



**UNIVERSITE DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE**

Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du Diplôme de Master
Spécialité Installation Energétique Et Turbomachine

**Etude et optimisation du processus de séparation
cryogénique de l'azote à partir de l'air**

Promoteur :ROUDANE Mohamed Réalisé par :

1. DOUMANE Assia
2. KERKACHE Weil
3. LAFOUKA Hanane

Année universitaire : 2022/2023

Remerciement

Avant tout, nous exprimons notre gratitude envers Allah, le miséricordieux, le plus puissant et le plus clément, qui nous a accordé la force et la patience nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.

Ce travail n'aurait jamais atteint son niveau actuel sans l'aide, le soutien, les encouragements et la générosité d'un grand nombre de personnes.

Nous tenons à remercier, dans ces quelques lignes, toutes celles et ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de notre projet, tant sur le plan humain que sur le plan scientifique.

Nous souhaitons exprimer notre gratitude à nous promoteur, Professeur Roudane, nous n'oublions pas, M. Kerkache akram, et Bahae eddine bouza qui ont partagé leur expérience avec nous, ainsi que leur confiance, leurs remarques, leurs conseils et leur disponibilité.

Un sincère remerciement est également adressé aux membres du jury qui nous ont fait l'honneur de juger et d'examiner notre travail. Nous n'oublions pas les enseignants qui ont consacré des efforts considérables à notre égard dans notre intérêt.

Enfin, nous exprimons notre reconnaissance envers nos familles respectives et nos amis pour leur soutien constant et leur disponibilité tout au long de notre parcours de travail.

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à celle qui passe au comble de la joie quand je suis
heureuse et sombre dans la tristesse quand je suis triste.*

*A celle qui ne dit pas tout pour dire le tout : à Toi Ma Mère Wahiba et à toi ma
grand-mère Khira*

*A tout ma famille sans exception du plus grande au plus petit
A mon chère frères : walid*

A ma chère sœurs : ahlam

A mon chère neveu: Mouad

*A tout mes amis : haithem asma rania wafa rihab,
wael, Loubna, Ghiles*

Et surtout mon amour hanane

Doumane Assia



Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à celle qui passe au comble de la joie quand je suis
heureuse et sombre dans la tristesse quand je suis triste.*

*A celle qui ne dit pas tout pour dire le tout : à Toi Ma Mère Fati et à toi mon
Père Amer*

*A tout ma famille sans exception du plus grande au plus petit
A mes chères frères : Noureddine et Aziz*

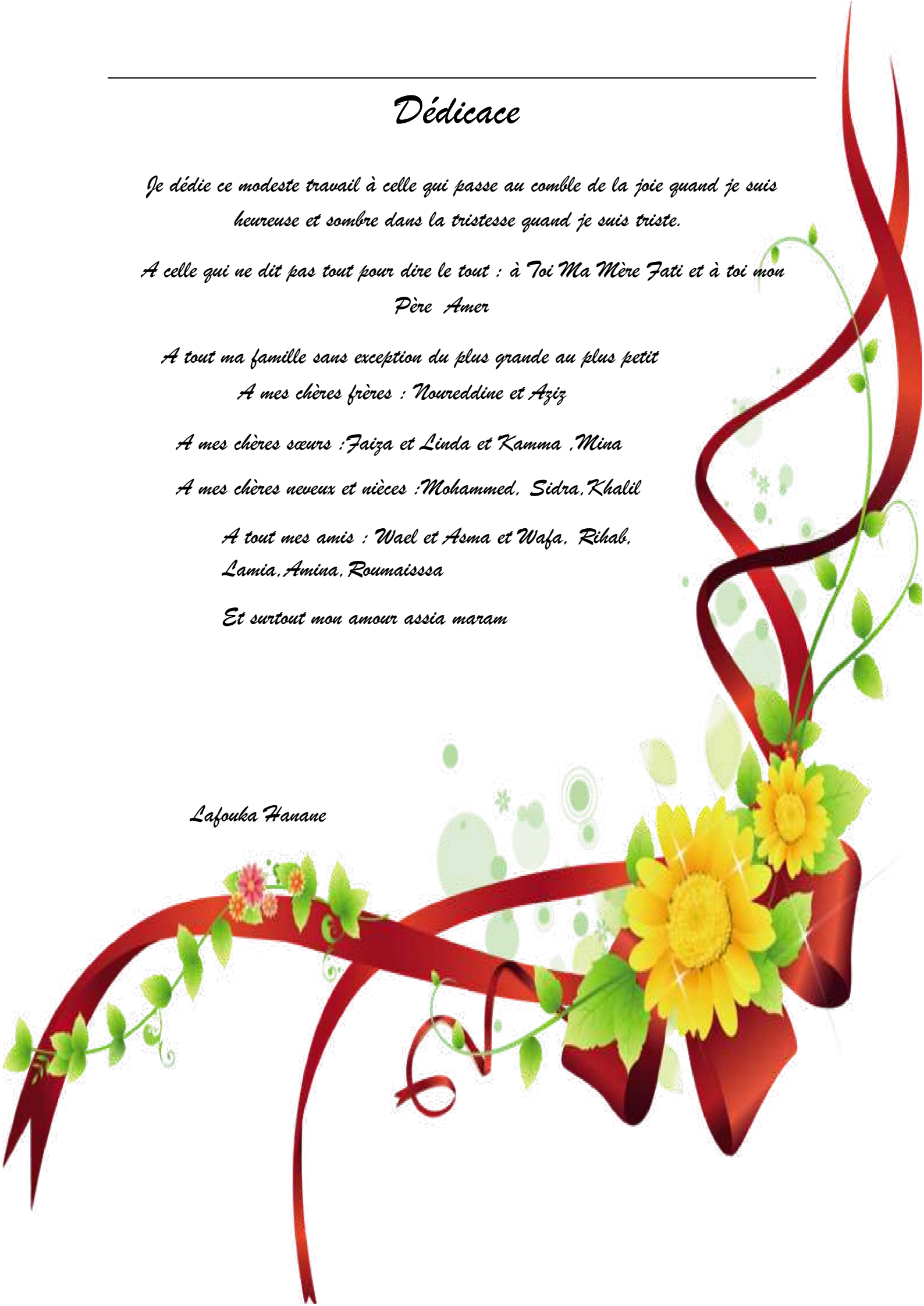
A mes chères sœurs : Faiza et Linda et Kamma , Mina

A mes chères neveux et nièces : Mohammed, Sidra, Khalil

*A tout mes amis : Wael et Asma et Wafa, Rihab,
Lamia, Amina, Roumaïssa*

Et surtout mon amour assia maram

Lafouka Hanane



Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à celle qui passe au comble de la joie quand je suis
heureuse et sombre dans la tristesse quand je suis triste.*

*A celle qui ne dit pas tout pour dire le tout : à Toi Ma Mère Zohra et à toi mon
Père Rabeh*

*A tout ma famille sans exception du plus grande au plus petit
A mon chère frères : Akram*

A mes chères sœurs : Iman et Yasmina et Amel

A mes chères neveux et nièces : Louai, Rafik, Lilia, Alaa, Maram

A tout mes amis : Hanane, Assia maram

Kerkache weil



Résumé

L'étude et l'optimisation du processus de séparation cryogénique de l'azote vise à séparer l'azote de l'air par distillation à basse température, en exploitant la différence de points d'ébullition entre les gaz. L'objectif est d'améliorer l'efficacité énergétique, réduire les coûts et minimiser l'impact environnemental, tout en assurant une pureté élevée de l'azote.

L'objectif de ce travail est d'étudier et de simuler, à l'aide du logiciel Hysys, le cycle thermique d'une installation énergétique de production d'azote liquide. Il présente les principes de la cryogénie, les techniques de production à basses températures et les cycles de liquéfaction. Le logiciel Hysys, utilisé pour la simulation, sera détaillé, et les résultats des simulations des cycles de liquéfaction seront présentés à la fin du travail.

ملخص

تهدف دراسة وتحسين عملية فصل النيتروجين المبرد إلى فصل النيتروجين عن الهواء عن طريق التقطير عند درجة حرارة منخفضة واستغلال اختلاف درجات الغليان بين الغازات. والهدف هو تحسين كفاءة استخدام الطاقة، وخفض التكاليف وتقليل التأثير البيئي، مع ضمان درجة نقاء عالية للنيتروجين.

الهدف من هذا العمل هو دراسة ومحاكاة الدورة الحرارية لمنشأة طاقة لإنتاج النيتروجين السائل باستخدام برنامج Hysys. ويعرض مبادئ علم التبريد الشديد وتقنيات الإنتاج ذات درجات الحرارة المنخفضة ودورات التسييل. سيتم تفصيل برنامج Hysys المستخدم للمحاكاة، وسيتم عرض نتائج محاكاة دورة التميع في نهاية العمل.

ABSTRACT

The study and optimization of the cryogenic separation process of nitrogen aims to separate nitrogen from air by distillation at low temperature, exploiting the difference in boiling points between the gases. The objective is to improve energy efficiency, reduce costs and minimize environmental impact, while ensuring high purity of nitrogen.

The objective of this work is to study and simulate, using Hysys software, the thermal cycle of an energy plant for the production of liquid nitrogen. It presents the principles of cryogenics, low temperature production techniques and liquefaction cycles. The Hysys software, used for the simulation, will be detailed, and the results of the simulations of the liquefaction cycles will be presented at the end of the work.

NOMENCLATURE

Symbole	Désignation	Unité
A	La surface de transfert de chaleur	m^2
A	Le paramètre d'interaction moléculaire	$m^3 \cdot Pa / (mol^2)$
A	Une autre constante ou une valeur fixe	-
A	Le facteur de pré-exponentielle, qui représente la fréquence des collisions moléculaires	-
B	Le paramètre de correction du volume	m^3/mol
Bp	Base de pression	[Kpa]
C	Concentration	(mol/m^3)
D	Coefficient de diffusion	(m^2/s)
E	Énergie	(mol/m^3)
Ea	L'énergie d'activation de la réaction, qui représente l'énergie minimale requise pour que la réaction se produise	(kJ/mol)
Hp	Haut pression	[Kpa]
h_f	Enthalpie de liquide	[KJ/kg]
h_g	Enthalpie massique de vapeur	[KJ/kg]
h_t	Enthalpie massique total	[KJ/kg]
Hi, Ho	l'enthalpie spécifique d'entrée et sortie	kJ/mol
K	La constante de vitesse de la réaction chimique	mol/L
Ln	Une constante ou une valeur fixe	-
\dot{m}	Débit massique	[Kg/h]
Σmi	Somme des débit d'entrée	(kg)

Σm_o	Somme des débit de sortie	(kg/s)
N	Quantité de matière	-
N	La valeur calculée ou inconnue	-
NTU	Le nombre de transfert de chaleur unitaire	-
P	Pression	[Kpa]
R	Constante des gaz parfaits	(J/(mol·K))
T	Température	°C ou K
U	Coefficient de transfert de chaleur	W/(m ² ·K))
W	Travail par unité de masse	[KJ/kg]
Xi,Xo	la fraction molaire d'entrée et sortie	Kg
dM /dt	Variation de masse par rapport au temps	[kg/s]
ϕ	Flux de chaleur	[W]
ΔU	Variation d'énergie interne	Joule (J)
ΔH	Variation d'enthalpie	Joule (J)
ΔT_{lm}	La différence logarithmique moyenne de température	K
$\Delta x, \Delta y$	La différence ou le changement de la variable x et y	-
Λ	Conductivité thermique	W/(m ² ·K))

SOMMAIRE

Introduction Général.....	1
CHAPITRE I : PRESENTATION ET GENERALITES DE L'ENTREPRISE MFG	
I-1 Présentation de l'entreprise : [1].....	3
I-2-Description d'une ligne de production du verre plat par flottage [2].....	4
Phase 1 : L'enfournement des matières premières :.....	5
Phase 2 : Fusion dans le four :.....	5
Phase 3 : Flottage du verre dans le bain d'étain :.....	6
Phase 4 : L'étenderie :.....	7
Phase 5 : Découpe du verre :.....	7
I-3Organigramme de l'entreprise : [2].....	8
I-4 Généralités sur l'azote :[3].....	8
I-4-1. L'utilisation d'azote (N2) :[2].....	9
I-4-2. L'Obtention d'Azote :[2].....	9
CHAPITRE II : NOTIONS SUR LA CRYOGENIE	
II-1. Définition de la cryogénie [3].....	12
II-2. Histoire de la technologie cryogénique [3].....	13
II-3. Les techniques cryogéniques dans divers secteurs.....	16
II-4. Applications cryogéniques [6].....	16
II-4-1. Cryogénie alimentaire :.....	16
II-4-1-a. Fonctionnement :.....	17
II-4-2. Cryoconservation :.....	17
II-4-2-a-Fonctionnement :.....	17
II-4-3. Supraconductivité :.....	18
II-4-3-a. Fonctionnement :.....	18
II-4-4. Superfluidité :.....	19
II-4-4-a. Fonctionnement :.....	20
II-4-5. Cryo-broyage :.....	20
II-4-5-a. Fonctionnement :.....	20
II-4-6. Givrage ou condensation cryogénique :.....	21
II-4-6-a. Fonctionnement.....	21
II-5. Gaz industriel : [5].....	22
II-5-1. Gaz de l'Aire :.....	22

II-5-2. Gaz nobles :	22
II-5-3. Hydrogène :	22
II-5-4. Autres gaz :	23
II-5-5. Azote :	23
II-5-5-a Utilisations :	23
II-5-5-b Propriétés :	24
II-6. Températures cryogéniques	24
II-6-1. Conductivité thermique	24
II-6-2. Refroidissement par évaporation	24
II-6-3. Refroidissement par expansion rapide	25
II-6-4. Démagnétisation adiabatique	25
II-7. Cycles cryogéniques : [4]	25
II-7-1. Cycle de Joule-Thomson (Cycle de LINDE) :	25
II-7-2-cycle de brayton :	26
II-7-3 Système de claudel:	27
CHAPITRE III : Principe Fondamental de Séparation Cryogénique d'Air	
III-1-Introduction :	30
III-2-Composition d'air et préparation de produits (oxygène et azote) :	30
III-3 Elimination des impuretés mécaniques dans l'air :	33
III-4-Compression de l'air :	34
III-4-1-Le compresseur :	34
III-5-1-pré refroidisseur :	37
III-5-2-Purificateur :	38
III-6Refroidissement et liquéfaction de l'air	38
III-6-1- COLD BOX « CAISSE FROIDE » :	39
III-6-1-a-les échangeurs :	40
III-6-1-b Colonne de rectification :	41
III-7-Rectification de l'air	43
III-8-Production de la puissance frigorifique	45
III-9-Caisse froide et isolation thermique :	46
III-10-Détection et contrôle :	48
Chapitre IV: Simulation et Analyse du Processus de Séparation de l'Air : Exploration des Effets des Paramètres Opérationnels	
IV-1. Introduction :	50

IV-2. Définition du logiciel Aspen HYSYS :	50
IV-3. Que peut faire HYSYS :	50
IV-4. Les étapes d'utilisation du logiciel HYSYS :	51
IV-4-1. Choix des composés :	51
IV-4-2. Sélection d'un modèle thermodynamique (Fluid packages) :	53
IV-4-3. Construction du PFD :	54
IV-5- Exemple de Simulation et Analyse du Processus de Séparation de l'Air :	55
IV-6- Le rôle de chaque composant :	55
IV-7. Simulation et Analyse du Processus de Séparation de l'Air :	57
IV-8. Analyse de l'effet de changement de quelques paramètres sur le système :	62
IV-8-1. L'effet de la pression sur le débit à la sortie de compresseur :	62
IV-8-2. L'effet de changement de de quelques paramètres sur le processus de liquéfaction dans la colonne de distillation :	63
IV-8-2-a. L'influence de la pression à l'Entrée de la colonne :	63
IV-8-2-b. L'influence de la pression dans les stages de la colonne :	65
IV-8-2-c. L'influence de la température à l'Entrée de la colonne :	68
IV9. Discussions Dun problème :	69
CONCLUSION GENERALE	71
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	72
ANNEXES	

Listes des figures

Figure I- 1 : Mediterranean Float Glass (MFG)	3
Figure I-2 : schéma global représentant une ligne de production de verre plat par le procédé Float.....	4
Figure I-3 : composition du verre.....	5
Figure I-4 : Four de fusion.	5
Figure I-5 : schéma représentant les différentes zones du bain d'étain.	6
Figure I-6 : Schéma générale de la production du verre.	7
Figure I-7 : organigramme de l'entreprise.	8
Figure II- 1 : Bonbonne de stockage.....	12
Figure II- 2 : échelle des températures.....	12
Figure II- 3 : Le développement de la cryogénie depuis 1850-2000.	155
Figure II- 4 : givrage ou condensation cryogénique	21
Figure II- 5 : schéma et diagramme de joule-Thomson.....	26
Figure II- 6 : Schéma et diagramme de Cycle de Brayton.....	27
Figure II-7 : schéma de cycle de claudé	27
Figure III- 1 : les particules en suspension dans l'air (les impuretés)	33
Figure III- 2 : compresseur ZR400 atlas Copco	35
Figure III- 3 : pré refroidisseur.	37
Figure III- 4 : Les tamis moléculaires	38
Figure III- 5 : Cold box.....	40
Figure III- 6 : Schéma D'échangeur thermique tubulaires.	40
Figure III- 7 : schéma d'un échangeur a plaques.....	41
Figure III- 8 : Colonne de distillation.....	42
Figure III- 9 : Turbine ou Expander	43
Figure III- 10 : réservoirs de stockages.	43
Figure III- 11 : Diagramme d'équilibre de mélange d'azote et d'oxygène.	45
Figure III- 12 : programme de la salle de contrôle.....	48
Figure IV- 1 : Fenêtre de sélectionner des composées	51
Figure IV- 2 : Fenêtre pour ajouter l'air.....	52
Figure IV- 3 : Fenêtre choisir Fluid Pkgs.....	54
Figure IV- 4 : Fenêtre de choisir le modèle thermodynamique	54
Figure IV- 5 : Construction de PFD	55

Figure IV- 6 : PFD (Process Flow Diagram) de Simulation et Analyse du Processus de Séparation de l'Air	58
Figure IV- 7 : diagramme de pression en fonction des plateaux de la colonne de Distillation	60
Figure IV- 8 : diagramme de températures en fonction des plateaux de la colonne de Distillation	60
Figure IV- 9 : diagramme de débit vapeur et liquide en fonction des plateaux de la Colonne de distillation	61
Figure IV- 10 : diagramme de pression en fonction des plateaux de la colonne de Distillation a 550kpa	64
Figure IV- 11 : diagramme de températures en fonction des plateaux de la colonne de Distillation a 550 kpa	64
Figure IV- 12 : diagramme de débit vapeur et liquide en fonction des plateaux de la Colonne distillation a 550 kpa	65
Figure IV- 13 : diagramme de pression en fonction des plateaux de la colonne de Distillation de 11 stages ($\Delta P = 200\text{kpa}$)	66
Figure IV- 14 : diagramme de températures en fonction des plateaux de la colonne de Distillation de 11 stages ($\Delta P = 200\text{kpa}$)	66
Figure IV- 15 : diagramme de pression en fonction des plateaux de la colonne de Distillation de 30 stages	67
Figure IV- 16 : diagramme de températures en fonction des plateaux de la colonne de Distillation de 30 stages	67

Liste des tableaux

Tableau III- 1: Composition de l'air sec et le point d'ébullition des composants.....	31
Tableau III- 2 : Teneur en eau saturée de l'air (en g/m ³ d'air).	35
Tableau III- 3 : Température de liquéfaction d'air à la pression différente Figure.	39
Tableau IV- 1 : Résultat de la simulation.....	58
Tableau IV- 2 : les compositions de N ₂ et O ₂ pendant la simulation.....	59
Tableau IV- 3 : le changement de débit massique en fonction de la pression (comp.355kw)	62
Tableau IV- 4 : le changement de débit massique en fonction de la pression (comp.700kw)	62
Tableau IV- 5 : résultats de simulation a 550 kpa	63
Tableau IV- 6 : les compositions de N ₂ et O ₂ pendant la simulation (550kpa)	63
Tableau IV- 7 : les compositions de N ₂ et O ₂ dans le produit a 11 stages colonne et ΔP de 200kpa	65
Tableau IV- 8 : les compositions de N ₂ et O ₂ dans le produit a 30 stages colonne	67
Tableau IV- 9 : les compositions de N ₂ et O ₂ dans le produit	68
Tableau IV- 10 : les compositions de N ₂ et O ₂ dans le produit (-173.1°C, P= 700 kpa).....	68

Introduction Général

La cryogénie et l'extraction de l'azote pur jouent un rôle essentiel dans de nombreux secteurs industriels, allant de la fabrication de glace à la conservation des aliments, en passant par la recherche scientifique et médicale. Ces domaines offrent des opportunités passionnantes pour explorer les températures extrêmement basses et les phénomènes physiques qui en découlent. Dans ce contexte, ce projet de fin d'études vise à étudier et à comprendre de manière approfondie les différentes facettes de la cryogénie et du processus d'extraction de l'azote pur à partir de l'air.

Le premier chapitre de ce mémoire se concentre sur la fabrication de glace et son rôle crucial dans diverses applications industrielles. Nous explorerons les processus de refroidissement à basse température utilisés dans la production de glace, ainsi que leur importance dans des secteurs tels que l'alimentation et la réfrigération industrielle.

Dans le deuxième chapitre, nous plongerons dans le monde fascinant de la cryogénie. Nous examinerons les températures extrêmement basses atteintes dans ce domaine et les phénomènes physiques uniques qui se produisent à de telles conditions. La cryogénie est une discipline scientifique qui trouve des applications dans divers domaines, notamment la physique des hautes énergies, la supraconductivité et la recherche en astrophysique.

Le troisième chapitre portera sur l'extraction de l'azote pur à partir de l'air. Nous étudierons les processus et les technologies utilisés pour séparer et purifier l'azote gazeux de l'air ambiant, en mettant l'accent sur la distillation comme méthode principale. Nous examinerons également le rôle essentiel de la colonne de distillation dans la production d'azote pur de haute qualité.

Enfin, le quatrième chapitre sera consacré à des simulations et des analyses visant à étudier les paramètres influençant les performances du système. Nous examinerons les effets de la variation de ces paramètres sur la production d'azote pur et chercherons des moyens d'optimiser le système.

Ce mémoire vise à fournir une vue d'ensemble complète de la cryogénie et de l'extraction de l'azote pur, en explorant à la fois les fondements théoriques et les applications pratiques. L'objectif ultime est d'acquérir une meilleure compréhension de ces domaines et de leur potentiel pour répondre aux besoins croissants de notre société en matière de réfrigération, de recherche scientifique et de développement industrie

CHAPITRE I

PRESENTATION ET GENERALITES DE L'ENTREPRISE MFG

CHAPITRE I : PRESENTATION ET GENERALITES DE L'ENTREPRISE MFG**I-1 Présentation de l'entreprise :[1]**

Mediterranean Float Glass (MFG) est l'une des filiales du groupe CEVITAL spécialisée dans la production de verre Float. Elle a été créée dans le but de faire de l'industrie du verre un acteur incontournable dans son domaine. Grâce à la ligne de verre Float de MFG, d'une capacité de 600 tonnes par jour, l'Algérie est passée d'un pays importateur exclusif à un pays exportateur de verre Float (75% de la production est destinée à l'exportation).

Implantée sur une superficie de 30 hectares dans la zone de Larbaa (à environ 30 km d'Alger), MFG dispose actuellement de trois lignes de production, dont la première a été lancée en septembre 2005. Ces lignes sont alimentées par plusieurs stations, notamment celles traitant les matériaux entrant dans la composition du verre (comme le sable) et celles produisant les gaz (H₂-N₂) nécessaires à l'adoption du procédé « Float » comme méthode de production.



Figure I- 1:Mediterranean Float Glass (MFG)

Ce chapitre comporte une description générale du fonctionnement d'une ligne de production de verre Float et de ses stations utilitaires. Celle de production d'AZOTE y fera objet d'une étude détaillée

I-2-Description d'une ligne de production du verre plat par flottage[2]

Le procédé "Float" représente une avancée technologique majeure dans la fabrication du verre plat. Inventé par Alastair Pilkington en 1952, ce procédé se distingue de manière significative de ses prédécesseurs. Il regroupe toutes les étapes de production en une seule et même ligne d'une longueur moyenne de 400 mètres. Depuis les années soixante, le procédé "Float" s'est généralisé et est devenu la méthode standard pour la production de verre plat de haute qualité.

