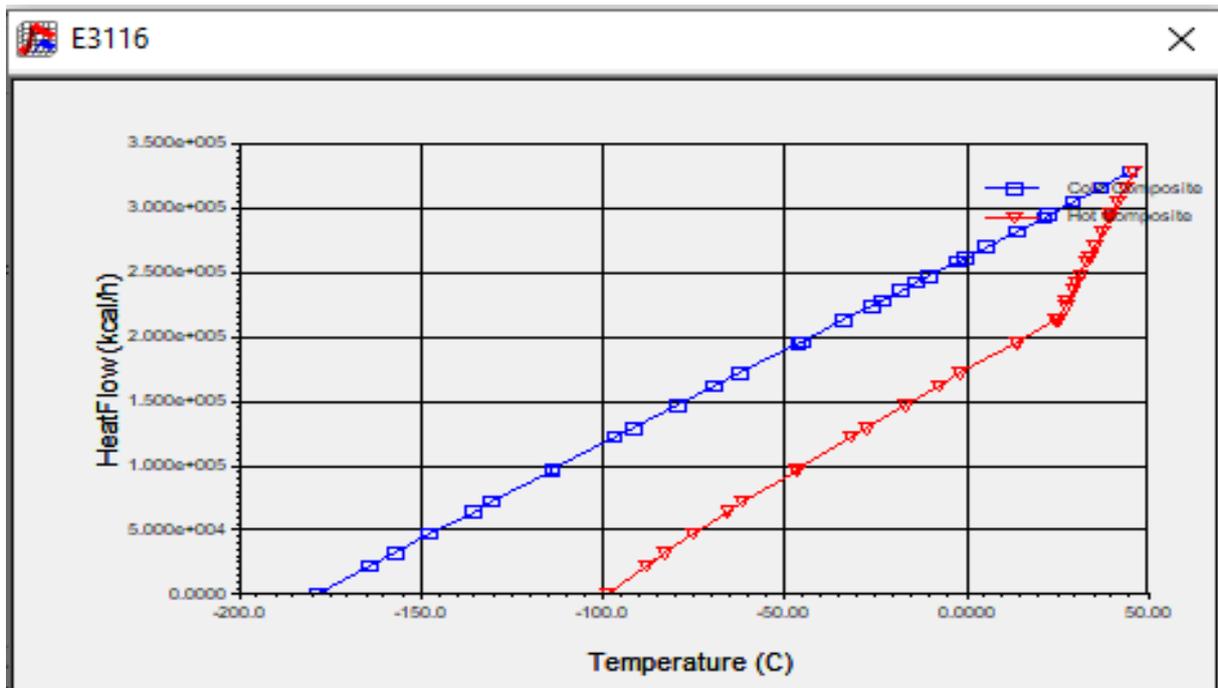


Figure IV-22 variations du flux de chaleur en fonction de la température

La courbe de variation du flux de chaleur en fonction de la température montre deux courbes, l'une caractérise le corps froid, et l'autre caractérise le corps chaud qui cède la chaleur.

IV.2.1.2 Au niveau de colonne de distillation :

IV.2.1.2.1 profils de la température :

Avec le HYSYS on n'a obtenu au niveau de la colonne de distillation la variation de la température en fonction des plateaux :

