

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Chimie Industrielle



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم : الكيمياء الصناعية

Mémoire présentée en vue de l'obtention
du diplôme de Master en : Génie des Procédés

Option : Génie Chimique

Titre :

SIMULATION DE LA LIQUEFACTION DE L'AIR ET SEPARATION.

Présentée par :

SALHAOUI YOUNA

Devant le jury composé de :

Président : Dr. MERZOUGUI ABDELKRIM

Encadreur : Pr. HASSEINE ABDELMALEK

Examineur : Dr. LAIADHI DJEMOUI

Promotion Juillet 2019



Dédicace

A ma très chère mère

Quoique je fasse ou je dise , je ne saurai point te remercier comme il se doit . Ton affection me couvre , ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles .

A mon très cher père.

Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager .

Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

Remerciements

Après avoir rendu grâce à Dieu le Tout Puissant et le Miséricordieux , je tiens à remercier tout ceux qui , de près ou de loin , ont participé à l'élaboration de ce modeste travail.

Il s'agit particulièrement de Monsieur Pr. HASSEINE ABDELMALEK pour sa disponibilité , sa rigueur scientifique et son sens d'écoute aussi pour Dr. LAIADHI DJEMOUI et Dr. ABDELKRIM MERZOUGUI.

Mes vifs remerciements également à les jurys et à tous mes êtres chers qui m'ont aidé durant toutes ces années.

Que Dieu vous récompense

Merci!

Liste des tableaux

Tableau I.1 :	Table de propriétés des cryo-fluide.....	6
Tableau I.2 :	Les propriétés chimique de l'oxygène.....	7
Tableau I.3 :	Généralité sur les propriétés physique et chimique de l'azote.....	10
Tableau II.1 :	Tableau des Logiciels de simulation de processus les plus commerciaux....	13
Tableau IV.1 :	Tableau des données obtenais par Aspen plus à la pression 5 atm.....	44
Tableau IV.2 :	Tableau des données utilisé pendant la simulation.....	52
Tableau IV.3 :	Tableau de résultat de la simulation.....	55
Tableau IV.4 :	Tableau de variation de la fraction liquide avec une pression de compression.....	56
Tableau IV.5 :	Tableau de l'effet de la variation de la fraction liquide en fonction de la variation de débit molaire.....	57
Tableau IV.6 :	Tableau de la variation de température de sortie flux chaud et la sortie de flux froid avec l'approche de l'échangeur de chaleur.....	58
Tableau IV.7 :	Tableau de l'effet de changement de nombre des plateaux sur la pureté des produits obtenus.....	59

Liste des figures

Figure I.1 :	composition de l'air.....	5
Figure I.2 :	les constituants dans l'air en fraction molaire.....	6
Figure I.3 :	points d'ébullition de gaz d'air.....	6
Figure II.1	Aspen one classification de la technologie Aspen one.....	14
Figure II.2 :	la première fenêtre pour choisir les paramètres de la simulation	16
Figure II.3 :	choix des propriétés des procédés durant la simulation	16
Figure II.4 :	l'environnement de simulation de l'Aspen plus.....	16
Figure II.5	Thermodynamique system séparation gaz- idéal.....	18
Figure II.6	Système de séparation des gaz à colonne unique de Linde.....	18
Figure III.1 :	les étapes de bases de séparation cryogénique de l'air.....	22
Figure III.2 :	Schéma simplifier le fonctionnement d'unité de séparation des gaz d'air.....	23
Figure III.3 :	Fonctionnement du processus principal d'une séparation cryogénique de l'air.....	23
Figure III.4 :	Procède du Linde pour l'air liquide.....	28
Figure III.5 :	Production de froid à l'aide d'une valve d'expansion.....	28
Figure III.6 (a):	Une colonne de distillation normale.	30
Figure III.6(b) :	Double colonne de Linde (sans argon).....	30
Figure III.7 :	Un compresseur à vis lubrifié le schéma du modèle avec les conditions	

	limite.....	31
Figure III.8 :	Schéma d'un échangeur a plaques et ailettes en aluminium.....	32
Figure III.9	Schéma d'un échangeur a ailette.....	32
Figure III.10 :	Les différents types de régénérateurs.....	33
Figure III.11 :	Détendeur alternatif de vapeur.....	34
Figure III.12 :	Une turbine à gaz cryogénique.....	35
Figure IV.1 :	T, X, Y diagramme, N ₂ – O ₂	37
Figure IV.2 :	T, X, Y diagramme, O ₂ - N ₂ à P=1 atm.....	37
Figure IV.3 :	X, Y diagramme N ₂ – O ₂ à P=1 atm.....	38
Figure IV.4 :	T, X, Y diagramme, N ₂ – O ₂ à P=2 atm.....	38
Figure IV.5 :	T, X, Y diagramme, O ₂ à P=2 atm.....	39
Figure IV.6:	Diagramme X,Y,N ₂ - O ₂ à P=2 atm.....	39
Figure IV.7 :	Diagramme T, X, Y, Ar- O ₂ à P=1.5 atm.....	40
Figure IV.8 :	Diagramme X, Y, Ar- O ₂ à P=1.5 atm.....	40
Figure IV.9 :	Diagramme T,X,Y- ,N ₂ -O ₂ à P=5 atm.....	41
Figure IV.10 :	Diagramme T,X,Y- ,N ₂ -O ₂ à P=5 atm.....	41
Figure IV.11 :	Diagramme T,X,Y- ,N ₂ -O ₂ à P=5 atm.....	42
Figure IV.12 :	Diagramme X, Y, N ₂ – O ₂ à P=5 atm par excelle	42
Figure IV.13 :	Colonne de distillation en Aspen plus.....	45
Figure IV.14 :	diagramme X,Y N ₂ -O ₂ a P=5 atm.....	46
Figure IV.15 :	diagramme X, Y à P=5 atm par excelle	46

Figure IV.16 :	Diagramme X, Y identifier les points X_D , X_W , F.....	47
Figure IV.17 :	Diagramme X, Y identifier les points X_D , X_W , F et q.....	48
Figure IV.18 :	Diagramme X, Y identifier les points X_D , X_W , F.....	49
Figure IV.19 :	Diagramme X, Y	50
Figure IV.20 :	Diagramme X, Y identifier les différent droite opératoire	51
Figure IV.21 :	Dessin des plateaux par la méthode McCabe-Thiele	51
Figure IV.22 :	Diagramme du coefficient d'activité N ₂ -O ₂	52
Figure VI.23:	Schéma de procédé du système de séparation des gaz à colonne unique Linde(sans argon).....	53
Figure IV.24 :	la méthode et l'équation choisis sur logiciel Aspen plus pour la simulation.....	54
Figure IV.24.a :	Configuration de désigne de l'échangeur	54
Figure IV.25 :	Exécution de la simulation.....	55
Figure IV.26 :	Diagramme fraction de liquid en fonction de changement de pression...57	57
Figure IV.27 :	Diagramme de fraction liquide en fonction de changement des débits molaire.....	58
Figure IV.28 :	Diagramme de la variation de température de sortie flux chaud et la sortie de flux froid avec l'approche de l'échangeur de chaleur.....	59
Figure IV.29 :	Diagramme de la variation La pureté de N ₂ en haut % en fonction de nombre des plateaux.....	60
Figure IV.30 :	Diagramme de la variation La pureté d'O ₂ en bas % en fonction de nombre des plateaux.....	60

Glossaire

O ₂	Oxygène
N ₂	Nitrogène
Ar	Argon
ASU	usines de séparation d'air
VLE	valeur limite d'exposition
PPS	propriété physique de système
X _D	fraction molaire de distillat en mole
X _w	fraction molaire de résidu en mole
X _f	fraction molaire de la charge en mole
T	température en °C °K
P	pression en bar atm

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Les produits de séparation de l’Air et leurs applications	
I.1 Introduction.....	4
I.2 Généralités sur l’air.....	4
I.2.1 Composition de l’air	4
I.2.2 Points d’ébullition des composants de l’air	5
I.3 Généralités sur les composants de l’air (l’oxygène et azote)	7
I.3.1 Propriétés et utilisations de L’oxygène.....	7
I.3.1.a Propriétés physiques & chimiques.....	8
I.3.1.b Principales applications de l’Oxygène.....	8
I.3.2 Propriétés et utilisations de L’Azote.....	9
a) Propriétés physiques & chimiques.....	9
b) Principales applications de L’azote.....	10
I.4 Utilisation industrielle, Stockage et le transport	10
Chapitre II: Description d’outil de la simulation	
II.1 Introduction de processus simulation.....	13
II.2 Technologie Aspen.....	13
II.2.1 Introduction.....	13
II.2.2 Aspen One	14
II.2.2.1 Ingénierie en Aspen One.....	14
II.3 Aspen Plus.....	14
II.3.1 Introduction.....	14
II.3.2 Les principes de l’Aspen.....	15
II.3.3 Environnement de la simulation.....	16
II.4 Système de liquéfaction de gaz cryogénique	17
II.4.1 Système de liquéfaction idéal	17
II.4.2 Système de séparation cryogénique.....	17
II.4.2.1 Système de séparation idéal	17
II.4.2.2 Principe de fonctionnement.....	18
II.4.3 Système à colonne unique Linde.....	18

II.4.3.1 Principe de fonctionnement.....	19
--	----

Chapitre III : Séparation cryogénique de l’Air

III.1 Introduction	20
III.2 Les technologies de séparation de l’air.....	20
III.3 Séparation cryogénique de l'air.....	21
III.3.1 Les étapes de base de la séparation cryogénique de l'air.....	21
III.3.2 Schéma de principe d’une séparation cryogénique de l’air.....	23
III.4 Cycle de Linde pour la liquéfaction de l’air.....	27
III.4.1 Principe et fonctionnement	27
III.4.2 Techniques générales utilisées pour la distillation.....	28
III.4.2.1 Avantage compétitif	30
III.5 Equipements utilisés dans la séparation cryogénique de l’air.....	31
III.5.1 Compresseurs cryogéniques.....	31
III.5.2 Les échangeurs	32
III.5.3 Les régénérateurs.....	32
III.5.4 Machines de détente cryogénique.....	34
III.5.5 Autres composants.....	35

Chapiter4 partie pratique

IV.1 Thermodynamique de la séparation de l'air.....	36
IV.2 Calcul de la distillation de l'air par la méthode McCabe-Thièle.....	43
IV.2.1 Schéma de la colonne.....	45
IV.2.1.2 Bilan de matière globale.....	45
IV.2.2 Préparation de diagramme XY.....	46
IV.2.3 Sélectionne sur le diagramme les points F, W et D.....	47
IV.2.4 Trace la ligne de la droite opératoire q	47
IV.2.5 Calcule de taux de reflux minimal.....	48
IV.2.6 Calculer le taux de reflux (R) en tant que $R = 1.5 R_{min}$	49
IV.2.7. Calcule la section $\frac{x_D}{(R_{min} + 1)}$ sur l’axe y pour x=0.....	50
IV.2.8 Nombre des plateaux et l’nidification de plateau d’alimentation.....	51
IV.3 Résultat et discussion de la simulation.....	52
IV.3.1 Simulation de la séparation d’air.....	52
IV.3.2 Description du schéma du procédé de séparation de l'air.....	53

IV.3.3 Résultat de la simulation.....	54
IV.4 Etudier l'effet de changement de différentes conditions du procédé	56
IV.4.1 La variation de la fraction liquide en fonction de pression de la compression.....	56
IV.4.2 Etude sur l'effet de la variation de la fraction liquide en fonction de la variation de débit molaire.....	57
IV.4.3 Etude de la variation de température de sortie de flux chaud et la sortie de flux froid avec l'approche de l'échangeur de chaleur	58
IV.4.4 Etude de l'effet de changement de nombre des plateaux sur la pureté des produits	59
Conclusion générale.....	61

Résumé :

L'air est un mélange de plusieurs gaz, chaque de ces gaz a des utilisations, la séparation d'air en ses gaz constituants devient très important de coté commercial. Pour séparer l'air il est nécessaire de le liquéfier. Dans ce projet, la simulation de la liquéfaction de l'air puis suivre ça processus à partir de logiciel de la simulation Aspen Plus. Le modèle à étude était le système à colonne unique de Linde. En plus l'étude l'effet de la variation des diverses conditions initial de traitement sur le rendement et la pureté du produit final ont également été analysés. A partir d'utilisation de système à colonne unique de Linde, il était possible d'obtenir l'oxygène à une pureté de presque 99%.et une pureté d'azote de 90%.

Mot clé : gaz industriel –séparation d'air-liquéfaction d'air-logiciel de la simulation-colonne unique de Linde-pureté.

الملخص :

الهواء عبارة عن مزيج من عدة غازات, كل من هذه الغازات تستخدم لغرض معين, وفصل الغازات المكونة للهواء يصبح مهم جدا في الجانب التجاري. لفصل الهواء من الضروري تسييله في هذا المشروع نتبع محاكاة تسييل الهواء. هذه العملية تجرى عن طريق استخدام برنامج محاكاة Aspen Plus. النموذج المدروس هو نظام ليند أحادي العمود . بالإضافة إلى دراسة تأثير مختلف الشروط الابتدائية على المردود و نقاوة المنتج النهائي. تم تحليلها باستخدام نظام ليند أحادي العمود كان من الممكن الحصول على الأكسجين بنقاوة حوالي 99% و نقاوة النيتروجين بنسبة 90%.

كلمات المفتاحية: غاز صناعي – فصل الهواء- تسييل الهواء- برنامج محاكاة- أحادي العمود ليند- النقاوة.

Introduction générale

La cryogénie, science et technologie des températures inférieures à 120 K, a entamé son deuxième siècle d'existence. Elle est le résultat d'une conjonction historique du progrès scientifique (déplacement progressif de la thermodynamique au cours du XIXe siècle, de la théorie macroscopique de l'énergie de J.Joule et S.Carnot, à la mécanique statistique des particules microscopiques de L.Boltzman et J.W.Gibbs, et du progrès technologique (poursuite de la liquéfaction des gaz atmosphériques jusque là considérés comme « non condensables », faisant appel aux études des propriétés des substances chimiques pures et de leurs mélanges, les appareils de compression, l'écoulement et les transferts de chaleur des fluides et les techniques d'isolation thermique) [1].

L'histoire de la séparation d'air est connue depuis longtemps, à l'échelle de la recherche et au niveau du laboratoire la première liquéfaction de l'air [L. Cailletet et R. Pictet, 1877] et la première séparation de l'oxygène et de l'azote [K. Olszewski et S. Wroblewski, en 1883] furent rapidement suivies par la liquéfaction de l'hydrogène, rendue possible par l'invention d'un réservoir isolé sous vide avec écran de rayonnement [J. Dewar, 1898].

Cependant, ce fut la première liquéfaction de l'hélium [H. Kamerlingh Onnes, 1908] qui a ouvert la voie de la recherche sur la matière condensée aux basses températures [1].

En 1895, la première liquéfaction de l'air au monde dans des unités pilotes et aussi leurs premières productions et commercialisation. La première usine de séparation de l'air fut naitre en 1904, depuis cette date une série d'évolution a été remarquée jusqu'à 1984, la plus grande usine de séparation d'air au monde sise à VAROX avec l'ajustement variable de demande de l'oxygène.

L'année 1991, la plus grande usine de séparation de l'air du monde avec les colonnes emballées.

En 1992, les usines de séparation d'air produisent les mégas purs gaz, et en 1997, Linde a fait une nouvelle et importante étape dans l'histoire de séparation d'air.

Quatre trains de génération d'azote sont fournis, chacun d'eux constitue la plus grande usine de séparation d'air jamais construite. Capacité d'azote 1.200 MMSCFD (40.000 t/d).

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

L'une des principales applications de la cryogénie est la production des gaz industriels qui sont ; à l'heure actuelle aussi essentiels que l'eau et de l'électricité même dans la vie quotidienne, et une telle nécessité est favorisée par la diversité de leurs provenances.

Introduction générale

(Séparation de l'air, Production chimique, Sources naturelles, Rejets industriels) [2].

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

De larges quantités de produits de l'air avec une grande pureté sont employées dans plusieurs industries, à savoir : la production de l'acier, produit de raffinage, les produits chimiques et les semi-conducteurs et aussi dans l'aéronautique, traitement de produits alimentaires, ainsi que l'industrie médicale.

L'air à basses températures (77°K) devient liquide et ainsi nous pouvons réaliser la distillation de l'air et ses composants. La distillation de l'air est actuellement la technique la plus utilisée pour la production de l'oxygène pur, de l'azote et de l'argon à l'échelle industrielle.

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

Parmi les gaz industriels, on trouve l'Oxygène et l'Azote qui prédominent, due à leur vaste et diverses utilisations, dans notre présente étude. On s'intéresse à la production de ces deux gaz à partir de l'air (plus précisément par la liquéfaction de l'air). Nous sommes basés sur le système à colonne unique de Linde.

Pour cela, notre travail est divisé en quatre parties :

Le premier chapitre est consacré pour les produits de séparation de l'air et leurs utilisations.

La deuxième partie est une vision sur la description d'outil de simulation.

La troisième partie est un aperçu sur la séparation cryogénique de l'air.

La quatrième partie est basé sur l'application de logiciel ASPEN PLUS et l'étude de l'effet de changement de diverses conditions initiales.

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

Objet du thème

Dans les systèmes de liquéfaction des gaz, on rencontre un problème majeur c'est :
Comment peut-t-on avoir le maximum de la pureté du gaz liquéfié ? En quelque sorte, jouant sur quels paramètres pour pouvoir améliorer la pureté et le rendement ? L'objectif, donc, de cette étude est la recherche de ces paramètres appliqués sur le cycle de Linde pour la liquéfaction de l'air, l'azote et l'oxygène pour obtenir une meilleure pureté et rendement, en utilisant la simulation de la liquéfaction cryogénique de l'air et l'azote par ASPEN PLUS.

CHAPITRE I :

LES PRODUITS DE

SÉPARATION DE L'AIR ET

LEURS APPLICATIONS

I.1 Introduction

Les gaz de l'air, plus communément appelés « gaz industriels » font partie de notre vie quotidienne et concernent toutes les industries.

Tout a commencé avec l'électrolyse de l'eau afin d'en extraire l'oxygène pour une utilisation médicale. Alors, la première clientèle était donc constituée des pharmaciens. Et cela s'est passé dans les années 1890.

Un peu de temps après 1895, deux méthodes développées en parallèle par CARLVAN LINDE et GEORGES CLAUDE ont abouti à la production industrielle d'air liquide puis des gaz qui le constituent (d'azote et d'oxygène...). [3].

I.2 Généralités sur l'air

I.2.1 Composition de l'air

L'air est un mélange des différents types de gaz. L'air atmosphérique contient essentiellement de (78,08 %) d'azote et (20,95 %) d'oxygène et, pour moins de 1 %, de gaz rares comme l'argon (0,93 %), le néon (0,0018 %, 18,18 ppm), le krypton (1,14 ppm), le xénon (0,08 ppm), l'hélium (5,24 ppm) et, dans les basses couches, de la vapeur d'eau, du dioxyde de carbone (actuellement environ 0,04 %, 400 ppm), du protoxyde d'azote (0,5 ppm), du méthane (1,7 ppm). S'y ajoute des traces de dihydrogène (0,000072 %), d'ozone (0,01 ppm), de radon, de divers aérosols (poussières, micro-organismes) et aussi d'autres gaz polluants et particules.

La séparation de l'air atmosphérique se fait dans une installation de séparation de l'air essentiellement pour obtenir de l'azote et de l'oxygène, et parfois aussi de l'argon et rarement d'autres gaz inertes.

Il existe différentes technologies pour le procédé de séparation, la plus courante étant la distillation cryogénique.

