

BADJI MOKHTAR ANNABA- UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



**FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**

MEMOIRE

PRESENT EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

INTITULE

**Etude du compresseur SULZER à piston au niveau de la
centrale à oxygène –SIDER EL HADJAR-ANNABA.**

DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE MECANIQUE

SPECIALITE : ENERGETIQUE

PRESENTE PAR : GHERICI HANA

DIRECTEUR DU MEMOIRE : Dr A. DIB

DEVANT LE JURY :

PRESIDENT : B. MERZOUG (PR) U.B.M.A

EXAMINATEURS : M. SARI (PR) U.B.M.A

PROMOTION : 2018-2019

SOMMAIRE

Dédicace.....	I
Remerciement.....	II
Nomenclature.....	III
Liste des figures.....	IV
Liste des tableaux.....	V
Résumé.....	VI
Introduction.....	VII
Chapitre I: Production des gaz à la centrale à oxygène	
I.1 Introduction.....	1
I.2 Historique du complexe.....	1
I.3 Situation géographique du complexe sidérurgique d'El –Hadjar.....	1
I.4 Présentation des différentes Ateliers dans l'entreprise.....	2
I.4.1 Préparation Matières Premières et Agglomération (PMA).....	2
I.4.2 La cokerie.....	3
I.4.3 Hauts Fourneaux (L'HF).....	3
I.4.4 Les aciéries.....	4
I.4.5 Laminoir à chaud(Lac).....	6
I.5 Présentation de la centrale à oxygène.....	8
I.5.1 La capacité du production de la centrale a oxygène	8
I.5.2 Le principe de fonctionnement de la COX3.....	9
I.6 Organisation technique des unités de la COX.....	
Chapitre II : Généralités sur les compresseurs	
II.1 Introduction.....	26
II.2 Généralité sur les turbomachines.....	26
II.3 Définitions.....	26
II.4 classification générales.....	26
II.4.1 Les turbocompresseurs.....	26
II.4.2 Les compresseurs volumétriques	27
II.5. Les turbocompresseurs.....	27
II.5.1 : les compresseurs axiaux.....	27
II.5.2 : Les compresseurs centrifuges.....	27
II.6 Compresseur rotatif	28
II.6.1 : compresseur à palettes.....	28
II.6.2 : Compresseur à lobes.....	30

II.6.3 : compresseur à vis.....	30
II.7 : Les compresseurs alternatifs.....	32
II.7.1 : Compresseur à membranes	32
II.7.2 : Système à barillet.....	33
II.7.3 : Compresseur a piston (système bille-manivelle).....	34
II.8 Historique.....	34
II.9 Cycle de compression.....	36
Chapitre III : Description et fonctionnement d'un compresseur	
III.1 Introduction.....	38
III.2 Description et fonctionnement d'un compresseur Sulzer.....	38
III-2-1 Description.....	38
III-2-2 Fonctionnement.....	38
III-2-3 Présentation géométrique de compresseur à Piston.....	40
III.3-2 Les différentes pièces composant le compresseur à piston.....	40
III.4 Caractéristiques de compresseur Sulzer.....	42
III.5 Calcul des performances du compresseur SULZER.....	42
III.5.1 Calcul du taux de compression global	42
III.5.2 Rapport de chaleurs spécifiques.....	43
III.5.3 La masse molaire.....	43
III.5.4 Facteur de pertes.....	43
III.5.5 Le taux de compression approximatif.....	44
III.5.6 Pression d'aspiration par étage.....	44
III.5.7 La pression de refoulement approximative par étage.....	45
III.5.8 Chute de pression entre les étages	46
III.5.9 Pression de refoulement réelle.....	46
III.5.10 Niveau de compression réelle par étage.....	47
III.5.11 Perte d'aspiration dans le cylindre de remplissage.....	47
III.5.12 Pression de déplacement du cylindre requis.....	48
III.5.13 Vitesse moyenne du piston	49
III.5.14 Facteur de correction.....	49
III.5.15 Efficacité de compression (rendement).....	49
III.5.16 Débit massique.....	50
III.5.17 La compression adiabatique.....	51
III.5.18 Puissance de compression.....	52
III.5.19 Efficacité volumétrique.....	53
Conclusion.....	VIII
Références bibliographiques.....	IX

DEDICACES

Je dédie ce mémoire de fin d'étude à la personne la plus chère à mes yeux, ma mère, qui a tout sacrifié pour ses enfants, et qui a veillé à mon éducation, qui, sans elle je ne serai pas ce que je suis.

A mon père que j'adore, en signe de reconnaissance pour son sacrifices, lui qui m'a supporté et m'adonné la force continuer ma formation.

A mon marié qui m'a encouragé durant toute la période de mes études.

A ma mes frères et ma sœur « Ayate, Badri et Yahia isslem ».

A ma grande mère que j'aime beaucoup.

A toute ma famille que j'aime.

A mes camarades, à mes amis de la résidence.

A toutes les personnes que je connaisse et que je n'ai pas citées.

Remerciements

Je tenais à remercier en premier lieu avant tous nos bons dieux de m'avoir donné le courage et la volonté pour arriver à ce niveau et réaliser ce travail.

Puis à mon encadreur, Dr. Dib Amar, pour m'avoir encadré, dirigé et conseillé tout le long de ce travail, et pour ces précieuses remarques.

Ainsi que mes professeurs qui m'ont préparé et soutenu pendant toutes les années de mes études.

Je tenais à remercier également le président de jury le Professeur Merzoug Bachir ainsi que le Professeur Sari Mohamed Rafik d'avoir accepté de faire parti du jury de ma soutenance.

Nomenclature

r_c	taux de compression globale
P_2	pression de refoulement.
P_1	pression d'aspiration.
K	rapport de chaleur spécifique
C_p	chaleur spécifique à pression constante
C_V	chaleur spécifique à volume constant
$\gamma_{sp.gr}$	la masse molaire
M_{w-gaz}	la masse molaire du gaz
M_{w-air}	la masse molaire de l'air
L_0	facteur de perte
r_{c-stg}	taux de compression adiabatique
N_{stg}	nombre d'étage
P_s	pression d'aspiration par étage
P_{d-stg}	pression de refoulement approximative par étage
P_{i-drop}	chute de pression entre les étages
$P_{d-actual}$	pression de refoulement réelle par étage
θ_s	Perte d'aspiration
a	rapporte de surface de la vanne
U	vitesse moyenne du piston
T_1	température d'aspiration en kelvin
θ_d	pression de déplacement du cylindre.
L	course en mm
B	facteur de correction identique
η_c	efficacité de compression (rendement)
P_{std}	pression atmosphérique en bar
T_{std}	température standard en K
Q_{std}	capacité d'aspiration

T_s	température d'entrée (k)
Z_s	compressibilité à l'entrée
M	le débit massique
ϱ	le débit volumique
ν	volume spécifique du gaz
ρ_{gaz}	la masse volumique
S	surface de chambre de compression
d	diamètre de la chambre
H_{ad}	compression adiabatique
Z_{av}	compressibilité moyenne des gaz à l'aspiration et au refoulement
Z	compressibilité du gaz
R	constante des gaz parfait
V	volume spécifique des gaz
GP	puissance de compression ou puissance du gaz (KW)
ε_V	Déplacement du cylindre
A_{he}	zone de la tête mm^2
D	diamètre de cylindre tête mm
d	diamètre de la tige de piston
A_{ce}	surface se manivelle
F_{lc}	charge de compression
F_{lt}	charge de tension

Liste des figures

	Page
Figure I.1 : Situation géographique du complexe.....	2
Figure I. 2 : Préparation de Matières Premières et Agglomération (PMA).....	3
Figure I.3 : Hauts Fourneaux.....	4
Figure I.4 : Aciérie à Oxygène N°1 (Bramès).....	5
Figure I. 5 : Aciérie à Oxygène N°2 (Billetes).....	5
Figure I. 6 : Aciérie Electrique.....	6
Figure I.7 : Laminoir à Chaud (LAC).....	6
Figure I.8 : Galvanisation à Chaud (RPA).....	7
Figure I.9 : Laminoir à fils et ronds (LFR).....	8
Figure I .10 : Schéma de filtration.....	10
Figure I .11 : Schéma de lavage et refroidissement.....	11
Figure I.12 : Schéma de La filtration (séchage) de l'air.....	12
Figure I.13 : Schéma de refroidissement de L'air sec.....	13
Figure I.14 : Schéma des turbines et les liquéfacteurs.....	13
Figure I.15 : Schéma de colonne de distillation (fractionnement).....	14

Figure I.16 : Schéma de récipient.....	14
Figure I.17 : Schéma d'un plateau.....	15
Figure I.18 : Le principe des plateaux.....	16
Figure I.19 : Diagramme des teneurs en oxygène.....	16
Figure I. 20 : Schéma d'un plateau dans le cas réel.....	17
Figure I.21 : Figure de colonne de séparation.....	18
Figure I.22 : Schéma d'une double colonne.....	19
Figure I.23 : Schéma d'une colonne.....	20
Figure I.24 : Purification d'argon.....	22
Figure I. 25 : Schéma de colonne d'argon pur.....	22
Figure I.26 : schéma de colonne d'argon brut.....	23
Figure I. 27 : Stockage d'azote et oxygène liquide.....	23
Figure I.28 : Figure de stockage d'argon.....	24
Figure II. 1 : Classification des compresseurs.....	27
Figure II.2 Les compresseurs dynamiques	28
Figure II.3 : Classification des compresseurs.....	28
Figure II.4 : Compresseur à palettes : principe de fonctionnement.....	29

Figure II.5 : Principe de fonctionnement pour compresseur à lobes.....	30
Figure II.6 : Principe de fonctionnement Compresseur mono-vis Zimmern.....	31
Figure II.7 : Compresseur double vis SRM.....	32
Figure II.8 : Fonctionnement d'un Compresseur à vis.....	32
Figure II.9 : Fonctionnement d'un Compresseur à pistons à barillet.....	33
Figure II.10 : Différents modes de travail du piston.....	
Figure II.11 : Cycle de compression d'un compresseur à piston.....	
Figure.III.1 : Vue réelle d'un ancien vilebrequin.....	

Liste des tableaux

	page
Tableau III.1 caractéristique du compresseur.....	41
Tableau III .2 : Comparaison entre valeurs calculées et mesurées pour l’oxygène (PC2, PC3).....	44
Tableau III.3 : Comparaison entre valeurs calculées et mesurées pour l’azote (PC5, PC6).....	45

Résumé

Dans ce travail, l'étude du compresseur à piston SULZER installé au niveau de la centrale à oxygène au sein de l'entreprise SIDER EL HADJAR_ANNABA .

On a fait une description et un fonctionnement du compresseur à piston SULZER 4D.375.3A à 3 étages qui fonctionne avec deux gaz différents l'oxygène et l'azote.