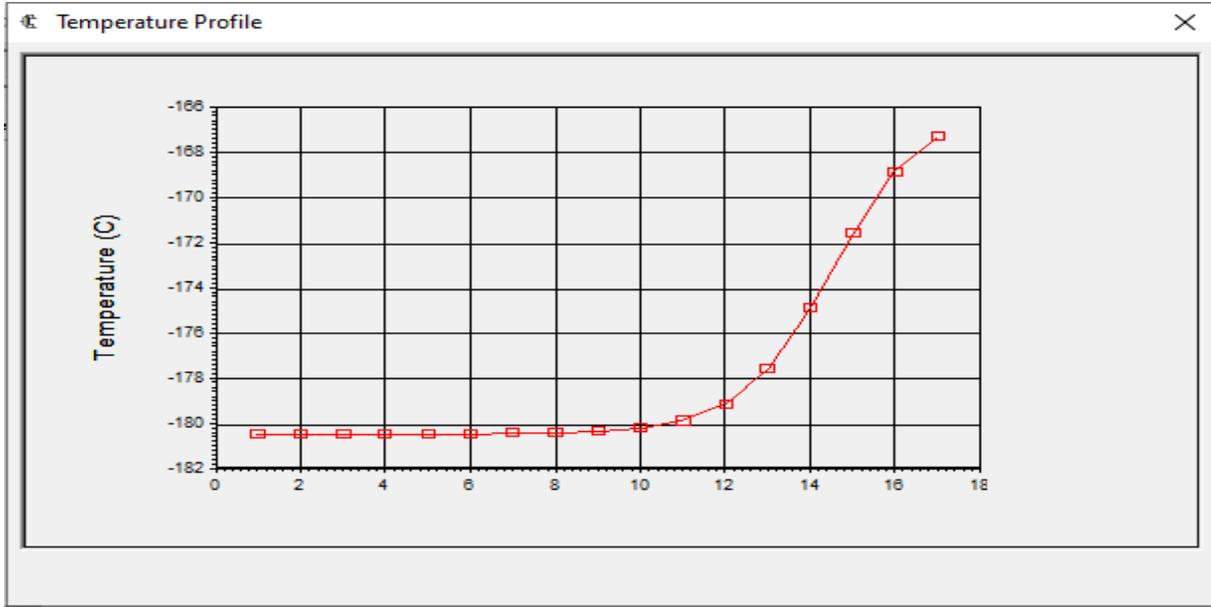


Figure IV-23 variations de la température dans la colonne de distillation

IV.2.1.2.2 Profils de débits molaires :

Avec le HYSYS on n'a obtenu au niveau de la colonne de distillation la variation de débits molaires en fonction des plateaux :

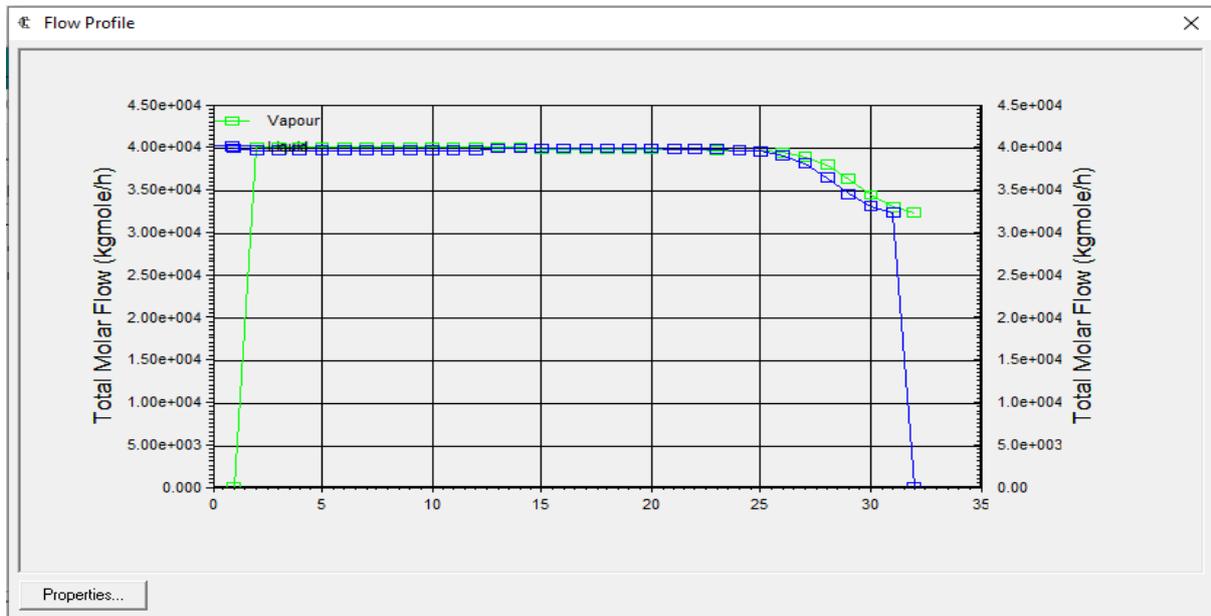


Figure IV-23 variations des débits molaires dans la colonne de distillation

IV.2.1.2.3 Profils des composition phase (vapeur et liquide) :

Avec le HYSYS on n'a obtenu au niveau de la colonne de distillation la variation des compositions en phase vapeur et liquide en fonction des plateaux