En plus de la méthode cryogénique, il existe d'autres méthodes telles que la membrane, l'adsorption à variation de pression (PSA) et l'adsorption à variation de pression sous vide (VPSA), qui sont, généralement, utilisées pour séparer un seul composant. [4]

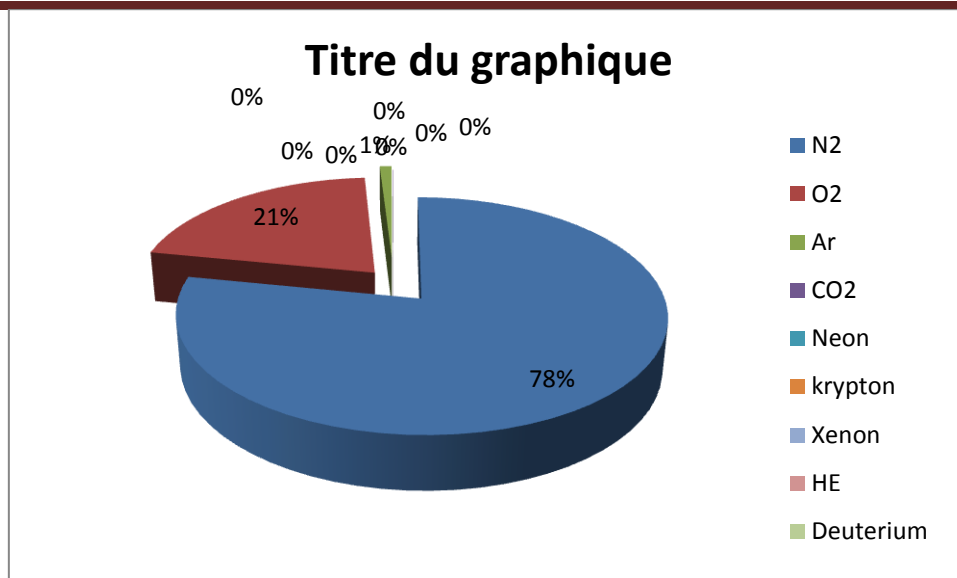


Figure I.1 : Les compositions de l'air

A ne pas oublier la petite quantité de la vapeur d'eau, les polluants (les hydrocarbures tels que méthane, éthane.. etc.) , les gaz acides tels que (H_2 , S_2 , SO_2 .. qui sont des gaz corrosifs), ainsi que les bactéries et les poussières.

La figure ci-dessous donne les quantités des compositions de l'air.

Nitrogen	0.78084
Oxygen	0.20946
Argon	0.00934
Carbon dioxide	0.00033
Neon	1.818×10^{-5}
Krypton	1.14×10^{-6}
Xenon	8.6×10^{-8}
Hydrogen deuteride	3.12×10^{-4}
Deuterium	1.56×10^{-4}
Helium	1.0×10^{-7}

Figure I.2 : Les constituants de l'air en fraction molaire [5]

I.2.2 Points d'ébullition des composants de l'air

On sait que l'air contient essentiellement de l'oxygène (O_2) et de l'azote (N_2) et parmi les méthodes de séparation : la distillation qui s'est basé essentiellement sur le point d'ébullition.

Point d'ébullition : c'est lorsqu' un mélange liquide ou un liquide pur est chauffé progressivement.

Cette zone de pression fixe la température pour permettre de s'élever la première bulle de vapeur.

Le tableau suivant représente les différentes propriétés des cryo-fluides.

Donc :

La température d'ébullition de l'oxygène c'est : $-183^\circ C$ ($90^\circ K$)

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

La température d'ébullition de l'argon c'est : -186°C (87°K)

La température d'ébullition de l'azote c'est : -196°C (77°K)

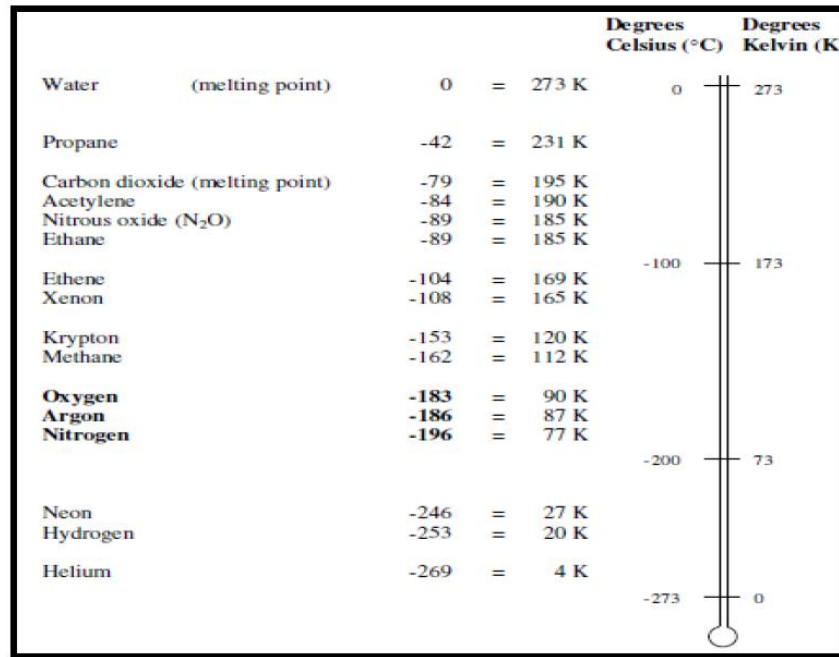


Figure I.3 : Points d'ébullition de gaz d'air [19]

Table de propriétés des cryo-fluides

Propriétés de quelques fluides	He3	He4	H2	D2	Ne	N2	O2	Ar	CH4	H2O	
Température d'ébullition à p normale ($1.013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$) (K) – T_{eb}	3.2	4.2	20.4	23.6	27.1	77.3	90.2	87.3	111.7	373.15	
POINT TRIPLE	T_t en K	-	-	13.95	18.70	24.50	63.14	54.40	84.00	90.70	273.16
	P_t en hPa	-	-	72	170	424	125	2	670	116	6
POINT CRITIQUE	T_c en K	3.33	5.20	33.20	38.30	44.40	126.10	154.40	150.80	191.00	647.14
	P_c en 10^5 Pa	1.16	2.23	12.80	16.50	26.60	33.10	49.50	47.70	45.80	220.60
Volume de gaz provenant de l'évaporation d'1 litre de liquide	à T_{eb} et p normale (l)	2.5	7.3	54.6	70.0	127.0	180.0	260.0	240.0	250.0	
	à T et p normale (l)	455	700	790	900	1355	646	798	784	595	
Chaleur latente L de vaporisation à T_{eb} et p normale (kJ/kg)	8.2	21	452	305	86	199	213	157	510	2250	
Enthalpie sensible entre T_{eb} et 300 K (kJ/kg)	2080	1550	3800	2048	280	233	193	112	402		
Taux d'évaporation (Wh/l) = nombre de watts à déposer pour vaporiser 1 litre en 1 heure	0.14	0.7	9.0	13.6	29	45	68	61	60	624	
Capacité calorifique à pression constante ($\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$) à 0°C et 1 bar	-	5.20	14.05	-	1.03	1.038	0.909	0.52	2.19	1.842 (à 100°C)	
Conductivité thermique du gaz à T_{eb} ($\text{mW/m}\cdot\text{K}$)	-	10	15	< 40	8	7.6	9	8	8.7	22	
Conductivité thermique du gaz à p normale et 300 K ($\text{mW/m}\cdot\text{K}$)	-	152	181	137	50	26	27	18	31		
Masse volumique du liquide à p normale (kg/m^3)	59	125	71	161	1210	810	1140	1400	425	998	
Masse volumique de la vapeur saturante à p normale (kg/m^3)	24	17	1.3	2.3	9.5	4.5	4.4	5.8	1.7	0.77	
Masse volumique du gaz à p et T normales (kg/m^3)	0.13	0.18	0.09	0.18	0.9	1.25	1.43	1.8	0.55		
Viscosité du liquide à T_{eb} ($\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$)	2	3.6	13	16.2	125	160	190	260	120	278	
Viscosité du gaz à T_{eb} ($\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$)	1.2	1	1	1.5	4.5	5	7	8	4.4	12.5	
Viscosité du gaz à Tambiante ($\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$)	-	20	9	13	30	17	20	22	11	19	
Permittivité du liquide	-	1.05	1.23	1.27	1.19	1.44	1.48	1.54	1.68	80	

Rappels :

p normale = pression dans les conditions normales soit 1 atm = $1.013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

T normale = $273,15 \text{ K}$ (0°C)

Tableau I.1 : Table de propriétés des cryo- fluides [6]

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

I.3 Généralités sur les composants de l'air (l'oxygène et l'azote)

Comme nous avons vu, les deux composants les plus importants sont l'Oxygène et l'Azote. Nous allons détailler ci-après les propriétés de ces deux composés ainsi que leurs domaines d'application. [6]

I.3.1 Propriétés et utilisations de L'oxygène

Quelques propriétés chimiques importantes de l'oxygène sont dans le tableau suivant :

a) Propriétés physiques & chimiques

Numéro atomique	8
Masse atomique	15.999 g/mol
Electronégativité	3.44
Masse volumique	1.429 kg/m ³ à 20°C
Température de fusion	-219°C
Température d'ébullition	-183 °C
Rayon atomique (Van Der Waals)	0.074 nm
Rayon ionique	0.14 nm (-2)
Isotopes	2
Configuration électronique	[He] 2s ² 2p ⁴
Energie de première ionisation	1311 kJ.mol ⁻¹
Energie de troisième ionisation	4577 kJ.mol ⁻¹
Découverte	Le nom de cet élément vient du grec (engendre acide)

Tableau I.2 : Les propriétés chimiques de l'oxygène [7]

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

Symbole: O.

Nombre atomique: 8.

Poids atomique : 5.9994 g/mol.

Dans les conditions normales, l'oxygène est un gaz sans couleur, inodore et insipide. Il se condense dans un liquide bleu-clair. L'oxygène fait partie d'un petit groupe de gaz littéralement paramagnétique, et il est le plus paramagnétique de tous. L'oxygène liquide est également légèrement paramagnétique. [7]

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

Il est d'un grand intérêt parce qu'il est l'élément essentiel dans les processus respiratoires de la plupart des cellules vivantes et dans les processus de combustion. C'est l'élément le plus abondant dans la croûte terrestre. Presque un cinquième d'air (en volume) est de l'oxygène.

L'oxygène gazeux non-combiné existe normalement sous la forme de molécules diatomiques (O_2). Mais, il existe également en forme triatomique (O_3) appelé l'ozone.

Ressource :

20,9 % dans l'air ; 50,5 % dans l'ensemble de l'atmosphère, l'hydrosphère, la biosphère et la lithosphère.

Plus de la moitié, à savoir précisément 50,5 % , des parties de notre planète accessibles à l'homme, sont composées d'oxygène.

C'est le pourcentage de cet élément dans l'atmosphère, l'hydrosphère (les eaux) et la lithosphère jusqu'à une profondeur de 16 kilomètres.

Rien que par sa masse, l'oxygène est ainsi l'élément de base le plus important dans notre monde.

b) Principales applications de l'Oxygène

D'ailleurs, dans l'espace, l'oxygène est le troisième élément après l'hydrogène et l'hélium, mais avec une fraction massique beaucoup moins importante que sur terre. Le caractère réactif de l'oxygène est exploité par des entreprises industrielles qui cherchent à rendre leurs productions plus efficaces à moindres coûts.

L'oxygène intervient dans la plupart des procédés industriels dans lesquels des combustions ou réactions chimiques jouent un rôle, dès le recuit d'acier jusqu'au traitement d'eau.

L'oxygène peut être séparé de l'air par liquéfaction fractionnée et distillation.

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

- 1) fabrication d'acier et d'autres métaux;
- 2) fabrication des produits chimiques par oxydation commandée;
- 3) propulsion de fusée;
- 4) appui médical et biologique;
- 5) extraction, production et fabrication des produits en pierre et de verre.

Les industries chimiques et pétrolières combinent l'oxygène avec les hydrocarbures pour produire des produits tels que l'antigel, le plastique, les polymères, et le nylon.

L'oxygène permet, par exemple, de faciliter le thermoformage et le raffinage du verre.

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

L'industrie du papier utilise l'oxygène pour augmenter la blancheur de papier tout en réduisant le besoin d'autres produits chimiques de blanchiment.

Les usines de traitement des eaux usées emploient l'oxygène pour donner aux procédés de traitement plus d'efficacité et aussi d'augmenter la capacité des bassins pendant les expansions ou les renversements d'usine.

6) Accélération des réactions d'oxydation dans différents secteurs et procédés .

7) Augmentation des températures de procédés dans la métallurgie (l'industrie des céramiques et du verre).

8) Accélération des procédés biologiques et biochimiques, par exemple ,dans le cadre du traitement des eaux usées (stations d'épuration biologique) ; ainsi que beaucoup d'autres applications encore.

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

L'eau (H_2O) et la silice (SiO_2), composants principaux du sable, sont les composés binaires de l'oxygène les plus abondants. Parmi les composés qui contiennent plus de deux éléments, les plus abondants sont les silicates, qui forment la plupart des roches et des sols. D'autres composés qui sont abondants dans la nature sont le carbonate de calcium (pierre à chaux et marbre), l'oxyde d'aluminium (bauxite), le sulfate de calcium (gypse) et divers oxydes de fer, qui sont employés comme source du métal.[7]

I.3.2 Propriétés et utilisations de L'Azote

a) Propriétés physiques & chimiques

a-1 : Propriétés physiques

Numéro atomique	7
Masse atomique	14.067 g/mol
Electronégativité	3.04
Masse volumique	1.24982 g/L à 20°C
Température de fusion	-210°C
Température d'ébullition	-195.8 °C
Rayon atomique (Van Der Waals)	150 pm ³
Rayon ionique	0.146 nm (-2)
Isotopes	2
Configuration électronique	[He]2s ² 2p ³
Energie de première ionisation	14.5341 eV
Famille d'élément	Non-métal
Colleur	Incolore

Tableau I.3 généralité sur les propriétés physique et chimique de l'azote

L'azote est un gaz inerte qui est incolore, inodore, insipide et diatomique. A la pression atmosphérique, il devient un liquide qui a la caractéristique d'être très froid. C'est l'une des meilleures sources de liquide très froid parce que d'autres liquides froids sont beaucoup plus coûteux à produire. Son point de fusion est de moins 210 degrés Celsius et son point d'ébullition est de moins 195,8 °C. L'azote a deux isotopes ¹⁴N, ¹⁵N, et il a un numéro atomique de 7. [8]

a-2: Propriétés chimiques

L'azote en lui-même n'est pas combustible. C'est-à-dire, il est incapable de supporter la combustion. A des températures élevées, il peut se combiner avec d'autres métaux pour produire des nitrures. En combinaison avec l'azote, l'oxygène produira l'oxyde nitrique et le dioxyde d'azote, il se combine avec l'hydrogène pour produire de l'ammoniac et s'il est combiné avec du soufre, il produira du sulfure d'azote. Avec l'aide de catalyseurs, l'activité biologique à des températures très hautes, permettra à une teneur d'azote de se composer. [8]

a-3: Utilisations

La plus grande utilisation de l'azote est unique en son rôle dans la production d'ammoniac, qui est utilisé comme engrais. L'azote est un élément également dans de nombreux autres types d'engrais. Dans son état, azote liquide, est très utile en raison de ses très basses températures. Il est utilisé pour le stockage et le transport des aliments, le stockage des échantillons biologiques et des parties du corps, tels que les transplantations d'organes, de sperme ou œufs femelles, et que la nitroglycérine azote a des qualités très explosifs qui sont utilisés dans les munitions et les démolitions. [8]

b) Principales applications de L'azote

L'azote est un gaz dans les conditions ordinaires 15 °c et 1 barre. L'azote est un gaz incolore, sans odeur et sans saveur. C'est le composant principal de l'air (78.08 % en volume)

A la pression atmosphérique, pour des températures à – 196°c ; c'est un liquide incolore, un peu plus léger que l'eau.

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

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

Son nom allemand (Stickstoff = matière étouffante) vient du fait qu'il est capable d'étouffer aussi bien des flammes que tout être vivant. Le nom scientifique Nitrogenium est dérivé du mot grec « nitros » qui veut dire nitrate de potassium, molécule à partir de laquelle l'azote était extrait avant l'invention de la séparation d'air.[8]

I.4 Utilisation industrielle, Stockage et le transport

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

Les ouvriers devraient utiliser les gants vigoureux, les lunettes de sécurité avec les boucliers latéraux pour protéger les yeux et le visage, et les chaussures de sûreté, gants isolés thermiques, une longue chemise gainée et pantalon sans manchettes, en manipulant des cylindres de gaz comprimé. En raison de sa basse température, l'oxygène liquide ne devrait pas contacter la peau, sinon il peut causer des brûlures de troisième degré.

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

Pour empêcher l'étouffement, il est important d'avoir la bonne ventilation en travaillant avec de l'azote. Les zones de travail Confinées doivent être examinées pour des niveaux de l'oxygène avant l'entrée.

Si le niveau de l'oxygène est plus bas que 19.5 %, personne, y compris les sauveteurs, ne doit entrer dans le secteur sans équipement de respiration spécial qui fournit une indépendante source d'air de respiration propre.

Le stockage de l'oxygène liquide dans trois différents types de récipients, les Vases Dewar, les cylindres de liquide cryogénique et les réservoirs de liquide cryogénique.

Pour répondre aux besoins en petites quantités, les gaz sont stockés dans des bouteilles sous pression.

Lorsque le besoin de gaz industriels est en grandes quantités sur le site d'utilisation, il se doit d'installer des réservoirs fixes permettant de stocker des gaz sous forme liquide.

Les gaz liquéfiés sont transportés depuis les sites de production jusque chez les consommateurs dans des camions citernes, dans des bouteilles sous pression.

Les grands sites industriels tels que les aciéries ou les industries chimiques, ont des besoins d'oxygène et d'azote si importants qu'une unité de séparation d'air est parfois exploitée à demeure sur leurs sites

Plusieurs grandes entreprises peuvent être aussi alimentées en gaz industriels par des réseaux de pipelines, notamment dans des zones industrielles.

Plus un utilisateur a des besoins en gaz industriels élevés, plus il se doit d'être proche du lieu de production des gaz qu'il utilise. En règle générale, les gaz sont produits là où se trouvent les besoins, à savoir à proximité des zones industrielles importantes.[2]

L'oxygène et l'azote sont employés pour des nombreux usages et pour un large éventail de différents secteurs industriels dont les industries pétrolière et gazière, pétrochimique, chimique:

- Production de carburant liquide de synthèse à partir de charbon (CTL) ou de gaz naturel GTL)
- Production d'acier
- Liquéfaction d'azote pour la distribution
- Industries papetières et du verre
- Extraction de cuivre et du verre
- Extraction de cuivre et d'or à partir du minerai
- Production d'engrais
- Production de puce électronique. [9].

Conclusion: Grâce à la grande quantité de l'azote et l'oxygène et leur importance on peut négliger l'argon dans ce travail.

CHAPITRE II :
DESCRIPTION D'OUTIL DE
LA SIMULATION

CHAPITRE III : LA SÉPARATION CRYOGÉNIQUE DE L'AIR

III.1 Introduction

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

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

Les liquides cryogéniques ont des caractéristiques spécifiques, qui nécessitent une attention toute particulière mais qui offrent également de nouvelles possibilités d'utilisation. Au vu de leurs faibles températures critiques et de leurs pressions critiques modérées.

Dans ce chapitre nous allons détailler une des applications de la cryogénie c'est bien que la production des gaz de l'air (l'Oxygène et l'Azote) par la liquéfaction de l'air selon le cycle de Linde, et aussi nous allons décrire la méthode d'opération d'usine de séparation cryogénique de l'air.

III.2 Les technologies de séparation de l'air

Toutes les principales sociétés de gaz industriels produisent et commercialisent des gaz et liquide variés produits dans des usines de séparation d'air (ASU).

Ces usines, à l'aide d'une méthode de distillation cryogénique divisent l'air atmosphérique en ses différents composants l'azote, l'oxygène et l'argon et d'autre gaz inertes rare. [9]

Les usines dites celle de fractionnement ou de séparation de l'air utilisent un processus thermique connu sous le nom de rectification cryogénique pour séparer les différents composants les uns des autres afin de produire l'azote et l'oxygène de haute pureté sous forme liquide et gazeuse.

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

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

Ces différentes technologies s'appliquent selon les différentes conditions sur la quantité et la pureté des produits [9]

III.3 Séparation cryogénique de l'air

Le procédé cryogénique de séparation de l'air c'est le procédé le plus populaire de séparation d'air et il est le plus utilisé fréquemment dans toutes les usines et à une large échelle.

C'est la technologie la plus préférée pour produire l'azote et l'oxygène comme gaz et/ou produits liquides et elle est censée pour être la technologie la plus rentable pour les usines de hautes cadences de fabrication.

Les usines de séparation de l'air sont construites dans différentes formes selon quels produits désirés et leurs degré de pureté ; qui seront fabriqués et la capacité productive.

Alors des différents équipements de processus et des machines de différents fabricants sont utilisés. Cependant, les principes de base de la construction et des méthodes de travail pour toutes ces différentes usines sont presque identiques.

Il y a différentes variations (les exigences du consommateur, la nature de produit final...) qui définissent et exigent le choix des cycles cryogéniques de séparation d'air, à savoir :

- Combien de produits sont exigés (si simplement l'oxygène ou azote, l'oxygène et azote).
- Degré de pureté exigée des produits.
- Pressions de livraison des produits gazeux.
- Si les produits doivent être stockés en forme liquide.
- Et le plus important c'est le procédé qui permet d'utiliser une énergie minimale et bien sûr avoir un rendement maximum.