On a calculé les performances de ce compresseur SULZER, et les pertes et le rendement volumétrique et le rendement de compression pour les deux gaz avec les valeurs des pressions et températures calculées et mesurées

La réalisation de ce projet de fin d'études nous a permis de se familiariser avec le monde de la production des gaz. On a pu constater que la machine la plus importante dans cette production est le compresseur.

summary

In this work, the study of the piston compressor SULZER installed at the oxygen plant in the seine company SIDER EL HADJAR_ANNABA.

The 3-stage SULZER 4D.375.3A piston compressor has been described and operated using two different gases, oxygen and nitrogen.

The performance of this SULZER compressor was calculated, and the losses and the volumetric efficiency and the compression efficiency for the two gases with the values of the pressures and temperatures calculated and measured.

The completion of this graduation project has allowed us to become familiar with the world of gas production. It has been found that the most important machine in this production is the compressor.

ملخص

في هذا العمل ، تم دراسة ضاغط مكبس SULZER في مصنع تركيب الأكسجين على مستوى مصنع الحديد و الصلب الحجار _ عنابة

تم وصف ضاغط مكبس SULZER 4D.375.3A ثلاثي الادوار وتشغيله باستخدام غازين مختلفين هما الأكسجين والأزوت

تم حساب مردود الضاغط SULZER ، للغازين مع قيم الضغط ودرجات الحرارة المحسوبة والمقاسة.

أتاح لنا الانتهاء من مشروع التخرج هذا التعرف على عالم إنتاج الغاز. لقد وجد أن الضاغط هو أهم آلة في هذا الإنتاج.

Introduction

Durant la période de stage effectuée au sein du complexe SIDER EL-HADJAR au niveau de la centrale à oxygène où se trouvent les compresseurs alternatifs à piston. Cette centrale a pour but de produire (l'oxygène, l'azote) gaz et liquide et l'argon liquide à partir de deux unités de production (COX3, COX4). Le bon fonctionnement de cette centrale est crucial pour les autres unités du complexe. Pour la maintenir en production, il faut prendre soin des machines les plus précieuses qui sont les compresseurs.

L'objectif visé par ce projet de fin d'études est de calculer les performances du compresseur alternatif à piston de la marque SULZER 4D.375.3A à 3 étages, installé au niveau de cette centrale. En premier lieu il fallait comprendre son fonctionnement, ce qui a nécessité d'abord une description générale de la centrale et ensuite une description de son fonctionnement.

Ce mémoire est structuré comme suit :

- Une introduction générale.
- Un premier chapitre, consacré à des généralités relatives à la présentation de l'unité de production des gaz.
- Un deuxième chapitre comprenant la description générale des compresseurs volumétriques et alternatifs.
- Un troisième chapitre et dédié aux calculs des performances du compresseur SULZER 4D.375.3A à 3 étages
- Une conclusion générale

Chapitre I : Production des gaz à la centrale à oxygène

I-1 Introduction :

Le présent chapitre a pour but de présenter le complexe sidérurgique d'El –Hadjar Annaba en générale et la centrale a oxygène en détaille.

I-2 Historique du complexe :

Le projet de construction d'une usine sidérurgique à Annaba était inscrit en 1958 dans le plan de Constantine. Ce projet a vu la Création de la Société Bônoise de Sidérurgie (SBS) qui a été chargée de réaliser un haut fourneau et ses annexes.

- 1964, création de SNS : Après l'indépendance, l'état algérien a créé, le 03 Septembre 1964, la Société Nationale de Sidérurgie (SNS) qui a été chargée de la construction du complexe sidérurgique d'El- Hadjar 1969, première coulée : le complexe est entré en production après son inauguration le 19 juin 1969 par le Président de l'état Algérien Houari Boumédiène.
- 1983, création de EN SIDER : La restructuration de l'industrie Algérienne à donné naissance à l'Entreprise Nationale SIDER.
- 1995, création du Groupe SIDER : Cette évolution marque le passage De l'entreprise administrée à l'entreprise économique EPE/SPA.
- 1999, création de ALFASID : Un plan de redressement Interne du Groupe Sider donne naissance à 25 entreprises industrielles.
- Autonomes dont ALFASID qui représenté le « cœur du métier » de la Sidérurgie.
- ISPAT Annaba le 18.10.2001 : Un contrat de partenariat entre SIDER et LNM donne naissance à ISPAT Annaba. LNM détient 70% du capital social et SIDER 30%.
- Cette nouvelle société regroupe les filiales de SIDER liées au métier de base de la sidérurgie qui sont : Alfasid, Almain, Gessit, Iman, Amm, Comersid, Alfatub, Cryosid, Coprosid et Fersid).
- Ispat Tébessa est créé à la même période. Elle est le résultat d'un partenariat entre LNM (70%) et FERPHOS (30%). Elle comprend les mines de fer d'Ouenza et de Boukhadra.
- Décembre 2004 Mittal Steel Annaba : La société change de Dénomination après la fusion de LNM holding et ISPAT International.
- Juin 2007, ArcelorMittal Annaba : Résultat de la fusion entre Métal Steel et Arcelor.

I-3 Situation géographique du complexe sidérurgique d'El –Hadjar

Le complexe sidérurgique d'El –Hadjar est situe a environ 15 kilomètre au sud de la ville de la d'Annaba, Il occupe une superficie de 800Ha.

À l'intérieur, il y a près de 60 km de voies ferrées permettant la circulation libre de la matière et près de 100 km de route permettant la circulation des engins.

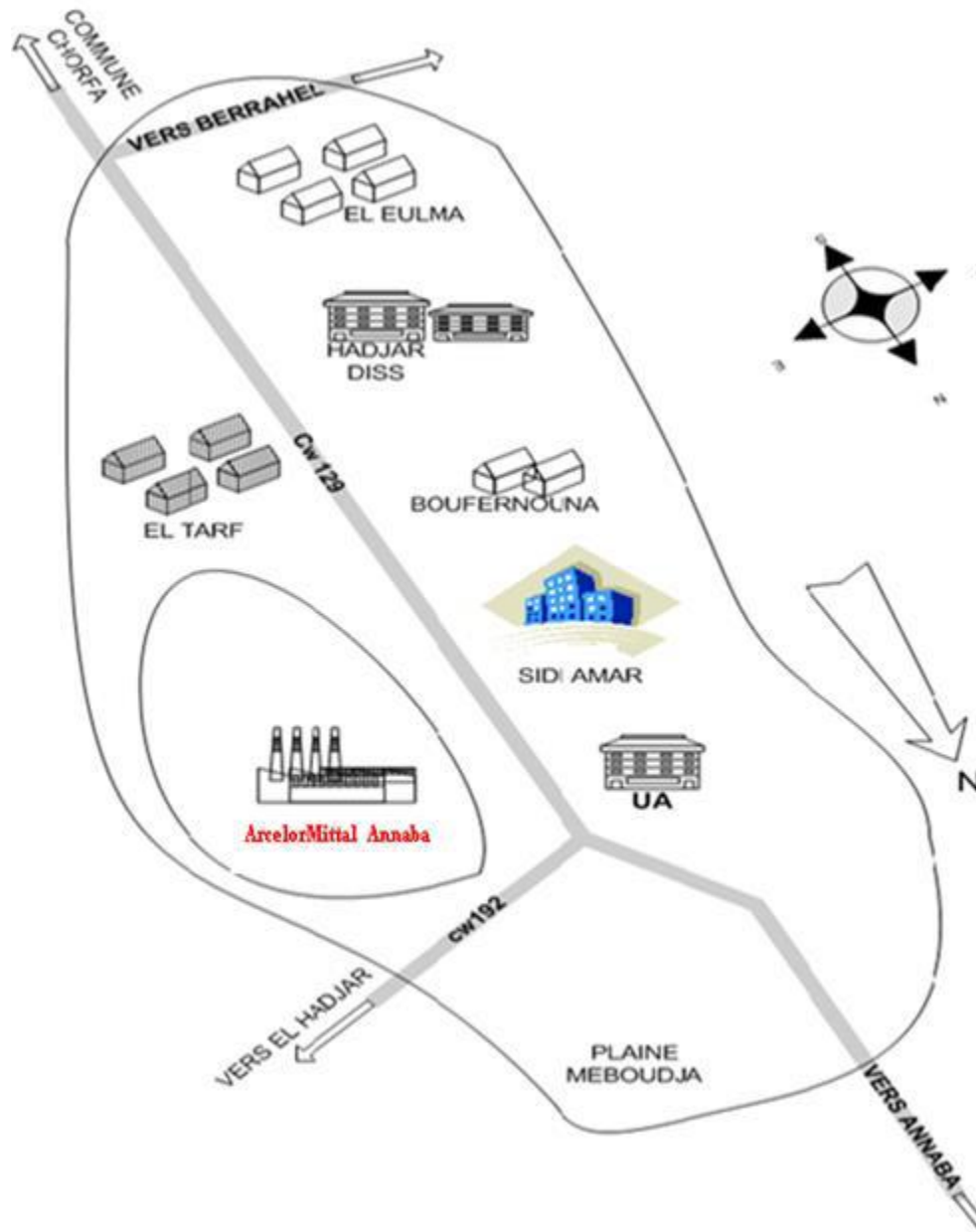


Figure I.1 : Situation géographique du complexe.

I.4 Présentation des différents Ateliers dans l'entreprise :

L'entreprise de sidérurgie d'El Hadjar comprend tous les ateliers intervenant dans le processus de production de l'acier.

I.4.1 Préparation Matières Premières et Agglomération (PMA)

L'atelier de PMA sert à préparer le minerai de fer provenant des mines de l'Ouenza et Boukhara puis est envoyé vers le haut fourneau.

La PMA est composée de :

Un atelier de préparation minerai

- L'agglomération N°1 d'une capacité de 770KT/an, a démarré en 1969 et rénovée en 1992
- L'agglomération N°2 d'une capacité de 2800KT/an, démarré en 1980 et rénovée en 1998



Figure I. 2 : Préparation de Matières Premières et Agglomération (PMA).

I.4.2 La cokerie

Un atelier de préparation coke, fine de coke et additions.

1.4.3 Hauts Fourneaux (L'HF)

A partir des matières premières (aggloméré et coke) fournies par la PMA, les hauts fourneaux produisent de la fonte liquide destinée aux aciéries à oxygène. Le laitier qui est un produit fatal, il sert pour les cimenteries et les travaux publics.

Les HF sont composées essentiellement de :

- 1) Atelier de stockage et criblage des matières premières
- 2) Atelier de traitement gaz
- 3) Stations de soufflage vent
- 4) Station de traitement des eaux et boues
- 5) Machines a coulées en gueuses
- 6) Atelier réfractaires



Figure I.3 : Haut Fourneau.

1.4.4 Les aciéries :

a) Aciérie à Oxygène N°1 (Bramès)

Construite en 1972, l'aciérie à oxygène n°1 (ACO1) transforme la fonte liquide provenant du haut fourneau, en acier à l'aide d'oxygène. L'acier est solidifié sous forme de produit appelé brame qui sera acheminé vers le laminoir à chaud pour être transformé en bobines.