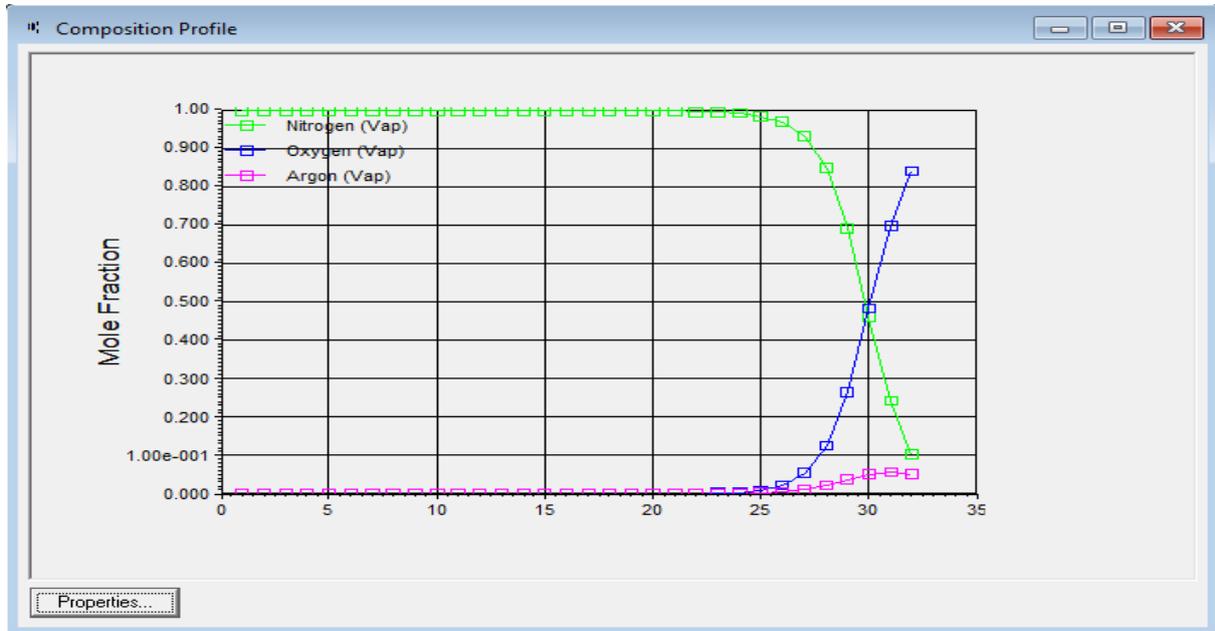


Figure IV-25 variations des compositions de la phase vapeur dans la colonne de distillation