Cette technique consiste à faire flotter une bande de verre en fusion sur un bain d'étain liquide. Grâce à ce procédé, le verre produit est parfaitement plat, éliminant ainsi la nécessité de polissage ou de doucissage. Il peut donc être directement découpé, ce qui représente une économie financière importante en termes de matériel, de matières premières et d'énergie. De plus, le processus de fabrication est accéléré, avec une vitesse de sortie entre 5 et 10 fois supérieure à celle de l'étirage. Il s'agit donc d'un procédé très efficace, expliquant pourquoi il est rapidement devenu la norme pour la fabrication de verre plat.

Voici un schéma global de la ligne de production de verre plat par flottage, illustré à la figure (1-2) :

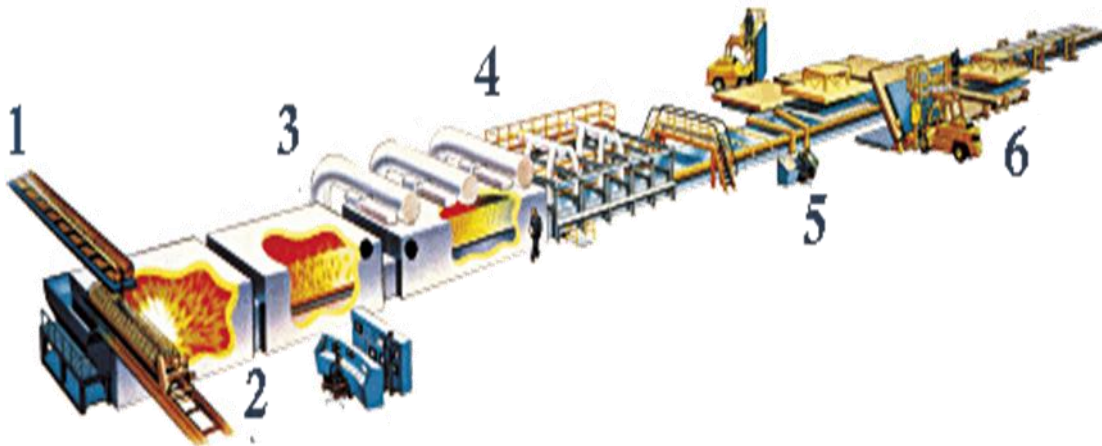


Figure I-2:schéma global représentant une ligne de production de verre plat par le procédé Float.

Chaque numéro fait référence à une étape de la fabrication. Nous allons donc les détailler dans cet ordre :

Phase 1 : L'enfournement des matières premières :

Les matières premières subissent une pesée électronique précise au 1/1000 près, puis elles sont mélangées et humidifiées pour former ce qu'on appelle la charge vitrifiable. Du calcin est ensuite ajouté, qui est obtenu en broyant des déchets de verre provenant de la production ou en recyclant des emballages en verre, permettant ainsi leur réutilisation en les réintégrant dans le processus de fabrication. L'ensemble est ensuite acheminé jusqu'au four.

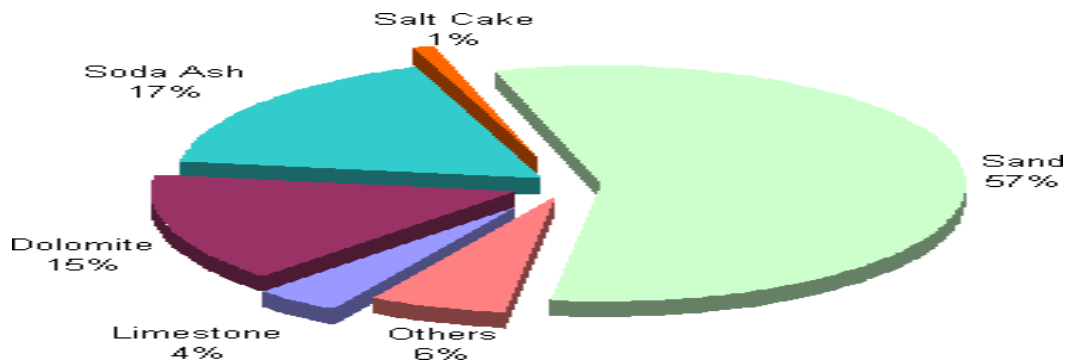
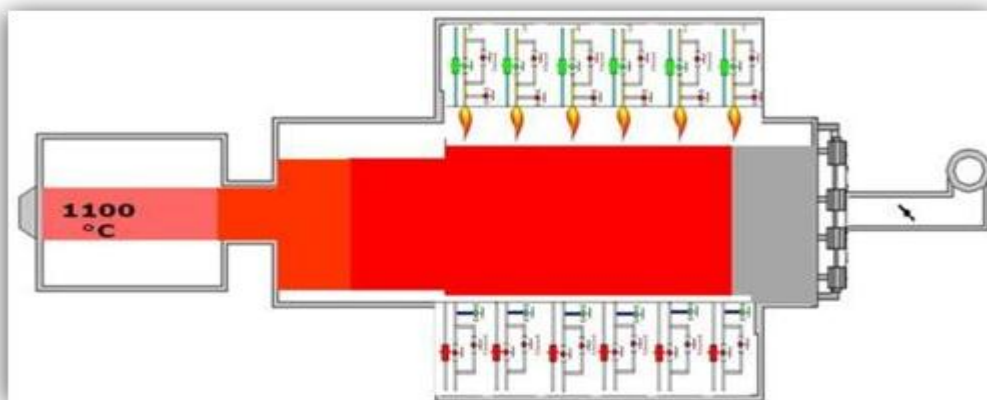


Figure I-3:composition du verre.

Phase 2 : Fusion dans le four :

La conversion des matières premières en verre s'effectue dans un four à cuve fabriqué avec des matériaux réfractaires, où elles sont chauffées à une température élevée de 1550°C, l'une des plus élevées de l'industrie. Dans le cadre du procédé "float", le four contient généralement environ 2000 tonnes de verre en fusion, ce qui représente



la production de 2 à 3 jours..

Figure I-4:Four de fusion.

Phase 3 : Flottage du verre dans le bain d'étain :

Après sa sortie du four, le verre fondu est dirigé vers un canal où il est versé sur un bain d'étain en fusion. Ce bain d'étain liquide, maintenu à une température d'environ 1050°C, offre une surface parfaitement plane. En raison de sa densité beaucoup plus faible que celle du métal, le verre "flotte" sur l'étain liquide, d'où le nom du procédé. Il s'étale alors en une longue bande continue. L'équilibre entre la force de gravité et la tension superficielle permet de produire une feuille de verre avec des faces bien parallèles et d'une épaisseur uniforme d'environ 6,5 mm, quelle que soit la largeur de la bande.

Pour faire varier l'épaisseur, des roues dentées (appelées toprolls) sont placées en aval sur les bords du ruban, à un endroit où il est suffisamment refroidi. Elles étirent ou repoussent le verre latéralement, pour obtenir l'épaisseur désirée. Les épaisseurs ainsi obtenues vont alors de 1,1 mm à 19 mm. Un bain d'étain standard possède trois zones distinctes, comme l'indique le schéma de la figure 1-5.

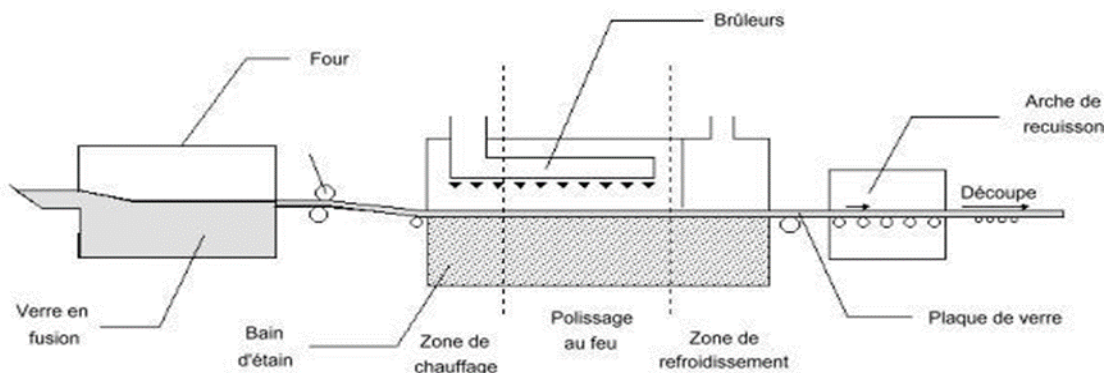


Figure I-5: schéma représentant les différentes zones du bain d'étain.

Chaque zone du processus de fabrication correspond à une température spécifique qui joue un rôle crucial dans la qualité du verre. La zone de refroidissement revêt une importance particulière. En effet, après avoir quitté le bain d'étain, le verre doit avoir atteint une certaine rigidité pour pouvoir être manipulé par les roulements sans laisser de marques sur la face inférieure. C'est pourquoi la longueur du bain d'étain doit être suffisante pour permettre au ruban de verre de refroidir progressivement de 1050 à environ 600°C, d'une extrémité à l'autre. Le contrôle précis de la température est essentiel tout au long du processus de fabrication du verre. Si la température est trop élevée, le verre risque d'être endommagé lors de son passage sur les rouleaux, tandis que s'il est trop bas, il risque de se briser nettement avant d'entrer dans l'étenderie.

Phase 4 : L'étenderie :

Une fois sorti du bain d'étain, la feuille de verre a une température d'environ 600°C, ce qui la rend encore relativement malléable, mais suffisamment solide pour être légèrement soulevée et placée sur un convoyeur à rouleaux. Ce convoyeur entraîne la plaque de verre, qui reste intacte, vers un tunnel de refroidissement appelé "étenderie". À l'intérieur de ce tunnel, qui s'étend sur 100 mètres, le ruban de verre se refroidit de manière régulière et constamment contrôlée. Aux alentours de 500°C, il acquiert les propriétés d'un solide parfaitement élastique. C'est à cette température que la recuisson est effectuée pour stabiliser ces propriétés.

Phase 5 : Découpe du verre :

La plaque de verre quitte l'étenderie à une température d'environ 200°C et continue de se refroidir à l'air libre. Cependant, elle est déjà suffisamment refroidie pour être manipulée, marquant ainsi la dernière phase de la production. Le verre est soumis à un contrôle de qualité, puis découpé en plateaux de dimensions 6 mètres sur 3 mètres. Les bords sont automatiquement enlevés pour obtenir des plateaux bien finis. Les plateaux ainsi obtenus sont ensuite positionnés verticalement sur des chevalets à l'aide de ventouses de levage (partie 6 sur la figure 2). À partir de là, ils sont retirés et stockés pour la suite du processus

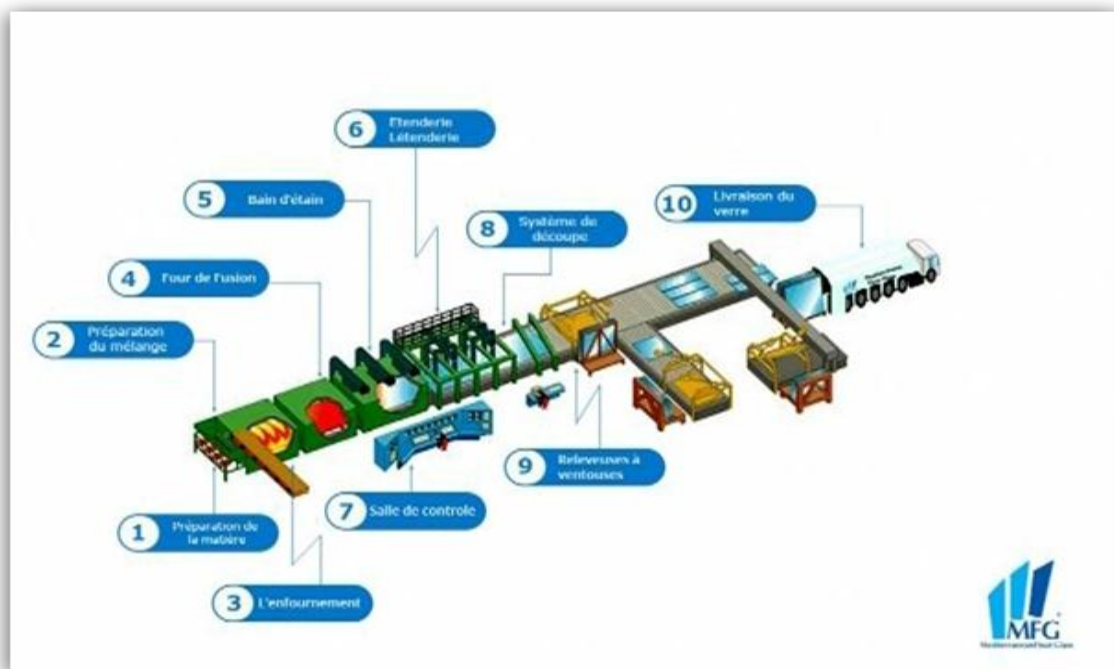


Figure I-6:Schéma générale de la production du verre.

I-3 Organigramme de l'entreprise : [2]

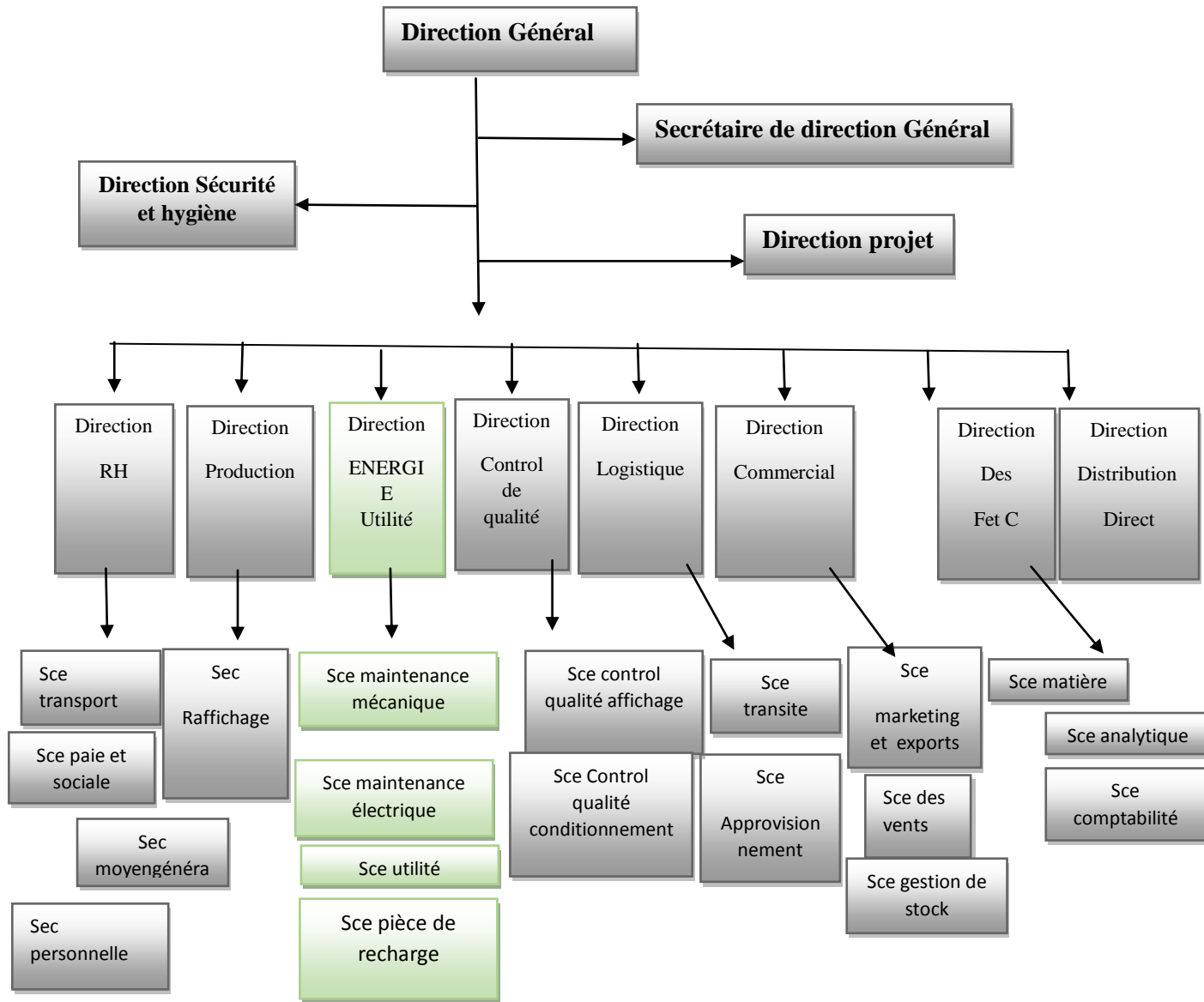


Figure I-7:organigramme de l'entreprise.

I-4 Généralités sur l'azote :[3]

L'azote (N₂) est un gaz incolore et inodore qui joue un rôle crucial dans de nombreux domaines de l'industrie mécanique. En tant que gaz inerte, il est utilisé dans de nombreuses applications pour créer un environnement non réactif, notamment lors de la purge, de l'inertage et de la protection contre l'oxydation. Son inertie chimique en fait un choix idéal pour prévenir les réactions indésirables et maintenir des conditions stables dans les systèmes mécaniques sensibles. De plus, l'azote est également utilisé comme gaz de refroidissement dans divers processus industriels, tels que la cryogénie, où des températures extrêmement basses sont requises. Sa capacité à refroidir rapidement et efficacement en fait un élément essentiel pour la manipulation et le traitement des matériaux à température contrôlée. En outre, l'azote est utilisé dans la fabrication d'air comprimé, où il est séparé de l'air ambiant pour fournir un gaz pur et sec utilisé dans de nombreux outils et équipements mécaniques. En résumé, l'azote est un gaz polyvalent largement utilisé dans le domaine de la mécanique en raison de son inertie chimique, de ses propriétés de refroidissement et de sa pureté, contribuant ainsi à la sécurité et à la performance des systèmes mécaniques.

I-4-1.L'utilisation d'azote (N₂) :[7]

L'utilisation de l'azote (N₂) joue un rôle essentiel à la fois dans le bain d'étain et dans le refroidissement des caméras de surveillance. Dans le procédé de fabrication du verre float, l'azote est employé dans le bain d'étain liquide afin de maintenir des conditions optimales. En raison de sa faible réactivité chimique et de sa capacité à réduire la formation d'oxydes indésirables, l'azote aide à garantir la pureté du bain d'étain, ce qui contribue à obtenir une surface parfaitement plane pour le verre en fusion. Parallèlement, l'azote est également utilisé pour refroidir les caméras de surveillance présentes dans l'environnement de production. En maintenant une température adéquate, l'azote assure un fonctionnement fiable et une surveillance efficace de tout le processus. Cette utilisation stratégique de l'azote démontre l'importance de ce gaz dans l'industrie du verre float, à la fois pour assurer la qualité de la production et pour soutenir les équipements de surveillance essentiels au contrôle et à la sécurité de l'ensemble du processus.

I-4-2. L'Obtention d'Azote :[8]

L'extraction du gaz azote (N₂) est principalement réalisée à travers des processus de séparation de l'air. L'air, composé de différents gaz tels que l'azote, l'oxygène, le dioxyde de carbone et de traces d'autres gaz, est soumis à un processus de séparation afin d'obtenir du gaz azote. La méthode la plus couramment utilisée à cet effet est la distillation cryogénique. Dans ce processus, l'air est d'abord comprimé puis refroidi à des températures très basses, généralement inférieures à -196°C (-321°F), à l'aide de techniques de réfrigération. Lorsque l'air est refroidi, ses composants se liquéfient à différentes températures en raison de leurs points d'ébullition variables. L'air liquide est ensuite introduit dans une colonne de distillation, où il est encore refroidi et séparé en ses composants principaux. L'azote, ayant un point d'ébullition plus bas que l'oxygène, s'évapore et monte jusqu'au sommet de la colonne, tandis que les autres gaz et impuretés sont éliminés. La vapeur d'azote est ensuite condensée et recueillie sous forme de gaz azote de haute pureté. Ce gaz azote extrait trouve de nombreuses applications dans diverses industries, notamment dans le domaine de l'ingénierie mécanique, en tant que gaz inerte pour des processus tels que la purge, l'inertage et la protection contre l'oxydation. L'extraction du gaz azote de l'air joue un rôle essentiel en fournissant une source fiable et facilement accessible de ce gaz polyvalent pour de nombreuses applications industrielle

CHAPITRE II

NOTIONS SUR LA CRYOGENIE

CHAPITRE II : NOTIONS SUR LA CRYOGENIE

II-1. Définition de la cryogénie[9]

La cryogénie est un domaine scientifique qui se concentre sur l'étude et la manipulation des températures extrêmement basses, souvent inférieures à -150°C ou (123 K). Elle englobe à la fois la production de ces basses températures et l'exploration des phénomènes physiques qui se produisent à de telles températures. La cryogénie est utilisée dans divers secteurs tels que la recherche scientifique, l'industrie, la médecine et l'alimentation. Elle permet des applications telles que la conservation des aliments, la cryopréservation de matériaux biologiques, l'étude des propriétés des matériaux à basse température, la recherche sur la supraconductivité et la superfluidité, ainsi que des avancées dans le domaine de la physique des particules. La cryogénie offre des perspectives fascinantes pour explorer les phénomènes physiques à des températures extrêmement froides et pour développer de nouvelles technologies et innovations dans de nombreux domaines.

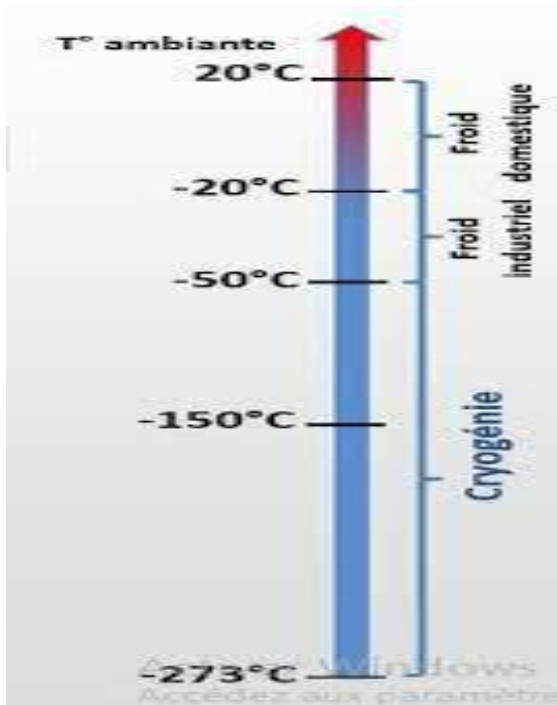


Figure II- 2:échelle des températures
Cryogéniques



Figure II- 1:Bonbonne de stockage
De l'azote

II-2. Histoire de la technologie cryogénique [3]

On croit que la première liquéfaction réussie d'un gaz cryogénique n'a pas été réalisée avant 1877, l'ingénieur des mines français Cailletet qui a produit un brouillard de gouttelettes d'oxygène liquide. Il a réussi un pré-refroidissement d'un récipient rempli d'oxygène à 300 atm par l'ouverture de la vanne du récipient par laquelle le gaz s'est étendu.

Vers la même époque, un physicien suisse Pictet a également été indépendamment réussi à liquéfier l'oxygène par le refroidissement en cascade.

En 1883, deux physiciens polonais Wroblewski et Olszewski réussissent à liquéfier l'oxygène et l'azote en quantité suffisante suite à des études expérimentales sur des mesures des propriétés cryogéniques. Un an plus tard ils ont essayé de liquéfier l'hydrogène par la technique d'expansion de Cailletet, par l'intermédiaire de pré-refroidissement de l'hydrogène à 100 atm à la température de l'oxygène liquide, puis tout à coup l'étendre à 1 atm par la suite Wroblewski à arriver à obtenir une brume contenant des gouttelettes d'hydrogène liquide mais il n'a pas réussi à obtenir de l'hydrogène complètement liquéfié.