La capacité maximale de l'ACO1 est de 1 037 KT/an de brames conformes.

Les principales installations de l'ACO1 sont :

- Une zone d'élaboration de l'acier liquide dotée de trois convertisseurs
- Deux stations de traitement des poches.
- Une installation de dépoussiérage.
- Une installation de manutention et de traitement des brames
- Deux machines de lingotières courbes pour la production de brames de largeur 750 à 1300 mm et de 220 mm d'épaisseur



Figure I.4 : Aciérie à Oxygène N°1 (Bramès)

b) Aciérie à Oxygène N°2 (Billetes)

L'aciérie à oxygène N°2 (ACO2) a été mise en service en mai 1981. Elle transforme la fonte liquide, acheminée du haut fourneau, en acier à l'aide d'oxygène. L'acier liquide est ensuite solidifié sous forme de produit appelé billette qui sera laminé par la suite au niveau des laminoirs à fil et rond.

Elle est composée de :

Une zone d'élaboration de l'acier liquide dotée de trois convertisseurs

Une zone de coulée billettes dotée de trois machines courbes à quatre lignes de section 130x130 mm



Figure I. 5 : Aciérie à Oxygène N°2 (Billetes)

c) Aciérie Electrique (Billetes et Lingots)

L'aciérie électrique (ACE) a été construite en 1975 pour alimenter principalement la tuberie sans soudure en lingots. Elle produit également des billettes L'ACE utilise la ferraille pour être fondue dans un four, mais également l'acier traité par l'ACO1 pour être coulé.

La capacité de l'ACE est de 400 000 tonnes par an.

Les principales installations sont :

Four avec panneaux refroidis d'une capacité de 80 tonnes Transformateur 60 MVA



Figure I. 6 : Aciérie Electrique

I.4.5 Laminoir à Chaud (LAC)

Mis en service en 1972, le LAC transforme les brames produites par l'aciérie à oxygène n°1, en bobines.



Figure I.7 : Laminoir à Chaud (LAC)

a) Galvanisation à Chaud (RPA)

Mis en service en 1980, la ligne de galvanisation à chaud dépose une couche de revêtement de zinc sur les bandes d'acier doux laminés à froid après avoir subi un traitement thermique dans un four à tunnel. La galvanisation et les trois lignes de parachèvement sont composées de :

- Sections entrée, processus et sortie
- Un four tunnel qui se compose d'une partie de préchauffage à feu direct d'une longueur de 22 m et une autre partie de traitement thermique d'une longueur de 110 m
- Un bain de galvanisation chauffée par induction
- une section de refroidissement à air et à eau
- une section de planage sous traction



Figure I.8: Galvanisation à Chaud (RPA)

b) Laminoir à fils et ronds (LFR)

A partir des billettes fournies par l'aciérie à oxygène n°2 ou par l'aciérie électrique, le LFR produit du rond à béton lisse et du fil machine de diamètre 6 à 12 mm, en couronnes.

Le rond lisse est destiné à renforcer les constructions en béton et à constituer les armatures passives pour les constructions en béton précontraint.



Figure I.9 : Laminoir à fils et ronds (LFR)

I.5 Présentation de la centrale à oxygène :

La centrale à oxygène est située en plein cœur du complexe sidérurgique d'El hadjar ,Dans le processus de fabrication de l'acier dans toutes ses étapes, La centrale à oxygène de SIDER EL HADJAR s'en charge de produire et distribuer ces gaz aux unités de production à savoir le haut fourneau et les aciéries à oxygène afin de garantir la continuité de production au complexe en outre, la Centrale à oxygène commercialise une partie de sa production à des clients externes.

Elle représente une installation vitale pour le complexe, son dysfonctionnement se répercute directement sur la marche des principales installations de production particulièrement les aciéries à oxygène.

La centrale à oxygène est composée de 2 unités de production indépendante COX 3 et COX 4 qui sont fonctionnelles. Les deux autres unités la COX 2 et la COX 1 sont à l'arrêt.

Il y a un projet de construire deux autres unités la COX 5 et COX 6 dans les 3 années prochaines.

La COX 3 est destiné à la production du l'oxygène en phase gaz et liquide et l'azote en phase gaz liquide, l'argon liquide et l'hydrogène gazeux pour les besoins du processus de la centrale . La COX 3 travaille selon le programme de ABB ,et la COX 4 travaille selon le programme de YOKOGAWA,elle a le même cycle de production sauf qu'elle ne produise pas d'argon.

I.5.1 La capacité de production de la centrale à oxygène :

La centrale à oxygène produit chaque heure avec une pureté de chaque produit :

- **Des produits liquides :**
 - Oxygène : 600 l/h pureté 99,7%
 - Azote : 400 l/h pureté 99.99%
 - Argon : 100l/h
- **Des produits gazeux :**
 - Oxygène : 14600 m³ /h pureté 99.7%
 - Azote : 400 m³/h pureté 99.99%
 - Hydrogène : 40 m³/h

I .5.2 Le principe de fonctionnement de la COX3

Le but de la centrale à oxygène est de produire l'oxygène et l'azote sous deux forme(gazeuse et liquide),son fonctionnement est basée sur l'air qui désigne le fluide gazeux parfait ,incolore,indore et invisible qui constitue l'atmosphère terrestre. L'air est un mélange de différents corps purs dans l'état gazeux et il se compose de :

- 78% d'azote
- 21% de dioxygène
- Environ1% d'autre gaz (argon, vapeur d'eauetc.).

Pour réaliser le but de cette centrale, il faut passer par les étapes suivantes :

- Aspiration et filtration.
- Compression et refoulement.
- Lavage et refroidissement.
- La filtration d'air.
- Refroidissent (étape de revex).
- Liquéfaction.
- Distillation.

a) L'aspiration et la filtration :

L'aspiration d'air est faite par un cheminé dans les conditions normale d'air (1bar et 25c).L'air passe par la salle des filtres qui est composée de deux types de filtre, le filtre à rouleaux retient toutes les particules solides, et le filtre à poche joue un rôle d'un épurateur d'air pour débarrasser les fines particules comme la poussière.

b) La compression :

L'air venant de la salle des filtres passe par le turbocompresseur, qui est un compresseur centrifuge à cinq étages, entre chaque étage il y a un réfrigérant à eau. L'air va être comprimé avec une température de 25 c° et une pression de 1bar et sort avec une température de 100 c° et une pression d'environ 5,6 bars qui représente la pression de refoulement générale.

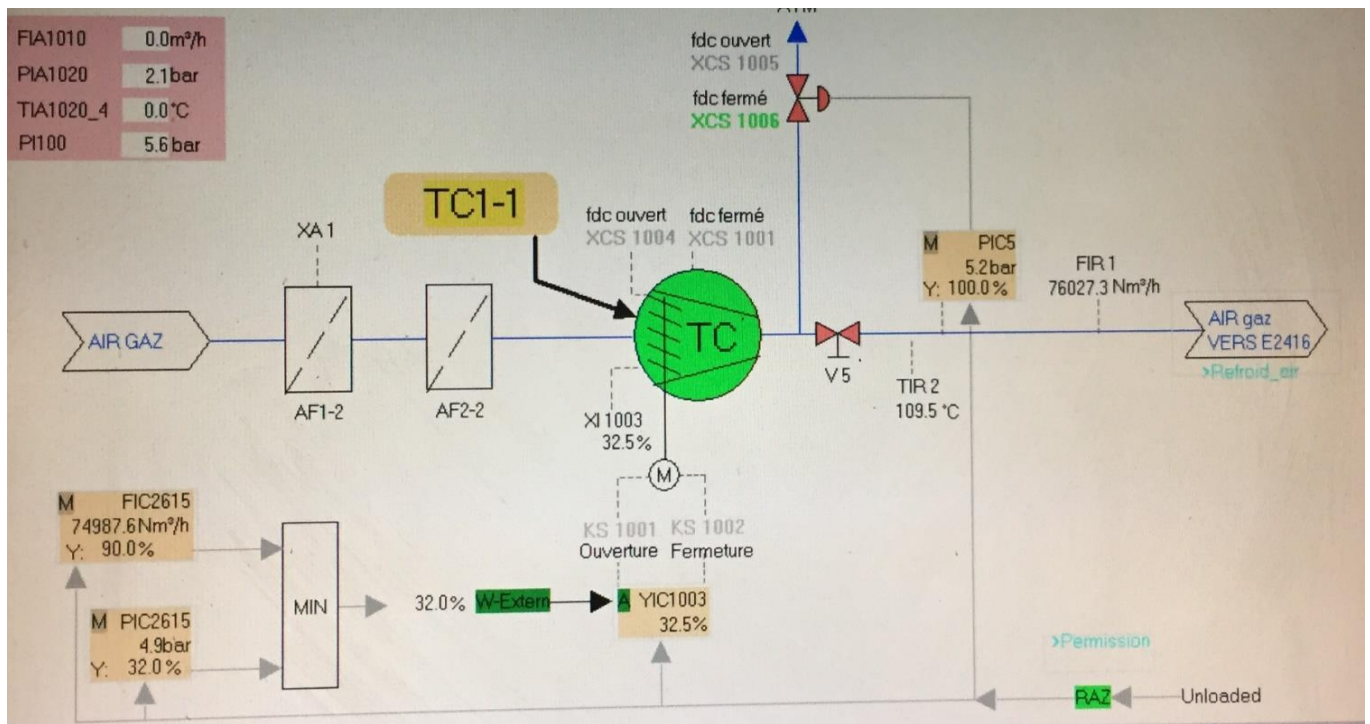


Figure I.10 : Schéma de filtration.

c) Lavage et refroidissement :

À l'entrée de cette étape, la température d'air est de 100 c° et à la sortie devient 15c°. Dans la tour de lavage, l'air refoulé du turbocompresseur subit un refroidissement et une épuration des poussières restantes dans l'air avec un contact direct d'eau froide qui est divisée en deux parties. Une partie est soutirée avec des pompes à eau glacée du aéro- réfrigérant où il est refroidi avec l'air ambiant dans la tour de refroidissement.

La deuxième partie d'eau est envoyée à la tour de refroidissement où se trouve l'azote impure issue de l'installation qui a une caractéristique spéciale : le pouvoir de céder la chaleur même si Température azote est supérieure à la température d'eau.