Quand une nouvelle usine doit être construite et la capacité productive et la pureté de chaque produit final doit être déterminés, le processus le plus approprié sera choisi de telle manière que la consommation d'énergie et le prix d'achat seront les plus bas possible tout en on réalisant un rendement maximal.[15]

III.3.1 le principe et Les étapes du fractionnement d'air.

Dans l'installation de fractionnement d'air, les différents constituants de l'air sont séparés par un procédé physique – on parle aussi de distillation/rectification à basse température ce qui permet d'obtenir de l'azote, de l'oxygène et de l'argon de haute pureté sous forme liquide et gazeuse.

1 Aspiration : L'air aspiré est pré-purifié avec un filtre.

2 Compression : L'air est comprimé de 5 à 6 bar.

3 Purification : L'air comprimé est pré refroidi par de l'eau et passe ensuite dans un tamis moléculaire pour être débarrassé des impuretés qu'il contient (dioxyde de carbone, vapeur d'eau et hydrocarbures).

Chapitre III : Séparation cryogénique de l'Air

4 Refroidissement : L'air est refroidi jusqu'à -160 °C dans un échangeur de chaleur, par du produit déjà froid. Le refroidissement se poursuit dans une turbine d'expansion où la température de l'air s'abaisse jusqu'à une valeur de -190 °C et se liquéfie alors partiellement.

5 / 6 Fractionnement d'air : Pour fractionner l'air liquéfié, on met à profit le fait que ses constituants ont des points d'ébullition différents.

Le principe du procédé est comparable à celui de la distillation de l'alcool. Comme les températures d'ébullition des composants de l'air sont relativement proches (oxygène: -183 °C , azote: -196 °C), la séparation doit avoir lieu en plusieurs étapes dans des colonnes de distillation. Celles-ci contiennent des tamis et des garnissages dont la structure assure une grande surface de contact. Pendant le déplacement à contre-courant, le gaz ascendant s'enrichit en azote et le liquide qui ruisselle vers le bas en oxygène et en argon (à savoir le type de la colonne). Dans la colonne de séparation de l'argon, l'argon est séparé de l'oxygène restant.

7- 10 Prélèvement et stockage des gaz : Les gaz sont prélevés dans les colonnes de séparation et conservés dans des cuves de stockage en vue de leur utilisation ultérieure. L'azote est prélevé directement sous forme gazeuse pendant le processus et acheminé par pipeline chez les clients implantés à proximité.

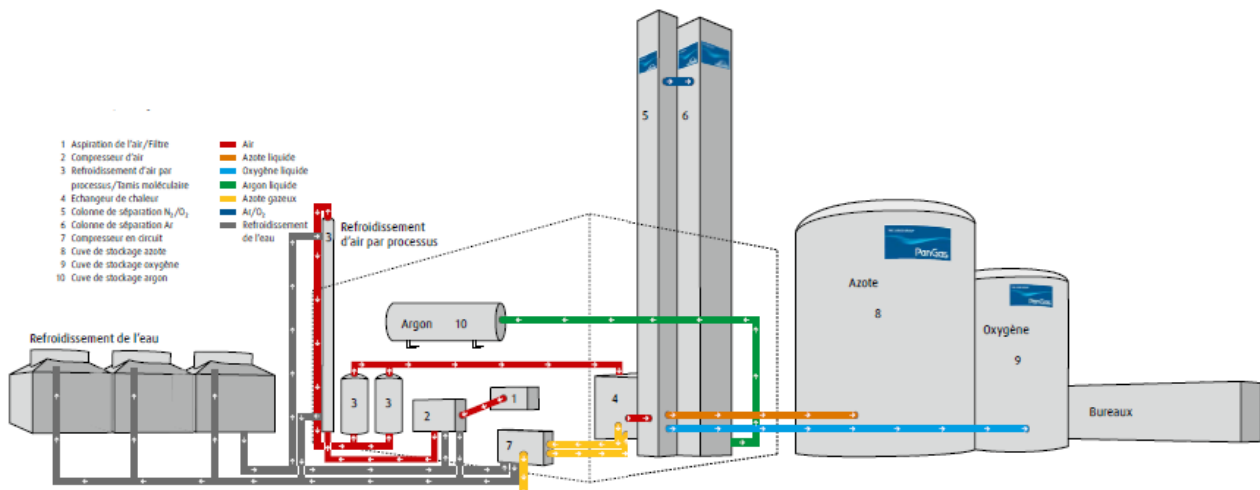


Figure III-1 : les étapes de bases de séparation cryogénique de l'air [16]

III.3.2 Schéma de principe d'une séparation cryogénique de l'air

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

- La compression
- L'épuration
- le refroidissement
- la liquéfaction
- la distillation

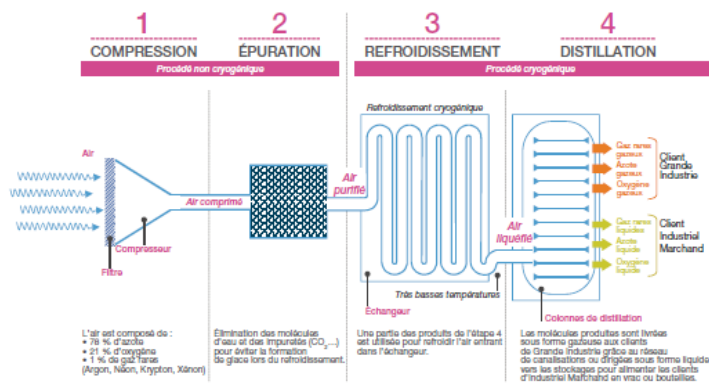


Figure III-2 : Schéma simplifié le fonctionnement d'unité de séparation des gaz d'air [17]

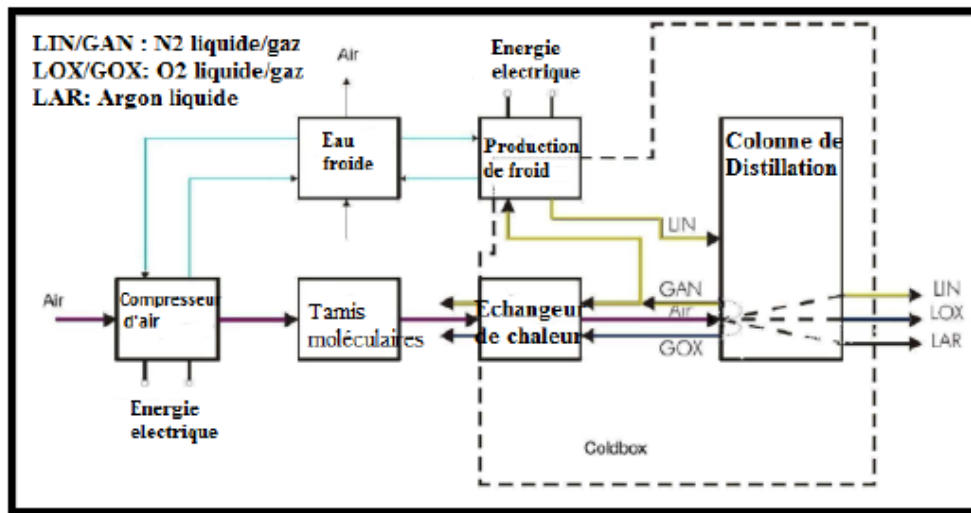


Figure III-3 : Fonctionnement du processus principal d'une séparation cryogénique de l'air [18]

a) Aspiration et compression de l'air ambiant

La première étape à n'importe quelle usine de séparation cryogénique de l'air est la filtration et la compression de l'air, c'est l'une des parties les plus importantes de l'installation ; l'air est aspiré grâce à un turbocompresseur avec le filtre (généralement avant la compression, un premier niveau de filtration est réalisé grâce à des filtres retenant les particules de plus de 2 μ tels que les poussières). [18]

Lors de son aspiration, l'air est comprimé à environ 5-6 bars (une pression suffisamment pour l'obtenir dans l'équipement).

Par exemple si l'on prend un débit entrant d'environ 30.000 m³/h (débit mesuré à la pression atmosphérique, à la température de 15°C), cela donne lieu à la production de 400 t/jour de gaz liquides (azote, oxygène et argon).

b) Pré-refroidissement avec l'eau froide

Après la filtration, l'air comprimé est pré-refroidi pour atteindre la température approximativement ambiante par le passage dans les échangeurs de chaleur refroidis à l'eau ou l'air refroidi, dans certains cas il est refroidi dans un système de réfrigération mécanique à une température beaucoup plus basse. Ceci mène à une meilleure élimination d'impureté, et également une minimisation de puissance d'énergie, causant moins de variation dans la performance d'usine due aux changements de la température atmosphérique de façon saisonnière. [18]

c) L'épuration de l'air

L'air ambiant contient d'autres contaminants (humidité, dioxyde de carbone, hydrocarbures, et autres...), qui doivent toujours être éliminés pour satisfaire des caractéristiques de qualité du produit. Il est donc indispensable de le purifier ; avant que l'air arrive à la partie de distillation; en piégeant le reste de ces contaminants afin d'éviter la formation de bouchons de neige carbonique et de glace lors de refroidissement. [18]

D'autres parts, l'oxygène réagit chimiquement (risque d'explosion) à la présence d'hydrocarbures. C'est pour ces raisons une seconde étape aura lieu, l'air est filtré par un tamis moléculaire rempli d'alumine et de zéolithe (épuration par adsorption) ; afin d'accélérer cette opération, deux tamis fonctionnent en alternance, pendant que l'un est utilisé, l'autre est régénéré.

d) Le refroidissement de l'air

La troisième étape dans la séparation cryogénique d'air est le transfert de la chaleur additionnelle (refroidissement de l'air), il se fait dans des échangeurs de chaleur à contre courant, dans l'échangeur de chaleur **l'air est refroidi près du point de condensation** par les gaz séparés froids, qui viennent de la colonne de distillation. Si un convenablement et assez grand échangeur de

Chapitre III : Séparation cryogénique de l'Air

chaleur est employé les gaz froids peuvent être chauffés à une température juste sous de celle d'air entrant, de sorte que les pertes froides deviennent acceptables.

Le refroidissement est habituellement fait dans les échangeurs de chaleur en aluminium soudés, ils laissent l'échange thermique entre l'alimentation entrante d'air et les produits froids (les jets de gaz résiduel quitte le procédé de séparation d'air).

Le refroidissement est réalisé au moyen d'échange thermique interne, dans lequel les écoulements du gaz froids qui ont été produits pendant le processus de refroidissement de l'air comprimé.

La réduction rapide de la pression fait alors refroidir l'air comprimé à des températures beaucoup plus basses, par lequel elle subisse la liquéfaction partielle. A des telles conditions l'air sera prêt pour être séparé dans la colonne de séparation, où la séparation réelle aura lieu. [18]

e) La liquéfaction de l'air et la production du froid

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

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

Ce froid est produit dans un cycle continu (réutilisation) en comprimant, en refroidissant et par expansion de l'azote à son état liquide. C'est une réutilisation parce que le gaz qui ne se condense pas est réchauffé et alimenté de nouveau au compresseur encore. [18]

f) La distillation et la séparation

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

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

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

L'air devenu liquide est remonté dans une colonne de distillation pour séparation de l'azote, qui est le gaz qui se liquéfie à la température la plus basse pour une pression donnée, dans la

Chapitre III : Séparation cryogénique de l'Air

colonne de distillation, ce gaz est dans des conditions ne lui permettant pas de rester liquide, l'azote redevient donc gazeux et remonte la colonne de distillation.

Cette loi physique a pour conséquence une accumulation d'azote pur en tête des colonnes.

Un circuit complémentaire constitué d'un compresseur et de turbines de détente permet de liquéfier l'azote gazeux accumulé en tête de colonne, à ce moment là, la pureté de l'azote est de 99,95%.

Dans le bas de la colonne, il reste un « liquide riche » à forte teneur en oxygène et argon. Ce liquide passe dans une colonne basse pression qui présente des conditions pression /température différentes.

Dans cette colonne, les résidus d'azote sont évacués ; après cette seconde distillation l'oxygène est pur à 99,6%. Le troisième constituant de l'air – argon – est faiblement représenté, mais il est séparé « piégé » dans les colonnes additionnelles et implique quelques étapes supplémentaires dans le processus. [18]

Remarques importantes sur la séparation par distillation de l'air

- 1- Les usines qui produisent l'oxygène, l'azote ou autre gaz cryogénique avec une grande pureté exigent plus d'étapes de distillation.
- 2- Les usines qui produisent l'azote peuvent avoir une ou deux colonnes, l'argon a un point d'ébullition semblable à celui de l'oxygène et il reste avec l'oxygène.
- 3- Si cependant l'oxygène de grande pureté est nécessaire, il est nécessaire pour cela à un point intermédiaire que l'argon doit être enlevé du système de distillation.
- 4- L'évaporation et la condensation continues ont provoquées par l'échange intense de la matière et la chaleur (c'est le rôle des condenseurs et les rebouilleurs de la colonne) entre la vapeur augmenté et le liquide descendant produit l'azote pur au dessus de la colonne à basse pression et de l'oxygène pur au fond.
- 5- Dans les installations de la cryogénique des gaz, des équipements divers sont utilisés comme les colonnes, les échangeurs de chaleur, les interconnexions et les pièces de l'équipement de production froid ...etc. Ceux qui fonctionnent aux températures très basses et par conséquent doit être bien isolés afin d'obtenir une perte froide acceptable. Ces équipements sont localisés à l'intérieur « des boîtes a froid (cold box)», ces boîtes froides ont des grandes structures avec la section transversale ronde ou rectangulaire, selon le type, la taille et la capacité de l'usine, les boîtes froides peuvent avoir une taille de 15 à 60 mètres et 2 à 4 mètres de côté. [18]

III.4 Cycle de Linde pour la liquéfaction de l'air

III.4.1 Principe et fonctionnement

A la fin du 1800's, **Karl Von Linde** en Allemagne était le premier qui a commencé la production industrielle des gaz d'air. Son invention comme nous avons vu, était la double colonne et le procédé qui porte son nom pour la liquéfaction de l'air. Voir la figure III.3 le processus de Linde pour l'air liquide.

Il a utilisé un compresseur à une pression de 200 bar, un échangeur de chaleur, une valve d'expansion et un réservoir de collection pour l'air liquide [18].

L'échangeur de chaleur était fabriqué par des tubes de cuivre épais, qui ont été enveloppés dans les spirales autour d'une pipe, et l'ensemble qui est couvert par une plus grande pipe.

L'air à haute pression est passé par les tubes de cuivre et l'air détendu ou bien après son expansion passe sur l'extérieur. L'air est comprimé dans le compresseur de piston à la 200 bar et refroidi avec de l'eau à +20° C et séché. Si cet air va directement à une valve d'expansion, sa température devient -16° C à la pression de sortie de 1 bar.

Maintenant l'air est introduit dans un échangeur de chaleur et vient au début à +20° C avant la valve d'expansion. Car aucun liquide ne se forme, tout l'air est alimenté à -16° C de nouveau à l'échangeur de chaleur.

Commence alors à refroidir l'air à haute pression par l'air de basse pression, qui est lui-même chauffé vers le haut quelques degrés plus froid que +20° C.

Cette alimentation sera plus fraîche avant la valve et donc encore plus froide après.

Le refroidissement continue jusqu'à ce que le point de condensation d'air -191° C soit atteint.

Alors les premières gouttes d'air liquide commencent à se former et elles restent dans le réservoir de collection.

Maintenant le processus entre dans une stable production et en continue et le liquide peut être envoyé à une colonne de distillation.

L'air de basse pression est sec donc s'il est renvoyé au compresseur, un dessiccateur de petite dimension peut être prévu.

On peut facilement dire que le froid est produit dans la valve d'expansion, car la température descend là, mais ce n'est pas le cas. Une valve ne peut pas ajouter ni emporter la chaleur.

La production du froid est effectuée au compresseur avec le refroidissement suivant, qui enlève la chaleur de l'air.

Ce processus n'est pas aussi efficace, seulement environ 10 % d'air comprimé devient liquide.

Le reste d'air est employé pour le refroidissement dans l'échangeur de chaleur.

Chapitre III : Séparation cryogénique de l'Air

Pendant que le reste de l'air est comprimé à 200 bar et ceci exige beaucoup d'énergie, la consommation d'énergie pour la production du liquide est relativement grande : 3.4 KWH/Nm³. Une petite amélioration est d'installer une machine de réfrigération qui refroidit l'air de -20 à -40°C. Un tel processus est également montré sur le schéma de (la figure III-5).

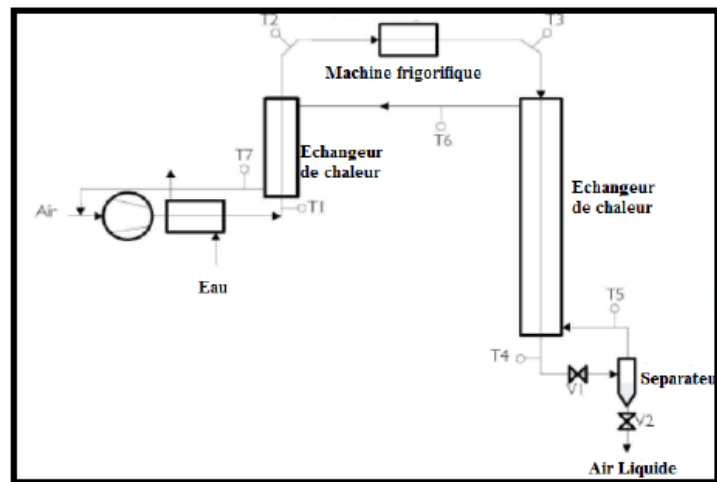


Figure III-4 : procédé du Linde pour l'air liquide [18].

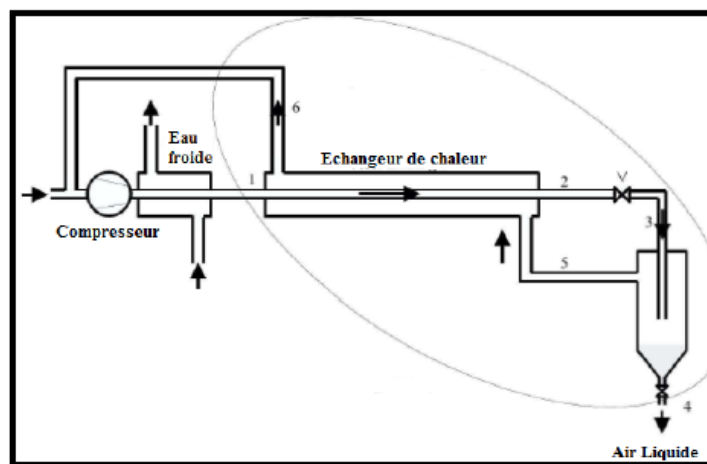


Figure III-5 : production de froid à l'aide d'une valve d'expansion [18].

III.4.2 Techniques générales utilisées pour la distillation

Comme nous avons vu avant, KARL VON LINDE dans son invention était la double colonne et le processus de fabrication de l'air liquide.

Alors il sera primordial de détailler le principe de fonctionnement de la colonne double mais aussi que la colonne de distillation normale ou classique.

a) La colonne de distillation normale [18]

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

- Rebouilleur au fond de la colonne pour produire la vapeur qui se lève dans la colonne
- Débouché ou une sortie pour le produit inférieur, en forme liquide
- Une certaine matière d'agrégation de colonne (ce qui forme les plateaux) de sorte que

la vapeur puisse entrer en contact intensif avec le liquide.

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

Voir le (la figure III-06 (a)) une colonne de distillation normale

b) Double colonne de LINDE (sans argon)

Dans la plupart des cas les usines des séparations d'air utilisent une combinaison de deux colonnes utilisées. C'était l'idée de KARL VON LINDE (Voir la figure III-6 (b)).

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

Le condensateur dans la colonne inférieure agit en tant que rebouilleur pour la colonne supérieure. De l'air est alimenté au fond de la colonne inférieure, normalement à une température qui est juste au-dessus du point de condensation. La vapeur se lève vers le haut de la colonne au condensateur et forme un reflux.

De l'air ne peut pas être chargé la forme liquide à cette colonne, car il ne contient pas un rebouilleur qui est exigé pour créer la vapeur.