Les chercheurs sont confrontés au problème de fuites de froid et "débouillissage" du liquide cryogénique, à la suite de laquelle l'hydrogène liquide pourrait être retenu que pour un temps très court. Ce problème de stockage d'un fluide cryogénique existe encore aujourd'hui. Ce dernier a été évité de façon à entourer le tube d'expérience contenant le fluide cryogénique par deux ou plusieurs tubes concentriques fermés à une extrémité, et en fournissant la vapeur à l'espace annulaire qui sépare les tubes. Ce concept prévaut dans les techniques modernes de conservation à froid ainsi le stockage de fluides cryogéniques à long terme et à grande échelle, avec une association supplémentaire d'une isolation très efficace des matériels.

Une découverte a été faite à Londres en 1892 lorsque James Dewar a développé le vide enveloppé entre deux parois argentées à l'intérieure. Cette invention a facilité le succès de liquéfaction de l'hydrogène et l'hélium en grandes quantités en 1898. James Dewar a aussi été le premier à utiliser une isolation sous vide. Parallèlement, Linde a obtenu un brevet sur la liquéfaction de l'air en Allemagne en 1885 il est devenu le pionnier dans la production des liquides cryogéniques à l'échelle industrielle. Dans la même année, Onnes Kammerling a établi un laboratoire de recherche en physique à basse température bien équipé, en Hollande, où il a réussi dans sa première tentative en 1908 à liquéfier 60 ml de l'hélium. Il a été rapporté qu'il produit jusqu'à 360 litres d'hélium gazeux en chauffant le sable de monazite de l'Inde, dont il se servait pour tous ses premières expériences sur l'hélium dans ce laboratoire. Onnes était le premier investigateur pour atteindre 1,04 K en 1910, tout en essayant de se solidifier

l'hélium, en abaissant la pression du récipient. Un an plus tard Onnes découvre la supraconductivité par l'observation du phénomène de la résistance électrique du mercure près de zéro à la température du l'hélium liquide.

En 1902, un ingénieur français Claude créé l'Air Liquide il a développé la produire de son système de liquéfaction de l'air dans lequel une fraction importante de refroidissement a été obtenue en utilisant un moteur d'expansion. Cinq ans plus tard, en 1907, Linde installée le premier usine de liquéfaction de l'air aux Etats-Unis, alors que dans la même année Claude produite le néon en quantité suffisante en tant que sous-produit d'une usine de séparation d'air en France. Ce n'est qu'en 1916 que la première production commerciale de l'argon a été introduite par la société Linde aux Etats-Unis et un an plus tard, la première usine de GNL a été commandée pour la production de l'hélium, qui a été nécessaire pour les dirigeables dans la Première Guerre mondiale. Toutefois, la production commerciale du néon a commencé aux États-Unis que dans l'année 1922.

Au cours de la période entre les deux guerres mondiales, un certain nombre de développements ont eu lieu dans le domaine de la cryogénie et le monde a pris conscience de l'importance de la cryogénie dans le domaine de l'armement et fusées. En outre, en 1933, le refroidissement magnétique a été utilisé avec succès pour atteindre des températures ultra basses ci-dessous 1K.

En 1934, Kapitsa a construit le premier moteur d'expansion à grande échelle de liquéfaction de l'hélium, qui a stimulé la recherche sur la supraconductivité. Après la seconde guerre mondiale, en 1947, Collins, un ingénieur en mécanique, mis au point un cryostat efficace pour la liquéfaction de l'hélium au MIT, Etats-Unis, qui a ensuite été commercialisé par A.D. Little Inc. Cela pourrait être utilisé pour la maintenance du température expérimentale des études entre la température ambiante et 2 K. L'impact de cette évolution a été si remarquable dans la dynamisation du niveau de confiance de chercheurs engagés dans des applications cryogéniques après cette époque tout a été plaisamment dénommée "BC" (Before Collins).

Un moteur à hydrogène liquide fusée a été développée en 1956 et cinq ans plus tard, en 1961, des teste de tir du premier véhicule spatial Saturn V a eu lieu, le propulseur a utilisé la combinaison de l'hydrogène liquide- oxygène liquide. Depuis ce temps, des nouvelles zones d'applications cryogéniques et les nouveaux dispositifs cryogéniques ont été développés.

Les développements les plus récents sont continuellement prenant lieu, même aujourd'hui.

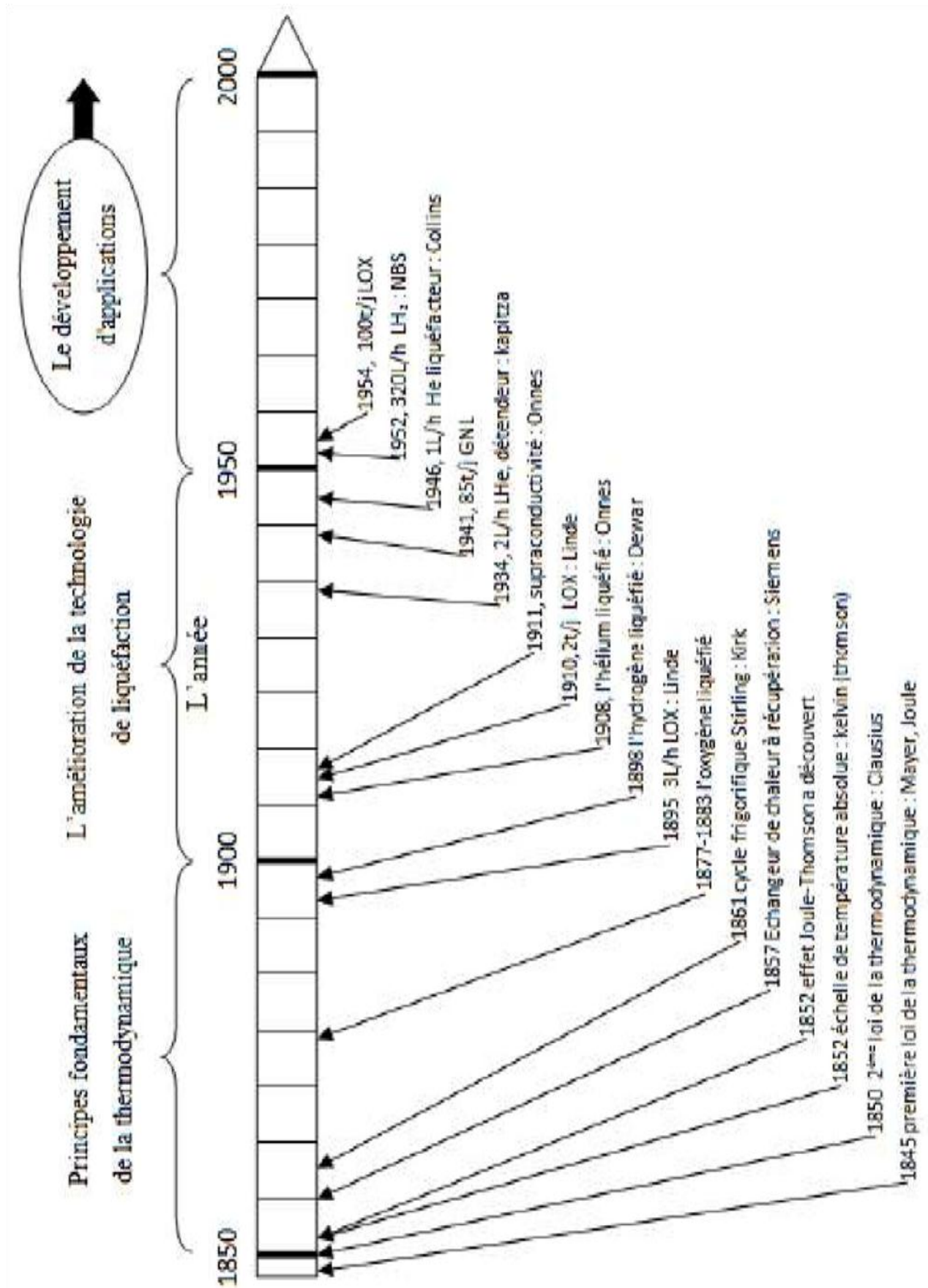


Figure II- 3:Le développement de la cryogénie depuis 1850-2000.

II-3. Les techniques cryogéniques dans divers secteurs

Entre-temps, de plus en plus les industries ont découvert l'utilité de la technologie cryogénique. En 1961, par exemple, la cryochirurgie a été pratiquée pour la première fois aux États-Unis. Les scientifiques ont découvert qu'un refroidissement lent pouvait détruire des tissus humains malsains. Aux États-Unis, l'azote liquide a été utilisé à cette fin et, quelques années plus tard, des médecins d'Afrique du Sud ont également utilisé cette méthode dans ce pays. En Afrique du Sud, cependant, le protoxyde d'azote a été utilisé à la place de l'azote liquide.

L'industrie des vols spatiaux a également introduit la technologie cryogénique au XXe siècle. En 1961, la fusée américaine Atlas-Centaur a utilisé pour la première fois dans le programme spatial de l'hydrogène et de l'azote liquides. Cet événement est considéré comme un jalon important dans le domaine de la cryogénie et a immédiatement conduit à la production d'hydrogène liquide à grande échelle pour des projets similaires.

Les industries médicale et aérospatiale ne sont que des exemples de secteurs où la technologie cryogénique est déjà utilisée depuis longtemps. La cryogénie joue également depuis longtemps un rôle de premier plan dans la recherche scientifique, l'industrie maritime, et la production de masse de gaz liquéfiés dans les unités de séparation d'air.

Pour en savoir plus sur les industries dans lesquelles les technologies cryogéniques sont Utilisées, lisez la suite.

II-4. Applications cryogéniques [6]

La cryogénie possède de très nombreuses applications, notamment dans le secteur alimentaire, médical, industriel, physique et de l'élevage. La cryogénie a ouvert beaucoup de possibilités.

II-4-1. Cryogénie alimentaire :

La cryogénie alimentaire est une technique de conservation des aliments qui implique une surgélation très rapide à des températures extrêmement basses, généralement en utilisant de l'azote liquide. L'aliment est plongé dans cet azote liquide, dont la température avoisine les -196 degrés Celsius (-321 degrés Fahrenheit), ce qui permet de figer rapidement l'aliment.

II-4-1-a. Fonctionnement :

La cryogénie est une technique qui consiste à utiliser des températures extrêmement basses pour congeler rapidement des produits alimentaires. Dans le secteur alimentaire, cette méthode est largement utilisée pour préserver la fraîcheur et la qualité des aliments.

Le processus de congélation cryogénique se déroule généralement dans des tunnels de congélation spécialement conçus. Ces tunnels sont équipés de systèmes de circulation d'azote liquide et d'air. L'azote liquide, qui est stocké à l'extérieur des bâtiments alimentaires dans des réservoirs appelés « super isolés sous vide », est acheminé vers les tunnels de congélation par le biais de tuyauteries également super isolées sous vide.

II-4-2. Cryoconservation :

La cryoconservation est une technique utilisée pour préserver des cellules, des tissus, voire des organes, en les exposant à des températures extrêmement basses. L'objectif est de suspendre l'activité cellulaire et de préserver leur viabilité pour une utilisation future.

La cryoconservation est appliquée dans divers domaines, tels que la médecine reproductive, la recherche scientifique et la transplantation d'organes. Elle permet de conserver le sperme, les ovules, les embryons, les tissus humains (tels que les cellules souches, les tissus musculaires, les tissus vasculaires, etc.) et même certains organes.

Le processus de cryoconservation implique plusieurs étapes délicates pour minimiser les dommages causés par les basses températures.

II-4-2-a-Fonctionnement :

- ✓ Préparation : Les échantillons biologiques à cryoconserver sont préparés en les traitants avec des cryoprotecteurs, des substances chimiques spéciales conçues pour protéger les cellules contre les dommages liés au froid. Ces cryoprotecteurs permettent de prévenir la formation de cristaux de glace à l'intérieur des cellules, ce qui pourrait endommager leur structure.

- ✓ Refroidissement progressif : Les échantillons préparés sont progressivement refroidis à des températures très basses, généralement en utilisant de l'azote liquide ou de l'azote

liquide vaporisé. Ils sont placés dans des récipients spéciaux, appelés cryoconteneurs, qui offrent une isolation thermique pour maintenir les températures stables.

- ✓ Stockage à très basse température : Une fois refroidis, les échantillons sont stockés à des températures extrêmement basses, généralement inférieures à -150 degrés Celsius (-238 degrés Fahrenheit). À ces températures, toutes les activités cellulaires sont essentiellement suspendues, ce qui permet une préservation à long terme.
- ✓ Surveillance et gestion du stockage : Les échantillons cryoconservés sont régulièrement surveillés pour s'assurer de maintenir les conditions de stockage appropriées. Des systèmes d'alarme et de contrôle de la température sont utilisés pour prévenir toute variation indésirable.
- ✓ Décongélation contrôlée : Lorsqu'il est nécessaire d'utiliser les échantillons cryoconservés, ils sont décongelés de manière contrôlée. Cela se fait généralement en inversant progressivement le processus de refroidissement, en éliminant les cryoprotecteurs et en rétablissant les conditions favorables à la survie cellulaire.

Il est important de noter que malgré les précautions prises, la cryoconservation peut entraîner des dommages cellulaires. Cependant, grâce aux avancées scientifiques et techniques, la cryoconservation reste une méthode précieuse pour préserver les échantillons biologiques dans des conditions permettant leur utilisation ultérieure.

II-4-3. Supraconductivité :

la supraconductivité est un phénomène physique qui se produit à des températures extrêmement basses, proches du zéro absolu (-273,15 degrés Celsius ou -459,67 degrés Fahrenheit). Elle est observée dans certains matériaux, appelés supraconducteurs, et se manifeste par deux caractéristiques principales : l'absence totale de résistance électrique (conductivité électrique infinie) et l'expulsion complète du champ magnétique de l'intérieur du matériau (effet Meissner).

II-4-3-a. Fonctionnement :

la supraconductivité offre de nombreuses utilisations et applications dans divers domaines scientifiques et technologiques. Voici quelques-unes des principales applications de la supraconductivité :

- ✓ Aimants puissants : Les matériaux supraconducteurs permettent la création d'électro-aimants extrêmement puissants et compacts. Ces aimants sont utilisés dans les dispositifs d'imagerie par résonance magnétique (IRM) en médecine, les accélérateurs de particules tels que les synchrotrons et les cyclotrons, ainsi que dans les expériences de recherche scientifique nécessitant des champs magnétiques intenses et homogènes.
- ✓ Trains à sustentation magnétique (Maglev) : La supraconductivité est utilisée dans les systèmes de lévitation magnétique des trains à grande vitesse, connus sous le nom de trains à sustentation magnétique. Ces trains flottent au-dessus des rails grâce à l'interaction entre les aimants supraconducteurs et les aimants situés dans les rails. Cette technologie permet des déplacements rapides, silencieux et économes en énergie.
- ✓ Stockage d'énergie : Les supraconducteurs sont utilisés pour stocker de l'énergie électrique. Lorsqu'un courant électrique est introduit dans une boucle supraconductrice, il peut circuler en boucle indéfiniment sans perte d'énergie, créant ainsi une réserve d'énergie. Cette propriété est utilisée dans les applications de stockage d'énergie à haute densité, telles que les batteries supraconductrices ou les dispositifs de stockage d'énergie par volant d'inertie.
- ✓ Fusion thermonucléaire contrôlée : La supraconductivité est essentielle pour la réalisation de la fusion thermonucléaire contrôlée, une source potentielle d'énergie propre et durable. Dans les tokamaks et autres réacteurs à fusion, les aimants supraconducteurs sont utilisés pour confiner le plasma à des températures et des pressions extrêmement élevées, permettant ainsi la fusion des noyaux atomiques et la libération d'énergie.

II-4-4. Superfluidité :

la superfluidité est un état de la matière qui se caractérise par l'absence totale de viscosité, ce qui signifie qu'un fluide superfluide peut s'écouler sans frottement ou résistance. Ce phénomène est observé à des températures extrêmement basses, proches du zéro absolu.

La science qui étudie la superfluidité est appelée l'hydrodynamique quantique ou la théorie des liquides de Bose. Cette branche de la physique explore les propriétés et les comportements des superfluides en utilisant des outils et des concepts de la mécanique quantique et de la mécanique des fluides.

II-4-4-a. Fonctionnement :

la superfluidité présente des utilisations pratiques dans divers domaines. Voici deux applications principales de la superfluidité :

- ✓ Réfrigération cryogénique : La superfluidité est utilisée dans les réfrigérateurs cryogéniques pour atteindre des températures extrêmement basses. Les fluides superfluides, tels que l'hélium liquide, sont utilisés comme agents de refroidissement pour atteindre des températures proches du zéro absolu (-273,15 degrés Celsius ou -459,67 degrés Fahrenheit). Les réfrigérateurs cryogéniques basés sur la superfluidité sont utilisés dans la recherche scientifique, les expériences de physique à très basses températures et d'autres applications nécessitant des températures extrêmement froides.
- ✓ Techniques spectroscopiques : La superfluidité est utilisée comme un "dissolvant de quanta" dans certaines techniques spectroscopiques, telles que la spectroscopie infrarouge et la spectroscopie de résonance magnétique nucléaire (RMN). Les fluides superfluides offrent un environnement de solvant idéal pour l'étude de molécules, car ils réduisent les interactions entre les molécules et minimisent les effets de l'environnement. Cela permet d'obtenir des spectres plus nets et plus précis, facilitant ainsi la caractérisation des composés chimiques et l'étude des propriétés moléculaires.

II-4-5. Cryo-broyage :

Le cryo-broyage utilise un liquide cryogénique (azote liquide) pour refroidir avec précision les matériaux jusqu'à leur point de fragilisation afin d'en faciliter la réduction mécanique.

II-4-5-a. Fonctionnement :

La cryogénie est utilisée dans le secteur alimentaire pour la congélation rapide de nombreux produits alimentaires. Cette opération est couramment réalisée au moyen de tunnels de congélation dans lesquels circule un fort flux d'azote liquide et d'air. L'azote liquide stocké à l'extérieur des bâtiments alimentaires dans des réservoirs dits « super isolés sous vide » est

acheminé vers ces tunnels de congélation par des tuyauteries également super isolées sous vide

II-4-6. Givrage ou condensation cryogénique :

Le procédé du givrage ou de la condensation cryogénique est un système cryogénique de récupération des composés organiques volatils (COV) dans les flux gazeux. Il est particulièrement efficace dans les situations à faible concentration de solvant.

II-4-6-a. Fonctionnement

La technologie fonctionne par contact direct avec l'azote liquide qui refroidit le flux de gaz chargé en solvants. Les COV se condensent et gèlent pour former une neige qui est alors éliminée grâce à des filtres en acier inoxydable. Ces filtres sont nettoyés à intervalles réguliers par des jets inversés de gaz comprimé qui font tomber la neige au fond du dispositif. Là, un chauffage électrique la fait fondre et les COV liquéfiés sont évacués. La technologie n'utilise qu'un seul condenseur et élimine avec efficacité les COV pour obtenir des concentrations très basses sans l'aide d'un dégivreur ou d'un lit de charbon actif.

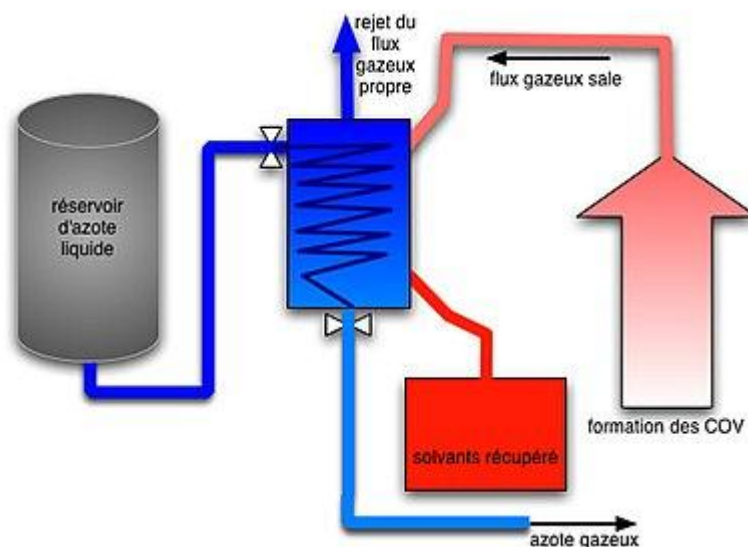


Figure II- 4:givrage ou condensation cryogénique

II-5. Gaz industriel : [5]

Pour l'application pratique de la technologie cryogénique, on utilise principalement des gaz industriels.

Les principaux gaz industriels sont l'azote, l'oxygène, le dioxyde de carbone (CO₂), l'argon, l'hydrogène, l'hélium et l'acétylène. Certains de ces gaz sont vendus dans les magasins et sont disponibles pour le grand public (pensez à l'hélium pour les ballons et à l'oxygène dans le domaine médical). Cependant, dans la plupart des cas, les gaz cryogéniques sont utilisés par les entreprises industrielles.

Le génie cryogénique reconnaît plusieurs types de gaz industriels (dont certains sont répertoriés dans plusieurs catégories) .

II-5-1. Gaz de l'Aire :

Les gaz de l'air sont extraits de l'air en séparant les différents composants. L'atmosphère se compose principalement d'azote, d'oxygène, d'argon et d'un petit nombre de gaz nobles. L'azote liquide est largement utilisé pour la réfrigération, par exemple dans l'industrie alimentaire et la profession médicale ; l'oxygène liquide est souvent utilisé dans l'industrie aérospatiale ; l'argon liquide est surtout connu pour son utilisation comme gaz de remplissage dans les ampoules électriques.

II-5-2. Gaz nobles :

Les gaz nobles (hélium, néon, argon, krypton, xénon et radon) sont également présents en quantités minimales dans l'atmosphère. Ces gaz ont une chose en commun : ils ne réagissent pratiquement pas avec d'autres matériaux. Ainsi, ils sont souvent utilisés pour des applications cryogéniques où une réaction (telle que la toxicité ou l'oxydation) n'est pas souhaitée. Par exemple, dans les ampoules et les lasers, mais aussi dans les ballons et les bouteilles d'air pour les plongeurs.

II-5-3. Hydrogène :

L'hydrogène est aussi régulièrement utilisé dans la technologie cryogénique. L'hydrogène est l'élément qui, lorsqu'il est fusionné avec l'oxygène, forme l'eau. Ce gaz n'existe pas sur terre sous sa forme pure, mais il est régulièrement produit pour la production d'énergie ou l'utilisation comme combustible.

II-5-4. Autres gaz :

Les catégories ci-dessus ne couvrent pas tous les gaz industriels. Par exemple, le dioxyde de carbone liquide (CO₂) est utilisé en cryogénie mais, à notre avis, il constitue une catégorie supplémentaire. Ce gaz est régulièrement utilisé principalement dans l'industrie alimentaire.

II-5-5. Azote :

Le gaz azote est le constituant majoritaire de l'air (78.09% en volume)

L'azote liquide est un des fluides cryogéniques le plus employé.