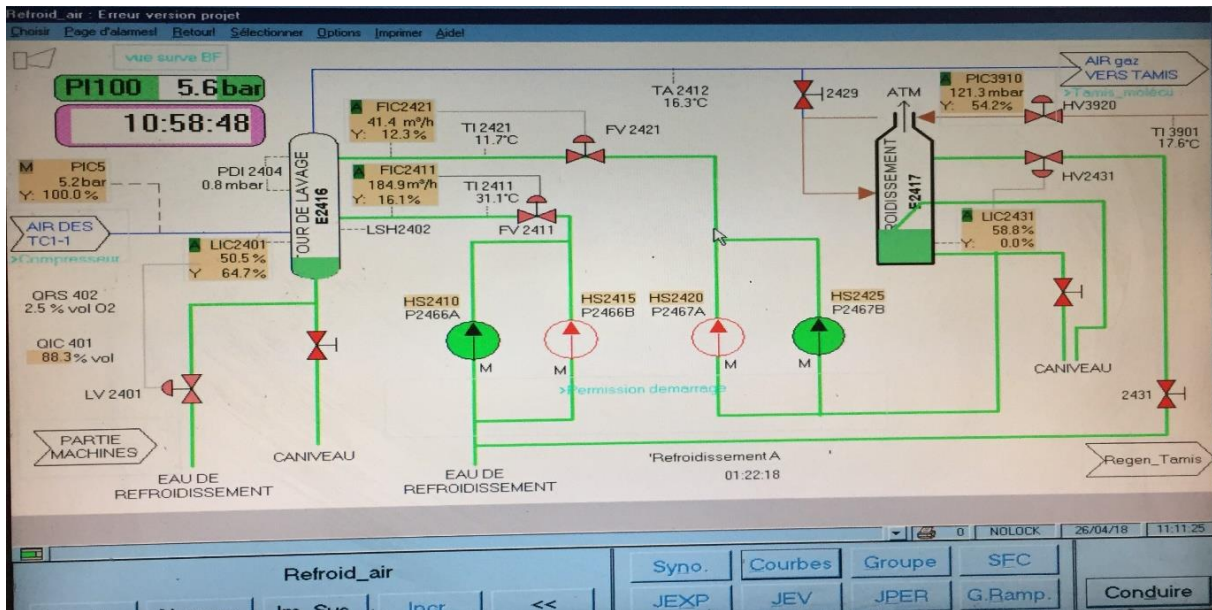


Figure I .11 : Schéma de lavage et refroidissement.

d) La filtration (séchage) de l'air:

C'est l'étape de purification d'air, pour la continuation normal de l'installation, l'air doit être pur est sans (humidité, dioxyde de carbone, hydrocarbures, particule de poussière).

L'épuration est réalisé grâce aux tamis moléculaires (enceinte chaude fermé calorifugé à 100% rempli d'alumine et de zéolithe) qui représente un matériel solide et poreux qui a la propriété d'agir comme un tamis à l'échelle moléculaire. Il s'agit d'une classe d'adsorbant qui a la capacité de retenir certaines molécules à l'intérieur de ses pores. Dans l'idéal, il possède des pores de petite taille distribués de manière homogène. Il a de ce fait une grande surface spécifique.

Dans cette centrale ce trouve deux tamis moléculaires travaillant en alternance chaque 3 heures, l'une travaille et l'autre passe à l'étape de régénération, Chaque enceinte contient à l'intérieur deux lits, un pour éliminer l'hydrocarbure avec le 13x(c'est une formule chimique très longue pour abrégé en l'appelle x), l'autre lit a pour but d'absorber les humidités avec l'alumine<Al₂O₃>.

Les tamis moléculaires sont souvent utilisés pour filtrer des gaz et des liquides ; un bon exemple est l'élimination de l'eau dans un solvant organique ou dans l'air, les micropores du tamis moléculaire réabsorbant l'eau jusqu'à des concentrations très faibles.

o La régénération :

Après les 3 heures de travail le tamis sera saturé et passe automatiquement à l'étape de régénération et l'autre entre en travail, la régénération est basée sur l'azote(N₂). Les plus importantes opérations sont le chauffage qui dure 1 heure et le refroidissement qui prend une heure et demi.

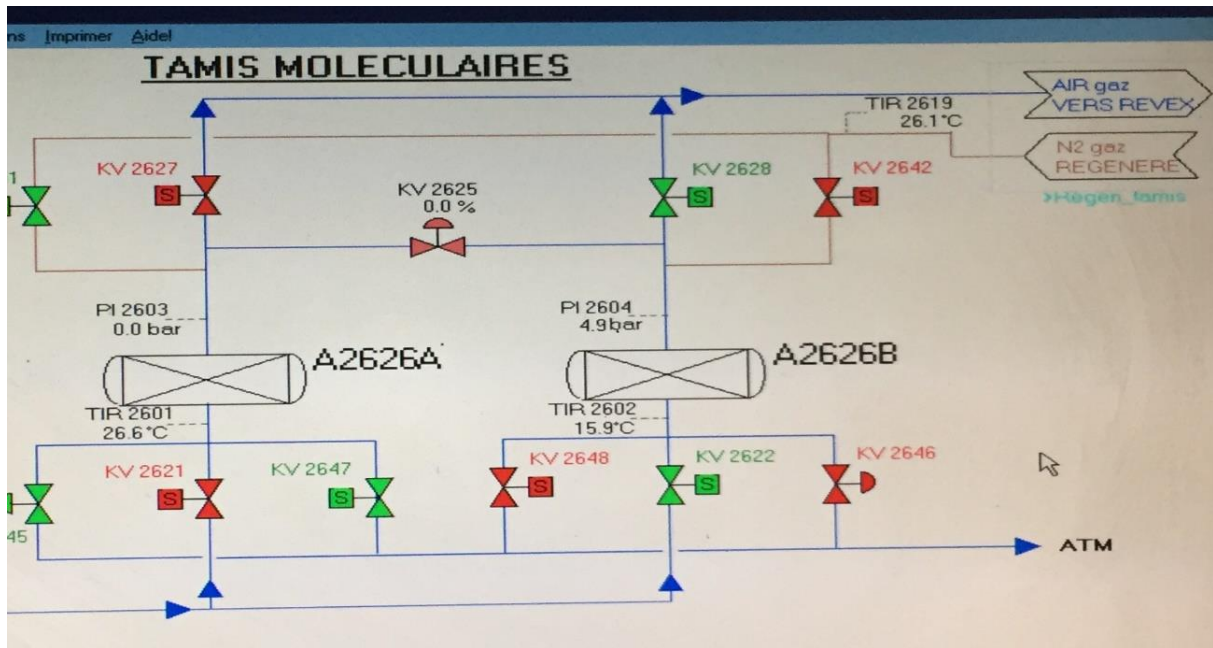


Figure I.12 : Schéma de La filtration (séchage) de l'air.

e) Le refroidissement :

L'air va passer maintenant par les REVEX : c'est un ensemble d'échangeurs de chaleur faisceau et calandre contre-courant) situés entre eux d'une façon parallèle permet de baisser la Température de l'air de 15°C à la température de rosé, l'échange de chaleur est réalisé dans deux blocs composés de 8 échangeurs, chaque bloc est construit de deux cadres appelés « bout chaud, et bout froid », à la sortie du bout chaud la température d'air est environ 70°C et 90°C, l'air donc passe au bout froid pour atteindre la plus basse température ; à la fin de cette étape la température devient environ -160 °C.

f) La liquéfaction :

Après le passage par les REVEX, une partie d'air va passer maintenant par les Turbines de froid: c'est l'étape de la création du froid, ici la pression diminue de 5bars jusqu'à 0.4bar, et la Température sera alors -180°C.

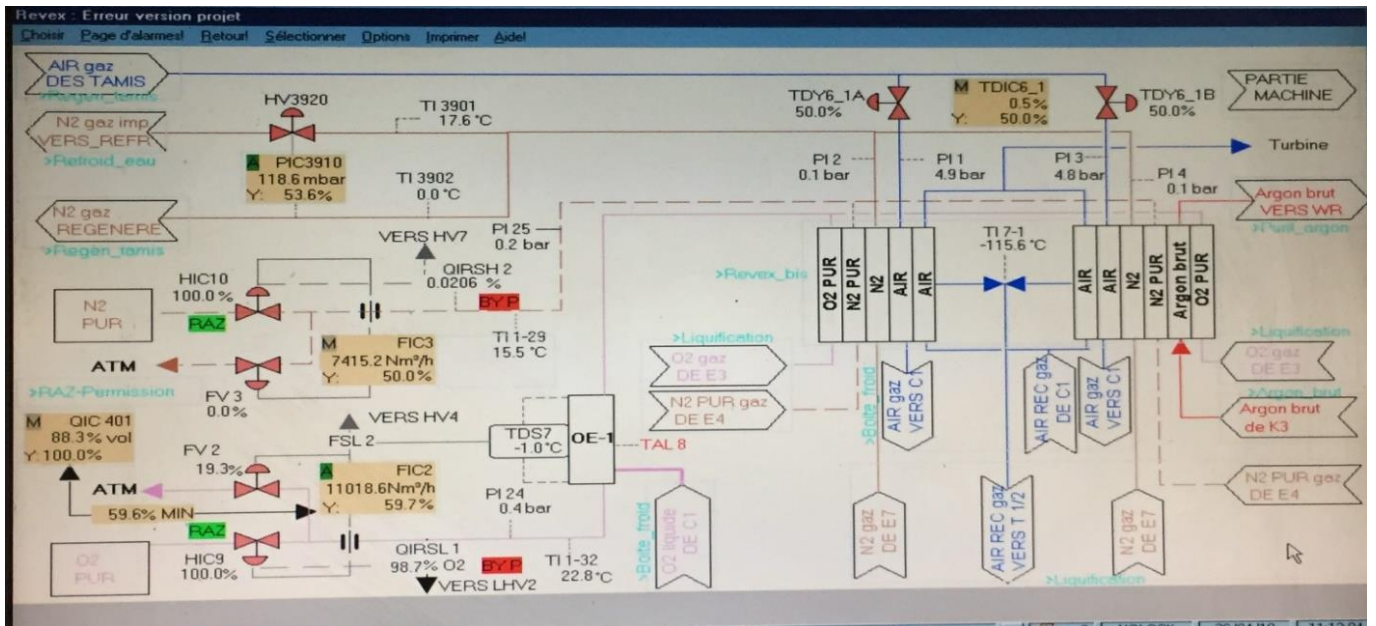


Figure I.13 : Schéma de refroidissement de L'air sec.