Nous avons déjà vu qu'au dessus de la colonne, il y a d'azote pur car il a un point d'ébullition inférieur que l'oxygène. Le produit inférieur ne sera pas pur, toutefois comparé à l'air qui a été chargé, c'est des riches de l'oxygène car l'azote a été sorti en tant que produit supérieur. Le produit inférieur, connu sous le nom de « liquide riche », contient l'oxygène approximativement de 35- 40 %. Le liquide riche est alors alimenté à la pièce de centre de la colonne supérieure. Dans cette colonne il n'y a aucun condensateur, mais le reflux est pris du produit supérieur pur de la colonne inférieure. Au fond de la colonne, il y a un rebouilleur, qui est chauffé par l'azote condensé dans la colonne inférieure. Là, la colonne supérieure peut également distiller le reste du liquide riche en oxygène et

Chapitre III : Séparation cryogénique de l'Air

autre, et nous pouvons avoir l'oxygène pur au fond, car l'oxygène a un point d'ébullition plus élevé que l'azote.

Pour pouvoir sortir le produit liquide, le froid (ou un certain liquide) doit être fourni. Ceci est habituellement effectué en prenant Nitrogène gazeux à partir du dessus de la colonne inférieure au réutilise, où l'azote liquide est produit et alimenté de nouveau au même lieu dans la colonne inférieure.

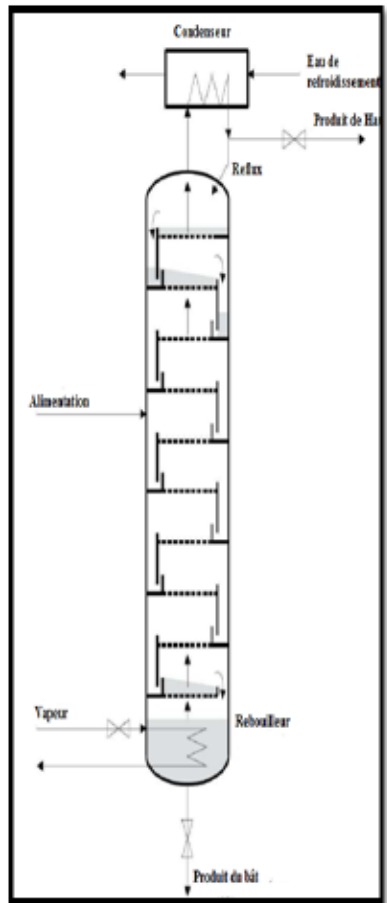


Figure III-6 (a) : Une colonne de distillation Normale. [18].

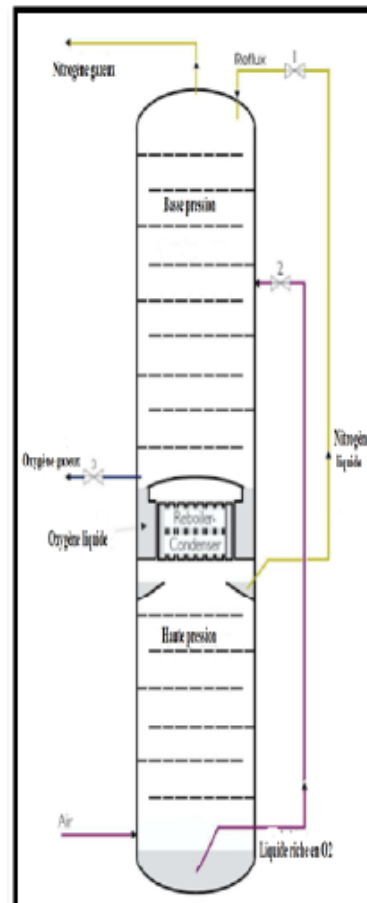


Figure III-6 (b) : Double colonne de Linde (sans argon). [18].

II.4.2.1 Avantage compétitif :

1. Aucune perte de gaz et rendement élevé.
2. Très simple et sûr pour fonctionner.
3. Consommation de puissance faible.
4. Basse pression d'utilisation.
5. Bas frais d'exploitation.
6. Coût de maintenance à prix réduit.
7. La durée a lieu sur 20 ans.
8. Machine disponible pour entretenir des machines à l'étranger.

9. Toutes les usines de gaz et de liquide sont optimisées pour répondre à des exigences client-spécifiques de site [19]

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

III.5.1 Compresseurs cryogéniques

Les compresseurs cryogéniques peuvent être volumétriques (alternatifs ou rotatifs) ou à impulsion (centrifuges) deux contraintes sévères il faut faire le bon choix d'un type par rapport à un autre

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

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

Une compression isotherme, ce type de compresseur est très fiable (jusqu'à 40000 h sans entretien) car le nombre de pièces en mouvement est faible.

Le compresseur à vis doit être séparé dans un système de déshuilage, pour des débits volumétriques de fluides cryogéniques importants (jusqu'à 300 l/s) .On recommande

Les compresseurs centrifuges qui ont l'avantage de supporter les grandes vitesses (40000 à 100000 tr/min) et ne pas apporter de pollution. [3]

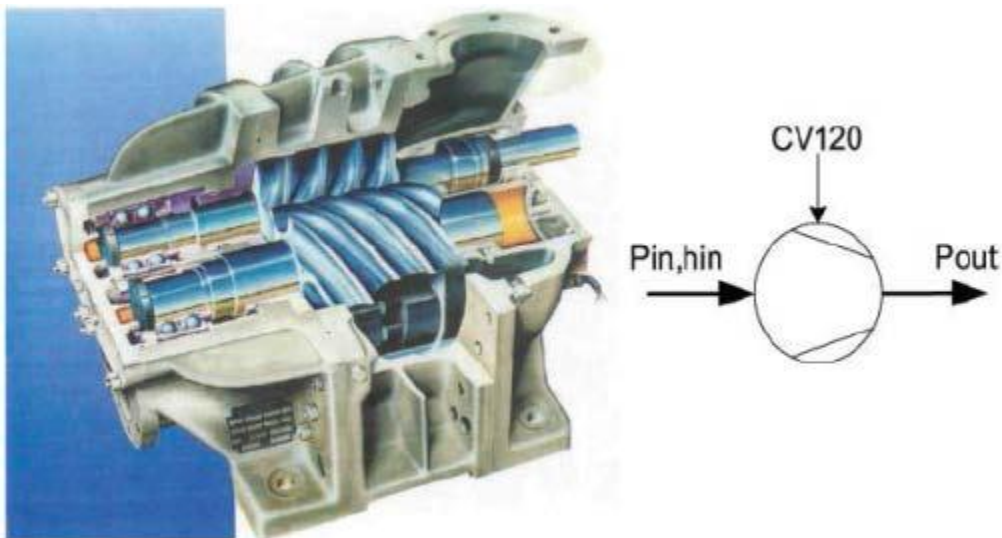


Figure III-7 : Un compresseur à vis lubrifié le schéma du modèle avec les conditions limite [18]

III.5.2 Les échangeurs

Mis à part les appareils de laboratoire, dont certains utilisent des échangeurs bobinés, les réfrigérateurs modernes sont construits avec des échangeurs à plaques ailettes en alliage d'aluminium, qui sont compacts et efficaces. [3] [20]

Il est constitué d'un empilement de plaques entre lesquelles circulent les deux fluides : par exemple le fluide chauffant dans les intervalles pairs et le fluide chauffé dans les intervalles impairs :[21]

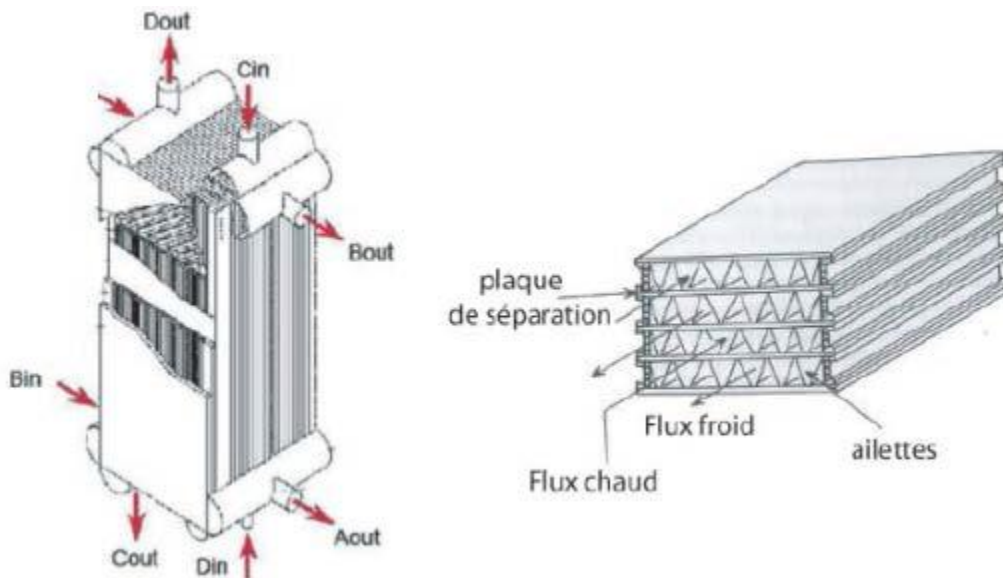


Figure III-8 : Schéma d'un échangeur à plaques et ailettes en aluminium. [3].

Ces tubes permettent d'améliorer le coefficient d'échange thermique

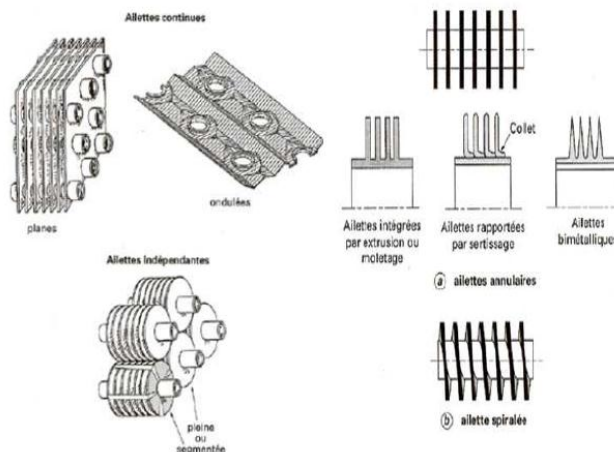


Figure III-9 Schéma d'un échangeur à ailette [21]

III.5.3 Les régénérateurs :

Le régénérateur est destiné à stocker momentanément la chaleur cédée par le fluide à haute pression s'écoulant de la température ambiante T_c à la température froide T_f avant de la restituer à ce fluide

Chapitre III : Séparation cryogénique de l'Air

repassant de T_f à T_c après détente. Il joue un rôle essentiel dans l'efficacité d'un Cryo-réfrigérateur à flux alterné, idéalement, ce régénérateur devrait avoir :

- Une capacité thermique infinie par rapport à celle du fluide cryogénique pour limiter ses oscillations en température, lors des alternances de flux.
- Une conduction thermique nulle longitudinalement pour empêcher les apports de chaleur parasite par conduction du bout chaud au bout froid.
- Une conduction thermique infinie dans le sens radial pour assurer une bonne diffusivité thermique lors des échangeurs ;
- Un volume mort minimal (c'est-à-dire une porosité faible) ;
- Une perte de charge minimale à l'écoulement du fluide cryogénique (transparence élevée) afin de limiter l'énergie de compression non utile au cycle. [3]

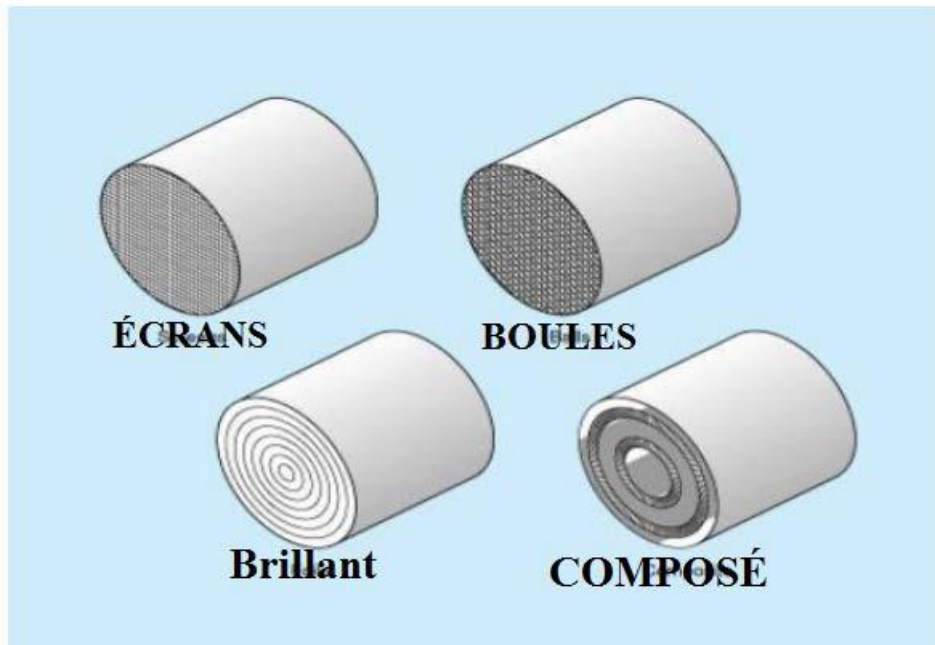


Figure III-10 : Les différents types de régénérateurs. [3]

a) les avantages :

Par les avantages de régénérateurs :

- maximiser la conduction au sein de la surface d'échange elle-même;
- minimiser les pertes de charges pour les deux fluides;
- assurer l'étanchéité des deux côtés;
- permettre la dilatation thermique différentielle de tous les composants;
- éviter l'encrassement de la surface d'échange et organiser son nettoyage éventuel;
- limiter la fatigue thermique éventuelle.[21]

III.5.4 Machines de détente cryogénique

a) Le détendeur alternatif

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



Figure III-11 : Détendeur alternatif de vapeur [22]

b) Les turbines à paliers à gaz hydrostatiques ou hydrodynamiques

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

Les paliers dynamiques, qui n'ont pas à être alimentés supportent mal les variations rapides des conditions de fonctionnement et ont une force de sustentation décroissante avec la vitesse de rotation.

La technologie actuelle des paliers à gaz est bien adaptée à la réfrigération. Les paliers statiques permettent d'atteindre des puissances extraites dans la gamme des 100 KW, autrefois réservée aux seules turbines à paliers à l'huile. [3]

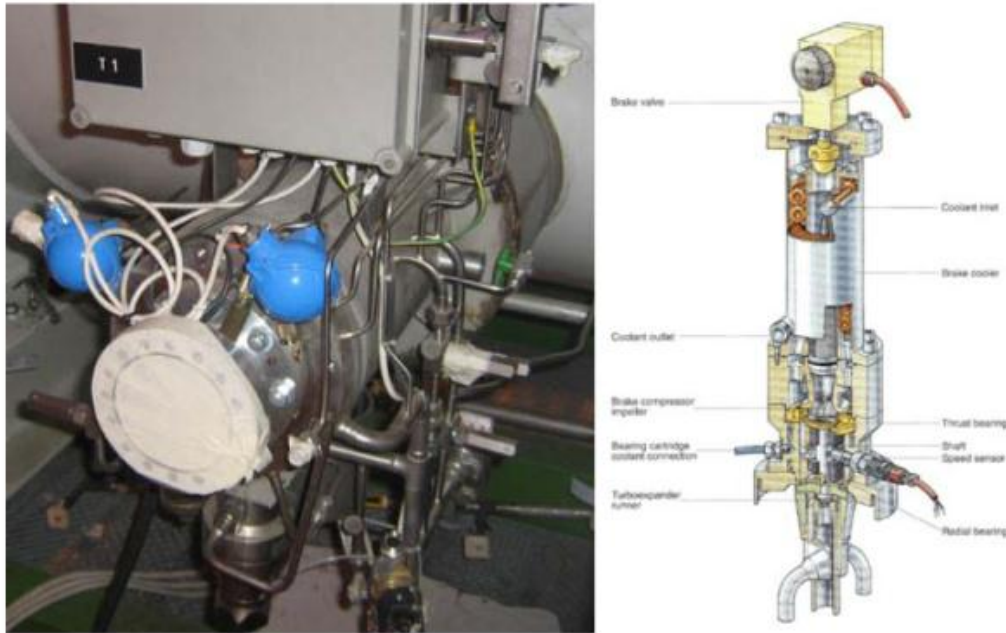


Figure III-12 : Une turbine à gaz cryogénique. [3]

III.5.5 Autres composants

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

- Les vannes cryogéniques.
- Les adsorbants : il est possible que, pendant de longues périodes de fonctionnement, des fuites se déclarent. Les quantités d'impuretés, même à des concentrations très faibles peuvent alors provoquer le bouchage des circuits. Pour pallier cet inconvénient, une capacité remplie de matériau adsorbant est intercalée dans le circuit haute pression à une température permettant de piéger les impuretés.[3]

Conclusion : Donc à partir de ce chapitre on conclue qu'on va baser sur le cycle de Linde dans notre travail pour obtenir des meilleurs résultats.

CHAPITRE IV :

PARTIE PRATIQUE

IV.1 Thermodynamique de la séparation de l'air

L'équation générale d'équilibre de phase qui décrit la distribution d'une composante en phase vapeur et liquide est donnée par:

$$Y_i = K_i X_i \dots\dots\dots (IV.1)$$

Pour les systèmes Azote et Oxygène, l'équation d'état de **Peng-Robinson** est généralement utilisée pour calculer le coefficient d'équilibre **k_{ij}**.

L'équation standard de Peng - Robinson est la formulation originale d'équation d'état Peng de Robinson avec la fonction alpha standard.

Il est recommandé pour applications de traitement des hydrocarbures telles que le traitement du gaz, la raffinerie et les processus de pétrochimie. Ses résultats sont comparables à la norme équation d'état **Redlich - Kwong - Soave**.

L'équation de ce modèle est :

$$P = \frac{RT}{vm-b} - \frac{a}{vm(vm+b)+b(vm-b)} \dots\dots\dots (IV.2)$$

Lorsque :

$$b = \sum_i X_i b_i \dots\dots\dots (IV.3)$$

$$a = \sum_i \sum_j x_i x_j (a_i a_j)^{0.5} (1 - k_{ij}) \dots\dots\dots (IV.4)$$

$$a_i = f_{cn}(T, T_{ci}, P_{ci}, w_i) \dots\dots\dots (IV.5)$$

$$b_i = f_{cn}(T_{ci}, P_{ci}) \dots\dots\dots (IV.6)$$

$$k_{ij} = k_{ij}^{(1)} + k_{ij}^{(2)} T + \frac{k_{ij}^{(3)}}{T} \dots\dots\dots (IV.7)$$

Le modèle possède des codes d'option qui peuvent être utilisés pour personnaliser le modèle en sélectionnant de différente fonction alpha et autres options du modèle.

Pour avoir de meilleurs résultats, le paramètre binaire k_{ij} doit être déterminé à partir de la régression des données d'équilibre de phase telles que les données VLE.

Aspen PPS (Physical Property System) a également intégré le k_{ij} pour un grand nombre de paires de composants dans le système.

Dans la base des données EOS-LIT. Ces paramètres sont utilisés automatiquement avec la propriété de la méthode PENG-ROB. Les valeurs de la base des données peuvent être différentes de celles utilisées avec d'autres modèles tels que Soave - Redlich - Kwong ou Redlich - Kwong - Soave, et cela peut produire des résultats différents.