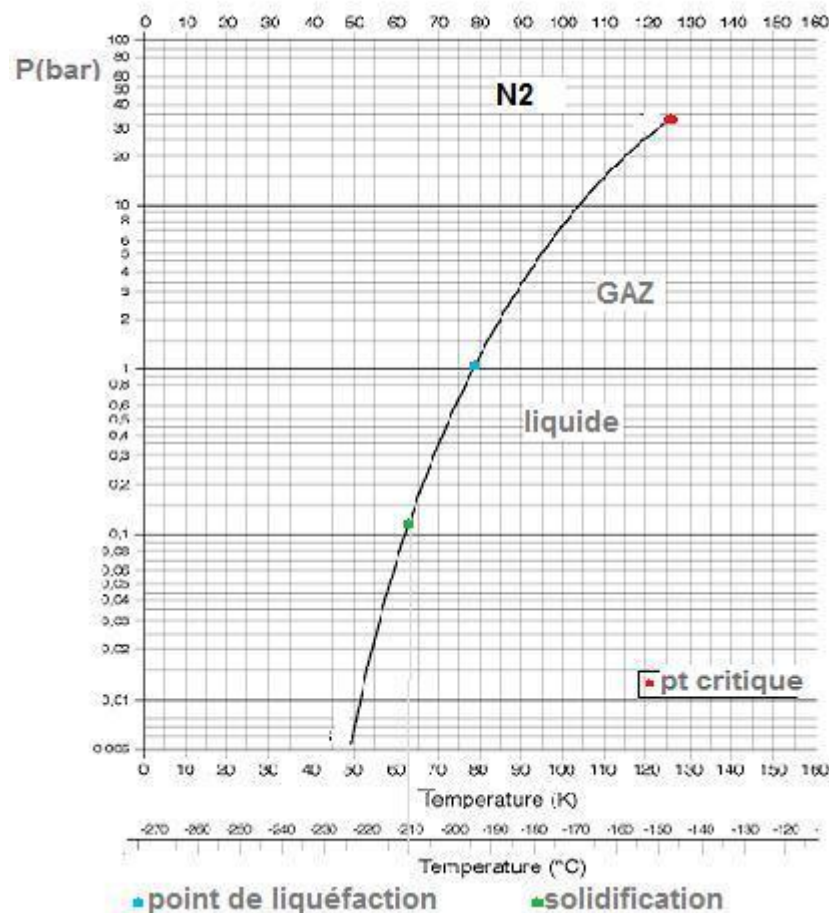


Figure II- 5 :diagramme de phases d'azote

II-5-5-a Utilisations :

L'azote est extrait de l'air par un processus cryogénique. Il est ensuite utilisé :

- soit sous forme gazeuse pour fournir une atmosphère inerte nécessaire aux procédés chimiques, métallurgiques, à l'élaboration de composants électroniques ou pour les

emballages en atmosphère neutre. Dans ce cas, il est très souvent stocké sous forme liquide (1 L liquide = ~ 650 L de gaz), avant d'être vaporisé ; – comme « réfrigérant », sous forme liquide, par exemple dans les équipements électroniques (refroidissement de détecteurs infrarouge, de laser), dans l'industrie alimentaire (refroidissement très rapide des aliments, surgélation, maintien de la température pendant leur transport), en génie civil (gel de sols meubles avant excavation).

II-5-5-b Propriétés :

La température d'ébullition de l'azote liquide saturée, à 1 bar, est de 77,3 K. Dans cet état, la densité du liquide est de 808,9 kg/m³ et l'enthalpie de vaporisation de 198,3 kJ/kg. L'azote liquide se solidifie à 63,2 K.

II-6. Températures cryogéniques

Pour atteindre des températures de congélation, des techniques sophistiquées sont nécessaires. Dans la plupart des cas, quatre méthodes différentes sont utilisées pour générer des températures cryogéniques

II-6-1. Conductivité thermique

La conduction thermique est peut-être la méthode la plus connue. En mettant en contact deux produits ou matériaux, la chaleur se transfère du produit le plus chaud au produit le plus froid. Le même principe s'applique pour les températures cryogéniques. Le froid extrême est transmis par la mise en contact d'un gaz, d'un liquide ou d'un solide avec un liquide cryogénique. Le gaz, liquide ou solide, atteint ainsi également la température cryogénique souhaitée.

II-6-2. Refroidissement par évaporation

Les atomes ou les molécules ont moins d'énergie sous forme liquide que sous forme gazeuse. Lors de l'évaporation d'un produit liquide, les atomes ou molécules à la surface reçoivent suffisamment d'énergie du liquide environnant pour se convertir à l'état gazeux. En revanche, le liquide restant conserve moins d'énergie, ce qui le rend plus froid. Ainsi, en induisant un processus d'évaporation, le refroidissement d'un liquide peut être réalisé.

II-6-3. Refroidissement par expansion rapide

Une troisième méthode est l'utilisation de l'effet Joule-Thomson. Il s'agit de refroidir les gaz par une brusque expansion de volume ou une chute de pression tout aussi rapide. Cette méthode est largement utilisée pour la liquéfaction de l'hydrogène et de l'hélium.

II-6-4. Démagnétisation adiabatique

La quatrième et dernière méthode est principalement utilisée pour le refroidissement de l'hélium liquide et fait appel à des sels paramagnétiques pour absorber la chaleur. Le sel paramagnétique peut être considéré comme un nombre massif de petits aimants qui, lorsqu'ils sont placés sur un champ magnétique puissant et traités avec un électro-aimant, génèrent ou utilisent de l'énergie. En absorbant l'énergie de ces matériaux à partir d'un gaz, celui-ci devient de plus en plus froid.

II-7. Cycles cryogéniques :[4]**II-7-1. Cycle de Joule-Thomson (Cycle de LINDE) :**

Le cycle de Linde est un processus de réfrigération basé sur la détente d'un gaz sous pression qui permet de produire du froid. Il est utilisé dans de nombreux domaines tels que l'industrie, la médecine et la recherche. Ce cycle implique la compression du gaz, suivie d'une détente adiabatique qui entraîne un refroidissement du gaz. Ensuite, le gaz est refoulé à travers un échangeur de chaleur pour se réchauffer, puis il est à nouveau comprimé pour entamer un nouveau cycle. Ce processus permet de produire un effet de refroidissement continu en utilisant le principe de l'expansion et de la compression du gaz. Le cycle de Linde est efficace et largement utilisé dans les systèmes de réfrigération et de congélation industriels

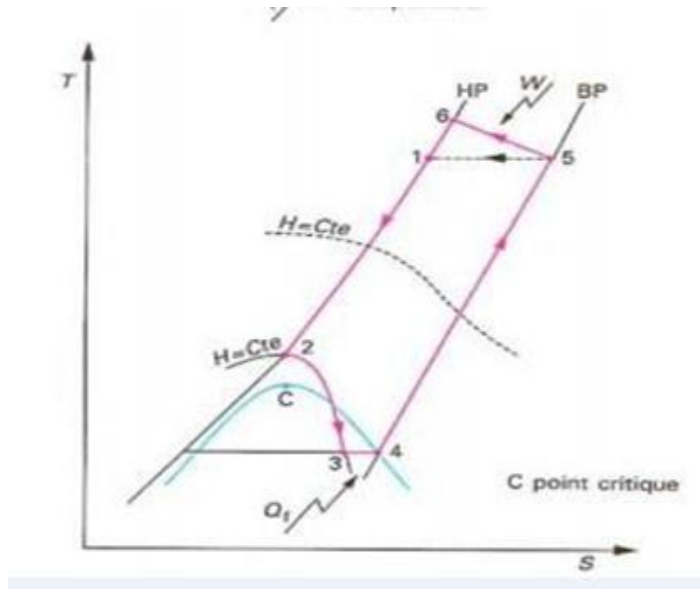


Figure II- 6:schéma et diagramme de joule-Thomson

II-7-2-cycle de brayton :

La détente isenthalpique du cycle de Joule-Thomson est remplacée par une détente avec extraction d'énergie. Parmi les cycles avec extraction d'énergie, le cycle de Brayton est le plus simple. La puissance utile peut être obtenue jusqu'à des températures de l'ordre de 10K.

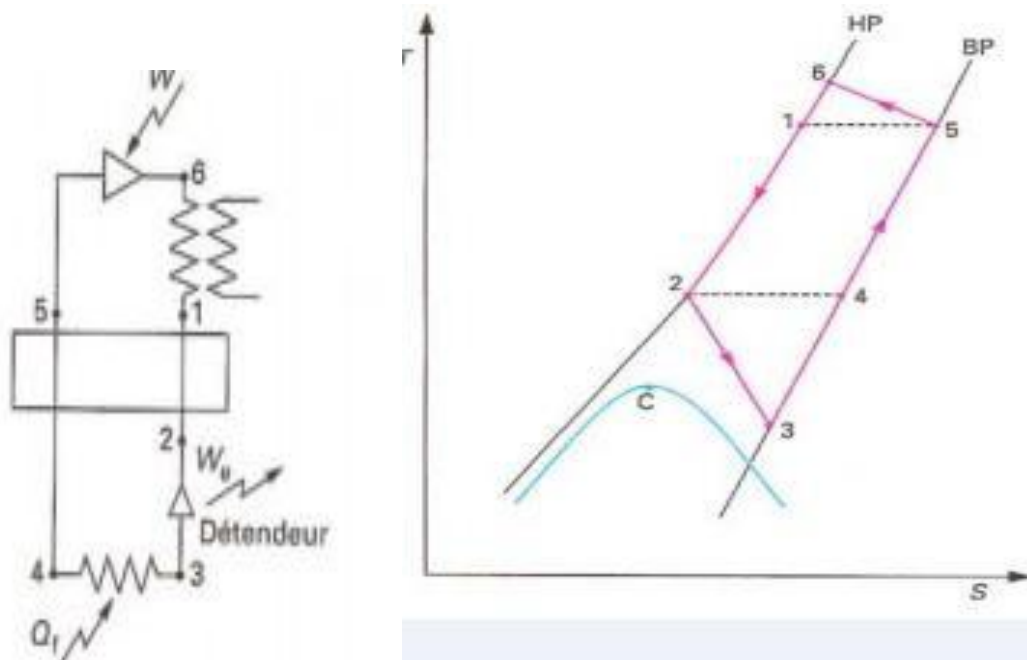
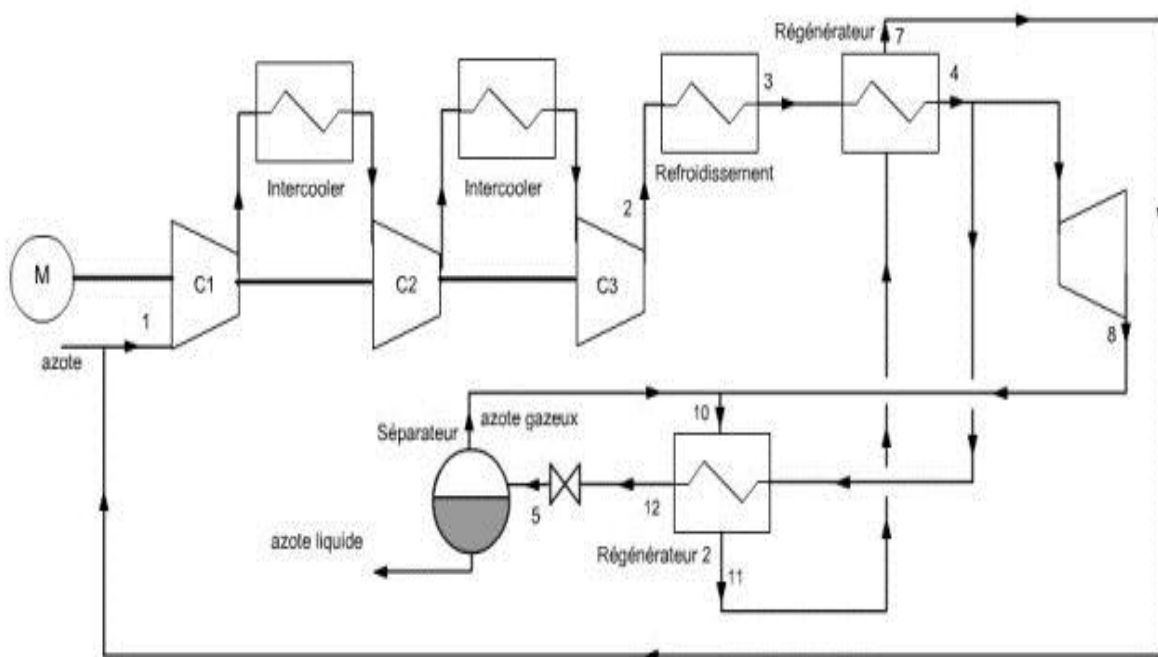


Figure II- 7:Schéma et diagramme de Cycle de Brayton.**II-7-3Système de claude :**

Le cycle de Linde est caractérisé par l'utilisation d'une détente isenthalpique qui présente deux inconvénients majeurs. Tout d'abord, le travail de détente est perdu, et ensuite, le refroidissement ne peut être obtenu que si l'état thermodynamique du fluide permet une détente de Joule-Thomson qui abaisse la température.

Pour remédier à ces inconvénients, Claude a proposé un cycle qui utilise une turbine et un détendeur avec un seul fluide comprimé à une seule pression, comme illustré dans la figure ci-dessous.

**Figure II-8:**schéma de cycle de claude

Le cycle de Claude a été largement utilisé dans les installations de liquéfaction de l'air en raison de son rapport de compression notablement plus faible que celui du cycle de Linde. Cependant, la machine de détente ne peut fonctionner avec un bon rendement que si le fluide reste dans la zone vapeur ou conserve un titre élevé.

Le cycle de Claude combine une détente isentropique dans la turbine avec une détente isenthalpique pour la liquéfaction du gaz.

Le début du cycle est similaire à celui du cycle de Linde, avec la compression du gaz à liquéfier, suivi du refroidissement à la température ambiante (1-3). Le gaz est ensuite envoyé dans un régénérateur pour le refroidir à environ -105 °C (3-4). Le flux est divisé, environ 15 % étant détendu dans une turbine (4-8).

Le flux principal passe ensuite dans un deuxième régénérateur, où il sort à très basse température (4-12).

Il subit alors une détente isenthalpique (12-5), et la phase liquide est extraite.

La phase vapeur est mélangée au flux sortant de la turbine pour servir de fluide de refroidissement au deuxième régénérateur (10-11), puis au premier (11-7), avant d'être recyclée par mélange avec le gaz entrant dans le cycle

CHAPITRE III

Principe Fondamental de Séparation Cryogénique d'Air

Chapitre III:Principe Fondamental de Séparation Cryogénique d'Air[2]

III-1-Introduction :

De nombreuses méthodes peuvent être utilisées pour la séparation des mélanges gazeux, certaines sans changement d'état, soit à l'ambiante, soit à plus basse température. Cependant, les plus employées dans l'industrie font appel à la liquéfaction, donc aux basses températures ; c'est le cas de la distillation et de la condensation fractionnée. Une partie des produits de la séparation peut être demandée à l'état liquide. On combine alors séparation et liquéfaction dans une même unité. Cette technique s'appuie sur certaines propriétés physiques ou physico-chimiques des constituants de mélanges gazeux peuvent être mises en œuvre pour les séparer. Parmi celles-ci, les plus utilisées industriellement : perméation, adsorption, absorption, distillation et condensation fractionnée.

III-2-Composition d'air et préparation de produits (oxygène et azote) :

L'air est un mélange complexe de gaz, composé par une variété de gaz. La composition de l'air sec et la nature des différents composants, comme indiqué dans le tableau 1, d'une façon générale, la composition de l'air dans les conditions normales peut être considérée comme constante, seule la teneur en dioxyde de carbone dans l'air varie avec les conditions différentes de la région, en plus des différents gaz dans le tableau 2-1, l'air contient en outre une petite quantité d'impuretés mécaniques, la vapeur d'eau, de l'acétylène, le méthane, le dioxyde d'azote, le monoxyde de carbone et d'autres substances nocives à la séparation de l'air.

Composants	Formule moléculaire	Masse moléculaire	Volume %	Point d'ébullition K
Nitrogène	N ₂	28.016	78.09	77.35
Oxygène	O ₂	32	20.95	90.17
Argon	Ar	39.944	0.93	87.29
Néon	Ne	20.183	1.8×10 ⁻³	27.09
Hélium	He ⁴	4.003	5.24×10 ⁻⁴	4.125
Krypton	Kr	83.80	1.0×10 ⁻⁴	119.79
Xénon	Xe	131.3	0.8×10 ⁻⁶	165.02
Hydrogène	H ₂	2.016	5.0×10 ⁻⁵	20.27
Ozone	O ₃	48	1.0×10 ⁻⁶	161.25
Dioxyde de carbone	CO ₂	44.01	0.03*	194.75(sublimé)

Tableau III- 1:Composition de l'air sec et le point d'ébullition des composants

Le processus de base de la séparation d'air au procédé cryogénique (à basse température) est de comprimer l'air à la pression désirée, enlever complètement la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone dans l'air d'abord, et ensuite introduire dans la colonne de fractionnement. Dans l'échangeur thermique principal au sein de la colonne de fractionnement, l'air échange la chaleur avec le produit gazeux et le gaz riche en oxygène refluant, est refroidi et partiellement liquéfié, introduit finalement dans la colonne de rectification. L'air devient le liquide et s'accumule au fond de la colonne de rectification, séparé en produit gazeux et l'air riche en oxygène à l'aide de la différence du point d'ébullition de l'azote et de l'oxygène. Les produits séparés sont réchauffés par l'échangeur thermique principal et sortent de la colonne de fractionnement, le produit gazeux est transporté au point de consommation, une partie de l'air riche en oxygène mène au purificateur pour la régénération et l'excès est évacué dans l'atmosphère.

L'eau gèle à 0 °C, le dioxyde de carbone devient la neige carbonique (solide) à ~79 °C. Ainsi, si l'humidité et le dioxyde de carbone ne sont pas d'abord enlevés de l'air, ils se transforment en glace et neige carbonique avec le refroidissement de l'air, ils s'écoulent avec l'air et se réunissent, enfin colmatent le passage d'air de l'échangeur thermique principal, les trous de plaque de la colonne de rectification et les obus de valves, affectant le

fonctionnement normal de l'installation. L'humidité, le dioxyde de carbone, comme lubrifiants, sont très nocifs à la partie de basse température de l'installation de séparation d'air.

Les hydrocarbures dans l'air, en particulier l'acétylène, ont la possibilité de l'explosion au processus de rectification si la concentration d'air liquide et d'acétylène atteignent un certain degré. Donc, il est très important que la teneur en acétylène dans l'oxygène liquide ne doit pas dépasser 0,1ppm. En raison de leur basse température de condensation, les gaz non condensables dans l'air comme le néon, l'hélium, se réunissent toujours en état gazeux dans le vaporisateur de condensation pendant le fonctionnement de l'installation de séparation d'air, ainsi, empiétant sur la surface de l'échange de chaleur du vaporisateur de condensation, augmentant la résistance thermique et influant sur l'effet de l'échange de la chaleur. C'est pourquoi, il faut les évacuer régulièrement.

Le processus de séparation cryogénique d'air est un processus physique, la 'puissance frigorifique' requise par le refroidissement et la liquéfaction de l'air, le refroidissement des composants dans la caisse froide et le maintien de leur température de fonctionnement est fournie principalement par turbodétendeur.

De la brève description ci-dessus on sait que la séparation cryogénique de l'air comprend généralement les processus suivantes:

- L'élimination des impuretés mécaniques dans l'air;
- La compression de l'air à la pression désirée;
 - L'élimination de L'humidité, du dioxyde de carbone et de l'acétylène, etc. dans l'air;
 - La production de la puissance frigorifique;
- Le refroidissement et la liquéfaction de l'air et le réchauffage des produits séparés;
- La rectification de l'air liquide, la séparation en produit gazeux et air riche en oxygène;
 - La compression de produits gazeux et le stockage, le transport et la gazéification des produits liquéfiés.

III-3 Elimination des impuretés mécaniques dans l'air :

Les poussières et d'autres particules solides en suspension dans l'air sont appelées impuretés mécaniques. Ces particules solides, si elles ne sont pas éliminées, provoquent l'usure rapide des roues à aubes et des diffuseurs du turbocompresseur d'air tournant à grande vitesse et du turbodétendeur, contaminent la surface de l'échangeur de chaleur si elles y sont introduites, ainsi, entraînant une diminution de coefficient de transfert de chaleur et une augmentation de la résistance. Ceux-ci peuvent affecter le fonctionnement normal de l'installation de séparation d'air.

La teneur en impuretés solides dans l'air est généralement de 0,005 à 0,01g/m³ d'air, mais jusqu'à 0,05g/ m³ d'air dans les environs des entreprises métallurgiques, la taille de particule de la poussière est de 0,15 mm ou moins, généralement, le filtre à air est installé à l'entrée d'aspiration d'air du compresseur pour éliminer les impuretés solides de l'air.

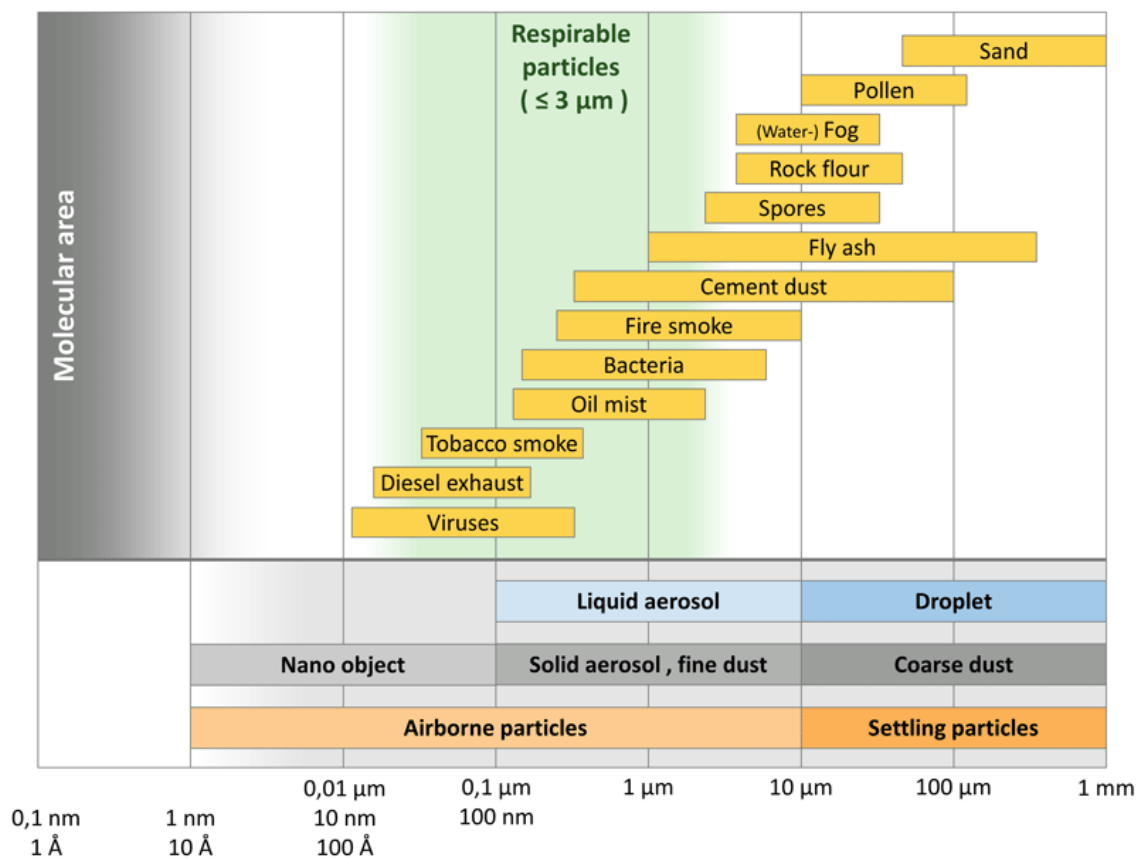


Figure III- 1 : les particules en suspension dans l'air (les impuretés)

III-4-Compression de l'air :

Comme mentionné précédemment, pour la séparation cryogénique de l'air, il faut d'abord refroidir et liquéfier l'air. Le processus de liquéfaction de l'air est un processus de conversion d'énergie. Seule avec la pression suffisante, l'air peut produire la puissance frigorifique suffisante au moyen de détenteur et l'effet d'étranglement pour qu'il tombe à la température désirée et se transforme de l'état gazeux en état liquide.

La pression d'air comprimé dépend de l'exigence de l'utilisateur à la pression du produit gazeux, de l'échelle de l'installation, du procédé de séparation d'air et du niveau du projet, de la fabrication, de l'exploitation et de la maintenance. Le compresseur d'air est le matériel le plus important et le consommateur d'énergie le plus grand d'une installation de séparation d'air.

Maximiser le taux d'extraction du produit d'azote et d'oxygène de l'air en réduisant la quantité de séparation d'air, réduire la perte du froid du matériel et la pression d'air, c'est un projet de recherche important à la fois pour le concepteur, mais aussi un problème très intéressant pour les exploitants.

III-4-1-Le compresseur :

L'air de l'atmosphère est aspiré dans un compresseur à vis à travers un filtre qui stoppe les principales poussières. Le compresseur augmente la pression de l'air entrant jusqu'à 7 bars pour quitter cette machine à une température de 40°C.