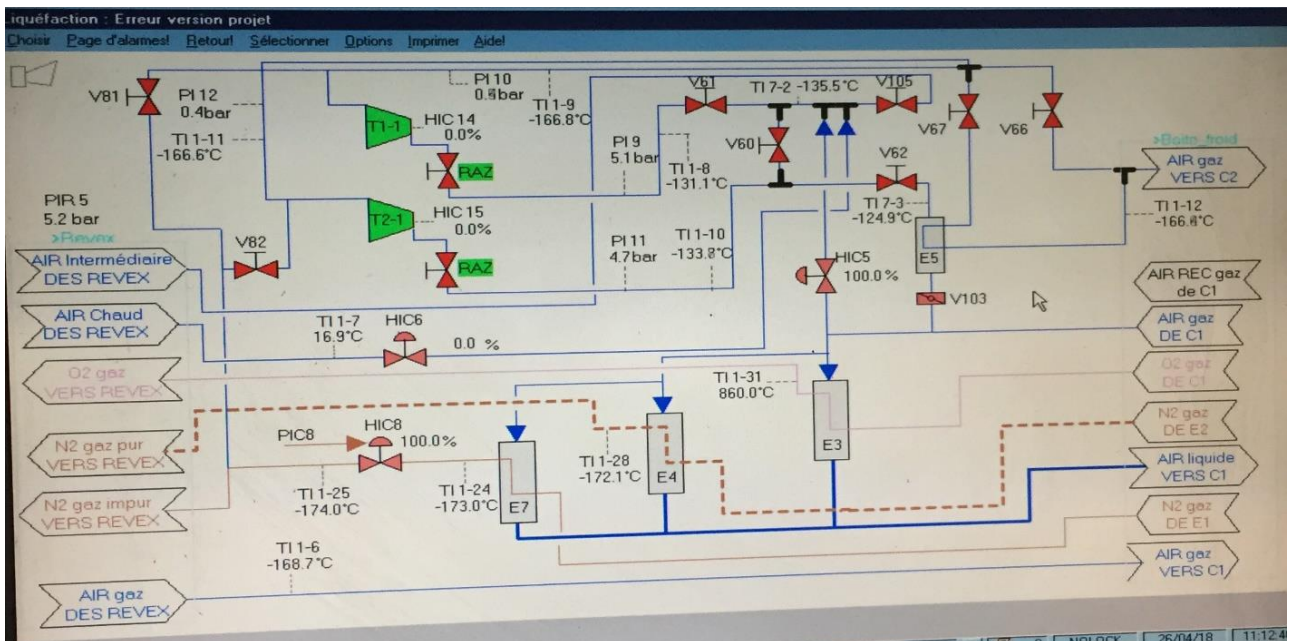


Figure I.14 : Schéma des turbines et les liquéfacteurs.

g) La distillation :

La distillation s'effectue au niveau de la double colonne, elle a pour but d'extraire à 100% chacun des constituants d'air.

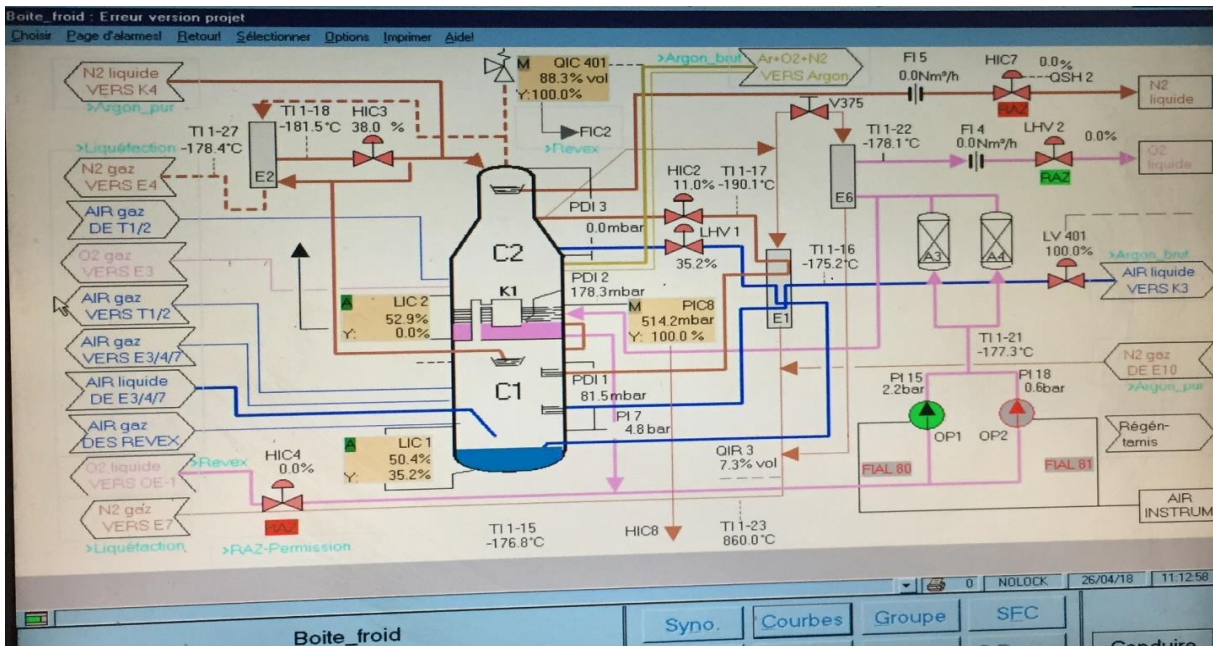


Figure I.15 : Schéma de colonne de distillation (fractionnement).

A fin d'obtenir le meilleur rendement de séparation, l'expérience montre qu'il faut mettre en œuvre des appareils appelés colonnes de distillation.

Cet appareil se compose d'un récipient contenant des plateaux en assez grand nombre, ces plateaux sont munis de dispositifs permettant au gaz de les traverser de bas en haut et d'autres permettant l'arrivée du liquide et son écoulement, Le liquide circulant de haut en bas. Dans la partie médiane de la colonne, on introduit le mélange à séparer, soit à l'état liquide, soit à l'état gazeux.

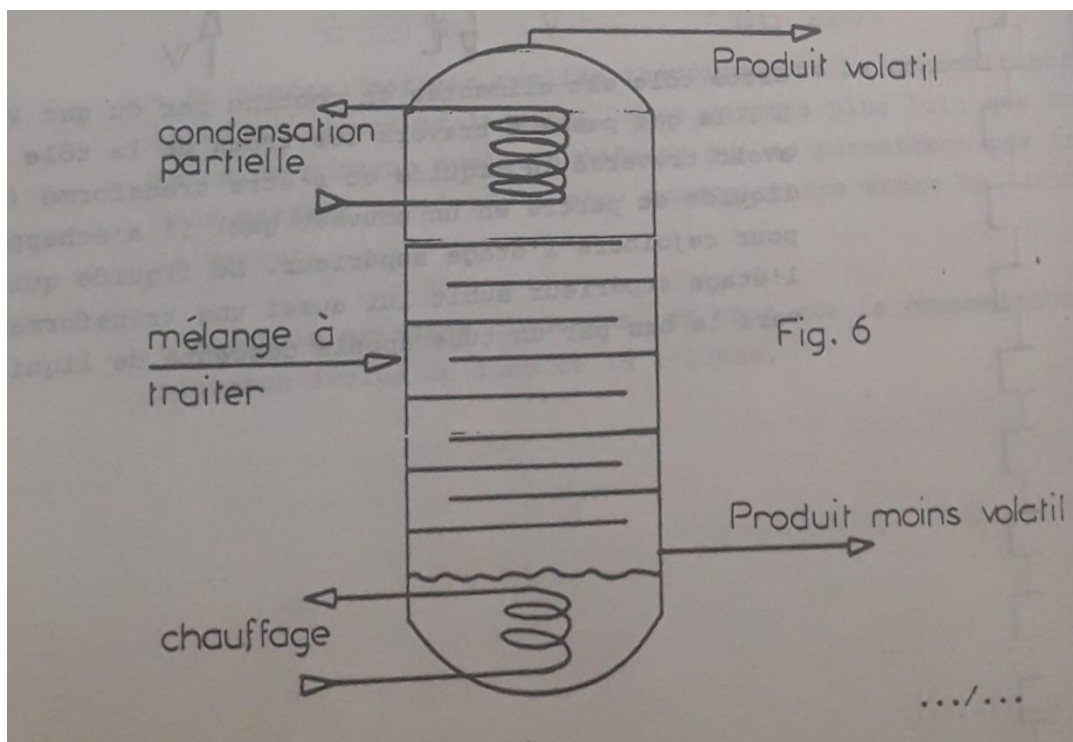


Figure I.16 : Schéma de récipient

En haut de la colonne, un réfrigérant condense une partie des vapeurs dégagées et produit ainsi un reflux ou rétrogradation .en bas un dispositif de chauffage produit la vaporisation d'une partie du liquide. La vapeur produite remonte dans la colonne en sens inverse du liquide.

- **Principe des plateaux :**

Pour une meilleure compréhension de ces phénomènes, considérons schématiquement un plateau comme une tôle perforée dans lequel circule de façon concomitante une phase liquide et une phase vapeur. Nous supposons que le liquide a la même composition en tous points de la surface d'un plateau et que la vapeur sortant d'un plateau est en équilibre avec le liquide de ce plateau. Enfin, sont négligées les entrées de chaleur par les parois latérales de la colonne.

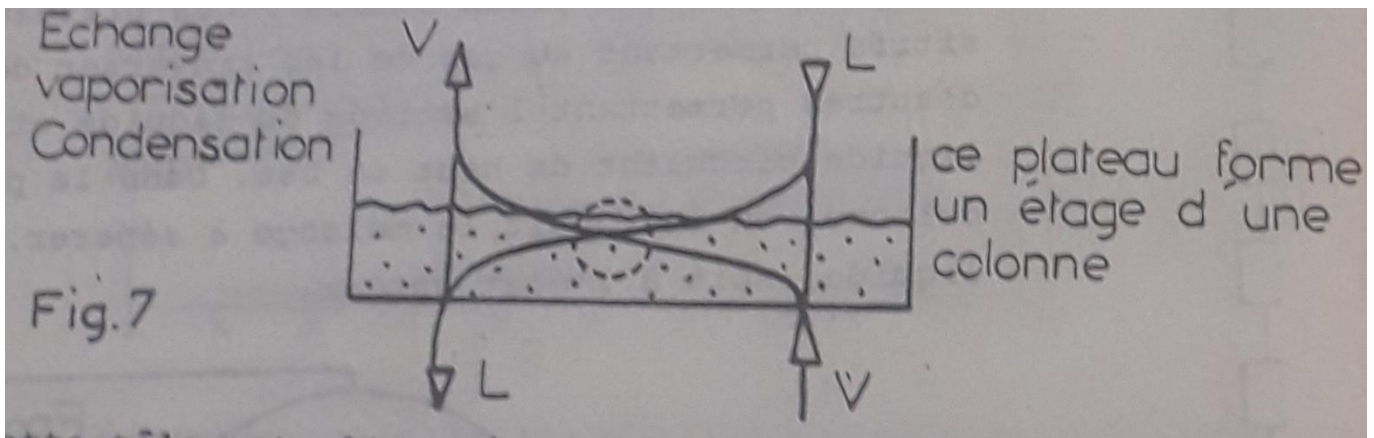


Figure I.17 : Schéma d'un plateau.

Cette tôle est alimentée en continu par du gaz V du liquide L. Le gaz passe à travers les trous de la tôle perforée. Après avoir traversé le liquide et s'être transformé (partie en liquide et partie en un nouveau gaz), il s'échappe par le haut pour rejoindre l'étage supérieur. Le liquide qui provient de l'étage supérieur subit lui aussi une transformation et s'échappe vers le bas par un tube appelé descente de liquide.