En utilisant l'équation d'état de Peng- Robinson, les diagrammes isobare T, XY et X, Y de N_2 - O_2 et les systèmes binaires Ar - O_2 à différentes pressions ont été calculés à

IV.1.a- P= 1 atm :

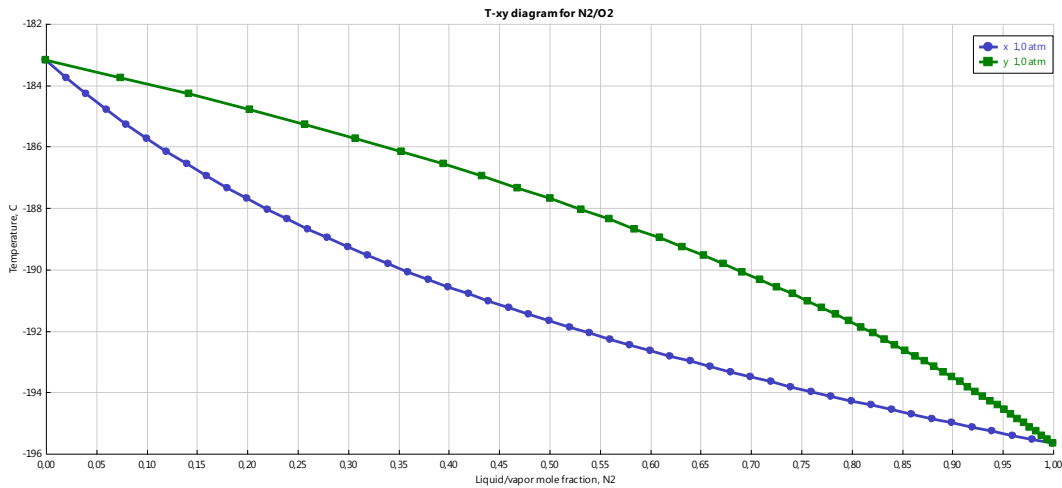


Figure IV.1 : T, X, Y diagramme, $N_2 - O_2$

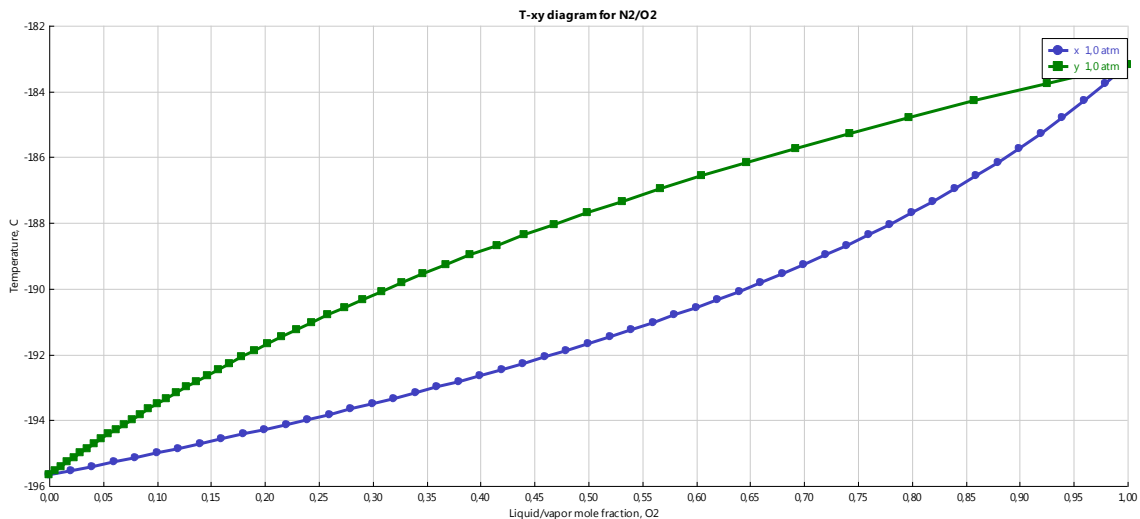


Figure IV.2 : T, X, Y diagramme, $O_2 - N_2$

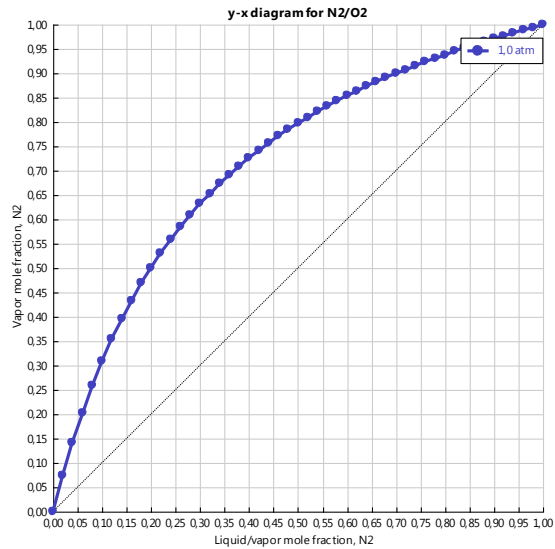


Figure IV.3 : X, Y diagramme $N_2 - O_2$

IV.1.b- P= 2 atm

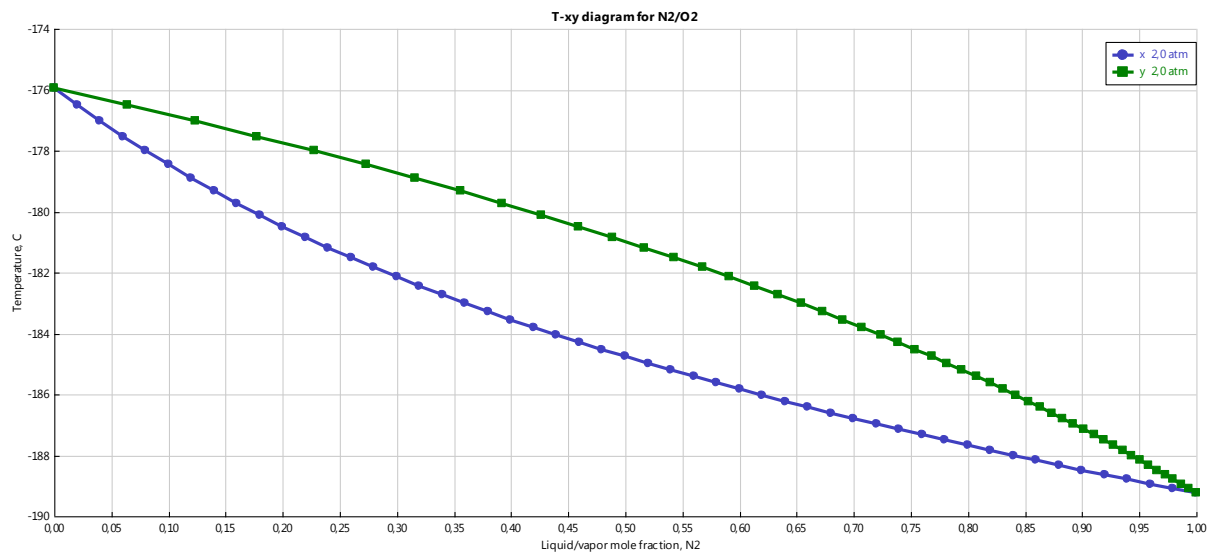


Figure IV.4 : T, X, Y diagramme, $N_2 - O_2$ à P=2 atm

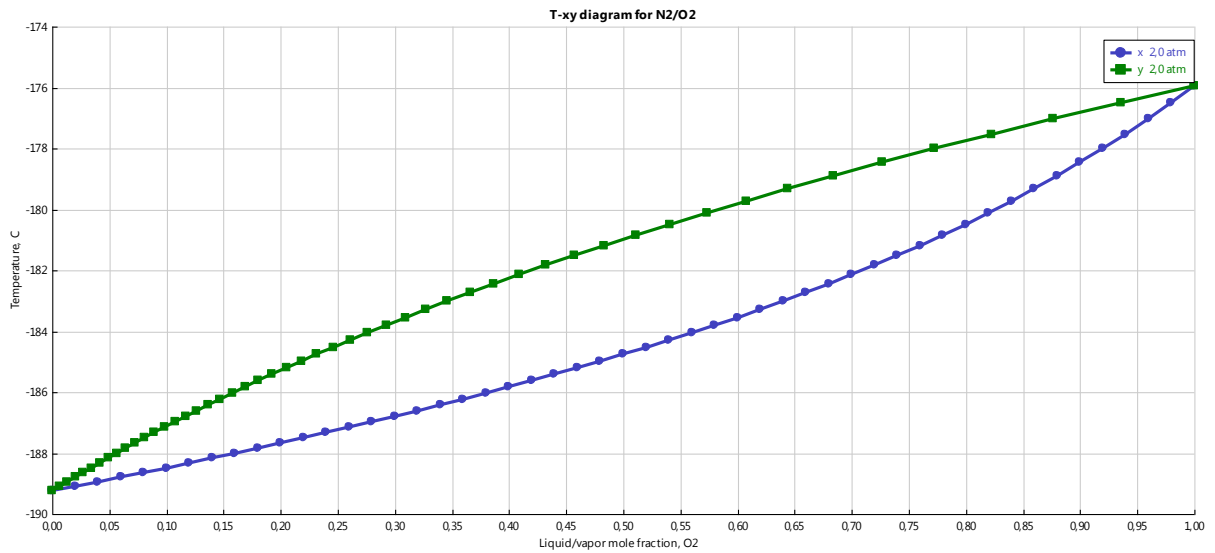


Figure IV.5 : T, X, Y diagramme, O₂ à P=2 atm

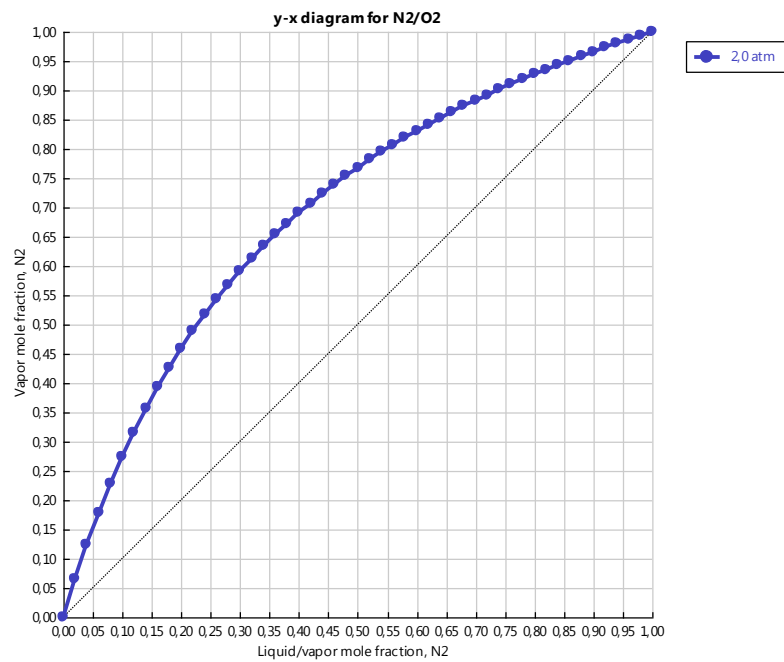


Figure IV.6: diagramme X,Y,N₂- O₂ à P=2 atm

IV.1.C- Oxygène, Argon P= 1.5 atm

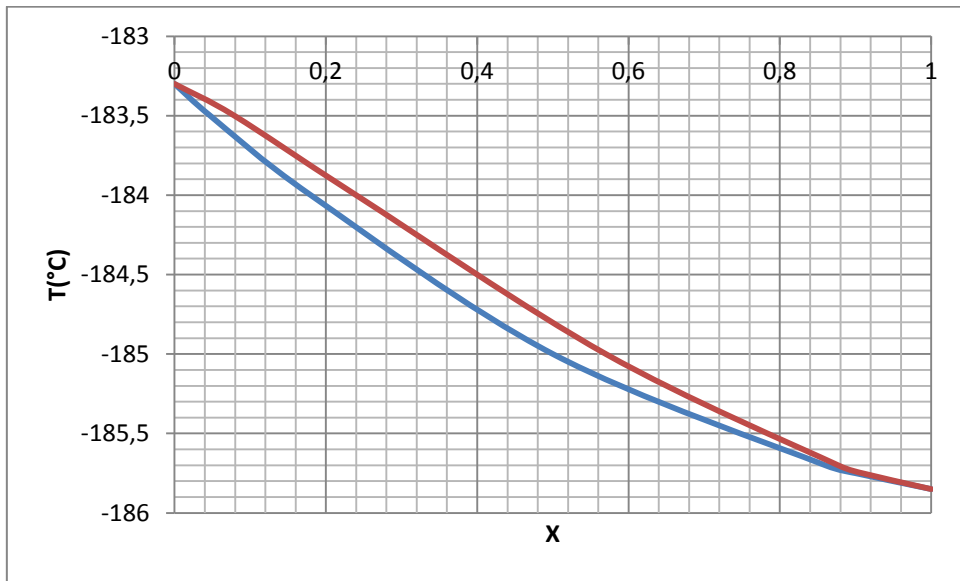


Figure IV.7 : diagramme T, X, Y, Ar- O₂ à P=1.5 atm

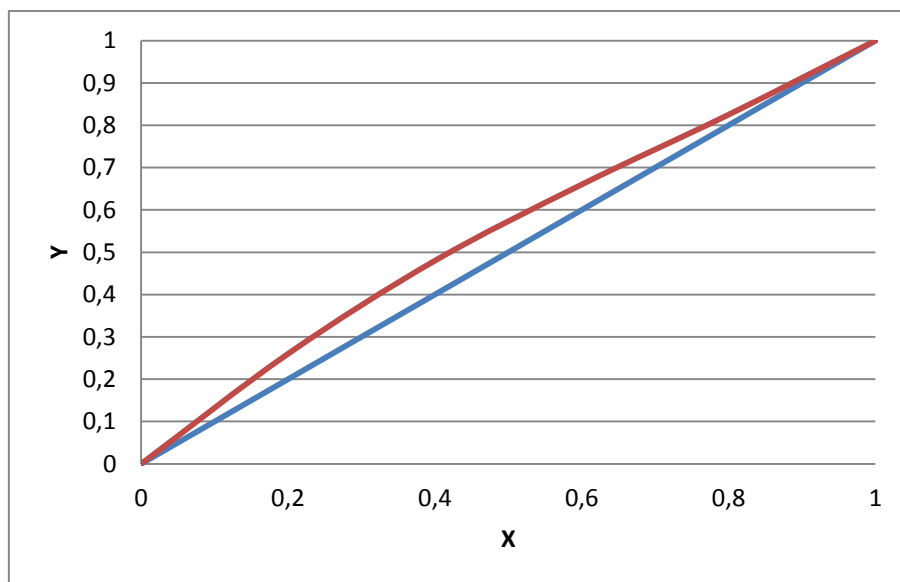


Figure IV.8 : diagramme X, Y, Ar- O₂ à P=1.5 atm

IV.1.d- P= 5 atm

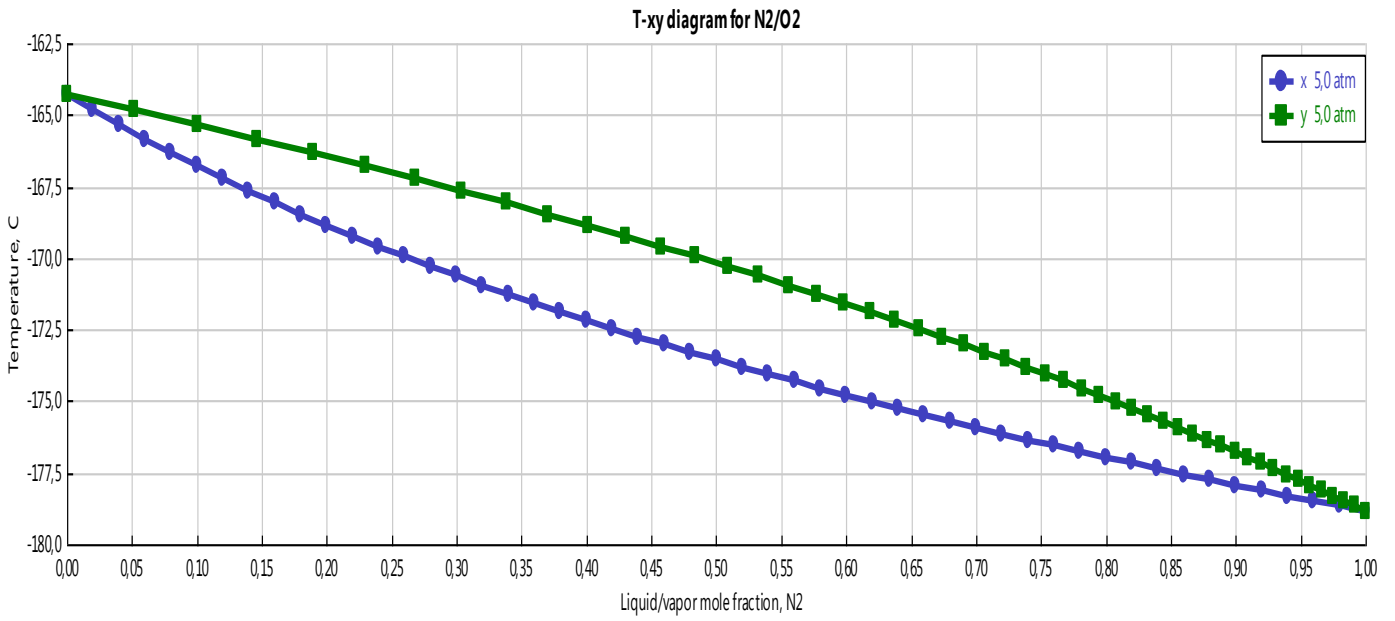


Figure IV.9 : diagramme T,X,Y- ,N₂-O₂ à P=5 atm

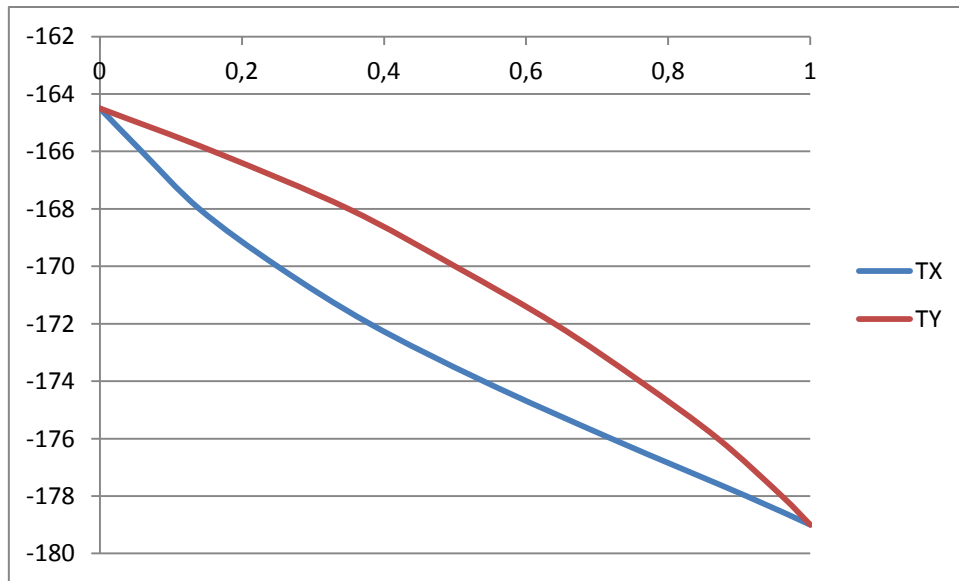


Figure IV.10 : diagramme T,X,Y- ,N₂-O₂

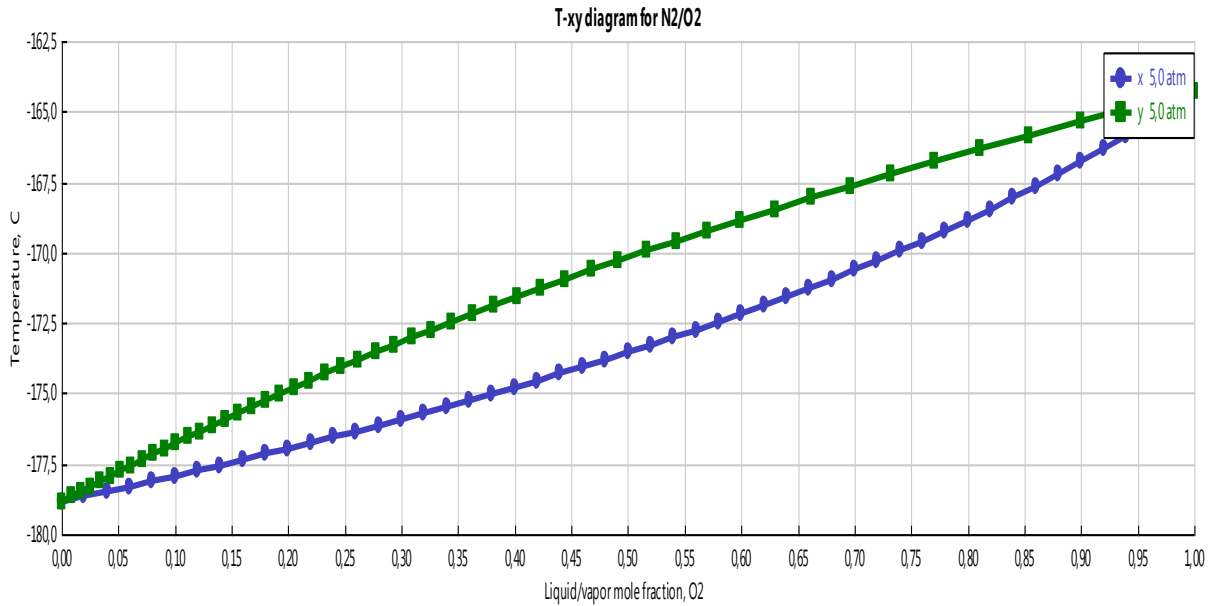


Figure IV.11 : diagramme T,X,Y- ,N₂-O₂ à P=5 atm

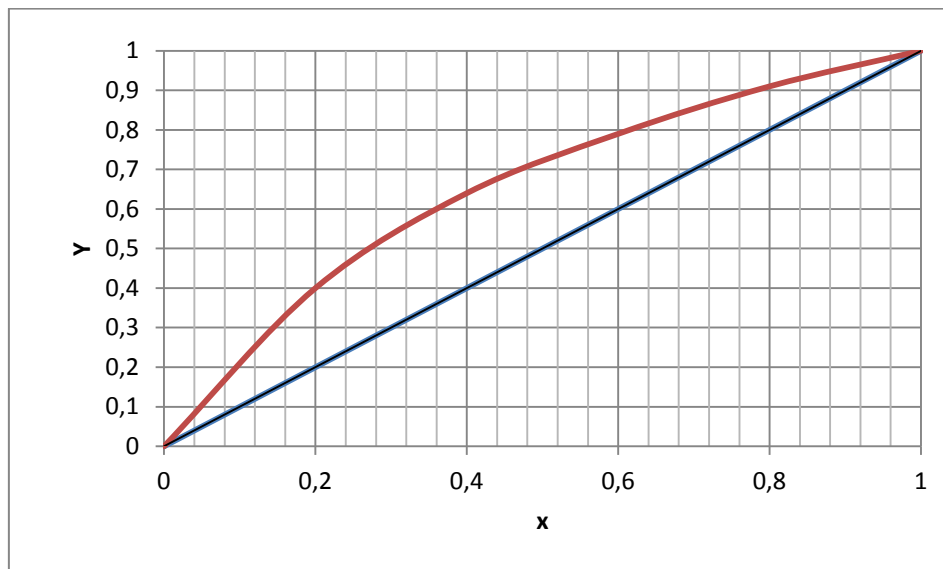


Figure IV.12 : diagramme X, Y, N₂ – O₂ à P=5 atm par excel

A partir de ces diagrammes et comme il est clair dans les diagrammes d'équilibre de phase isobare, on remarque que la volatilité relative de N₂ par rapport O₂ est faible, cela signifie que la séparation de N₂ et d'O₂ n'est pas très difficile.