Figure III- 2 : compresseur ZR400 atlas Copco**III-5 Purification de l'air :**

La teneur en humidité par mètre cube d'air est d'environ 4 à 40g. A la pression atmosphérique, la teneur en eau saturée de l'air à différentes températures est comme indiquée dans le tableau 2-2.

Température °C	Teneur en vapeur d'eau %	Température °C	Teneur en vapeur d'eau %	Température °C	Teneur en vapeur d'eau %
50	83.2	10	9.4	-20	0.888
40	50.91	5	6.8	-25	0.55
30	30.3	0	4.85	-30	0.34
25	23	-5	3.24	-40	0.12
20	17.3	-10	2.14	-50	0.038
15	12.8	-15	1.38	-60	0.011

Tableau III- 2 : Teneur en eau saturée de l'air (en g/m³ d'air).

En raison du volume réduit de l'air après la compression, la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air par volume spécifique diminue également. Parce que quand l'air est comprimé, une partie de l'humidité contenue dans l'air se condense et s'extrait dans le réfrigérant du compresseur et est enlevée par séparateur d'eau.

La teneur en dioxyde de carbone dans l'atmosphère est de 300 ~ 400 ppm (0,03 ~ 0,04% du volume), à savoir un mètre cube d'air contient 460 à 600 mg de dioxyde de carbone.

Habituellement, le gaz a 3 états : Gaz, liquide et solide à la pression et à la température différentes, mais le dioxyde de carbone dans l'air seulement deux états: gazeux et solide.

Le dioxyde de carbone dans l'air à une certaine température a également une teneur maximale, appelée teneur à saturation. Il existe une pression partielle à saturation correspondante à la teneur à saturation. Si la pression partielle de dioxyde de carbone est supérieure à sa pression partielle à saturation, il y aura la séparation de dioxyde de carbone en flocon de neige.

L'humidité, l'acétylène et le dioxyde de carbone dans l'air sont éliminés dans le tube d'adsorption de purificateur. Le tube d'adsorption est rempli d'un genre de substances capables d'adsorber l'humidité, le dioxyde de carbone et l'acétylène, appelés l'adsorbant. La capacité absorbante de l'adsorbant pour l'humidité et le dioxyde de carbone dépend des facteurs suivants: la pression et la température (teneur en humidité) d'air, la vitesse du courant d'air dans le tube d'adsorption et la hauteur de couche d'adsorbant, La pression d'air est déterminée par le processus et ne peut pas être modifiée arbitrairement. La capacité d'adsorption du dioxyde de carbone augmente avec la chute de la température d'adsorption. Prenant en considération de la consommation d'énergie et l'investissement, la température d'adsorption est généralement déterminée à $\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, pour cet effet, une unité de préfroidissement est installé entre le réfrigérant final du compresseur (environ $40\text{ }^{\circ}\text{C}$) et le purificateur dans le but de réduire la température de l'air de 40°C à $\sim 10^{\circ}\text{C}$, d'éliminer une grande partie de l'humidité et d'améliorer la capacité d'adsorption de l'adsorbant.

L'adsorption de l'humidité et du dioxyde de carbone de l'adsorbant présente certaine limite, quand cette limite est atteinte, l'adsorbant est 'saturé', seul l'enlèvement de l'humidité et du dioxyde de carbone adsorbés sur l'adsorbant peut rétablir la capacité d'adsorption, on l'appelle "régénération" de l'adsorbant.

Selon cette caractéristique, deux tubes d'adsorption et un réchauffeur électrique de régénération sont mis en place, deux tubes d'adsorption fonctionnent à tour de rôle, l'un adsorbe l'humidité et du dioxyde de carbone dans l'air, l'autre enlève l'humidité et le dioxyde de carbone adsorbés sur les tamis moléculaires avec le gaz de régénération chauffé, et ensuite refroidit au soufflage les tamis moléculaires à la température de fonctionnement pour rétablir leur capacité à travailler. Deux tubes d'adsorption sont commutés périodiquement, et Le chauffage électrique est utilisé à chauffer le gaz de régénération au cours de la régénération de l'adsorbant. Le cycle de fonctionnement de l'installation de séparation d'air est étroitement lié aux conditions de fonctionnement de purificateur, en vue d'assurer le fonctionnement continu et à long terme de l'installation de séparation d'air, l'air qui sort du purificateur et entre dans la caisse froide doit atteindre une certaine température du point de rosée et une certaine teneur en dioxyde de carbone. Si le point de rosée de l'air qui entre dans la colonne monte et la teneur en dioxyde de carbone augmente, l'humidité et le dioxyde de carbone résiduels dans l'air entrant dans la colonne se congèlera encore dans l'échangeur de chaleur et la colonne de rectification, et avec le temps, les petits ruisseaux font grandes rivières, quand l'humidité et

le dioxyde de carbone s'accumulent à un certain degré, ils affecteront le bon fonctionnement de l'installation. Dans ce cas, il faut arrêter l'installation et la chauffer.

III-5-1-pré refroidisseur :

Il se résume en une machine frigorifique qui est pour but de refroidir l'air sortant du compresseur et condenser la vapeur d'eau existant dans l'air en premier temps, elle contient un fluide frigorigène Fréon fonctionnant en boucle fermée et qui subit des transformations dans ses quatre éléments :

- Un compresseur \Rightarrow compression adiabatique ou la température du Fréon augmente.
- Un condenseur \Rightarrow condensation isobare ou le fréon échange sa chaleur avec l'eau froide.
- Un détendeur \Rightarrow détente isenthalpique , cette détente permet de réduire la pression tout en obtenant le froid.
- Un évaporateur \Rightarrow évaporation isobare ou le fréon froid et l'air chaud échangent leur chaleur pour but de refroidir l'air à une température optimal de 5-8°C.



Figure III- 3 : pré refroidisseur.

III-5-2-Purificateur :

L'air comprimé est envoyé dans des bouteilles de purification contenant des matériaux : absorbants (Alumine activée), tamis moléculaires, qui filtrent une grande partie de la vapeur saturante de l'eau et du dioxyde de carbone contenus dans l'air par la différence de diamètres des pores. L'ensemble de ce système est composé de deux tamis en raison de saturation de l'adsorbent, l'échange de ces deux machines se fait par une régénération¹ ; l'air sec donc quitte ces tamis à une température de 10°C.



Figure III- 4 : Les tamis moléculaires

III-6 Refroidissement et liquéfaction de l'air

En plus de la colonne de rectification, dans la colonne de fractionnement de l'installation de séparation d'air il y a encore une variété d'échangeurs de chaleur, par exemple, l'échangeur de chaleur principal, le vaporisateur de condensation. Le rôle des divers échangeurs de chaleur est à réaliser un échange de chaleur entre les fluides chauds et froids, le rôle de l'échangeur de chaleur principal est de refroidir le fluide chaud (air) et le liquéfier partiellement, de chauffer le fluide froid (produits d'oxygène, d'azote et le gaz à rejeter) à peu près à la température ambiante, puis de le faire sortir de la caisse froide afin de maximiser la récupération du froid. Le vaporisateur de condensation assure le fonctionnement normal de la colonne de rectification.

Pression (absolue)	MPA	0.49	0.588	0.686	0.735	0.785
Température K		98.2	100.5	102.5	103.7	107.5

Tableau III- 3 : Température de liquéfaction d'air à la pression différente Figure.

III-6-1- COLD BOX « CAISSE FROIDE » :

Composée des échangeurs de chaleurs, colonne de rectification, les turbines ainsi que toute la tuyauterie et l'ensemble des vannes. Tous ces éléments sont isolés entre eux avec le calorifuge Perlite expansé



Figure III- 5 : Cold box.**III-6-1-a -les échangeurs :**

Échangeurs de chaleur : L'air doit être liquéfié, et donc pour cela porté à une température très basse pour ensuite être distillé (c'est-à-dire fractionné) en Oxygène et Azote. L'air qui entre dans la boîte froide échange sa chaleur avec l'air riche en oxygène froid quittant ainsi qu'une fraction passant par les turbines ($T = -172^{\circ}\text{C}$), aussi une petite partie d'azote gazeux obtenu en haut de la colonne a une température très basse. L'air donc quitte cet échangeur, de type échangeur à plaques, a une température de $-169,3^{\circ}\text{C}$.

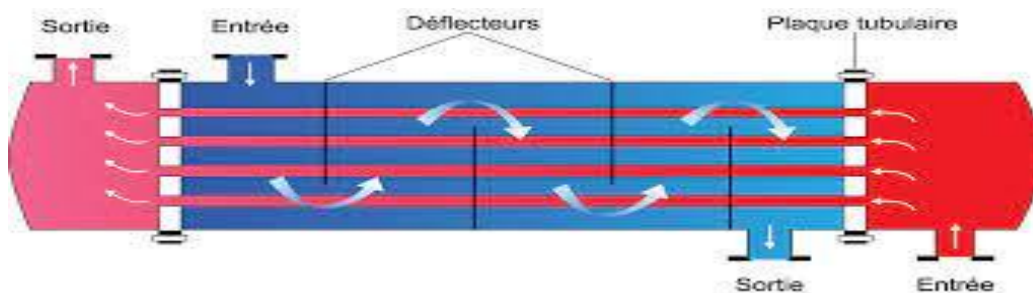
**Figure III- 6 :** Schéma D'échangeur thermique tubulaires.



Figure III- 7 : schéma d'un échangeur a plaques.

III-6-1-b Colonne de rectification :

Colonne de rectification ou distillation : la rectification est un processus de condenser et vaporiser partiellement l'air à maintes fois sur des plaques dans une colonne de rectification pour séparer l'air en oxygène et azote à l'aide de la différence du point d'ébullition entre eux. Chaque plaque de colonne possède les conditions de contact du liquide avec la vapeur. le gaz montant et le liquide descendant échangent la chaleur et la masse sur chaque plaque de colonne, enfin, l'azote pur est obtenu dans la partie haute de la colonne de rectification et l'air liquide riche en oxygène est obtenu dans la partie basse de la colonne; une partie de l'air liquide riche en oxygène est aspirée du fond de la colonne de rectification et envoyée dans le vaporisateur de condensation pour échanger la chaleur avec l'azote pur dans le passage d'azote du vaporisateur de condensation. En raison de la différence de la pression et de la température de saturation entre l'azote et l'air liquide riche en oxygène, ce dernier se gazéifie et l'azote pur se condense en azote liquide dont la plus grande partie continue à intervenir dans la rectification comme liquide de reflux de la colonne de rectification et la plus petite partie est pompée comme produit liquide dans les tanks.

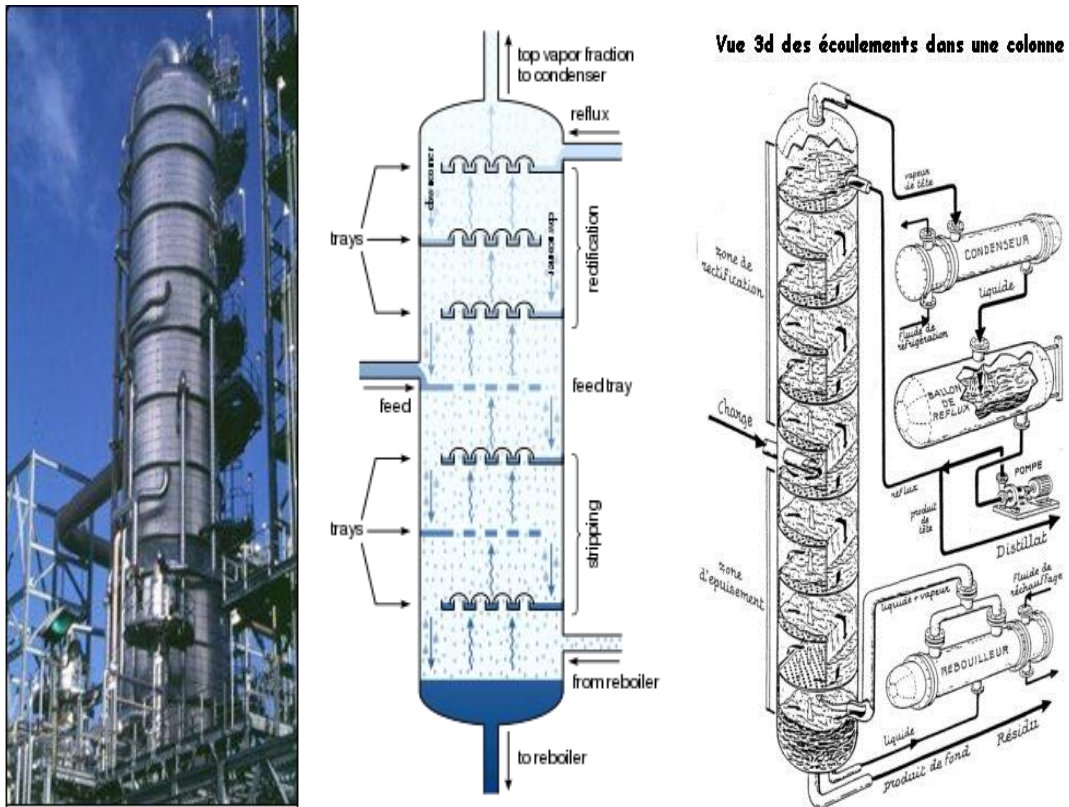


Figure III- 8 : Colonne de distillation.

III-6-1-c Turbine (Expander)

Turbine ou EXPANDER : il est appelé aussi dilatateur en raison de son but de fonctionnement qui est de dilater et détendre l'air oxygéné, aspire en bas de la colonne, par une baisse de pression de 2 bars à 0,3 bars (chute de pression) qui mène à refroidir et baisser la température de -149°C à $-173,4^{\circ}\text{C}$. La turbine est l'élément qui maintient le fonctionnement de tout le système de séparation des gaz de l'air car elle permet de fournir le froid nécessaire dans la caisse froide et de le maintenir tout au long du système.



Figure III- 9 : Turbine ou Expander

III-6-1-d-Stockage :

L'opération de stockage de l'azote liquide se déroule au fur et à mesure de sa liquéfaction à partir du vaporisateur de condensation, ce dernier est donc réservé dans des Tanks de capacité de 105,26m³.

Toutes les unités Cryo Tank et Cryocyl sont toujours fournies avec une protection complète contre les surpressions, une instrumentation, des vannes de contrôle et des tuyauteries. L'isolant entre la coque et le récipient intérieur est la perlite expansée.



Figure III- 10 : réservoirs de stockages.

III-7-Rectification de l'air :

Le processus de rectification est un processus de condenser et vaporiser partiellement l'air ou le liquide à maintes fois sur les plaques de colonne de rectification pour séparer l'air en oxygène et azote à l'aide de la différence du point d'ébullition entre eux. Chaque plaque de colonne possède les conditions de contact du liquide avec la vapeur. Et chaque contact est un processus de transfert de la chaleur, à la fois un processus de transfert de masse. C'est-à-dire,

la vapeur montante obtient le froid à partir du liquide descendant pour que l'oxygène, composant au point d'ébullition élevé dans la vapeur se condense et se transforme en liquide; et le liquide sera vaporisé et chauffé pour que l'azote, composant au point d'ébullition bas se vaporise et se transforme en vapeur. En passant une plaque de colonne, la teneur en azote dans la vapeur augmente et l'oxygène réduit, et au contraire, la teneur en oxygène dans le liquide augmente et la teneur en azote réduit. Autrement dit, la teneur en azote dans la vapeur qui monte devient de plus haute, et la teneur en oxygène dans le liquide qui descend, de plus en plus haute, après la rectification en passant un certain nombre de plaques, la partie supérieure de la colonne obtient l'azote pur, et la partie inférieure de la colonne, l'air liquide riche en oxygène. On peut comprendre de la figure 1 l'échange de chaleur et de masse entre le gaz montant et le liquide descendant sur la plaque de colonne: la température T_2 du gaz montant qui entre dans une certaine plaque au point A est supérieure à la température du liquide de la même composition au point B, l'équilibre subséquent se produira au point C (T_3) sur la ligne verticale entre T_1 et T_2 , mais à la température T_3 , l'équilibre ne peut se produire qu'entre le point E du liquide dont la concentration est encore plus élevée que le point B et le point D du gaz dont la concentration est encore moins élevée que le point A, ainsi, les composants d'oxygène s'accumulent dans le liquide descendant et les composants d'azote s'accumulent dans le gaz montant, à travers la séparation par les plaques suffisantes, on obtient finalement l'oxygène pur en liquide et l'azote pur en gaz.

Comme mentionné précédemment, en général, l'air entrant dans la colonne de rectification est la vapeur saturée ou partiellement liquéfiée. Alors, d'où vient le liquide qui descend des plaques de colonne? C'est l'effet de vaporisateur de condensation. Le vaporisateur de condensation a deux passages, l'un pour l'azote, l'autre pour l'air liquide riche en oxygène. La différence de la température entre l'azote et l'air liquide riche en oxygène est prise en considération par la conception, la température de condensation de l'azote est toujours supérieure à la température d'ébullition (température de vaporisation) de l'air liquide riche en oxygène, par conséquent, le gaz azoté se condense et devient l'azote liquide et l'air liquide riche en oxygène se vaporise et devient la vapeur saturée. Une partie d'azote liquide retourne sur le haut de colonne inférieure comme liquide de reflux, l'autre partie est transportée dans le réservoir d'azote liquide. La montée de la vapeur à partir du bas et la descente du liquide à partir du haut, c'est la condition impérative de la réalisation de la rectification par chaque plaque dans la colonne de rectification, le vaporisateur de condensation joue un rôle très important.

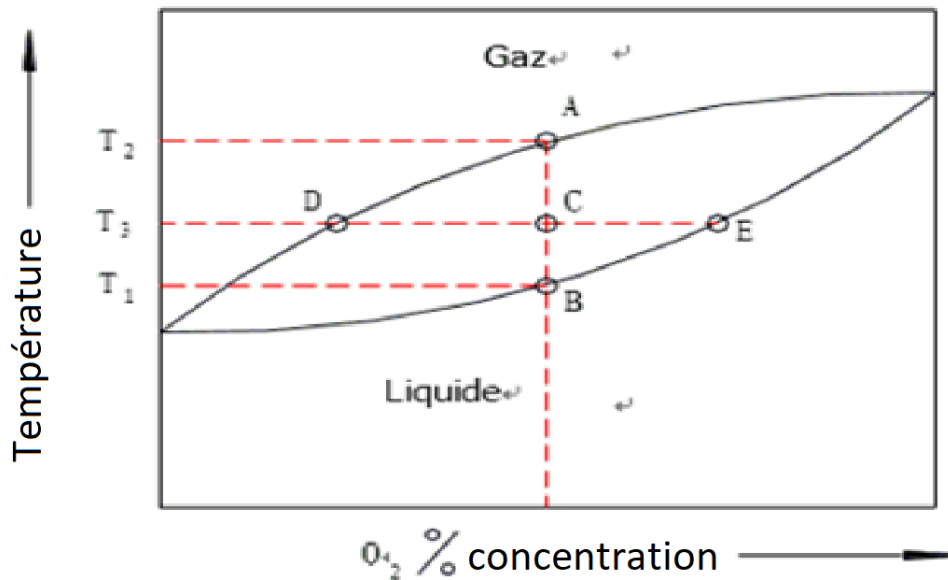


Figure III- 11 : Diagramme d'équilibre de mélange d'azote et d'oxygène.

III-8-Production de la puissance frigorifique

La caisse froide de l'installation de séparation d'air fonctionne à la basse température, il existe une grande différence de température avec l'extérieur, la chaleur y pénètre inévitablement, pour réaliser un échange de chaleur entre les fluides chaud et froid, la différence de température doit exister entre les deux fluides. Autrement dit, la température du produit gazeux et de l'air riche en oxygène sortis de la caisse froide est toujours inférieure à celle de l'air entrant dans la caisse froide. Dans la préparation des produits liquides, le fluide de basse température doit faire sortir plus de puissance froide. Lors de montage et après le chauffage de l'installation de séparation d'air, les pièces internes et externes sont à la même température ambiante, mais au cours de fonctionnement normal de l'installation, la colonne de rectification, les échangeurs de chaleur, la tuyauterie et les vannes au sein de la caisse froide doivent atteindre et maintenir leur propre température, donc, il doit l'énergie froide pour maintenir le fonctionnement normal de l'installation de séparation d'air. Pour l'énergie froide dans l'installation de séparation d'air, une petite partie est obtenue par l'effet d'étranglement isotherme de la haute pression de l'air comprimé à la basse pression, une grande partie est venue de la réfrigération de la détente adiabatique du détendeur.

Le détenteur tourne à grande vitesse à l'aide de la poussée de l'air comprimé à la roue à aubes; l'air comprimé consomme l'énergie et réduit la pression, à la fois, réduit la température de l'air à basse pression sorti du détenteur pour la rendre inférieure à celle de l'air à refroidir et à liquéfier, cela crée une différence de température de transfert de chaleur d'extraire l'énergie calorifique à partir de l'air à basse température, autrement dit, l'énergie froide est obtenue.

Il ressort de tout cela que soit la réfrigération de détenteur, soit la réfrigération de l'effet d'étranglement de gaz (liquide) à haute pression ont trait à la pression avant la détente et après l'étranglement. La détermination de la pression de refoulement du compresseur dans le processus technologique doit pouvoir compenser la perte de toutes sortes d'énergie froide susmentionnée par ces deux parties de l'énergie froide.

Le détenteur est une partie importante de l'installation de séparation d'air, bien le maintenir et l'exploiter correctement est une responsabilité importante de l'exploitant.

III-9-Caisse froide et isolation thermique :

Les échangeurs de chaleur, vaporisateur de condensation, colonne de rectification ainsi que les vannes et tuyauterie qui connecte ces parties et les divers fluides dans l'installation de séparation d'air sont à la température différente, l'endroit où la température la plus basse se trouve à $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$ environ. Par conséquent, l'isolation thermique (préservation du froid) de l'installation de séparation d'air est une question importante. L'isolation thermique parfaite et la moins perte de l'énergie froide peuvent rendre la pression de fonctionnement réduite ou les produits plus.

Tous les échangeurs de chaleur, colonne, vaporisateur, tuyaux, vannes sont installés dans la caisse froide, il existe un espace d'environ $300 \sim 500\text{mm}$ entre la paroi de la caisse froide et tous les appareils et tuyaux, destiné à remplir le calorifuge — perlite (également connue comme la perlite expansée). Au cours de remplir la perlite, il faut faire attention aux points suivants :

1. A préserver de l'humidité, la perlite humidifiée est difficile à traiter, sa performance d'isolation thermique se détériorera considérablement, faisant augmenter la perte du froid.
2. Prêter attention à la sécurité au cours de remplissage, afin de prévenir que le personnel tombe accidentellement dans la caisse froide.
3. Après la mise en service de l'installation de séparation d'air, la perlite s'affaisse et devient compacte à cause de la petite vibration de la tuyauterie, et parfois même le haut des équipements est exposé dans la caisse froide. Le haut de l'appareil est le plus froid, cela conduit à la perte de froid, donc, après une période de fonctionnement, observer le haut par l'endoscope, ouvrir le trou d'homme sur le haut le cas échéant, rajouter la perlite à plein.
4. Prévenir la pénétration de l'humidité dans la caisse froide. Comme nous le savons, il existe une relation correspondante entre la température et la pression, le volume de la casse froide est donné, quand la température dans la caisse baisse, la pression baisse également jusqu'à ce qu'elle soit inférieure à la pression atmosphérique ; l'air humide de l'extérieur pénétrera dans la caisse froide avec la différence de pression et humidifiera la perlite progressivement. Pour éviter ce problème, la caisse froide est conçue en structure étanche et remplie de l'air sec riche en oxygène, ce qui permet de toujours maintenir une pression positive dans la caisse et de mettre fin à la possibilité de la pénétration de l'humidité de l'extérieur. Faire attention à l'ouverture de la vanne de chargement d'air lors de manipulation. Si on enlève la perlite de la caisse à l'arrêt

de l'installation, il faut fermer d'abord la vanne de chargement d'air et ouvrir un peu le trou d'homme (attention à la sécurité) pour décharger la pression.

III-10-Détection et contrôle :

Le débit, la température, la pression, le niveau, la pureté et d'autres paramètres sont très exigés pour les diverses parties de l'installation de séparation d'air. L'exploitant règle et manipule l'installation suivant ces exigences du projet par rapport aux paramètres réels du fonctionnement.