La Figure I.17 nous nous explique que le produit de la haute colonne est le plus volatil donc le plus froid. Le liquide descendant sera donc plus froid que le gaz montant.

En traversant le liquide, le gaz se refroidit et se condense partiellement, en même temps, il chauffe le liquide qui bout et se vaporise partiellement.

Si la chaleur spécifique des deux constituants est la même, les quantités vaporisées seront égales aux quantités condensées. Un bilan matière montre alors que la quantité de gaz qui part d'un plateau est égale à celle qui est arrivée, de même la quantité de liquide partant du plateau est égale à celle arrivant.

Cependant, la composition du gaz sortant est différente de celle du gaz entrant, il a laissé de l'oxygène dans le liquide pour prendre de l'azote à la place. Inversement, le liquide qui part du plateau est plus riche en oxygène que celui qui est arrivé.

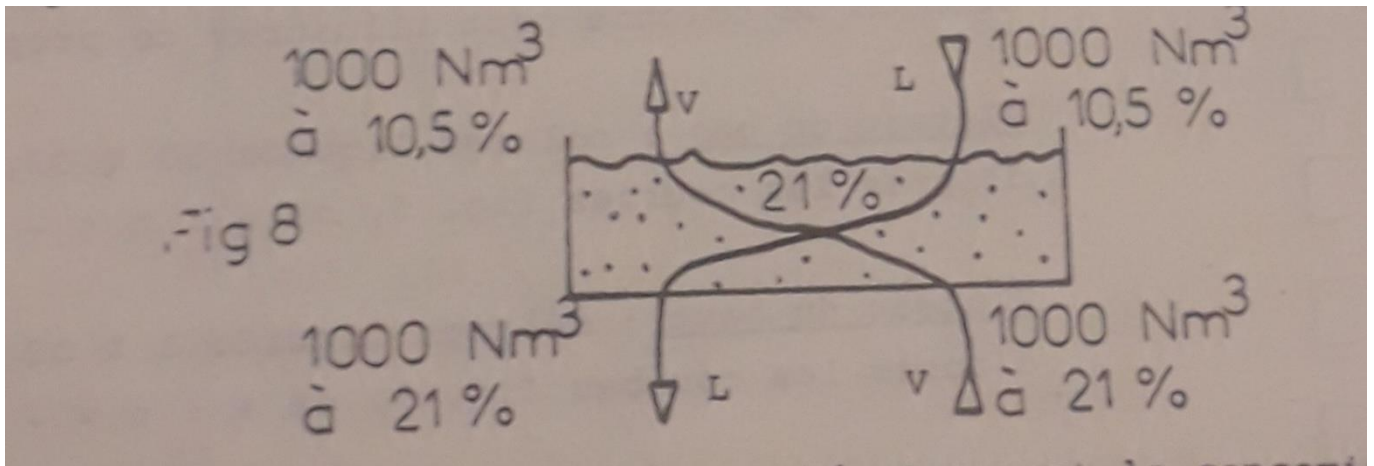


Figure I.18 : Le principe des plateaux.

Un plateau parfait réalise théoriquement la concomitance des teneurs vapeurs et liquides. Nous verrons plus loin que les plateaux comportent quelques défauts qui ne permettent pas un rendement parfait et il n'y a plus concomitance entre le liquide et la vapeur.

Selon le principe ci-dessus, on voit que la composition par plateau évolue le long de la colonne. On peut représenter les teneurs en oxygène sur toute la hauteur d'une colonne à l'aide du diagramme ci-dessous :

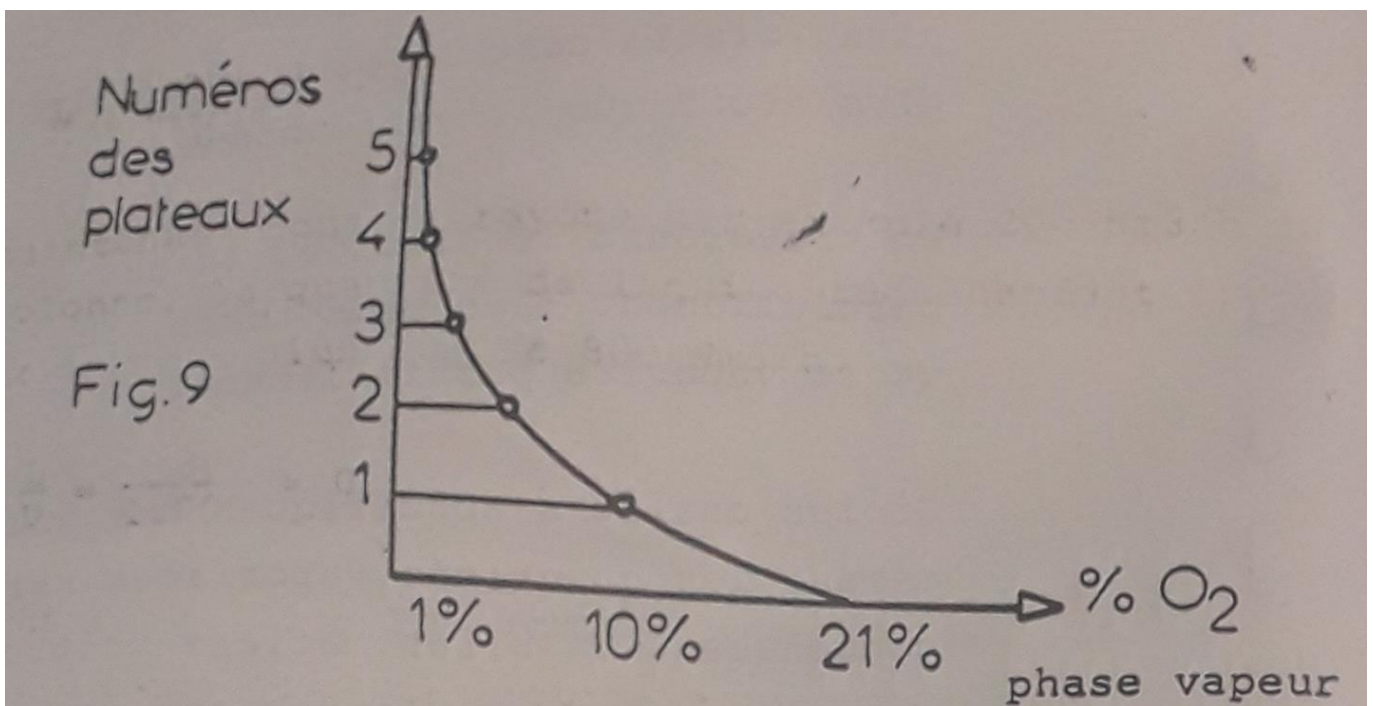


Figure I.19 : Diagramme des teneurs en oxygène

Nous savons que la température a un plateau donné résulte de composition du mélange sur ce plateau. Il y a donc successivement de température d'ébullition, les températures allant du plateau chaud <en bas> au plateau froid <en haut>. [1]

- **Le cas réel :**

Reprenons notre plateau qui représenter au figure suivante :

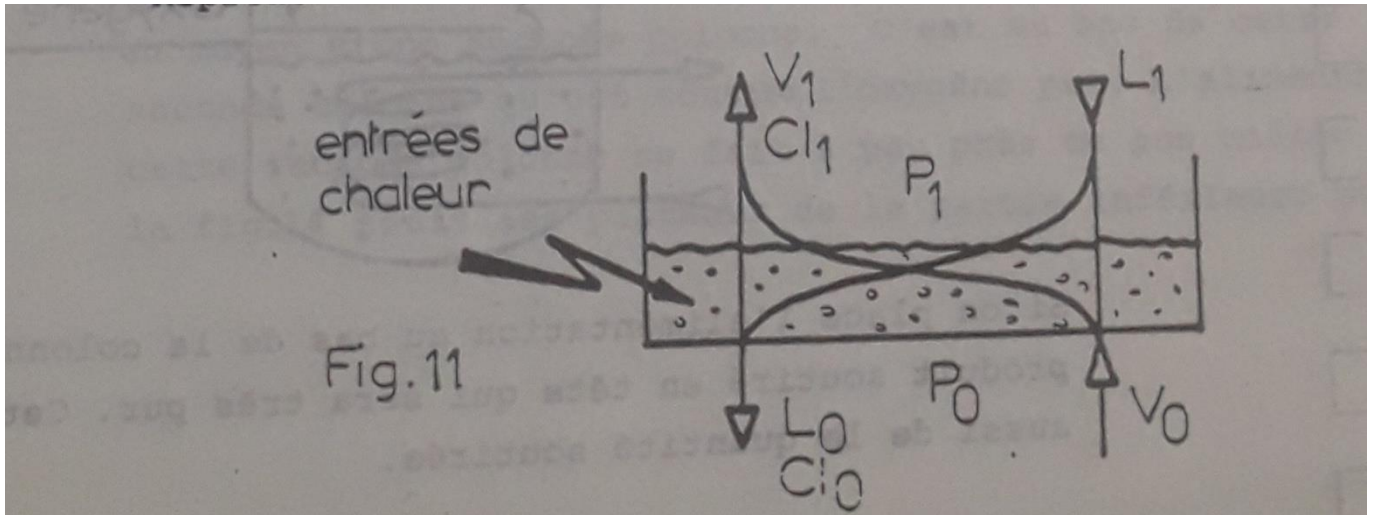


Figure I. 20 : Schéma d'un plateau dans le cas réel

Nous avons pris comme hypothèse :

- 1- Aucune entrée de chaleur
- 2- Chaleurs de vaporisation identiques pour tous les constituant
- 3- Pas de pertes de charge par plateau

Sur le plateau réel :

1- les entrées de chaleur entraînant une vaporisation partielle sans condensation de liquide, donc ($V_1 > V_0$)

2- La chaleur de vaporisation de l'oxygène est plus importante que celle de l'azote, ce qui entraîne $Cl_1 < Cl_0$ puisque V_1 est plus pauvre en oxygène, ainsi V_1 sera encore augmentée.

4- La perte de charge par plateau $P_0 > P_1$ implique une température plus basse de V_1 , donc une vaporisation accrue. [1]

- **Produit séparés :**

Dans la colonne nous pouvons obtenir l'un des produits aussi pur qu'on le désire, fonction du nombre de plateaux et de quantité soutirée, mais c'est toujours au détriment de l'autre produit. La position de l'alimentation et la teneur du mélange à distiller conditionnent aussi les pertes du produit désiré ainsi figure 21 si l'alimentation en air liquide se fait au sommet, le produit sortant en tête contiendra beaucoup d'oxygène même si le nombre de plateaux est très grand mais l'oxygène très pur.