Mais la volatilité relative de l' Ar avec O₂ est très lente par rapport au nitrogène. Pour cette raison ,la séparation de ces composants, nous avons besoin d'un grand nombre d'étages (plateaux) théoriques et un taux de reflux élevés.

IV.2 Calcul de la distillation de l'air par la méthode McCabe-Thièle :

Système de bilan matière:

La quantité d'oxygène et d'azote à l'intérieur la plante est égale à la quantité de ces gaz qui sont à l'extérieur par production de la plante.

Si nous connaissons la concentration de produit oxygène et azote, nous pouvons connaître la quantité d'eux par équation du bilan matière.

Nous considérons que 200 mol / s d'une bulle d'air composée de 79 mol% N₂ et 21 mol% l'O₂ est distillé en continu dans une colonne de distillation à une pression de 5 atmosphère.

Le distillat contient 98.5% en mole de constituants légers et 99% en bas de constituant lourds.

Le taux de reflux est égal à 1.5 fois le taux de reflux minimum.

- Ce qui suit décrira le calcul de:

Nombre d'étages théoriques et l'emplacement optimal des étages d'alimentation.

Avec :

Les valeurs remarquables de q sont :

- alimentation en liquide froid : $q < 0$
- alimentation en liquide bouillant $q = 0$
- alimentation partiellement vaporisé : $0 < q < 1$
- alimentation en vapeur sature : $q = 1$
- alimentation en vapeur surchauffée $q > 1$.

[23]

Données :

X	Y
0	0
0.0479042	0.1167660
0.0928144	0.2185630
0.140719	0.302395
0.191617	0.386228
0.287425	0.517964
0.332335	0.568862
0.383234	0.619760
0.428144	0.664671
0.473054	0.700599
0.535928	0.751497
0.580838	0.781437
0.631737	0.814371
0.721739	0.867391
0.797826	0.908696
0.830435	0.926087
0.91087	0.963043
0.956522	0.982609
1	1

Tableau IV.1 tableau des données obtenues par aspen plus à la pression 5 atm

$$X_{fN_2} = 0.79 \quad q = 1$$

$$X_{fO_2} = 0.21 \quad T = T_{eb} = -196^\circ\text{C}$$

$$X_{DN_2} = 0.985 \quad N_f = 720 \text{ kmol/h}$$

$$X_{WN_2} = 0.015$$

$$M_{N_2} = 28 \frac{\text{Kg}}{\text{kmol}}$$

$$M_{O_2} = 32 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

IV.2.1 Schéma de la colonne

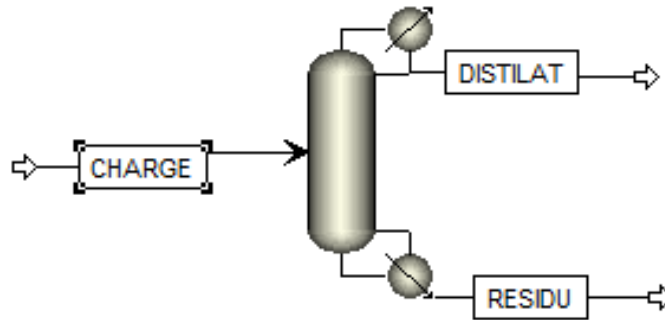


Figure IV.13 : Colonne de distillation en Aspen plus

IV.2.1.2 Bilan de matière globale

$$n_f = n_D + n_w \dots \dots \dots (IV.8)$$

4.2.1.3 Bilan de matière partielle :

$$n_f x_f = x_D n_D + x_w n_w \dots \dots \dots (IV.9)$$

Simplification de x_f en fonction de x_D et x_w

$$n_f x_f = x_D n_D + (n_f - n_D) x_w = x_D n_D + x_w n_f - x_w n_D \dots \dots \dots (IV.10)$$

$$n_D = n_f \frac{x_f - x_w}{x_D - x_w} \dots \dots \dots (IV.11)$$

$$n_D = 575.257 \frac{kmol}{h}$$

$$n_w = 720 - 575.257$$

$$n_w = 144.743 \frac{kmol}{h}$$

IV.2.2 Préparation de diagramme XY

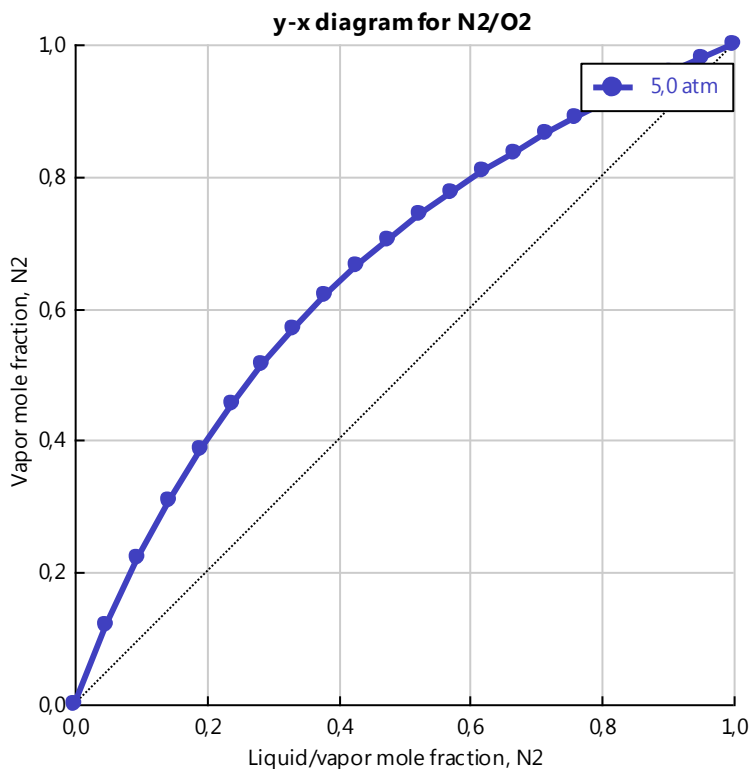


Figure IV.14 : diagramme X,Y N₂-O₂ a P=5 atm

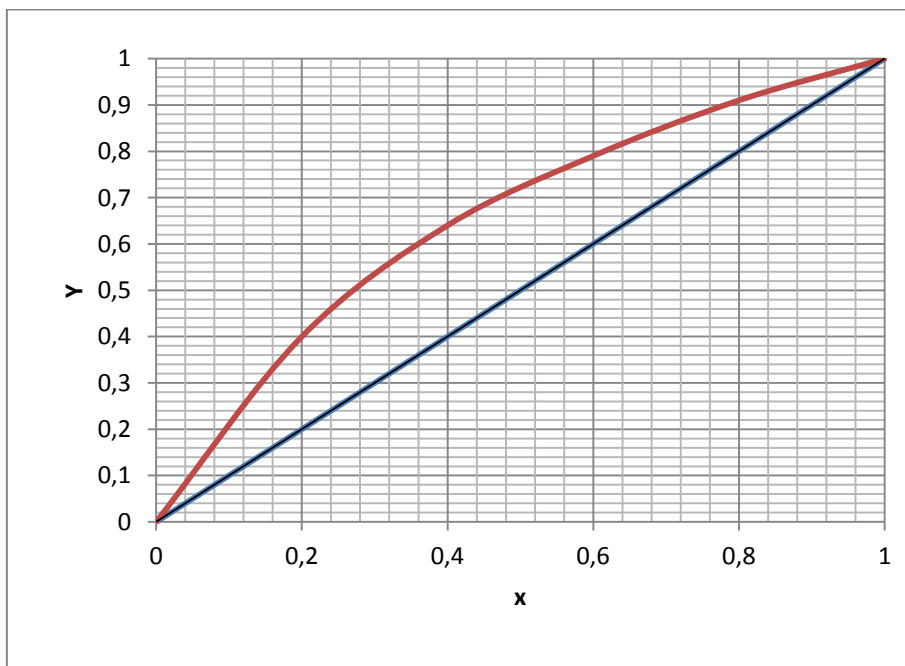


Figure IV.15 : diagramme X, Y à P=5 atm par excellence

IV.2.3 Sélectionne sur le diagramme les points F, W et D

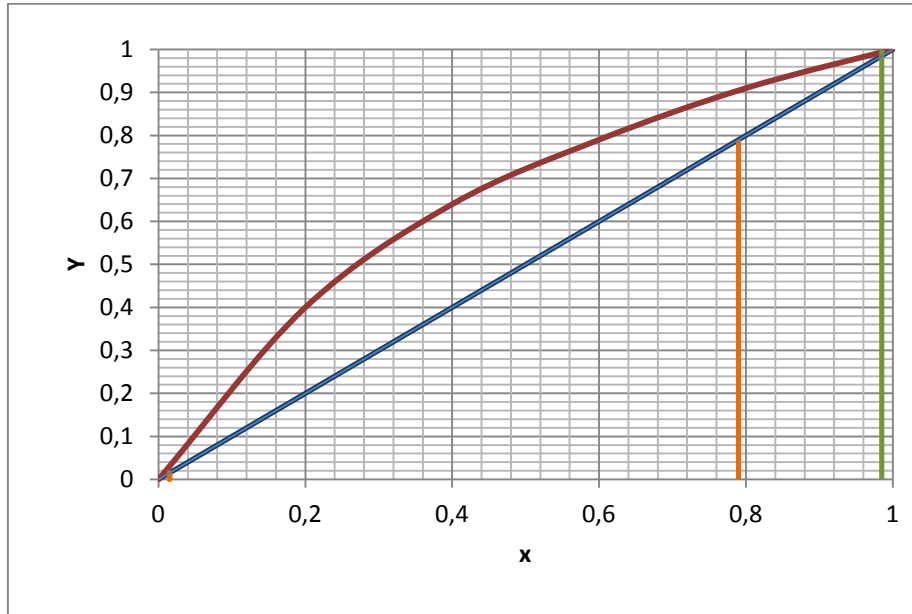


Figure IV.16 : diagramme X, Y identifier les points X_D , X_W , F

IV.2.4 Trace la ligne de la droite opératoire q

La ligne q est une interprétation graphique du bilan matière de l'étape d'alimentation; q représente la quantité de liquide qui s'accumule au stade de l'alimentation en nourrissant 1 kmol de l'aliment.

L'équation de q :

$$n_v = n_L + n_D$$

$$n_v y_i = n_L x_L + n_D x_D$$

$$y_i = \frac{n_L x_i}{n_v} + \frac{n_D x_D}{n_v}$$

$$y_i = \frac{R n_D}{(R + 1)} x_i + \frac{n_D}{(R + 1)} x_D$$

$$y_i = \frac{q}{(q + 1)} x_i + \frac{x_f}{(q + 1)}$$

Pour un liquide brouille la position de $q = 1$ donc $\tan \alpha = \frac{q}{(q+1)} = \frac{\infty}{\infty} = \infty$ donc $\alpha = 90^\circ$

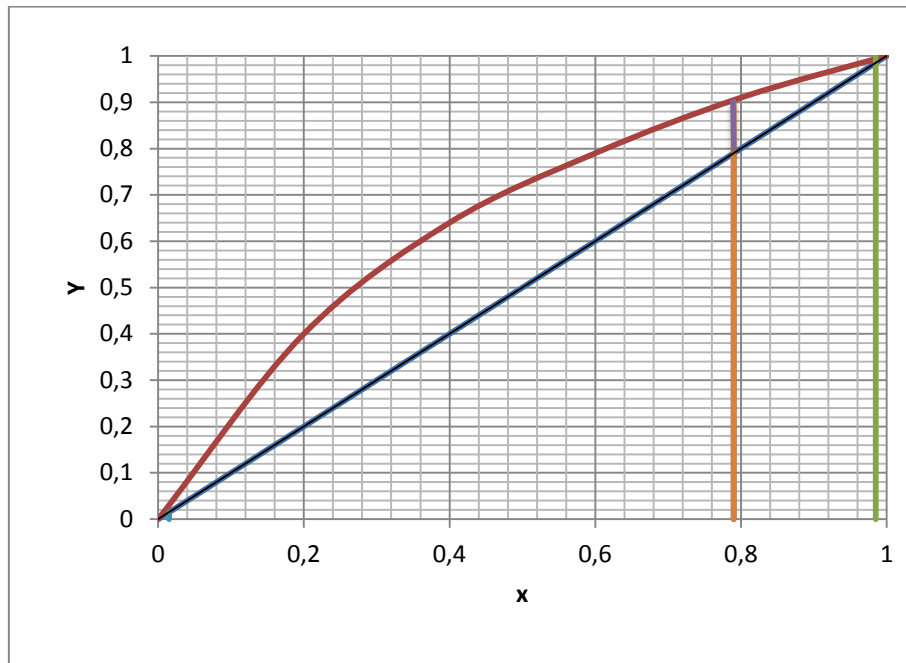


Figure IV.17 : diagramme X, Y identifier les points X_D , X_W , F et q

IV.2.5 Calcul de taux de reflux minimal

Pour calculer le reflux minimal R_{min} La ligne d'opération dans la section de redressement de la colonne pour R_{min} doit être tracée.

$$Y = \frac{R_{min}}{(R_{min} + 1)} x + \frac{x_D}{(R_{min} + 1)}$$

Nous avons deux points de cette ligne dont l'un est l'intersection de la courbe d'équilibre q-line et un autre à l'intersection de la ligne x_D .

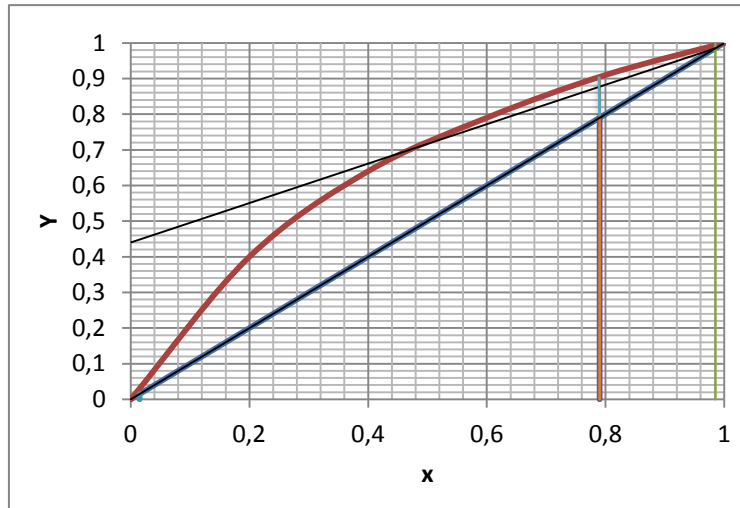


Figure IV.18 : diagramme X, Y identifier les points X_D , X_W , F

Le taux de reflux minimum peut être calculé à partir de la pente de cette ligne

$$R_{min} = \frac{x_D - y'}{y' - x'}$$

Ou de la section $\frac{x_D}{(R_{min}+1)}$ sur l'axe y pour $x=0$

$$\text{Donc } y = \frac{x_D}{(R_{min}+1)} = \mathbf{0.54} = \frac{\mathbf{0.985}}{(R_{min}+1)}$$

$$(R_{min} + 1) = (0.985)/(0.54)$$

$$R_{min} = \frac{0.985}{0.54} - 1$$

$$R_{min} = \frac{0.985}{0.54} - 1$$

$$R_{min} = \mathbf{0.824}$$

IV.2.6 Calculer le taux de reflux (R) en tant que $R = 1.5 R_{min}$

$$R = 1.5 R_{min}$$

$$R_{min} = \frac{x_D - y'}{y' - x'}$$

$$R = 1.5(0.824) = 1.2361$$

IV.2.7. Calcule la section $\frac{x_D}{(R_{min}+1)}$ sur l'axe y pour $x=0$

$$y = \frac{x_D}{(R_{min}+1)}$$

Donc

$$y = \frac{x_D}{(R_{min} + 1)} = \frac{0.985}{1.2361 + 1} = 0.44$$

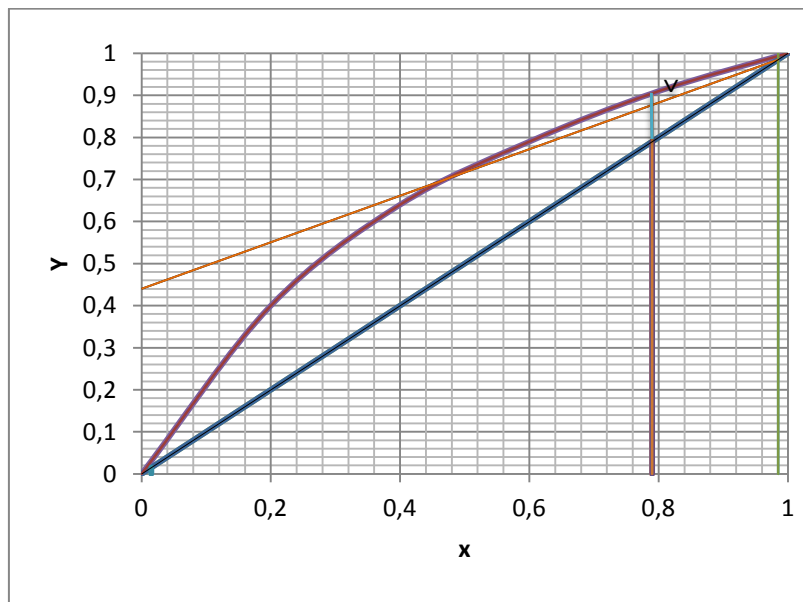


Figure19.IV : diagramme X, Y

L'intersection entre la droite opératoire d'épuisement et les autres lignes donne :

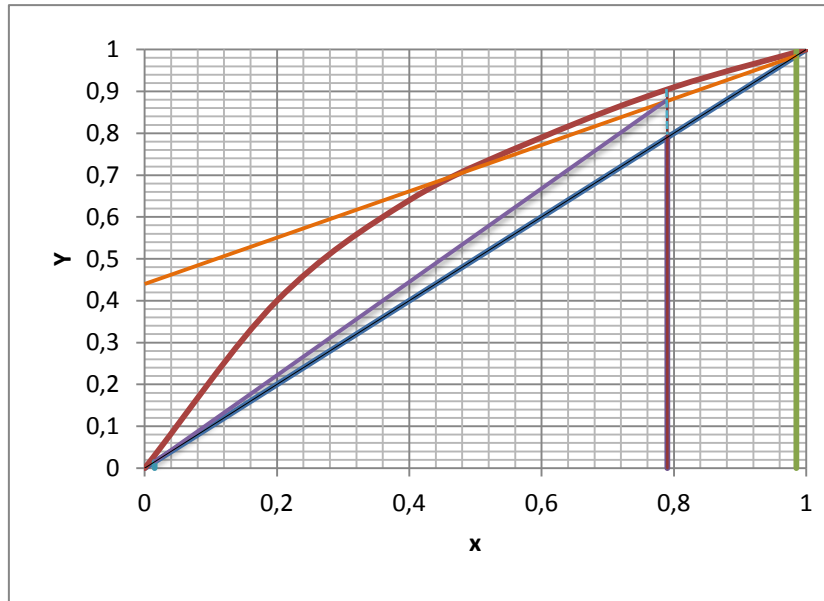


Figure IV.20 : diagramme X, Y identifier les différentes droites opératoires

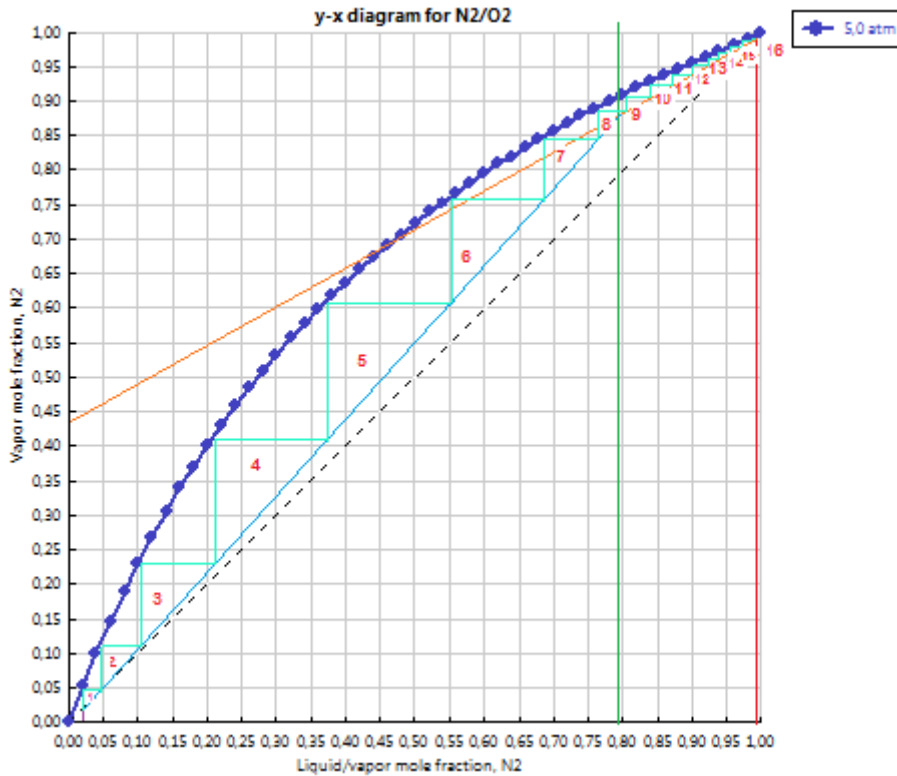


Figure IV.21 : Dessin des plateaux par la méthode McCabe-Thiele

IV.2.8 Nombre des plateaux et l'indification de plateau d'alimentation

D'après le graphe on remarque que le nombre des étages est 16 plateaux +1 (bouilleur) et le plateau d'alimentation est supposé sur le 8ème plateau, aussi d'après les deux graphes passés on remarque que il y a une relation entre la pression et le nombre des plateaux.