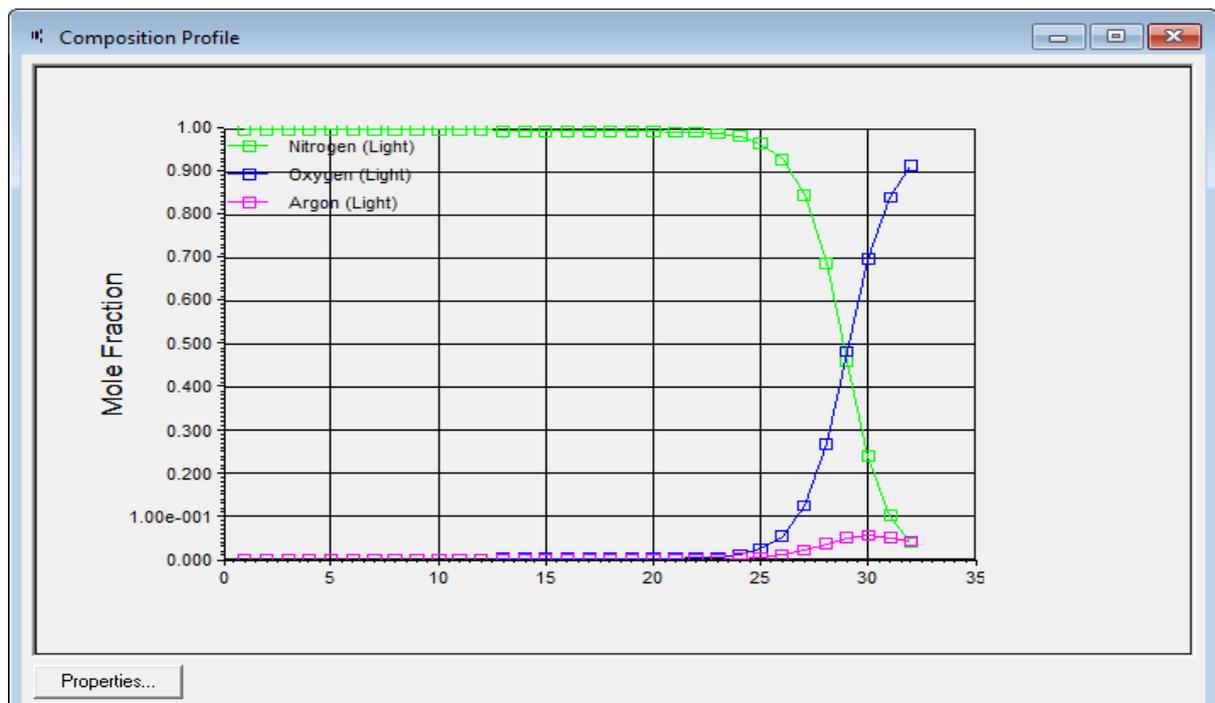


Figure IV-24 variations des compositions de la phase liquide dans la colonne de distillation

IV.2.1.2.4 Interprétation des profils :

- Le profil de température présente une évolution normale le long de la colonne, sauf une augmentation légère de la température qui est remarquée au niveau du 7^{ème} plateau et 9^{ème} plateau, ce s'explique par la différence entre la température d'alimentation et celles des plateaux.
- Le profil de débits liquide et vapeur, présente une évaluation des profils des débits liquides et vapeurs uniforme et parallèle qui est dû à l'absence d'une source de perturbation.
- Le profil de la composition permet de confirmer le rôle que joue le « bouilleur » dans l'élimination de l'azote dans le produit de fond.

IV.2.2 Les résultats obtenus :

On a remarqué d'après la figure IV.17 que dans le haut de la colonne la fraction de l'azote (LIN) a atteint le pourcentage prévu (100%) pour dire que le liquide obtenu est de l'azote pur.

Pour le bon fonctionnement de l'installation, le choix du nombre d'étage est influent C'est important pour la pureté du produit fini.

Le taux de reflux a une influence considérable sur la fraction d'azote (liquide+ vapeur).

Le rebouilleur doit être maintenue à la température d'ébullition d'azote afin d'éviter l'évaporation de l'argon et d'oxygène.

La liquéfaction de l'azote au niveau du condenseur doit être assurée par un fluide de température inférieure à la température de la condensation de l'azote.

Conclusion générale

Conclusion générale :

La liquéfaction d'un gaz est un procédé important dans l'industrie et principalement dans la production des gaz purs et Le cycle de liquéfaction de l'air de Linde gaz et l'un des plus performant aux mondes, car il à monter son efficacité sa rémunération dans le domaine de production de l'air liquide, oxygène liquides, argon.... Etc.

D'après la simulation effectuée sur cette installation, nous pouvons tirer quelques conclusions intéressantes :

Dans notre travail, nous avons pu simuler via le logiciel Aspen-HYSYS le procédé de liquéfaction, l'adaptation d'un outil aussi puissant qu'HYSYS, a permis de nous donner un aperçu général sur les techniques de séparations industrielles, ainsi de voir les performances des équipements de l'installation, et de nous familiariser avec les procédés de séparation de l'air et de ces composants essentiels l'azote l'oxygène et l'argon

En effet dans tout système de liquéfaction, on cherche à maximiser la fraction d'azote liquéfié, et on voit que la présence d'argon n'a pas d'effet réel sur la pureté de nos produits.

D'après notre étude, on a conclu qu'il existe plusieurs paramètres affectant la pureté incluent notamment Augmenter la fraction du liquide à la sortie de la vanne de joule-Thomson, dans le haut de la colonne, en augmente le taux de reflux.

La mise en exergue des paramètres influençant le processus de la séparation de l'air, tel que : le débit massique, la température, le taux de reflux, la pression..... nous a donné des informations primordiales sur la performance des équipements de l'installation.

Les résultats obtenus sont satisfaisants ont les comparons avec ceux trouves sur site, et pour chaque programmation des éléments de ce procédé ont été fait en exploitants les données fournit par l'entreprise.