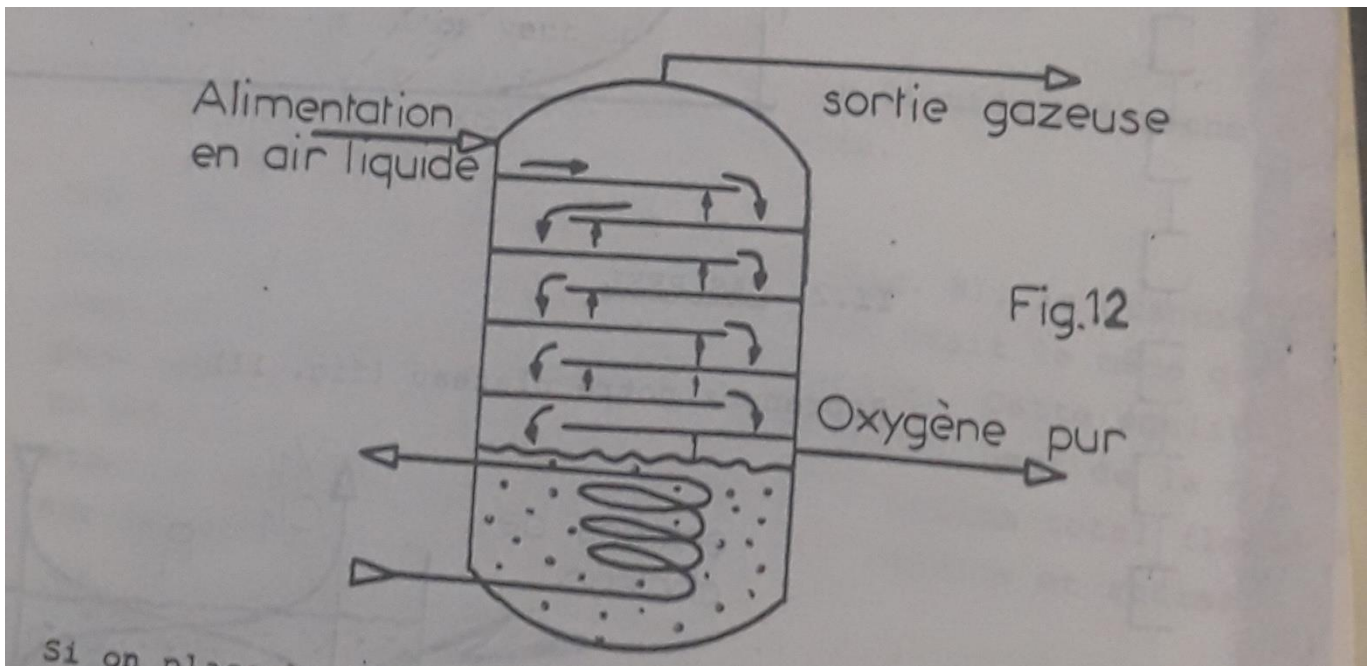


Figure I.21 : Figure de colonne de séparation

Si on place l'alimentation au bas de la colonne, c'est le produit soutire en tête qui sera très pur. Cette pureté dépendra aussi de la quantité soutirée.

Le liquide soutiré en haut est appelle liquide riche (en oxygène)

Maintenant, s'il on veut obtenir de l'oxygène pur à partir de ce liquide riche, il faudra le traiter dans une deuxième colonne. .[1]

- **La double colonne de la rectification :**

nous venons de dire qu'à partir du liquide riche produit dans une première colonne, il était possible d'obtenir de l'oxygène pur en moyen d'une seconde colonne c'est au bas de cette seconde colonne qu'est soutiré l'oxygène pur . L'alimentation de cette seconde colonne se fait à peu prés en son milieu et selon, seuls les plateaux de la partie inferieure peuvent en conséquence recevoir du liquide. Dans ces conditions, il n'ya aucune raison pour qu'une distillation se produise, les plateaux de la partie supérieure, seul du gaz pourrait s'échapper à son sommet, et ce gaz étant en concomitance, le liquide riche serait trop riche en oxygène .Il est donc nécessaire de garnir les plateaux supérieures en liquide pour provoquer une distillation dans la partie supérieure, ce liquide aura pour effet de diminuer les pertes d'oxygène.

Ce liquide sera prélevé de la première colonne, la figure I.22 représente cette double colonne. .[1]

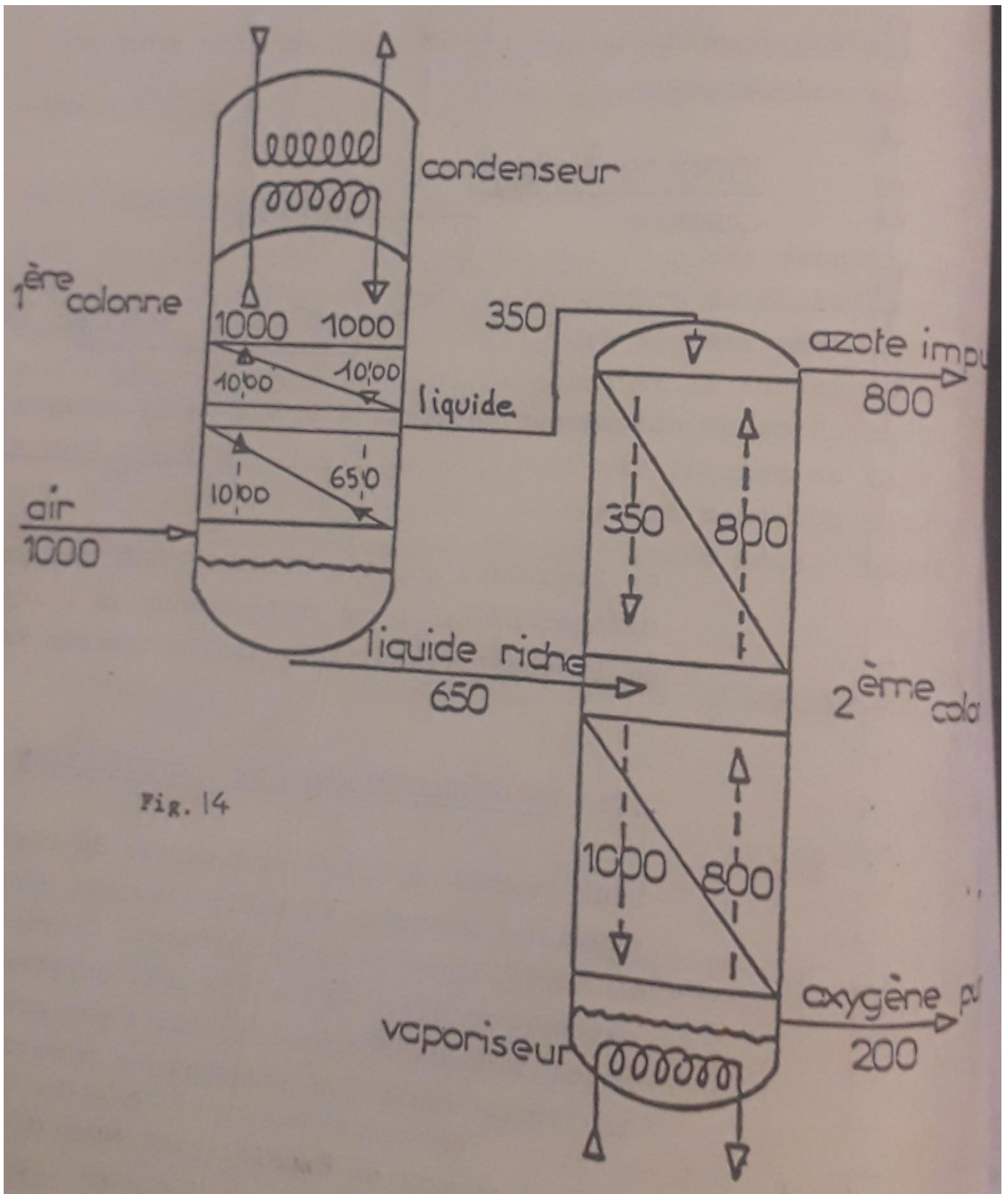


Figure I.22 : Schéma d'un double colonne

- **Fonctionnement d'une colonne :**

On peut schématiser l'ensemble des deux colonnes comme suit :

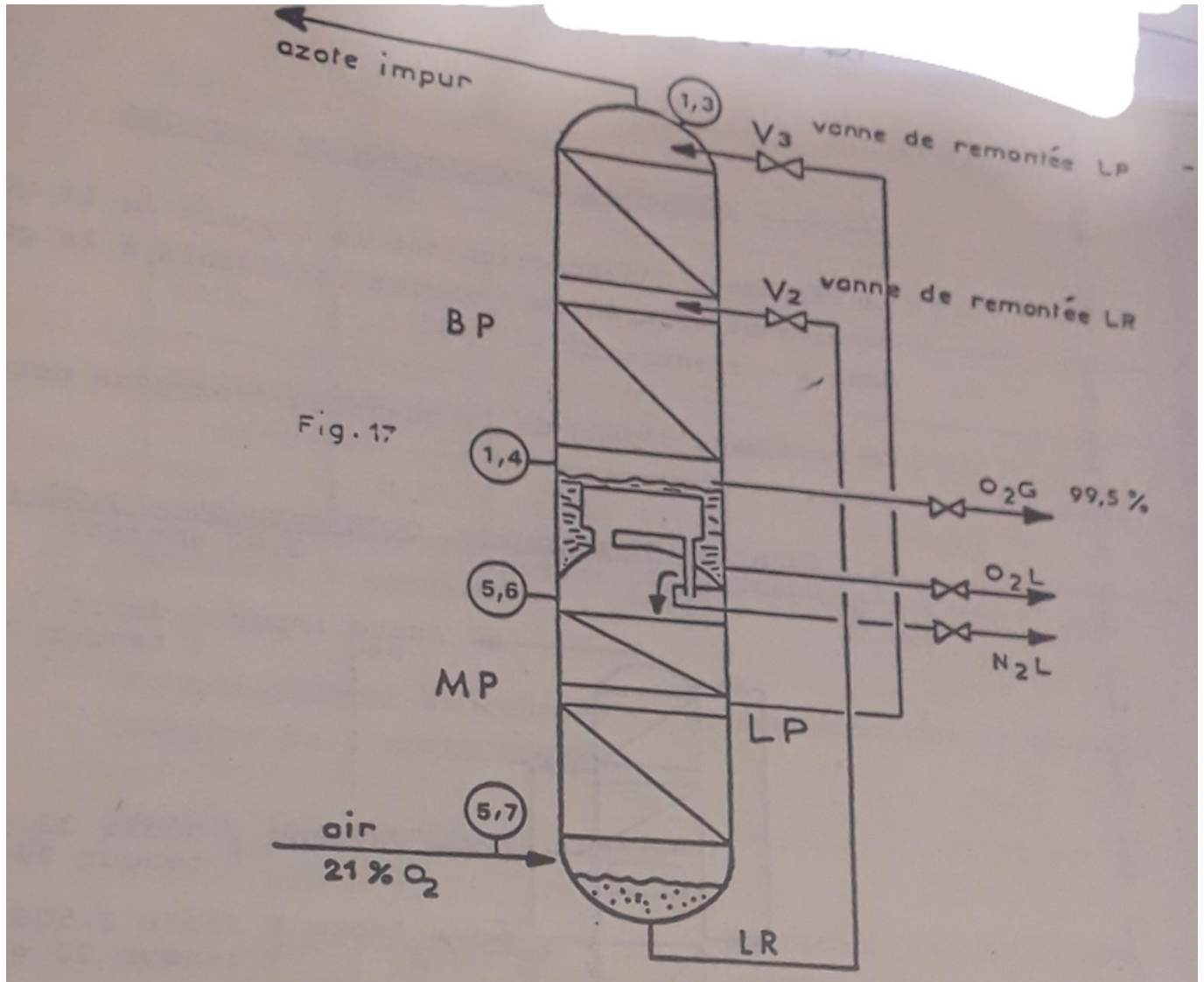


Figure I.23 : Schéma d'une colonne

Le liquide du bas de la MP (moyenne pression) remonte au milieu de la BP (bas pression) c'est ce qu'on appelle « remontée de liquide riche ». Le liquide riche contient la plus grande partie de l'oxygène de l'air entrant dans la colonne.