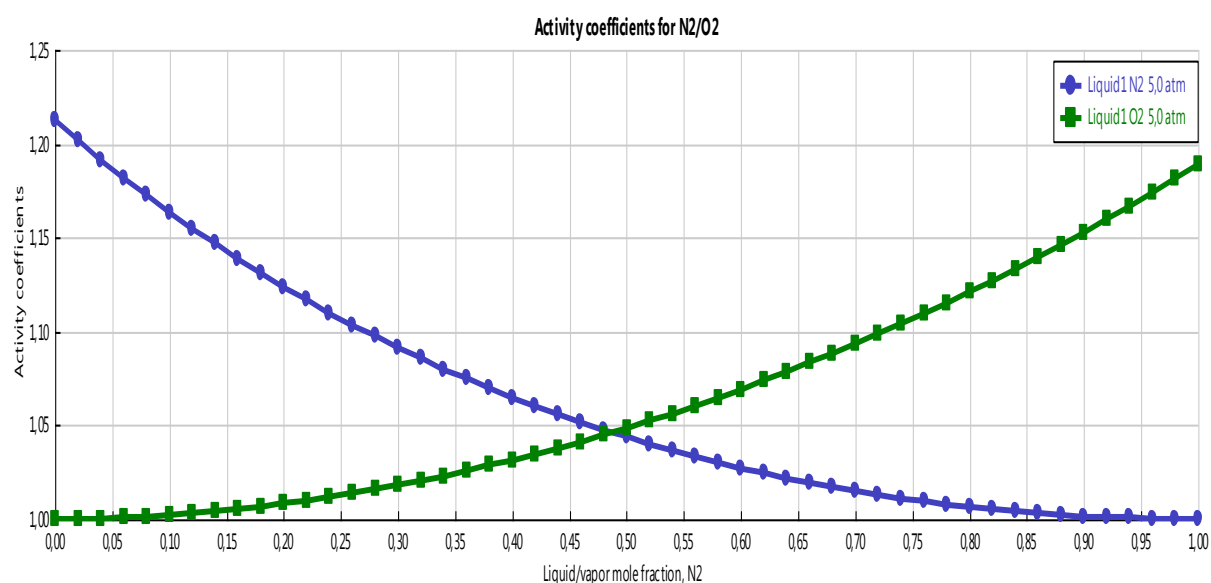


Figure IV.22 : Diagramme du coefficient d'activité N2-O2

IV.3 Résultat et discussion de la simulation

IV.3.1 Simulation de la séparation d'air

Les conditions initiales de la simulation :

La température ambiante	293	k
La pression ambiante	1	atm
La pression maximale de compression	200	atm
La charge molaire	720	kmol/hr
Approche de l'échangeur de chaleur	5	k
Température du ruisseau après avoir traversé la section de la bouilloire	93	k
La pression dans la colonne de distillation	1	atm
Le taux reflux	7.5	
Taux de distillat par rapport à l'alimentation	0.8	
Nombre d'étages	10	

Tableau IV.2 : tableau des données utilisées pendant la simulation

Les Hypothèses:

1. On suppose que : L'air est un mélange d'azote et d'oxygène uniquement, l'azote représentant 79% et l'oxygène représentant 21% en volume (sur base sèche) donc on néglige l'Argon (distillation à colonne unique) .
2. Il n'y a pas de chute de pression dans le compresseur, le refroidisseur et l'échangeur de chaleur (pour obtenir le produit liquide au niveau de la vanne).

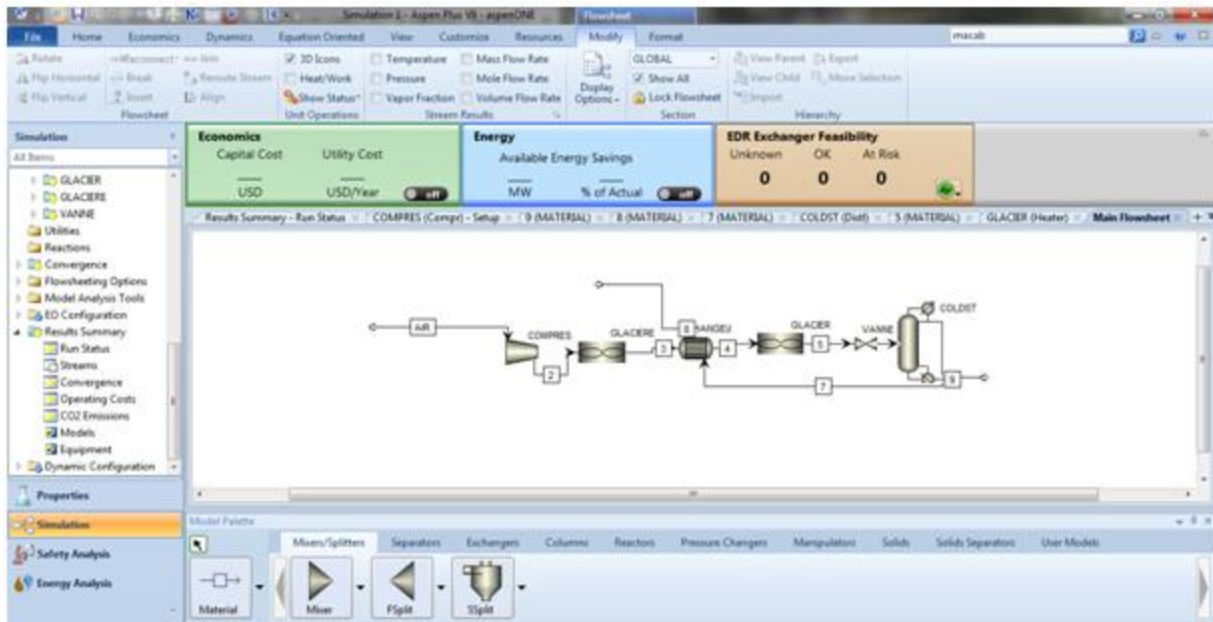


Figure VI.23: Schéma du procédé du système de séparation des gaz à colonne unique Linde (sans argon) .

IV.3.2 Description du schéma du procédé de séparation de l'air

Le système de séparation des gaz à une seule colonne (à colonne unique) de Linde basé essentiellement sur la compression isothermique . La première étape c'est que le bloc COMPRES (compresseur) prend en charge la compression, afin de nous assurer que nous avons une compression isothermique (à partir de régler les paramètres) un refroidisseur (aircooler) est ajouté après le bloc COMPRES et nommé bloc GLACIERE. Après cela, le refroidissement du flux est effectué à l'aide d'un échangeur de chaleur, qui est pris en charge par le bloc ECHANGEUR. Après cela, un refroidissement supplémentaire est effectué dans la partie cuve de la colonne de distillation, qui est prise en charge par le bloc GLACER. Après cela, le détenteur (bloc J-TVALVE) relâche la pression pour obtenir de l'air liquide. La séparation de l'air liquide en azote et en oxygène se produit dans le bloc COLDST.

L'air à la température ambiante est de 20 degré et à la pression atmosphérique, après la filtration du CO_2 , va compresser de 6 bar à 200 bar en plus il va purifier de et la vapeur d' H_2O (pour négliger la production de neige ou de glace dans l'étape de refroidissement) et le CO_2 aussi. L'air est refroidi jusqu'à -173°C (proche du point de liquéfaction d'air) après il va passer sur l'échangeur de chaleur qui va baisser la température encore une fois (car le distillat passe au niveau de l'échangeur pour profiter la basse température de nitrogène) après il va passer au niveau de refroidisseur qui va baisser la température environ 73 K et le trape de la vanne Joule-Thomson c'est qu'elle ne fonctionne plus sauf aux conditions données, la chute de

pression de 200 bar à 1 bar peut changer la nature physique de l'air de forme gaz à la forme liquide et la variance des températures d'ébullition nous permet d'utiliser la colonne de distillation pour séparer ces deux produits.

IV.3.3 Résultat de la simulation

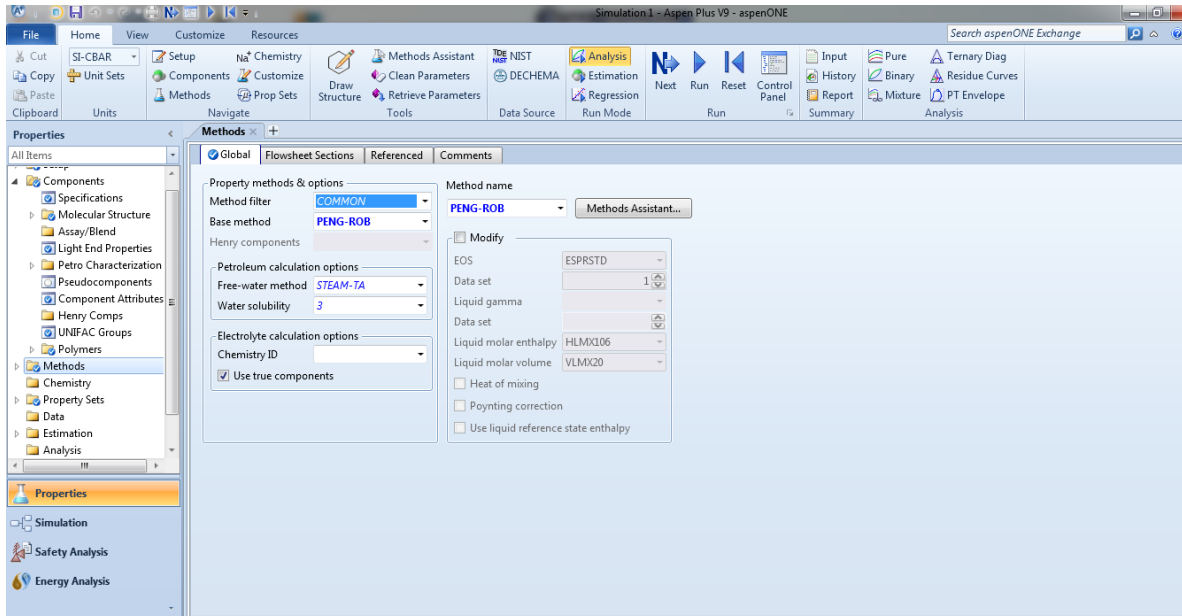


Figure IV.24 : la méthode et l'équation choisies sur logiciel aspen plus pour la simulation

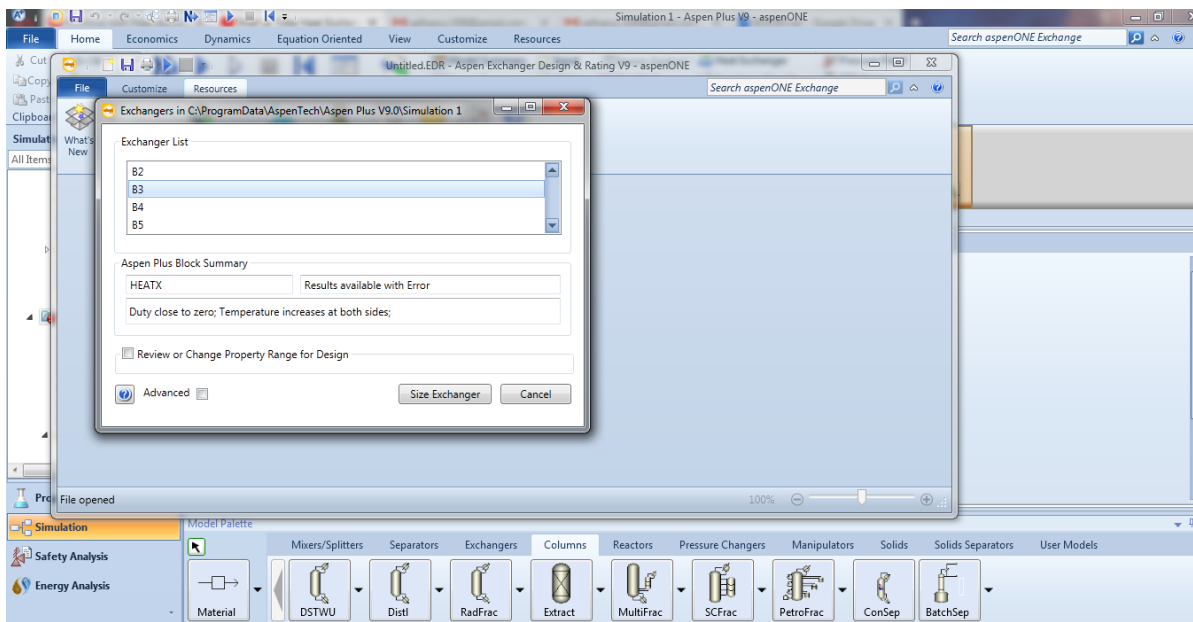


Figure IV.24.a : Configuration de désigne de l'échangeur

Chapitre IV : Partie pratique

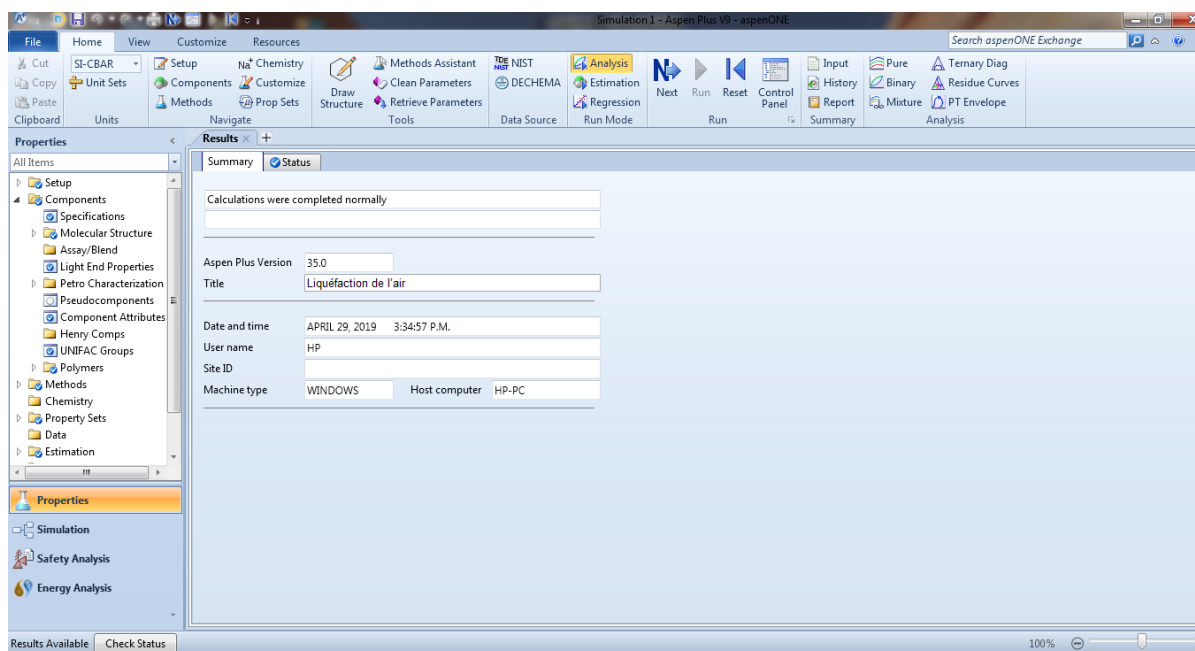


Figure IV.25 : exécution de la simulation

Liquéfaction de l'air										
Stream		AIR	AIRCMC	AIRCOM	AIRHX	AIRIDCO	BOTTOM	DISTHX	DSTILL	LIQAIR
From			GLACER	COMPRE	ECHANG	GLACIERE	COLDST	ECHANGE	COLDST	YANNE
To		COMPRE	YANNE	GLACIER	GLACER	ECHANG			ECHANGE	COLDST
Phase		VAPOR	VAPOR	VAPOR	VAPOR	VAPOR	LIQUID	VAPOR	LIQUID	MIXED
Substream:										
Mole	Kmol/h									
N2		568.8000	568.8000	568.8000	568.8000	568.8000	1.348183	567.45110	567.4511	568.8000
O2		151.2000	151.2000	151.2000	151.2000	151.2000	88.65182	62.54887	62.54887	151.2000
Ar		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Mole frac										
N2		0.7900	0.7900	0.7900	0.7900	0.7900	0,0145798	0,9013746	0,9015386	0.7900
O2		0.2100	0.2100	0.2100	0.2100	0.2100	0,9907744	0,0992538	0,0992019	0.2100
Ar		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Total	Kmol/hr	720.000	720.000	720.000	720.000	720.000	90.0000	630.0000	630.0000	720.000
Total	Kg/hr	20772.29	20772.290	20772.290	20772.290	20772.290	28745.5190	17897.7700	17897.7700	20772.2900
Total	Cum/hr	17596.380	178,5891	307,647	31,86832	88,89968	2,529825	7596,63	21,4812	3848,753
Temperat	C	2485.000	-182,954	930,18	-127,105	24,85789	-183,6121	-125,1079	-195,0077	-192,3062
Pressure	bar	1,01325	202,65	202,65	202,65	202,65	202,65	202,65	1,01325	1,01325
Vapor		1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0,8363141
Liquid		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000	0,1640678
Solid		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Enthalpy	J/kmol	-12530,6	-1,05E+07	2,65E+07	-8,32E+06	-1,24E+06	-1,42E+07	-4,07E+07	-1,25E+07	-7,39E+06
Enthalpy	J/kg	-434,328	-2,56E+05	8,14E+06	-40412,8	-4,44E+05	-1,55E+05	-4,30E+05	-4,30E+05	-6,78E+04
Enthalpy	MMB	-8,55E-03	-5,47691	15,1834	-5,43219	-775666	-1,1012	-2,74123	-7,3124	-5043244
Enthalpy	J/Kmol-K	4235,69	-61756,2	-3370,596	-75407,2	-43209,1	-1,10E+05	-2,625363	-7,271593	-46506,74
Enthalpy	J/kg-K	146,8157	-2140,57	-116,3801	-2613,73	-1497,69	-3440,796	-626,8537	-3850,014	-1613,244
Density	Kmol/cu	0,040918	4,031602	2,340345	22,59297	8,099016	35,57558	0,0829315	29,32798	1870736
Destiny	Kg/cum	1,180486	116,3133	67,1987	65,8162	23,6598	1136,252	2356014	833,1831	5,397146
Average		28,8504	28,8504	28,8504	28,8504	28,8504	31,93919	28,40916	28,40916	28,85040
Liq vol	cum/hr	38,56162	38,56162	38,56162	38,56162	38,56162	4,820202	33,74141	33,74141	38,56162

Tableau IV.3 : résultat de la simulation

D'après le tableau de flux, on remarque que la fraction liquide dans le flux LIQAIR est proche de 0.1640678, ce qui implique que la liquéfaction de l'air a eu lieu dans les conditions données. Aussi, le flux INFÉRIEUR contient 0,985 fraction molaire d'oxygène et 0,015

fraction molaire d'azote. Le flux DISTILL contient 0,901 mole d'azote et 0,099 mole d'oxygène. Par conséquent, la séparation de l'air liquéfié en oxygène et en azote a été réalisée et la pureté de l'oxygène et du nitrogène obtenus en bas et en haut de la colonne de distillation est respectivement de 99% et 90% cela nous pousse à étudier l'effet de changement de différentes conditions du procédé.