Les paramètres de fonctionnement du compresseur d'air et de l'unité de pré refroidissement ainsi que leur réglage et contrôle sont intuitives, visibles et tangibles, mais la variation et le contrôle des paramètres à l'intérieur de la caisse froide ne peuvent s'appuyer sur que l'indication des instruments et le jugement de l'exploitant. Cela exige que ces instruments soient fiables, précis, bien entretenus et exploités correctement. Les exploitants doivent posséder des connaissances théoriques de base de façon à connaître l'effet de changement d'un paramètre sur les autres.

Pour l'exploitation et l'entretien des instruments, lire respectivement le manuel d'instruction correspondant

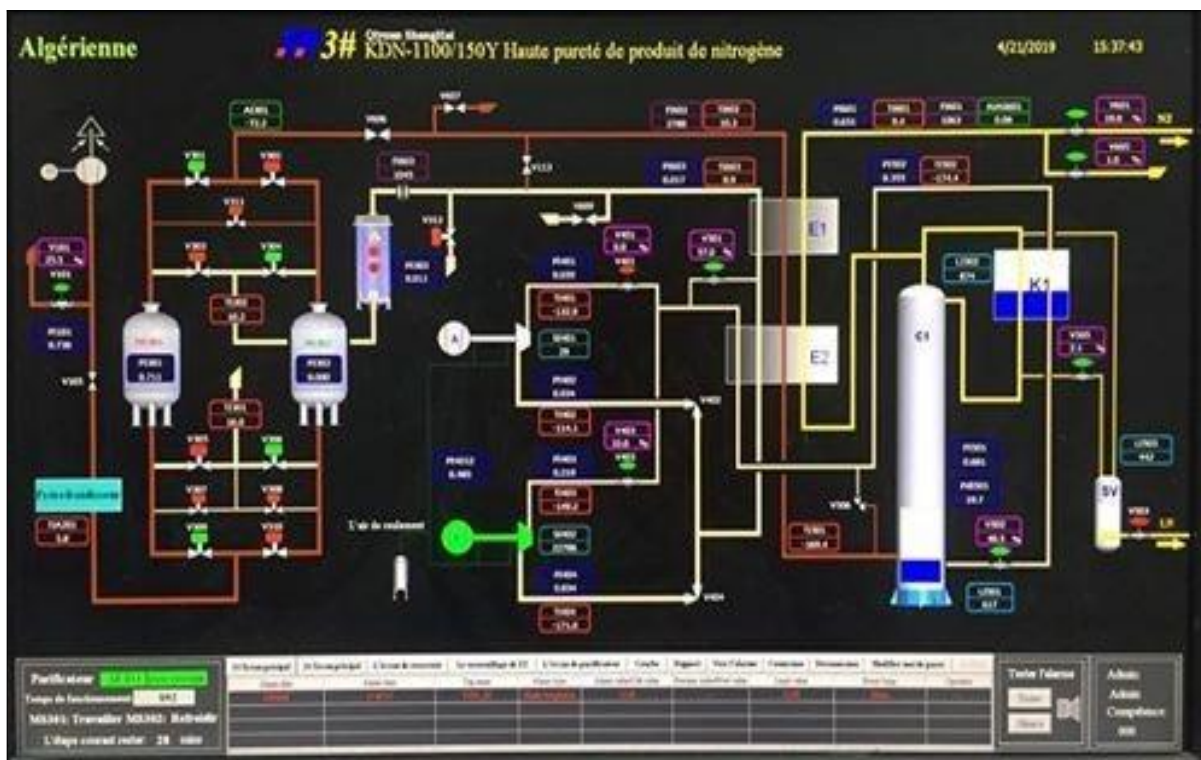


Figure III- 12 : programme de la salle de contrôle.

CHAPITRE IV

Simulation et Analyse du Processus de Séparation de l'Air : Exploration des Effets des Paramètres Opérationnels

Chapitre IV: Simulation et Analyse du Processus de Séparation de l'Air : Exploration des Effets des Paramètres Opérationnels

IV-1. Introduction :

Dans ce chapitre de simulation, notre objectif est de réaliser des simulations du processus de séparation de l'air afin d'analyser en détail son fonctionnement et d'étudier les effets des différents paramètres opérationnels. Les simulations jouent un rôle crucial dans notre mémoire, car elles nous permettent de mieux comprendre le système de séparation de l'air et d'évaluer l'impact des variables telles que les débits, les températures, les pressions et les rapports de reflux. En simulant le processus, nous pouvons observer et analyser les performances du système, optimiser les conditions de fonctionnement et identifier les possibilités d'amélioration. Les résultats de nos simulations fourniront des informations précieuses sur les interactions entre les paramètres et la performance globale du système, ce qui contribuera à une meilleure compréhension du processus de séparation de l'air et à des recommandations pour une optimisation efficace de celui-ci.

IV-2. Définition du logiciel Aspen HYSYS :

Aspen HYSYS est un logiciel de simulation de procédés utilisé dans l'industrie pour modéliser, simuler et optimiser les opérations de procédés chimiques et pétrochimiques. Il permet aux ingénieurs et aux chercheurs d'analyser le comportement des procédés, de prédire les performances, d'optimiser les conditions de fonctionnement et de prendre des décisions éclairées en matière de conception et d'exploitation des installations. Aspen HYSYS offre une interface conviviale et des fonctionnalités avancées pour la modélisation thermodynamique, la simulation dynamique, l'optimisation des procédés, et il est largement utilisé pour résoudre des problèmes complexes liés à la conception et à l'optimisation des systèmes de production industriels.

IV-3. Que peut faire HYSYS :

- ✓ Calculer les bilans thermiques et massiques,
- ✓ Calculer les données thermodynamiques et l'équilibre

- ✓ Dimensionnement et évaluation de la capacité de divers équipements (opérations unitaires)
- ✓ Optimisation économique des unités / usines
- ✓ Capacités de simulation dynamique.

IV-4. 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 (PDF – Process Flow Diagrams).
4. Spécification des courants et des unités
5. Exécution du programme de simulation
6. Interprétation des résultats.

IV-4-1. Choix des composés :

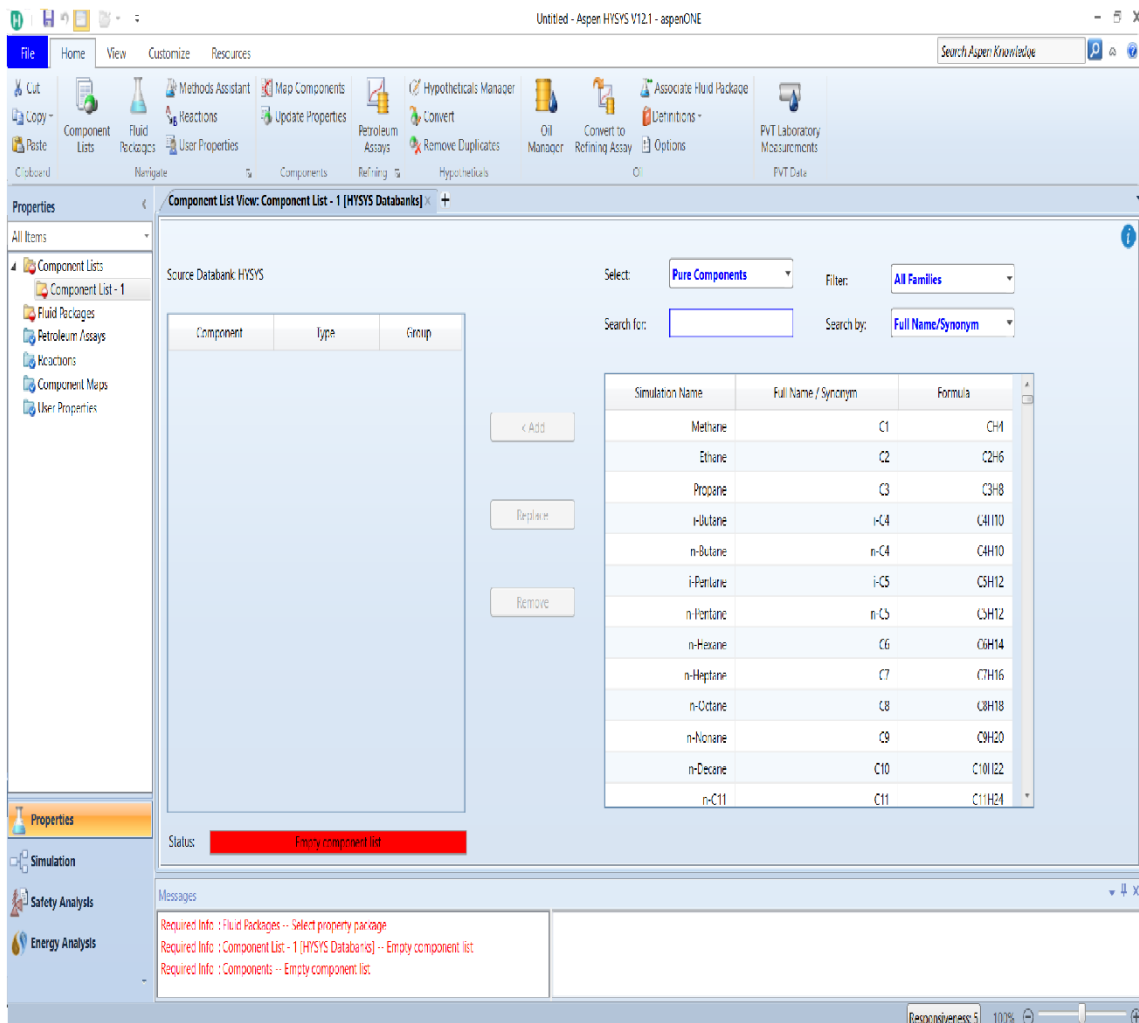


Figure IV- 1 : Fenêtre de sélectionner des composés

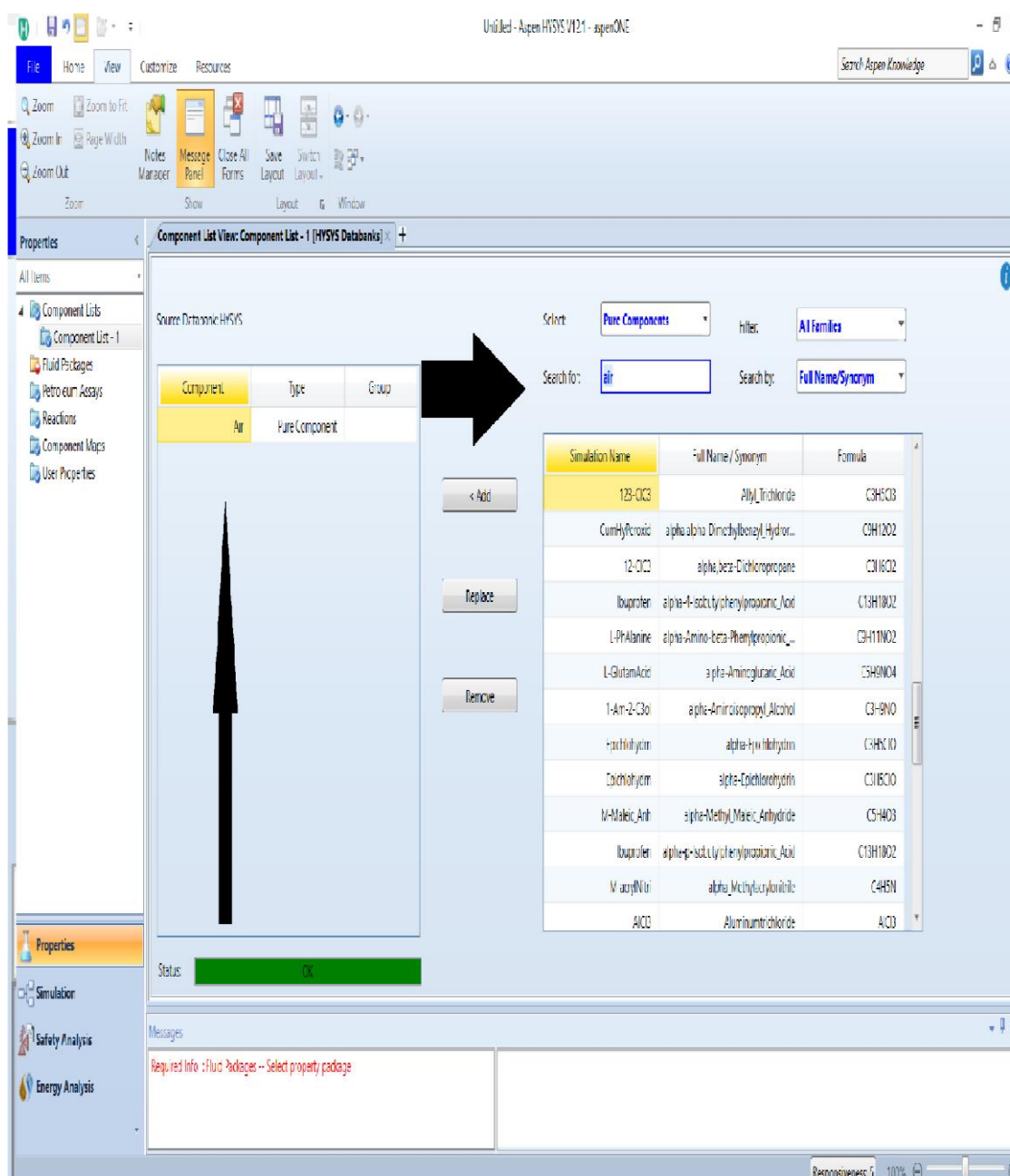


Figure IV- 2 : Fenêtre pour ajouter l'air

IV-4-2. Sélection d'un modèle thermodynamique (Fluid packages) :

Sur la fenêtre Prop Pkg, sélectionner le filtre EOSs (Equations of State). A l'aide de la souris choisir l'équation Peng-Robinson. Fermer cette fenêtre et observer que dans la fenêtre Simulation Basis Manager apparaît une ligne indiquant le nombre de composés sélectionnés (2) et le modèle thermodynamique choisi (Peng-Robinson).

Peng-Robinson : Le modèle le plus simple suppose un comportement de gaz idéal pour la phase gaz et un comportement de solution idéal pour la phase liquide. Donc, on utilise la loi de Raoult pour les calculs de l'équilibre de phases. Dans HYSYS, ce modèle est appelé « Peng-Robinson ».

❖ Voici quelques équations mathématiques couramment utilisées dans la simulation et la modélisation des processus à l'aide d'Aspen HYSYS : [10]

1. Équations thermodynamiques :

• Équation d'état de Peng-Robinson (PR) :

$$P = (RT / (V - b)) - (a / (V(V + b) + b(V - b)))$$

2. Équations de transfert de chaleur :

• Méthode de l'efficacité des échangeurs de chaleur (NTU) :

$$Q = U * A * NTU * \Delta T_{lm}$$

3. Bilans de masse et d'énergie :

❖ Équation de bilan de masse :

$$\Sigma (m_i * X_i) = \Sigma (m_o * X_o)$$

❖ Équation de bilan d'énergie :

$$\Sigma (m_i * H_i) = \Sigma (m_o * H_o) + Q$$

4. Équations de séparation :

❖ Équation de McCabe-Thiele :

$$N = (Ln / (\alpha - 1)) * (\Delta x / \Delta y)$$

❖ Équation de Fenske-Underwood-Gilliland (FUG) :

$$N = (Ln / \alpha) * (\Delta x / \Delta y)$$

5. Cinétique des réactions :

❖ Équation d'Arrhenius :

$$k = A * \exp(-E_a / (R * T))$$

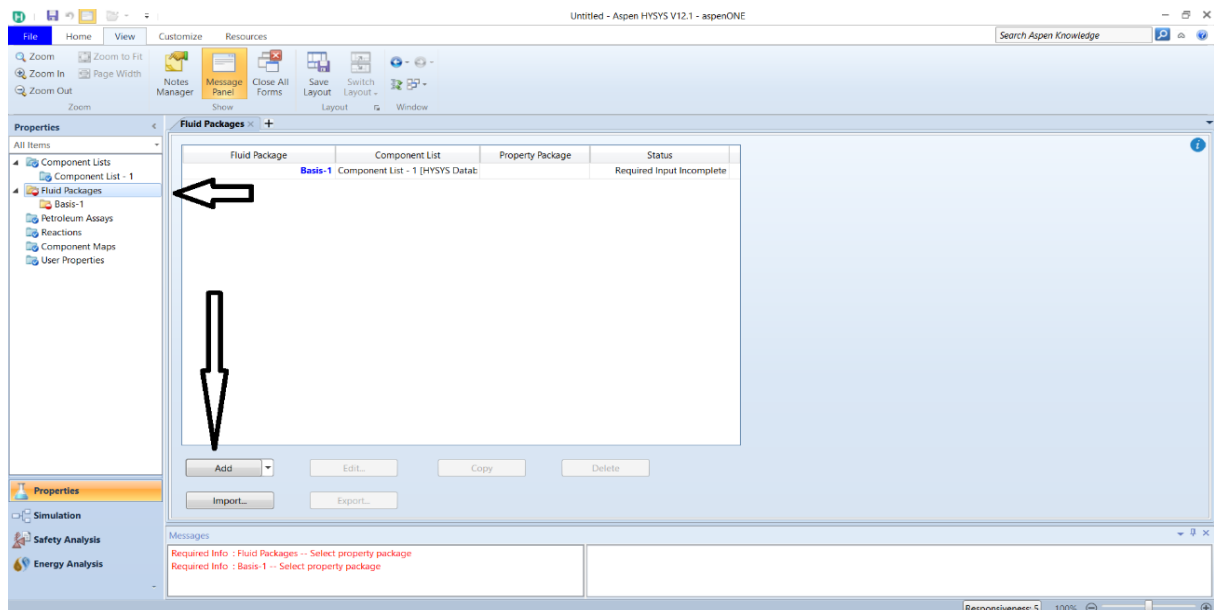


Figure IV- 3 : Fenêtre choisir Fluid packages

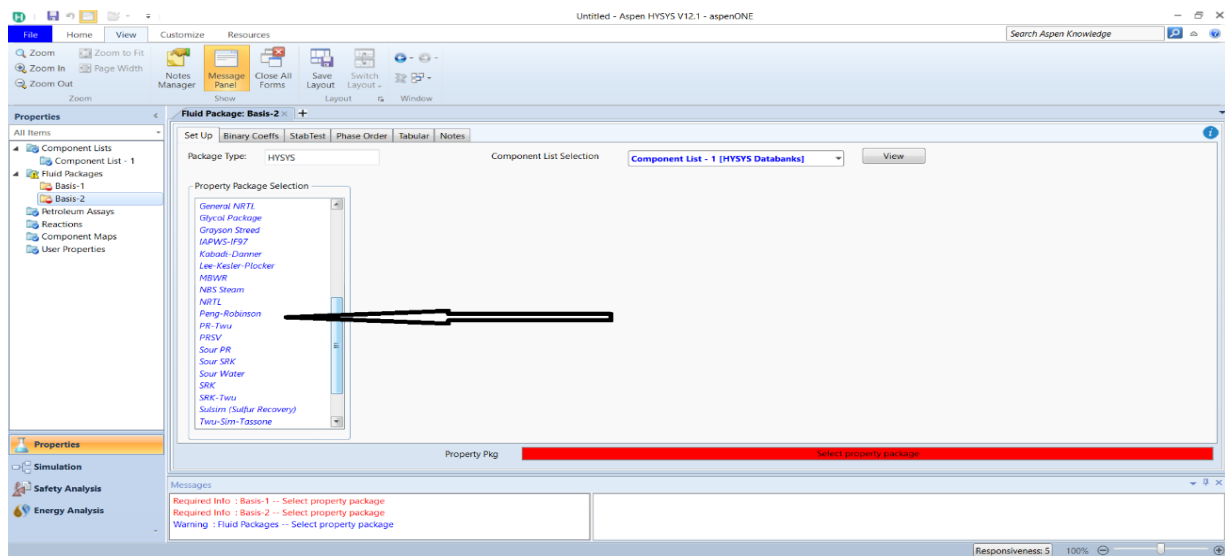


Figure IV- 4 : Fenêtre de choisir le modèle thermodynamique

IV-4.3. Construction du PFD :

Agrandir la fenêtre PFD-Case(Main). Maintenant, placer les unités sur l'espace de travail du PFD. Ceci est réalisé en sélectionnant les opérations sur la palette d'objets latérale, cliquer sur le bouton gauche pour choisir l'objet, re-cliquer sur le bouton gauche à l'emplacement désiré sur la feuille du procédé.

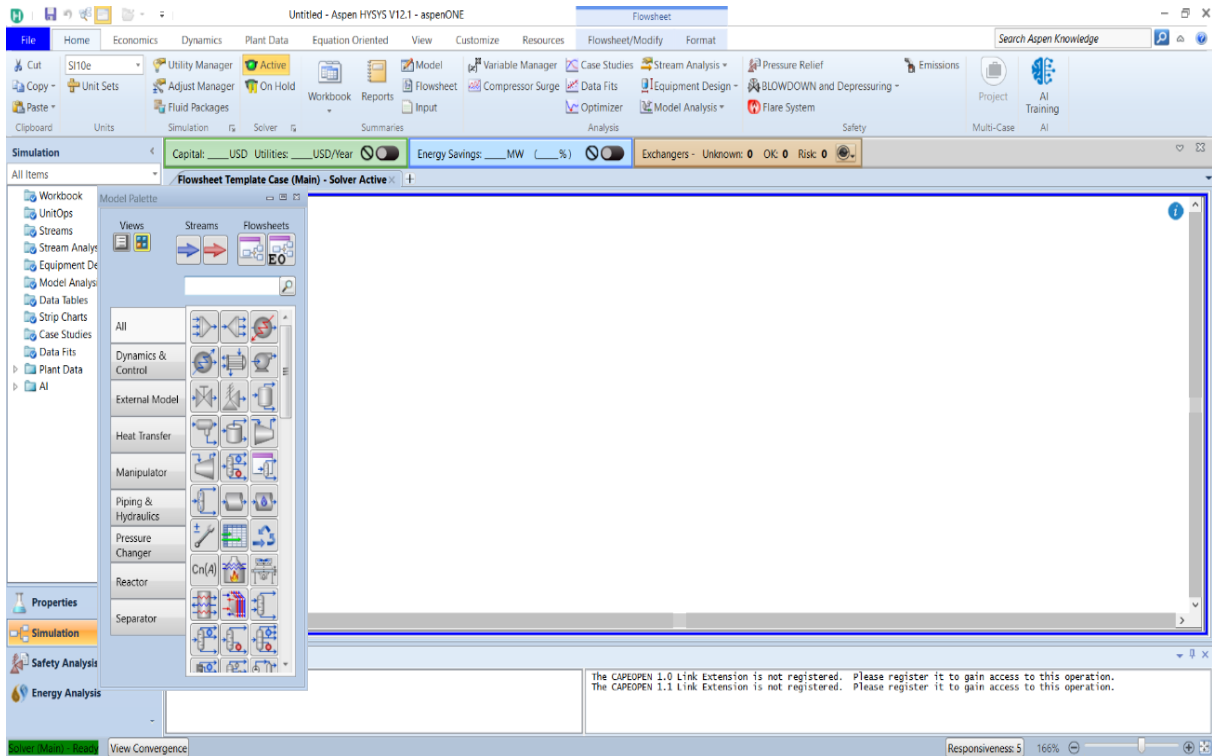


Figure IV- 5 : Construction de PFD

IV-5-Exemple de Simulation et Analyse du Processus de Séparation de l'Air :

1. Compresseur
2. Système de pré-refroidissement
3. Échangeur
4. 2eme échangeur
5. Colonne de distillation
6. Turbine

IV-6-Le rôle de chaque composant :

1. Compresseur (K-100)

Le compresseur est modélisé pour être isentropique avec une efficacité isentropique de 85%.

La pression de refoulement est de 7.5 bars.

2. Système de pré-refroidissement (E-100)

Le flux sous pression qui sort du compresseur est trop chaud pour pénétrer dans le tube de l'échangeur de chaleur et constitue donc un système de pré-refroidissement avec une spécification de 300 K on considère la température et 7.5 bars. Il n'y a pas de chute de pression à l'intérieur.