En fin, nous pouvons dire que nous avons eu l'occasion de traiter un domaine complexe et intéressant qui est la liquéfaction des gaz et Pour la séparation de l'argon et l'oxygène la double colonne est fortement recommander pour des futurs travaux.

Liste des références

Liste des références :

- [1] : Djelloul amel, « Simulation de cycle de Claude pour la liquéfaction de l'air, de l'azote et de l'oxygène », mémoire de fin d'études 2006.
- [2] : Philippe, Bredy, « températures cryogéniques », Techniques de l'ingénieur, septembre 2004.
- [3] : « Aperçu sur l'Histoire de la Production du Froid » institut international du froid - Organisation intergouvernementale pour le développement du froid.
- [4] : Julien Bobroff, « Thermodynamique Classique Magistère de Physique d'Orsay », 2008.
- [5] : <http://elearningfr.univrelizane.dz/moodle/pluginfile.php/29161/course/overviewfiles/Cryog%C3%A9nie%207.pdf>.
- [6] : « Le froid et ses applications dans l'industrie du gaz » – collection des techniques gazières association technique de l'industrie du gaz en France.
- [7] : DESMOND E Winterbone « Advanced thermodynamics for engineers », 1997.
- [8] : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Liqu%C3%A9faction>.
- [9] : RANDALL F. BARRON « Cryogenic Systems » Oxford university press, New York, Clarendon press, Oxford 1985.
- [10] : « PROCÉDES DE LIQUEFACTION DES GAZ PERMANENTS » USTO-MB- Faculté de Chimie - Département de Génie des Matériaux.
- [11] MILES ADEL « Optimisation des cycles de liquéfaction du Gaz Naturel » Présenté pour l'Obtention du Diplôme de Magister En Génie Mécanique.
- [12] LAÏFA AHMED ESSEDIK • BOUTADJINE SOUFYANE « Etude comparative entre deux procédés de liquéfaction du gaz (PRICO et APCI) » mémoire fin d'étude : ingénierie de gaz naturel.
- [13] Mohamed SMAIL Toufik ALI-CHERIF « Manipulation des capteurs utilisés à la séparation des gaz (Oxygène, Azote, Argon) à l'unité de Linde Gas Algérie » Mémoire de fin d'Etudes de MASTER PROFESSIONNEL.
- [14] Zioui Brahim Hadj Ali Hocine « Etude énergétique et exergétique d'un système simple de Linde » Mémoire de fin d'études génie mécanique.
- [15] AYAD Ouardia CHOUIMET Imen « Étude et simulation des cycles de liquéfaction des gaz cryogéniques » Génie Mécanique Option : Mécanique Énergétique.
- [16] SALHAOUI YOUBA « SIMULATION DE LA LIQUEFACTION DE L'AIR ET SEPARATION » diplôme de Master en : Génie des Procédés.
- [17] BETTAYEB Soufiane GHOUL Mahmoud Yacine « Analyse des risques de système de production d'hydrogène Etude de cas Linde Gas Skikda » Mémoire de LICENCE PROFESSIONNELLE.
- [18] M. ABBAS Amir - Mlle. BENABDELOUED Nassima « Etude des performances du procédé de liquéfaction du gaz naturel APCI (C3/MR) » MEMOIRE DE PROJET DE FIN CYCLE MASTER ACADEMIQUE Génie Mécanique Spécialité : Énergétique.
- [19] LINDE GAZ ALGERIE, guide informatif en ligne www.linde-gas.entreprise-dz.com.

Liste des références

- [20] Mr. ZAGHRIR BACHI- Melle DRAMCHINI BOUCHRA « Production et analyse des gaz médicaux N₂O et O₂ » MEMOIRE DE FIN D'ETUDE procédés organiques et macromoléculaires.
- [21] DAHOU, M. E. A. « Distillation. Cours de distillation ».
- [22] Le site web <https://www.lenntech.fr/data-perio/o.htm>.
- [23] Manuel de Linde gaz, Algérie, Reghaia.
- [24] DJEBBARI Abdelbasset « SIMULATION D'UNE UNITÉ DE PRODUCTION DE MÉTHANOL A L'AIDE DE L'ASPEN PLUS-HYSYS » diplôme de Master en : Génie des Procédés.
- [25] HAL open science Antonio Orantes Molina, « Méthodologie pour le placement des capteurs à base de méthodes de classification en vue du diagnostic », 2005.