IV.4 Etudier l'effet de changement de différentes conditions du procédé

IV.4.1 La variation de la fraction liquide en fonction de pression de la compression

Pression (atm)	Fraction de liquide
100	0.1617945
150	0.1635618
200	0.1640678
250	0.1642575
300	0.1643040
400	0.1646108
450	0.1647128
500	0.1647942
600	0.1649162
700	0.1650031

Tableau IV.4 Tableau de variation de la fraction liquide avec une pression de compression

On remarque que la fraction de liquide augmente lorsque la pression de compression augmente donc on conclut que la relation entre la pression de compression et la fraction de liquide est une relation de corrélation directe même si le domaine de variation est très petit mais on ne peut pas négliger la variation de la fraction de liquide en fonction de pression.

Le diagramme suivant montre la variation de la fraction liquide en fonction de la pression.

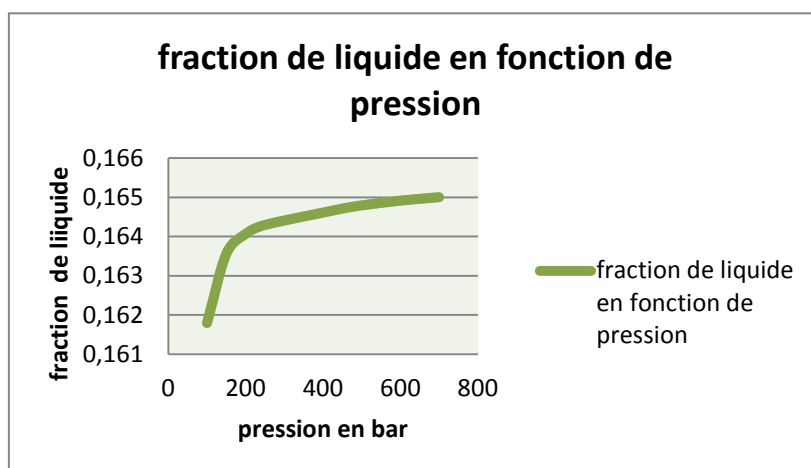


Figure IV.26 : Diagramme de fraction de liquide en fonction de changement de pression

D'après le graphe on remarque que la fraction liquide augmente en parallèle avec l'augmentation de pression et ça signifie que les besoins en travail augmentent, ainsi que le coût de production globale. Dans la plupart des situations industrielles, une pression de compression de 200 atm est utilisée, lorsque l'oxygène est le produit recherché sous forme liquide.

D'après ces résultats on va étudier l'effet de la variation de la fraction liquide en fonction de la variation de débit molaire.

IV.4.2 Etude sur l'effet de la variation de la fraction liquide en fonction de la variation de débit molaire

Le débit molaire (mol/sec)	140	210	260	300	360	400	450	500	550
Fraction de liquide	0.1640678	0.1640678	0.1640678	0.1640678	0.1640678	0.1640678	0.1640678	0.1640678	0.1640678

Tableau IV.5 tableau de l'effet de la variation de la fraction liquide en fonction de la variation de débit molaire.

On remarque que la fraction de liquide en fonction de débit molaire reste constante.

Le graphique ci-dessus montre que la fraction liquide est indépendante du débit molaire de l'air. Par conséquent, le débit n'a aucune contribution dans la détermination de la fraction d'air liquéfié. Le projet en cours envisage la simulation d'une usine avec un débit molaire de 200 moles / sec, ce qui correspond à près de 498 tonnes / jour.

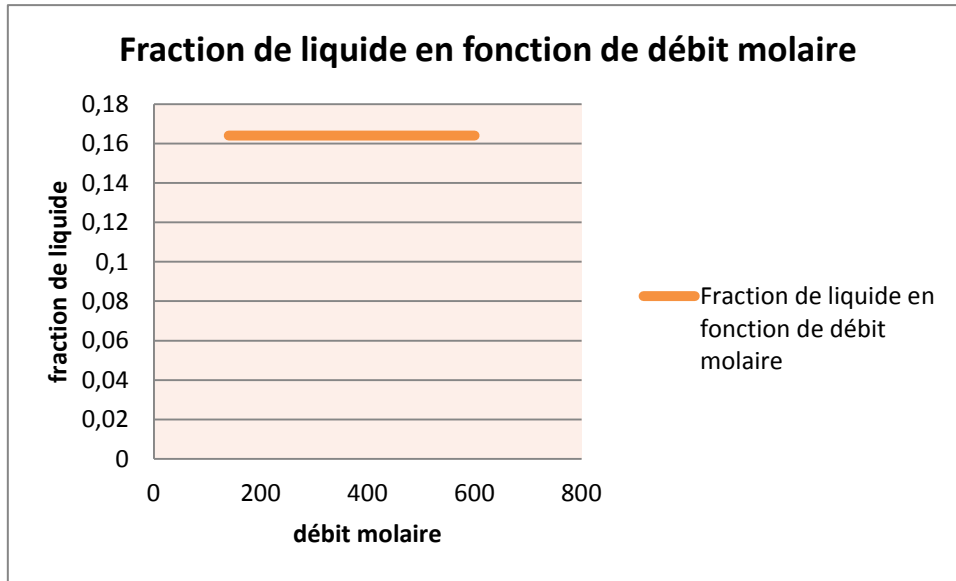


Figure IV.27 : diagramme de fraction liquide en fonction de changement de débit molaire

IV.4.3 Etude de la variation de température de sortie de flux chaud et la sortie de flux froid avec l'approche de l'échangeur de chaleur

L'Aspen plus donne ces résultats :

Température approches (k)	1	4	7	9	12	14	15
température de sortie de flux chaud (k)	152	152	153	153	154	155	156
température de sortie de flux froid (k)	151	148	146	144	142	141	141

Tableau IV.6 tableau de la variation de température de sortie de flux chaud et la sortie de flux froid avec l'approche de l'échangeur de chaleur

Le tableau montre que l'effet de l'approche de la température sur la température de sortie de flux chaud est inférieur à celui de la température de sortie de flux froid. Lorsque l'approche en température de l'échangeur thermique passe de 1K à 15K, la température de sortie de flux froid passe de 151K à 141K, tandis que la température de sortie de flux chaud ne change que de 152K à 156K.

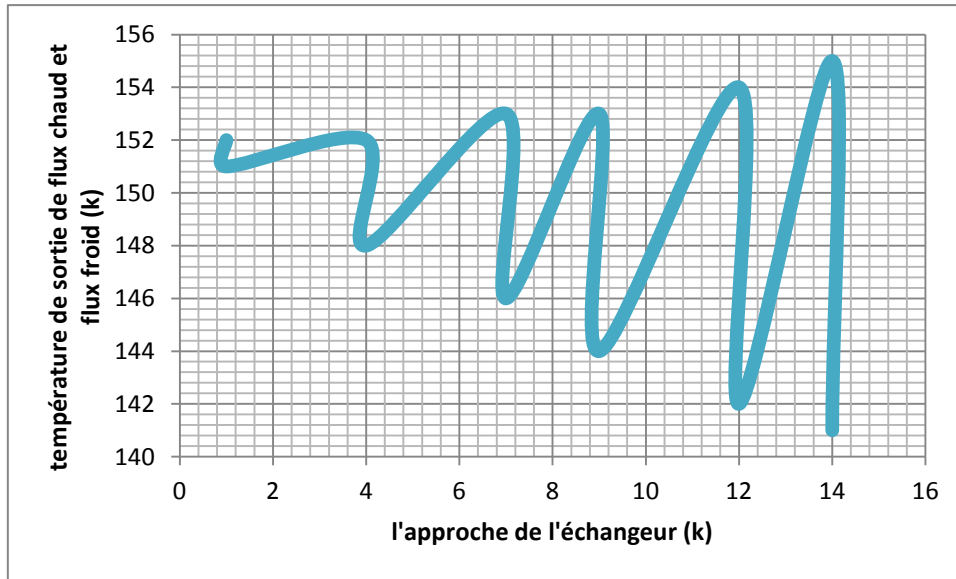


Figure IV.28 : diagramme de la variation de température de sortie de flux chaud et la sortie de flux froid avec l'approche de l'échangeur de chaleur

IV.4.4 Etude de l'effet de changement de nombre des plateaux sur la pureté des produits

Nombre d'étages	10	15	20	25	30
La pureté de N ₂ en haut %	90.15386	90.17717	90.18547	90.18953	90.19185
La pureté de O ₂ on bas %	99.07744	99.24645	99.30468	99.33285	99.34905

Tableau IV.7 : tableau de l'effet de changement de nombre des plateaux sur la pureté des produits obtenus

D'après ce tableau, on remarque que la pureté augmente en fonction de nombre d'étages d'une façon directe donc on peut dire que la relation est une relation de corrélation directe.

Le diagramme ci -dessous montre les résultats obtenus.

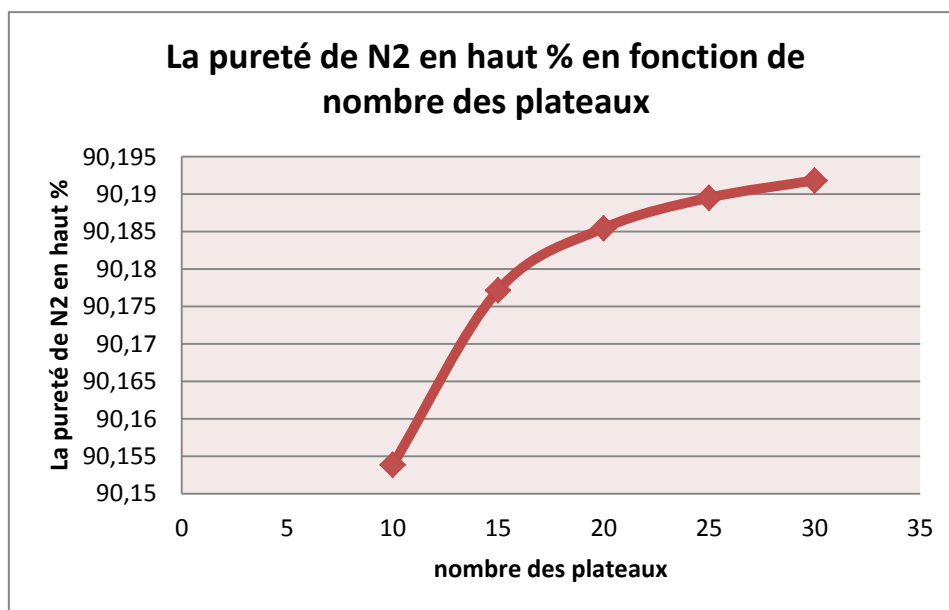


Figure IV.29 : diagramme de la variation de la pureté de N₂ en haut % en fonction de nombre des plateaux

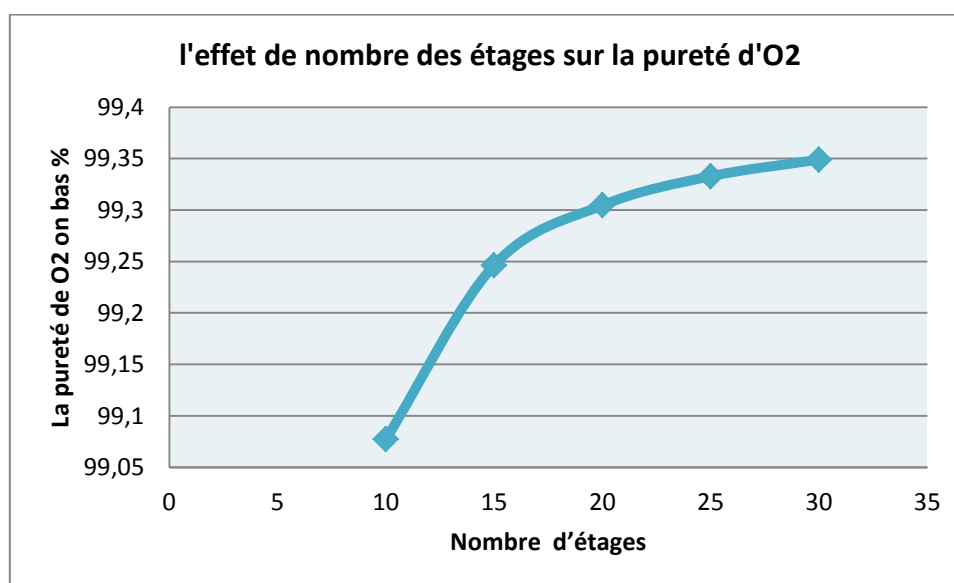


Figure IV.30 : diagramme de la variation de la pureté d'O₂ en bas % en fonction de nombre des plateaux

On remarque aussi que cette méthode (distillation à colonne unique) est largement utilisée lorsque l'oxygène est un produit recherché, car l'oxygène a une pureté de près de 99%. Mais, lorsque l'azote est un produit souhaitable, cette méthode n'est pas préférée car sa pureté n'est que de 90% et une énorme quantité d'oxygène est également gaspillée par le flux supérieur de la colonne de distillation.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion

La simulation de la liquéfaction de l'air a été effectuée avec succès à partir du logiciel de simulation ASPEN plus.

Dans ce travail nous avons utilisé le modèle de la colonne unique de Linde.

Dans un premier travail nous avons étudiés l'effet de la variation de différentes conditions sur le rendement et la pureté de la production du procédé final.

Les résultats obtenus donnent une vision qu'en peut utiliser le système à colonne unique de Linde, et il était possible d'obtenir une production d'oxygène d'une pureté presque 99%, et production d'azote de pureté de 90%.

En conclusion, il s'avère que l'utilisation du système à colonne unique de Linde est plus recommandée pour la production de l'oxygène.

Aussi on peut dire que la simulation de systèmes de liquéfaction est très complexe si on considère en plus la production de l'argon.

La liste des références

- [1]: Bulletin de l'institut international du froid 2003-6, La cryogénie, clé de la science et de la technologie avancées par Philippe Lebrun.
- [2]: Les sites web www.messergroup.com / www.specialtygases.com. de Gases for Life Messer France S.A.S.
- [3]: P.Petit Technique de l'ingénieur Séparation et liquéfaction des gaz .Date de publication : 10 décembre 1995
- [4]: Le site web <https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/environnement-air-composition-57/>
- [5]: J.G.Weisend II , The Handbook Of Cryogenic Engineering ,Copyrighted Material, 31 août 1998.
- [6]: P.Bredy Introduction à la cryogénie et à la supraconductivité Fluides cryogéniques L'état pdf philippe.bredy@cea.fr , 1 avr. 2013 .
- [7]: Le site web <https://www.lenntech.fr/data-perio/o.htm>
- [8]: Le site web <http://www.buyitblack.com/les-caracteristiques-de-l-azote/>
- [9]: Le site web <https://cryogenics-energy.fivesgroup.com/fr/application/production-de-gaz-industriel/separation-de-lair.html>
- [10]: C.Y.Foo, C. Nishanth, K.S. Denny. Ng, R. Elyas, C.L.Chen, Rene´ D. Elms,Hao-Yeh Lee, I-Lung Chien, Siewhui Chong, Chien Hwa Chong , ElsevierChemical engineering process simulation/Dominic, 16 Jul 2017.
- [11]: Le site web <https://www.zonebourse.com/ASPEN-TECHNOLOGY-INC-8515/actualite/Aspen-Technology-Inc-AspenTech-presente-la-facon-selon-laquelle-l-optimisation-des-industries-de-15530627/>
- [12]: A.Bose La thèse doctorat simulation of air liquefaction using aspen plus par Institute nationale de la technologie Rourkela ,2012.
- [13] : Le site web <https://www.aspentech.com/en/products/engineering/aspem-plus>
- [14]: J. Schwartzentruber Introduction au logiciel de simulation Aspen-plus septembre 2005.
- [15]: Le site web <https://www.engineeringtoolbox.com/>
- [16]: Le site web <https://www.pangas.ch/fr/images/pangas-brochure-unite-de-fractionnement->

- d-air-a-muttentz-f_tcm557-114523. Livre Unité de fractionnement d'air à Basel. Votre source d'oxygène, d'azote et d'argon. THE LINDE GROUP PanGas pdf.
- [17]: Le site web <https://www.airliquide.com/sites/airliquide.com/files/2017/03/08/air-liquide-document-de-reference-2016.pdf>
- [18]: Air separation techniques course par Anders Lenneskog, Cryogenic plants. Version 8 June 2007.
- [19]: Le site web <http://french.airseparation-plant.com/sale-1826837-industrial-cryogenic-air-separation-unit-equipment-1000kw-for-oxygen-generating.html> .
- [20]: Le site web <https://energie.wallonie.be/fr/differents-types-d-echangeurs-de-chaleurs.html?IDC=8049&IDD=97759>
- [21]: Mémoire de Master en Génie Energétique Thème : ETUDE DU COMPORTEMENT DYNAMIQUE ET THERMIQUE DE DEUX ECOULEMENTS DU FLUIDE DANS UN ECHANGEUR DE CHALEUR (COMPARAISON ENTRE LE CAS SIMPLE ET LE CAS AVEC AILETTES) , Présenté par : T. Farida , Université Abou Bakr Belkaid-TLEMCEM Faculté de technologie , ANNEE UNIVERSITAIRE: 2012-2013
- [22]: Le site web <https://www.swagelok.com.mx/downloads/webcatalogs/fr/MS-02-230.pdf>
- [23]: Le site web http://www.azprocede.fr/Cours_GC/rectification_Mcalim.html

Résumé :

L'air est un mélange de plusieurs gaz, chaque de ces gaz a des utilisations, la séparation d'air en ses gaz constituants devient très important de coté commercial. Pour séparer l'air il est nécessaire de le liquéfier. Dans ce projet, la simulation de la liquéfaction de l'air puis suivre ça processus à partir de logiciel de la simulation Aspen Plus. Le modèle à étude était le système à colonne unique de Linde. En plus l'étude l'effet de la variation des diverses conditions initial de traitement sur le rendement et la pureté du produit final ont également été analysés. A partir d'utilisation de système à colonne unique de Linde, il était possible d'obtenir l'oxygène à une pureté de presque 99%.et une pureté d'azote de 90%.

Mot clé : gaz industriel –séparation d'air-liquéfaction d'air-logiciel de la simulation-colonne unique de Linde-pureté.

الملخص :

الهواء عبارة عن مزيج من عدة غازات, كل من هذه الغازات تستخدم لغرض معين, وفصل الغازات المكونة للهواء يصبح مهم جدا في الجانب التجاري. لفصل الهواء من الضروري تسييله في هذا المشروع نتبع محاكاة تسييل الهواء. هذه العملية تجرى عن طريق استخدام برنامج محاكاة Aspen Plus. النموذج المدروس هو نظام ليند أحادي العمود . بالإضافة إلى دراسة تأثير مختلف الشروط الابتدائية على المردود و نقاوة المنتج النهائي. تم تحليلها باستخدام نظام ليند أحادي العمود كان من الممكن الحصول على الأكسجين بنقاوة حوالي 99% و نقاوة النيتروجين بنسبة 90%.

كلمات المفتاحية: غاز صناعي – فصل الهواء- تسييل الهواء- برنامج محاكاة- أحادي العمود ليند- النقاوة.