3. Echangeur (LNG-100)

L'échangeur de chaleur utilisé dans la simulation est un échangeur à contre-courant tube et calandre dans lequel le fluide chaud circule à travers le côté du tube et le fluide froid à travers le côté de la coque.

4. Colonne de distillation

Le rôle de la colonne de distillation dans cette simulation est primordial. Elle permet de séparer les différents composants de l'air en fonction de leurs points d'ébullition. En utilisant des plateaux ou des garnissages, la colonne facilite la montée des composants légers et la descente des composants plus lourds, assurant ainsi une séparation efficace. Grâce à la colonne de distillation, il est possible d'obtenir des produits finaux de haute pureté, contribuant ainsi à la performance globale du système de séparation de l'air.

5. Turbine

Le rôle de la turbine est de réduire la température de l'air liquide riche en oxygène de -150 à -170 degrés Celsius et de l'envoyer vers les échangeurs pour refroidir l'air entrant.

IV-7.Simulation et Analyse du Processus de Séparation de l'Air :

Les Données de exploitations :[2]

❖ Entre de compresseur (k-100)

Débit massique du l'air $\dot{m} = 3760 \text{ Kg/h}$

Pression $P = 101.3\text{KPa} = 1\text{atm}$

Température $T=298\text{k}$ ($T=25 \text{ }^\circ\text{C}$)

❖ Sortie de compresseur (k-100)

Pression $P = 750 \text{ kpa}$

❖ Sortie de pré-refroidisseur (E-100)

Pression $P= 740 \text{ kpa}$

Température $T= 10 \text{ }^\circ\text{C}$

❖ Sortie Échangeur (LNG-100)

Température $T= -43.9^\circ\text{C}$

❖ Sortie Échangeur (LNG-101)

Température $T = -170 \text{ }^\circ\text{C}$

❖ Entre de la colonne de Distillation (T-100)

Pression $P=700\text{kpa}$

Température $T = -170 \text{ }^\circ\text{C}$

Débit massique $\dot{m}=3760 \text{ Kg/h}$

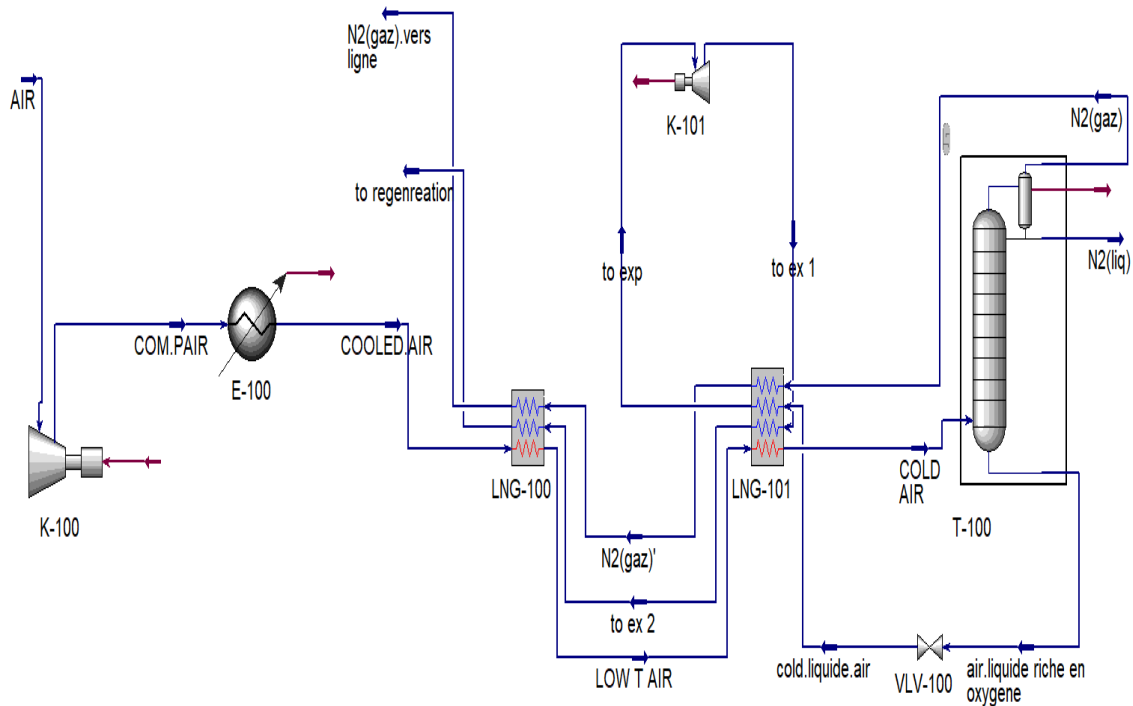


Figure IV- 6 : PFD (Process Flow Diagram) de Simulation et Analyse du Processus de Séparation de l'Air.

Material Streams									
		AIR	COM.PAIR	COOLED.AIR	LOW T AIR	COLD AIR	N2(gaz)	N2(liq)	air.liquide riche en oxygene
Vapour Fraction		1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,9050	1,0000	0,0000	0,0000
Temperature	C	25,00	350,2	10,00	-43,90	-170,0	-175,6	-175,6	-170,7
Pressure	kPa	101,3	750,0	740,0	720,0	700,0	650,0	650,0	700,0
Molar Flow	Nm3/h(gas)	2920	2920	2920	2920	2920	1100	100,0	1720
Mass Flow	kg/h	3760	3760	3760	3760	3760	1375	125,0	2260
Liquid Volume Flow	L/h	4343	4343	4343	4343	4343	1705	155,0	2483
Heat Flow	kJ/h	-836,2	1,277e+006	-6,364e+004	-2,698e+005	-8,391e+005	-3,012e+005	-4,821e+004	-8,464e+005
		cold.liquide.air	to exp	to ex 1	to ex 2	to regenreatior	N2(gaz)'	N2(gaz).vers ligne	
Vapour Fraction		0,1007	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	
Temperature	C	-179,6	-150,0	-170,0	-140,0	-141,4	-150,0	0,0000	
Pressure	kPa	350,0	330,0	151,4	50,00	400,0	500,0	400,0	
Molar Flow	Nm3/h(gas)	1720	1720	1720	1720	1720	1100	1100	
Mass Flow	kg/h	2260	2260	2260	2260	2260	1375	1375	
Liquid Volume Flow	L/h	2483	2483	2483	2483	2483	1705	1705	
Heat Flow	kJ/h	-8,464e+005	-3,923e+005	-4,317e+005	-3,627e+005	-3,744e+005	-2,548e+005	-3,709e+004	

Tableau IV- 1 : Résultat de la simulation

Compositions								
	AIR	COMP.AIR	COOLED.AIR	LOW T AIR	COLD AIR	N2(gaz)	N2(liq)	air liquide rich on oxygen
Comp Mole Frac (Nitrogen)	0,7879	0,7879	0,7879	0,7879	0,7879	0,9997	0,9989	0,6402
Comp Mole Frac (Oxygen)	0,2121	0,2121	0,2121	0,2121	0,2121	0,0003	0,0011	0,3598
	to ex1	to exp	to ex 1'	to ex 2	to regeneration	N2(gaz)'	N2(gaz)vers ligne	
Comp Mole Frac (Nitrogen)	0,6402	0,6402	0,6402	0,6402	0,6402	0,9997	0,9997	
Comp Mole Frac (Oxygen)	0,3598	0,3598	0,3598	0,3598	0,3598	0,0003	0,0003	

Tableau IV- 2 : les compositions de N2 et O2 pendant la simulation

Commentaires :

L'air qui sort de compresseur devrait être refroidi dans le système de pré-refroidissement (E-100) à une température $T = 298$ K à une pression de 750 KPa.

Après l'air envoyé à l'échangeur de chaleur (LNG-100), la température chute jusqu'à

$T = -43.9^{\circ}\text{C}$, après l'échangeur (LNG-100) il y a un deuxième échangeur (LNG-101) donc la température chute à $T = 103$ K (pression $P=700$ KPa).

L'air pénètre dans la colonne de distillation (T-100) à une température de -170 degrés Celsius, puis en ressort sous forme de trois produits distincts : le gaz N2, le liquide N2 et l'air liquide riche en oxygène.

Après cela, l'air liquide riche en oxygène pénètre dans l'échangeur (LNG-101) où il perd sa température jusqu'à atteindre -150 degrés Celsius, puis il passe par une turbine qui abaisse sa température à -170 degrés Celsius. Ensuite, il entre dans l'échangeur (LNG-100) pour refroidir l'air.

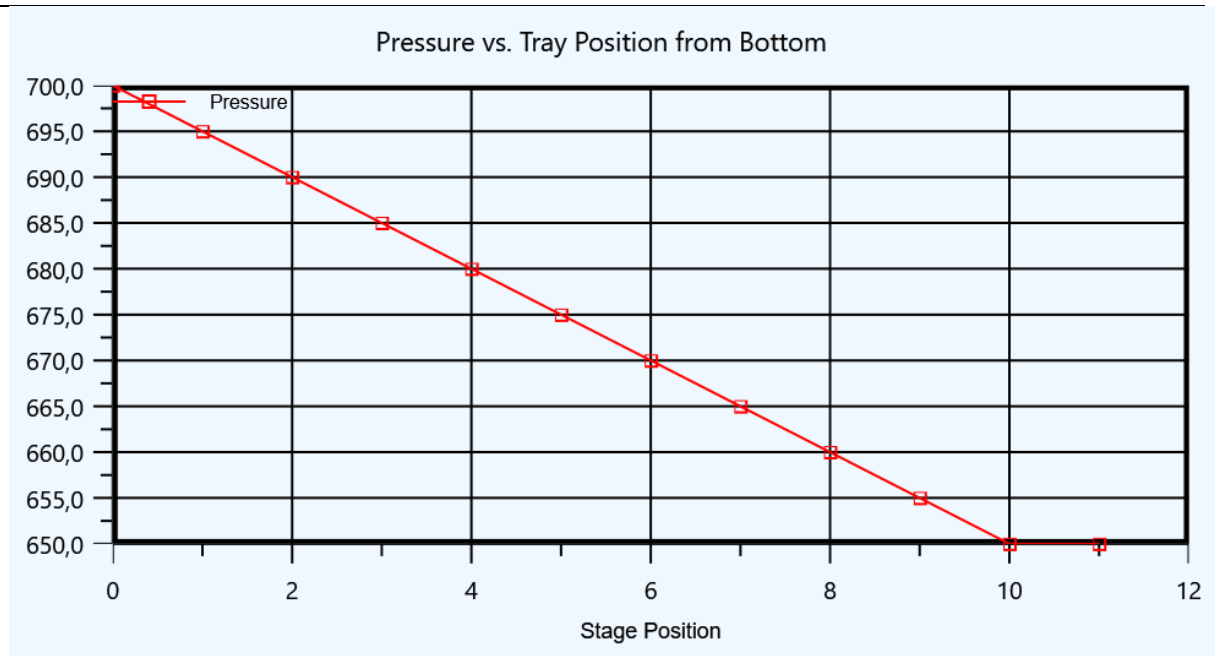


Figure IV- 7 : diagramme de pression en fonction des plateaux de la colonne de Distillation

❖ **Commentaire :**

Dans ce diagramme, nous avons remarqué que la pression diminue de manière uniforme entre les étages de la colonne, passant de 700 kPa à 650 kPa.

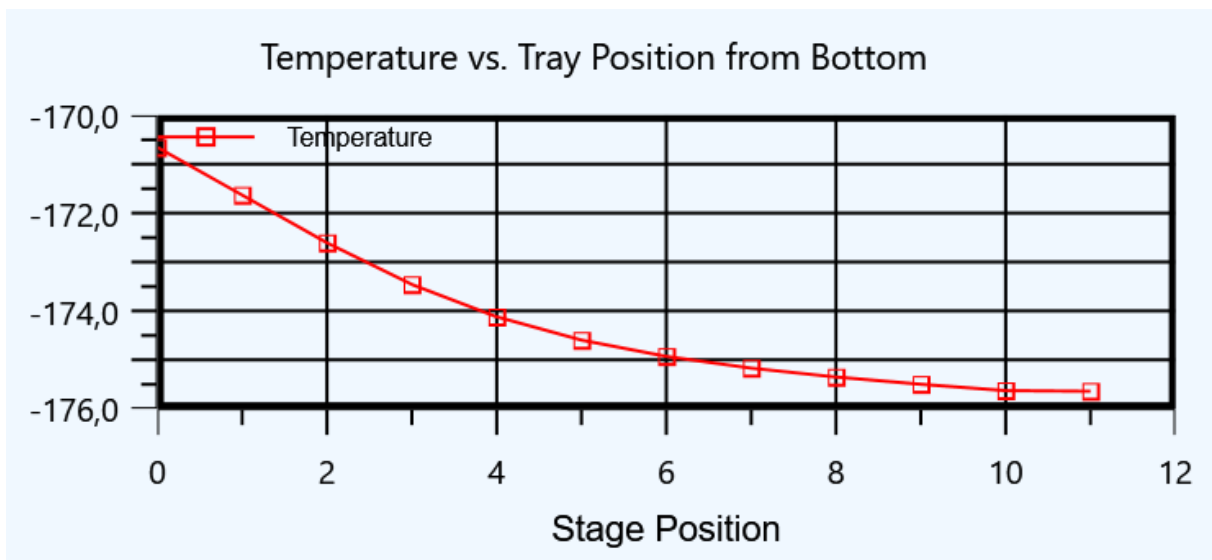


Figure IV- 8 : diagramme de températures en fonction des plateaux de la colonne de Distillation

❖ **Commentaire :**

Dans ce diagramme, nous constatons que la température diminue à chaque étage de la colonne, à l'exception des derniers étages qui restent constants.

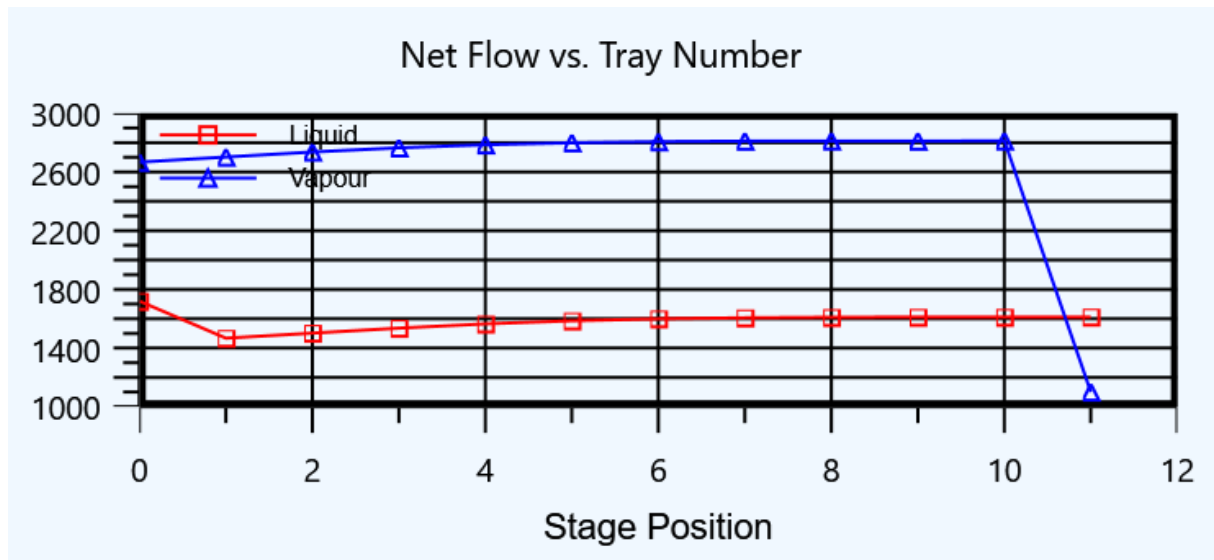


Figure IV- 9 : diagramme de débit vapeur et liquide en fonction des plateaux de la Colonne de distillation

Commentaires :

Dans ce diagramme, nous remarquons que les six premiers étages présentent une diminution suivie d'une augmentation du débit de liquide, tandis que le débit de vapeur augmente. Cela est dû au fait qu'aux premiers étages, l'air liquide s'évapore et s'élève, tandis que l'oxygène se liquéfie et l'azote s'élève et se liquéfie, puis réintègre la colonne sous forme de reflux liquide.

Dans les étages supérieurs, le débit de vapeur diminue tandis que le débit de liquide augmente, ce qui s'explique par le fait que le condenseur condense la vapeur d'azote en liquide.

❖ A l'aide des résultats on peut déterminer la quantité de l'azote liquéfié

- ✓ Le débit de l'azote liquide est $\dot{m} = 125 \text{ Kg/h}$
- ✓ La pression $P = 650 \text{ KPa}$
- ✓ La température $T = -175.6 \text{ }^\circ\text{C}$
- ✓ Fraction de vapeur : 0

Le taux de liquéfaction est donné ci-après

$$X = \left(\frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_f} \right) = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}} = \frac{125}{3760} = 0.033 = 3.3\%$$

IV-8. Analyse de l'effet de changement de quelques paramètres sur le système :

IV-8-1. L'effet de la pression sur le débit a la sortie de compresseur :

- ❖ Compresseur capacité 355 kw
- ❖ Entre de la compresseur température 25 °C et pression 1 atm

Pression P(kpa)	150	200	400	550	600	750	1000	2000	3000
Débit massique (kg/h)	26910	14890	8785	5535	4833	4343	3473	2394	1977

Tableau IV- 3 : le changement de débit massique en fonction de la pression (comp.355kw)

- ❖ Compresseur capacité 700 kw

Pression P(kpa)	150	200	300	500	600	750	1000	2000	3000
Débit massique (kg/h)	53060	29350	17320	10910	9529	8566	6848	4721	3899

Tableau IV- 4 : le changement de débit massique en fonction de la pression (comp.700kw)

Discutions des résultats :

Le débit à la sortie est influencé par la puissance du compresseur. Si la puissance du compresseur augmente, le débit à la sortie augmente également. Cependant, nous avons constaté un phénomène inverse en ce qui concerne la pression. Lorsque la pression augmente, le débit à la sortie diminue.

IV-8-2. L'effet de changement de quelques paramètres sur le processus de liquéfaction dans la colonne de distillation

IV-8-2-a. L'influence de la pression à l'Entrée de la colonne :

❖ Pression de sortie de compresseur P= 550kpa

Material Streams									
		AIR	COMP.AIR	COOLED.AIR	LOW T AIR	COLD AIR	N2(gaz)	N2(liq)	air liquide rich on oxygen
Vapour Fraction		1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,0000	0,0000
Temperature	C	25,00	248,3	10,00	-83,86	-170,0	-179,9	-179,9	-174,0
Pressure	kPa	101,3	550,0	540,0	520,0	500,0	450,0	450,0	500,0
Molar Flow	Nm3/h(gas)	4299	4299	4299	4299	4299	1100	1479	1720
Mass Flow	kg/h	5535	5535	5535	5535	5535	1378	1865	2292
Liquid Volume Flow	L/h	6394	6394	6394	6394	6394	1699	2265	2430
Heat Flow	kJ/h	-1231	1,277e+006	-9,101e+004	-5,036e+005	-1,118e+006	-3,017e+005	-7,354e+005	-8,737e+005
		to ex1	to exp	to ex 1'	to ex 2	to regeneration	N2(gaz)'	N2(gaz)vers ligne	
Vapour Fraction		0,0381	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	
Temperature	C	-177,5	-150,0	-170,0	-140,0	-42,95	-140,0	0,0000	
Pressure	kPa	380,0	330,0	151,8	40,00	4,000	400,0	350,0	
Molar Flow	Nm3/h(gas)	1720	1720	1720	1720	1720	1100	1100	
Mass Flow	kg/h	2292	2292	2292	2292	2292	1378	1378	
Liquid Volume Flow	L/h	2430	2430	2430	2430	2430	1699	1699	
Heat Flow	kJ/h	-8,737e+005	-3,919e+005	-4,311e+005	-3,620e+005	-1,507e+005	-2,382e+005	-3,692e+004	

Tableau IV- 5 : résultats de simulation a 550kpa.

Compositions								
	AIR	COMP.AIR	COOLED.AIR	LOW T AIR	COLD AIR	N2(gaz)	N2(liq)	air liquide rich on oxygen
Comp Mole Frac (Nitrogen)	0,7879	0,7879	0,7879	0,7879	0,7879	0,9812	0,9382	0,5351
Comp Mole Frac (Oxygen)	0,2121	0,2121	0,2121	0,2121	0,2121	0,0188	0,0618	0,4649
	to ex1	to exp	to ex 1'	to ex 2	to regeneration	N2(gaz)'	N2(gaz)vers ligne	
Comp Mole Frac (Nitrogen)	0,5351	0,5351	0,5351	0,5351	0,5351	0,9812	0,9812	
Comp Mole Frac (Oxygen)	0,4649	0,4649	0,4649	0,4649	0,4649	0,0188	0,0188	

Tableau IV- 6 : les compositions de N2 et O2 pendant la simulation (550kpa)

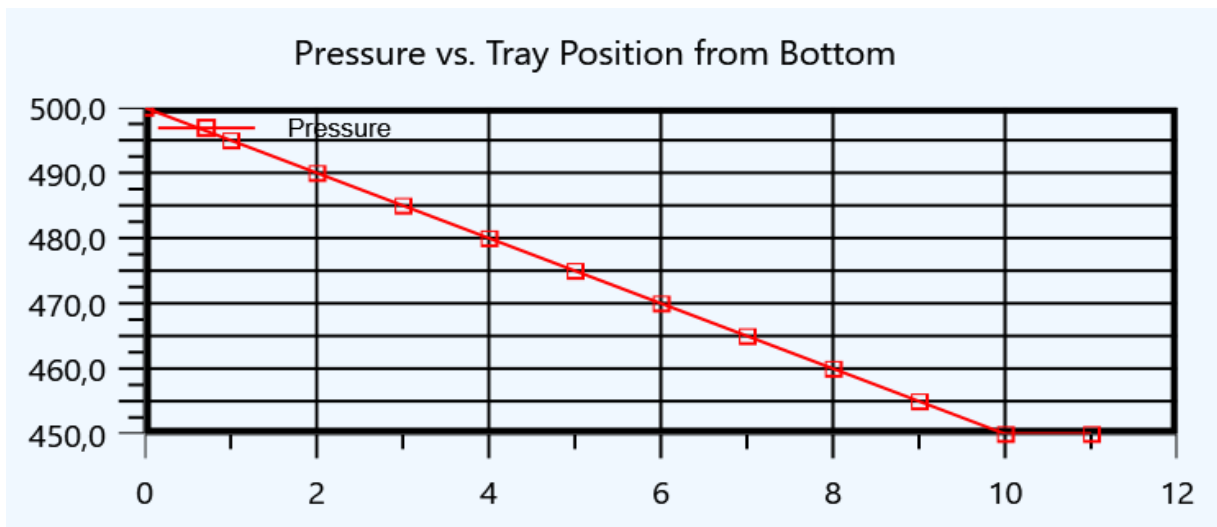


Figure IV- 10 : diagramme de pression en fonction des plateaux de la colonne de Distillation a 550kpa

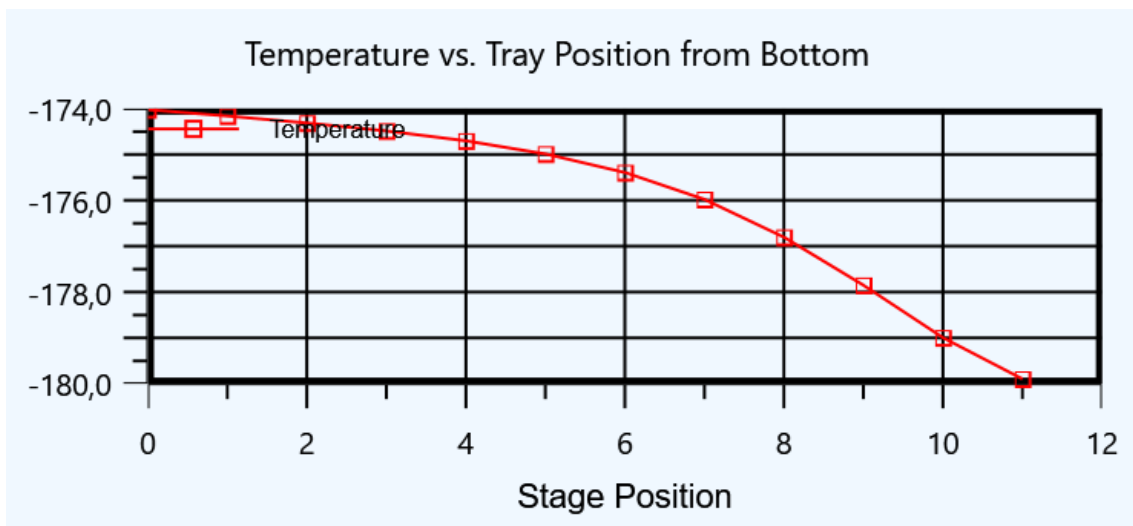


Figure IV- 11 : diagramme de températures en fonction des plateaux de la colonne de Distillation a 550kpa

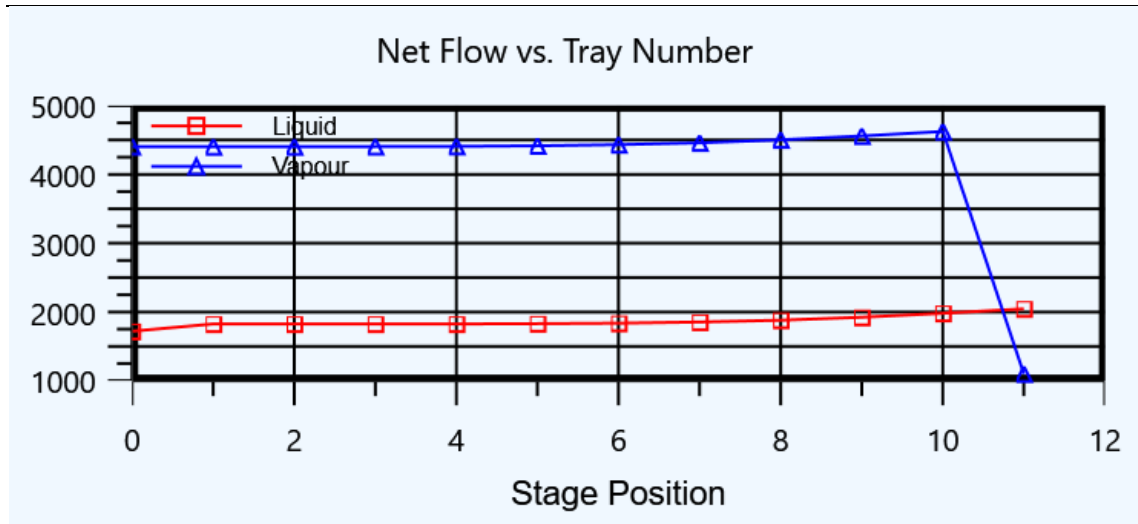


Figure IV- 12 : diagramme de débit vapeur et liquide en fonction des plateaux de la Colonne distillation a 550 kpa

❖ **la quantité de l'azote liquéfié :**

$$X = \left(\frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_f} \right) = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}} = \frac{1865}{5535} = 0.336 = 33.6\%$$

Discutions des résultats :

Suite à cette simulation, nous avons conclu que si nous réduisons la pression de manière à ce que toutes les unités du processus fonctionnent et que la pression requise pour le gaz N2 soit respectée, nous pouvons augmenter le volume de N2 liquide produit a 33.6%. Cependant, diminuer la pression pour augmenter le débit peut affecter la pureté du gaz N2 et du iquide produits.

IV-8-2-b. L'influence de la pression dans les stages de la colonne :

❖ Colonne avec 11 stages et ΔP de 200kpa

	Compositions			
	COLD AIR	N2(gaz)	air liquide rich en oxygen	N2(liquide)
Comp Mole Frac (Nitrogen)	0,7879	0,9997	0,6401	0,9991
Comp Mole Frac (Oxygen)	0,2121	0,0003	0,3599	0,0009

Tableau IV- 7 : les compositions de N2 et O2 dans le produit a 11 stages colonne et ΔP de 200kpa

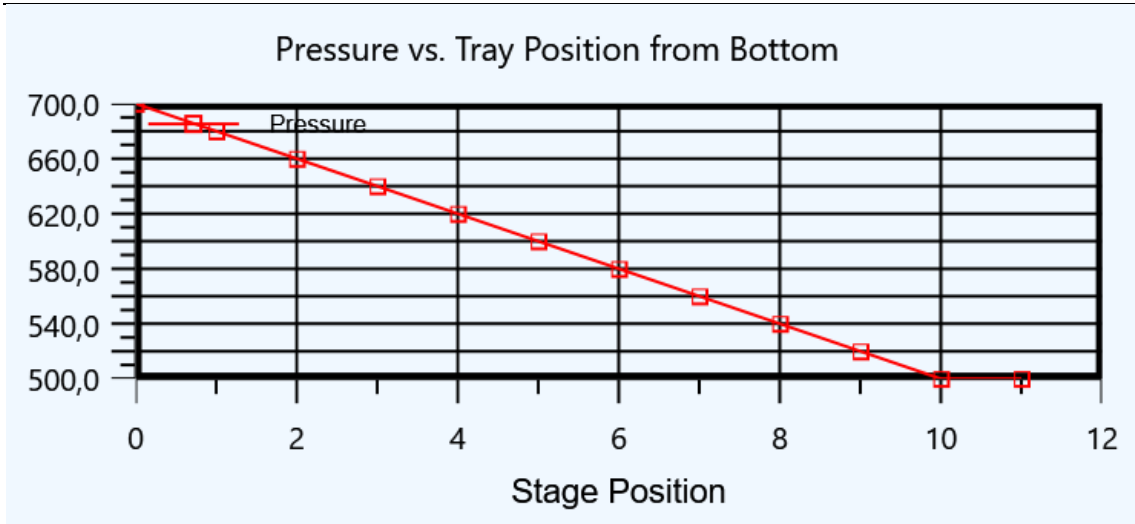


Figure IV- 13 : diagramme de pression en fonction des plateaux de la colonne de Distillation de 11stages ($\Delta P = 200\text{kpa}$)

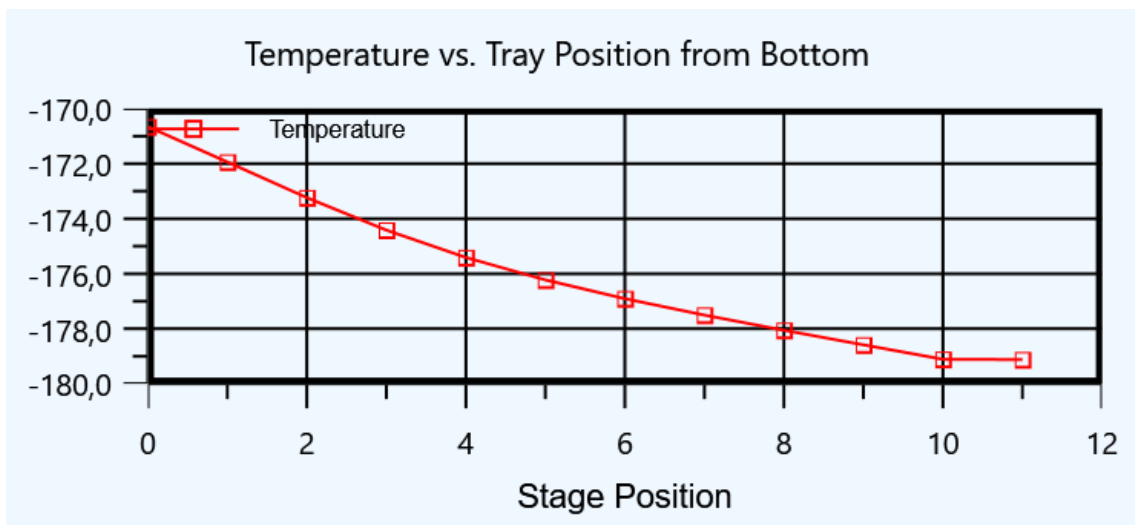


Figure IV- 14 : diagramme de températures en fonction des plateaux de la colonne de Distillation de 11 stages ($\Delta P = 200\text{kpa}$)

Commentaires :

Après ces résultats, nous avons remarqué que l'augmentation de la (ΔP) à l'intérieur de la colonne entraîne une plus grande diminution de la température, ce qui rend les produits plus purs.

❖ Colonne de 30 stages et $\Delta P=50\text{kpa}$ (même ΔP de la premier simulation)

	Compositions			
	COLD AIR	N2(gaz)	air liquide rich en oxygen	N2(liquide)
Comp Mole Frac (Nitrogen)	0,7879	1,0000	0,6399	1,0000
Comp Mole Frac (Oxygen)	0,2121	0,0000	0,3601	0,0000

Tableau IV- 8 : les compositions de N2 et O2 dans le produit a 30 stages colonne

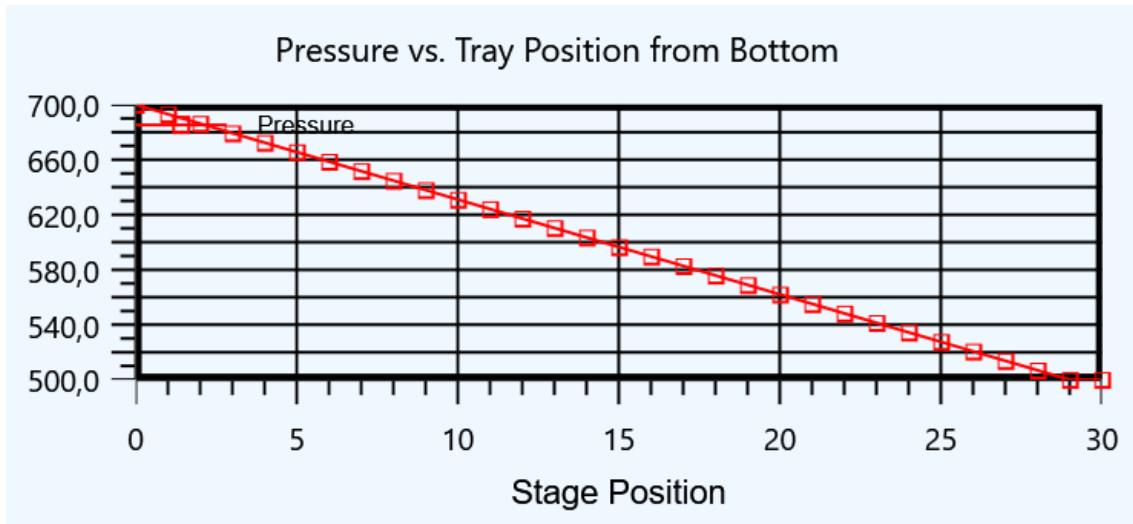


Figure IV- 15 : diagramme de pression en fonction des plateaux de la colonne de Distillation de 30 stages

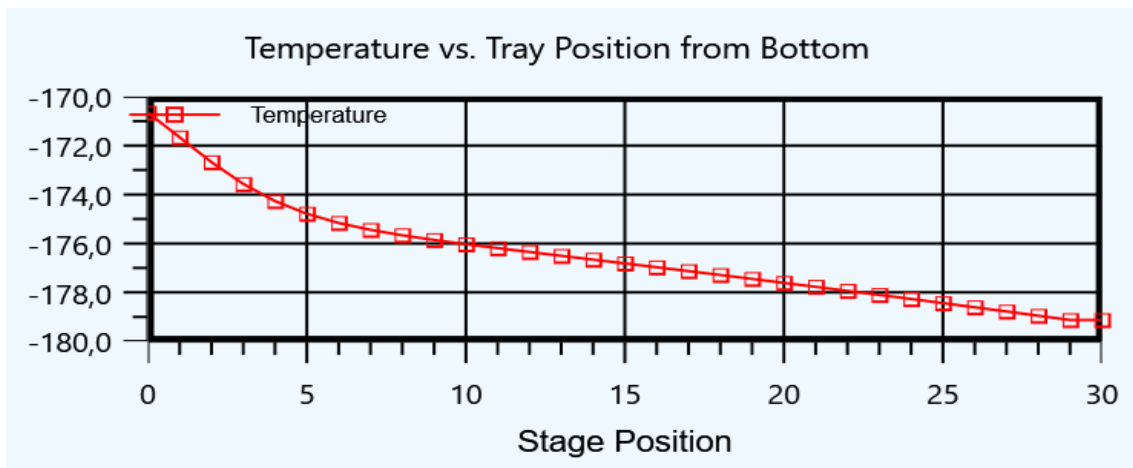


Figure IV- 16 : diagramme de températures en fonction des plateaux de la colonne de Distillation de 30 stages

Discussion des résultats :

Après avoir maintenu les mêmes paramètres que dans la simulation originale et en ne modifiant que le nombre d'étages, nous avons conclu que l'augmentation du nombre d'étages entraîne une plus grande chute de température, ce qui rend les produits plus purs.

IV-8-2-c. L'influence de la température à l'Entrée de la colonne :

❖ Gardez les données originales et change la température à l'entrée de colonne

$$T = -171 \text{ °C} \quad P = 700 \text{ kPa}$$

	Compositions			
	COLD AIR	N2(gaz)	air liquide rich en oxygen	N2(liquide)
Comp Mole Frac (Nitrogen)	0,7879	0,9657	0,6677	0,8995
Comp Mole Frac (Oxygen)	0,2121	0,0343	0,3323	0,1005

Tableau IV- 9 : les compositions de N2 et O2 dans le produit

$$T = -173.1 \text{ °C}$$

$$P = 500 \text{ k}$$

	Compositions			
	COLD AIR	N2(gaz)	air liquide rich en oxygen	N2(liquide)
Comp Mole Frac (Nitrogen)	0,7879	1,0000	0,6400	0,9998
Comp Mole Frac (Oxygen)	0,2121	0,0000	0,3600	0,0002

Tableau IV- 10 : les compositions de N2 et O2 dans le produit (-173.1°C, P= 700 kPa)

Discussion des résultats :

La température agit en relation avec la pression. Par exemple, à une pression de 700 kPa, si nous descendons en dessous de -170°C, l'air commence à se liquéfier et la séparation ne sera pas parfaite, ce qui entraînera des produits moins purs. De même, si nous dépassons -170°C, la séparation ne sera pas optimale. Cependant, si la pression d'entrée est de 500 kPa, la température idéale serait de -173,1°C. Si nous descendons en dessous ou dépassons cette température, la séparation commencera à être imparfaite.

IV-9. Discussions Dun problème :

Il convient de noter qu'il existe un problème dans la ligne de production réelle de gaz N₂, à savoir que la production de N₂ liquide est inférieure à la capacité prévue. Alors que la production visée est de 150 L/h, nous observons une production actuelle de seulement 100 L/h, voire parfois moins.

Étant donné que l'objectif principal est la production de gaz N₂ et que le liquide est stocké en cas de défaillance du système pour être vaporisé et envoyé dans la ligne, nous avons réalisé une simulation qui indique que tous les paramètres du système sont conformes aux spécifications requises. Même de légères variations des paramètres dans la réalité ne devraient pas compromettre la qualité du N₂ liquide produit. Par conséquent, nous avons conclu que le problème réside probablement au niveau du condenseur, qui est responsable de la production de N₂ liquide.

❖ Solution :

Des investigations plus approfondies et des ajustements au niveau du condenseur sont nécessaires pour résoudre ce problème et garantir une production de N₂ liquide conforme aux normes attendues.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE :

Le processus de séparation cryogénique de l'air est complexe et dépend de plusieurs facteurs importants tels que le débit, la pression, la température et les unités utilisées, ainsi que de leurs capacités et de leurs efficacités respectives. Ces paramètres interagissent pour assurer une séparation efficace des composants de l'air, notamment l'azote, l'oxygène et autres gaz. La simulation joue un rôle crucial dans la détermination de la structure et des paramètres de fonctionnement optimaux de ce processus.

Grâce à la simulation réalisée pour ce processus spécifique utilisé dans la fabrication, nous avons pu déterminer les meilleurs paramètres de fonctionnement. Il a été démontré que le démarrage du compresseur à une pression de 600 kPa permet d'atteindre une pression d'entrée de la colonne de 550 kPa, associée à une température de $-173,1^{\circ}\text{C}$. Ces conditions spécifiques permettent d'obtenir à la fois un produit d'azote de haute pureté et un volume maximum de liquide d'azote.

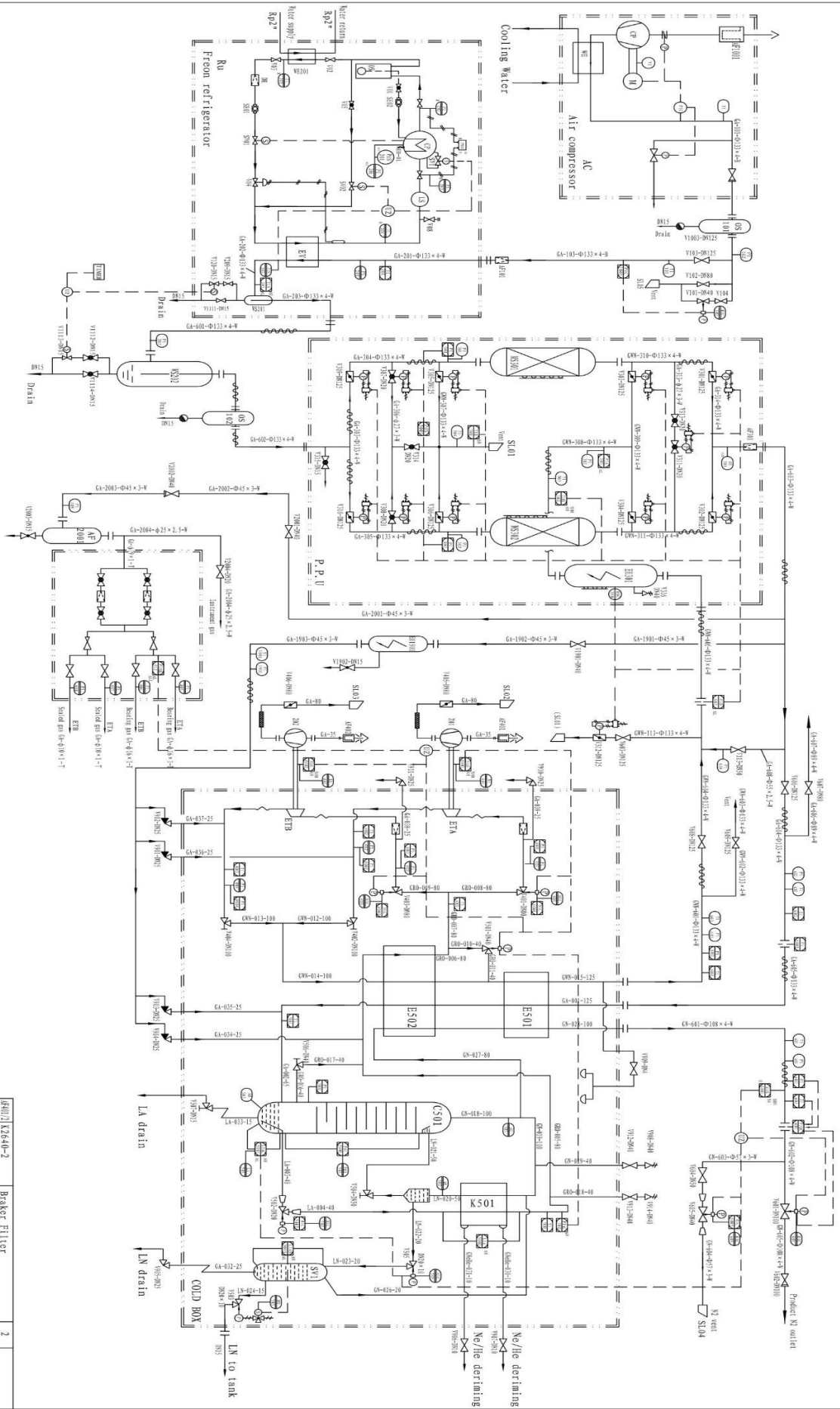
Il est important de noter que l'augmentation du débit en réduisant davantage la pression dans le compresseur ne permet pas d'atteindre les conditions requises par le constructeur, qui spécifie que le gaz d'azote doit être à une pression de 350 à 400 kPa et un débit de 1100 Nm³/h. De plus, une diminution excessive de la température avant d'entrer dans la colonne entraînerait la liquéfaction totale de l'air avant d'atteindre la colonne, ce qui serait un échec du processus.

Pour éviter ces problèmes et trouver les meilleures conditions de fonctionnement, une simulation approfondie a été réalisée. Cela permet d'optimiser la performance du système cryogénique et d'assurer la production efficace d'azote pur et de liquide d'azote à grande échelle. Ces résultats peuvent servir de référence pour le dimensionnement et l'exploitation d'installations de séparation de l'air dans le domaine de la fabrication et d'autres industries nécessitant des produits gazeux de haute pureté.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

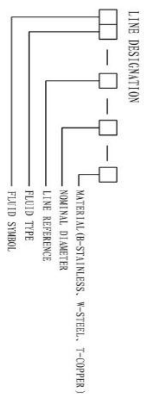
- [1] : " Présentation du la société MFG ". Le site officiel de l'entreprise MFG CEVITAL
<http://www.mfg.dz>
- [2] : Documents MFG
- [3] :Cryogenic Engineering. (n.d.). Retrieved from
<https://www.cryogenicsociety.org/resources/cryogenic-engineering/>
- [4] : Joule-Thomson Effect. (n.d.). Retrieved from
<https://www.britannica.com/science/Joule-Thomson-effect>
- [5] Rivoire, A., & Chirat, J. F. (2009). Production d'oxygène et d'azote par séparation cryogénique de l'air. Techniques de l'ingénieur, dossier R 5 620
- [6] Le Moullec, Y. (2014). Production de l'oxygène et de l'azote par distillation de l'air: Technologie, schémas de procédés, intégration énergétique. Éditions Tec & Doc
- [7] Jouhara, H., Tariq, A., Czulak, A., & Elsayed, Y. (2016). Étude expérimentale du procédé de séparation de l'air par cryogénie. Congrès Français de Thermique, SFT2016.
- [8] Durand, C., & Bertrand, J. (2007). Traité de génie des procédés: Génie des procédés de l'air liquide. Éditions Tec & Doc.
- [9] Smith, R. (2010). Cryogénie: Technologie des températures extrêmes. Éditions Techniques de l'Ingénieur.
- [10] "Process Systems Analysis and Control" par Donald Coughanowr et Steven LeBlanc

ANNEXES



KEY SYMBOLS FOR DIAGRAMS

Symbol	Description	Symbol	Description	Symbol	Description	Symbol	Description	Symbol	Description
	Bag Filter		System Inflow		Stop Valve		Theoretical Valve		Asterisk
	Air Compressor		Press. Indication		Check Valve		Barometric Valve		Expansion Joint
	Water Filter		Fus. Indication		Isolated on both hand		Isolated on both hand		Puff Bag
	Electric Heater		Temp. Indication		Isolated on one hand		Isolated on one hand		Electric Signal
	Refrigeration Unit		Level Indication		Safety Valve		Safety Valve		
	Water Separator		Fus. Indication		Isolated on both hand		Isolated on both hand		
	Storage Vessel		Level Indication		Isolated on one hand		Isolated on one hand		
	Feon Compressor		Level Indication		Isolated on both hand		Isolated on both hand		
	Condenser		Level Indication		Isolated on one hand		Isolated on one hand		



Item No.	Code	Name	Number	Remark
04012	K2546-2	Breaker Filter	2	
07001	1701.000	Instruments Air Filter	1	
07002	0995.000	HR-251.124.35 Expansion Turbine	2	
07003	1442.000	Type JH-6.00 Electric Heater	1	
10778	00000	FN-800/50Y Cold Box	1	
1680C	00000	HAK-2700/8 P.P.U.	1	
0502	1696A.30000	Water Separator	1	
0503	18971.000	HR-2100/8 Feon Refrigerator	1	
0504	HR-2-2-150	Filter	1	
0505	HR-7-2-150	Filter	1	
0506	CA1315W-7.5	Air Compressor	1	

Revision	Date	By	Check	Approved
1				
2				
3				
4				
5				