Le liquide de haut de la MP remonte au sommet de la BP. c'est ce qu'on appelle « remontée de liquide pauvre », Le liquide pauvre étant de l'azote presque pur.

La colonne MP fonctionnant à 5,6 bars environ, alors que la colonne BP a une pression légèrement supérieure à la pression atmosphérique, les liquides seront détendus. Les vannes V2 et V3 permettent de maintenir le niveau constant en liquide riche et la quantité soutirée en liquide pauvre.

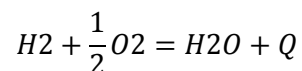
Le maintien constant du niveau de liquide riche permet d'éviter la passage de gaz de la MP vers la BP. Le niveau du liquide pauvre se maintient constant par débordement. Au sommet de la colonne BP se trouve la sortie des résiduaire appelés « azote impur ». [1]

h) La production d'argon :

La colonne de mixture argon permet d'obtenir du gaz contenant encore entre 2 et 3 % d'oxygène « c'est l'argon brut ».

L'élimination de cet oxygène se fera par réaction chimique avec de l'hydrogène en présence d'un catalyseur. Le gaz à la sortie de la colonne de mixture est d'abord réchauffé jusqu'à la température ambiante dans un échangeur puis comprimé à environ 5bars , L'hydrogène est ensuite ajouté au gaz ,puis le mélange passe dans le réacteur DEOXO rempli de billes d'alumine recouvertes de palladium .

La quantité minimum d'hydrogène à injecter est de 2 Nm pour 1Nm d'oxygène a éliminer



(Réaction exothermique, c'est à dire dégageant de la chaleur)

De façon à assurer une réaction complète sans trace d'oxygène en sortie de DEOXO, la quantité d'hydrogène est major pour avoir un excédent d'environ 1% d'H₂ dans le gaz sortant de déoxo, teneur contrôlée par analyse spécifique.

le gaz contient une certaine quantité d'eau sous forme vapeur, la température étant élevée, il faut d'abord refroidir le gaz dans un réfrigérant puis éliminer l'eau liquide obtenue par condensation dans un séparateur, le gaz est enfin séché dans des bouteilles de dessiccation.

La dernière étape nous a permis d'obtenir l'argon pur et éliminer l'hydrogène et l'azote dans la colonne de rectification d'argon pur par un refroidissement jusqu'à sa température de liquéfaction, il sera plus facile d'éliminer les traces d'azote et d'hydrogène par distillation à basse température parce que la température de rosée de ceux-ci étant éloignée de celle de l'argon.

L'argon pur est recueilli dans la partie basse de la colonne, il peut être soutire soit sous la forme gazeuse ou liquide. [1]

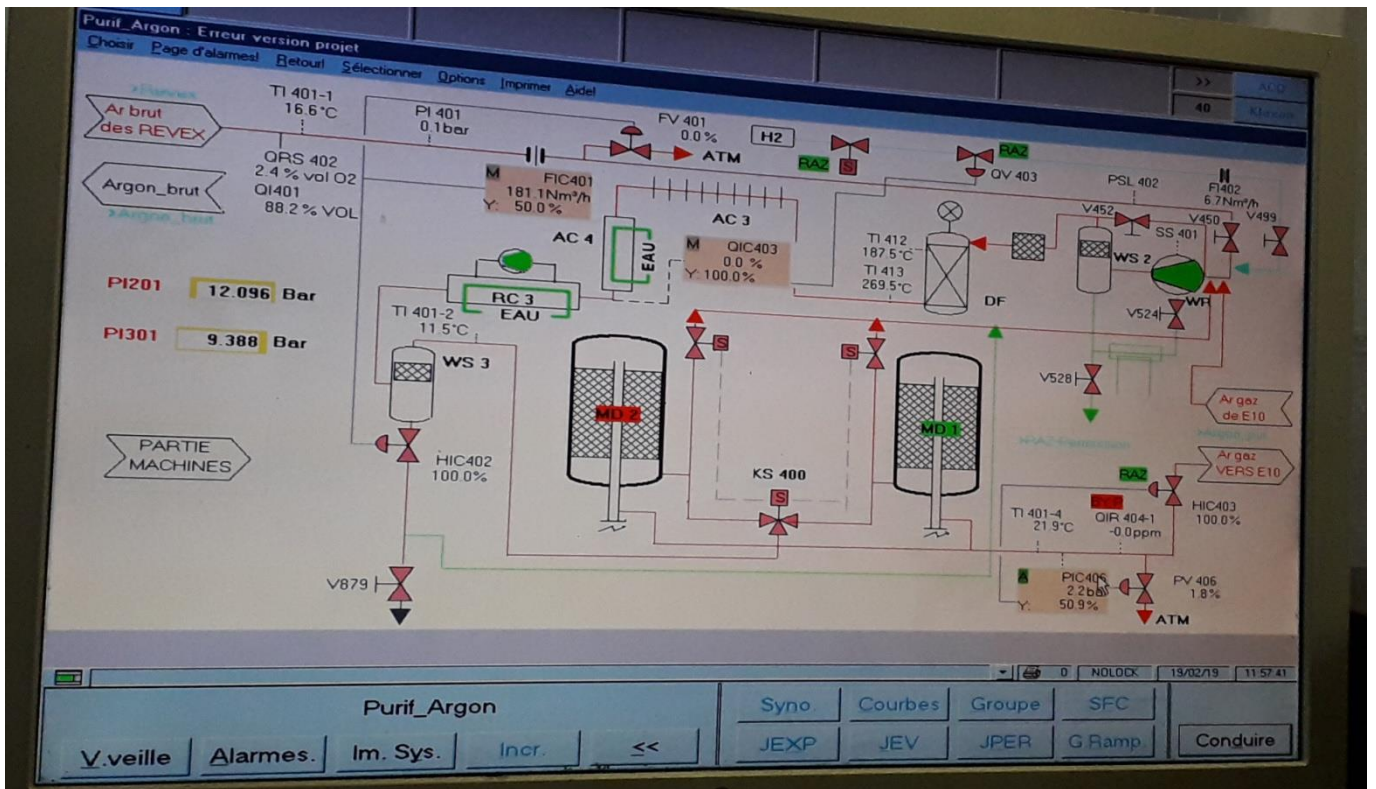


Figure I.24 : Purification d'argon

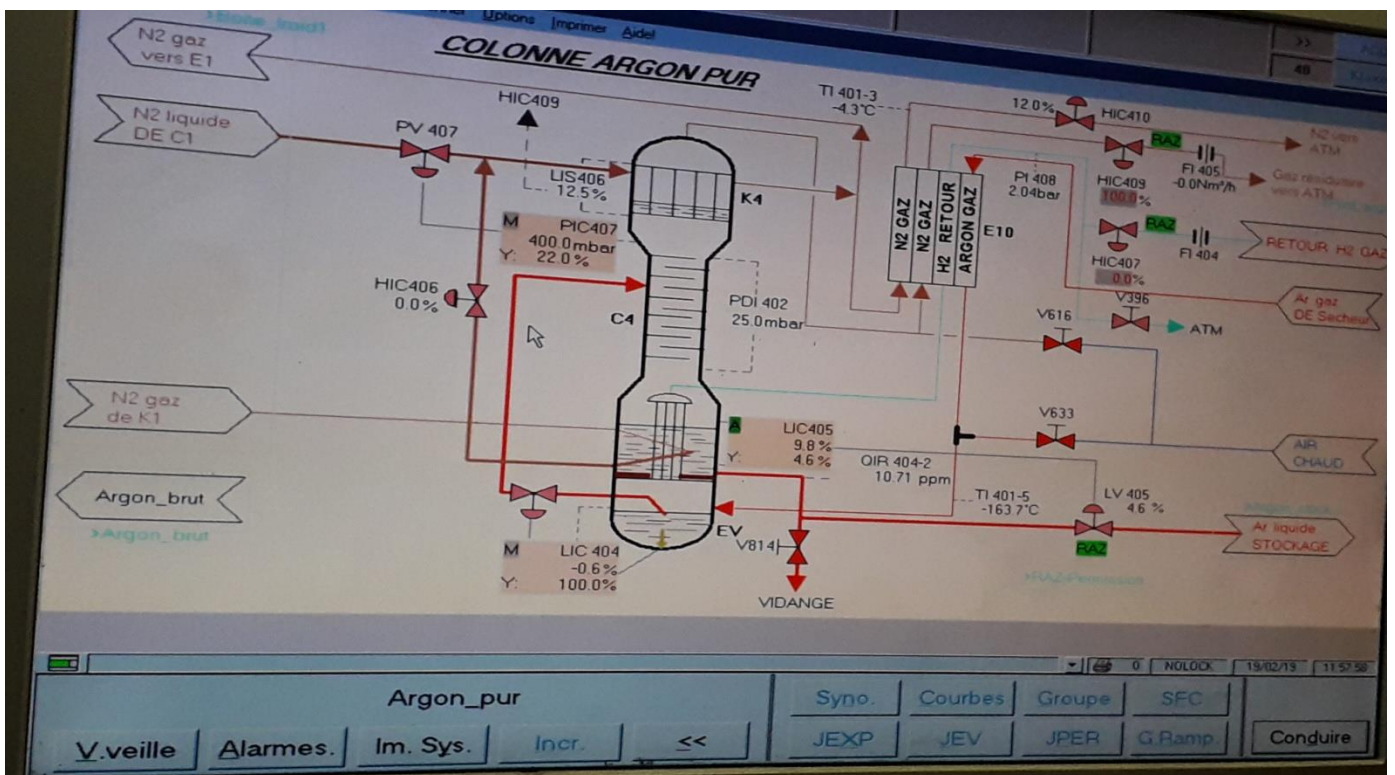


Figure I. 25 : Schéma de colonne d'argon pur

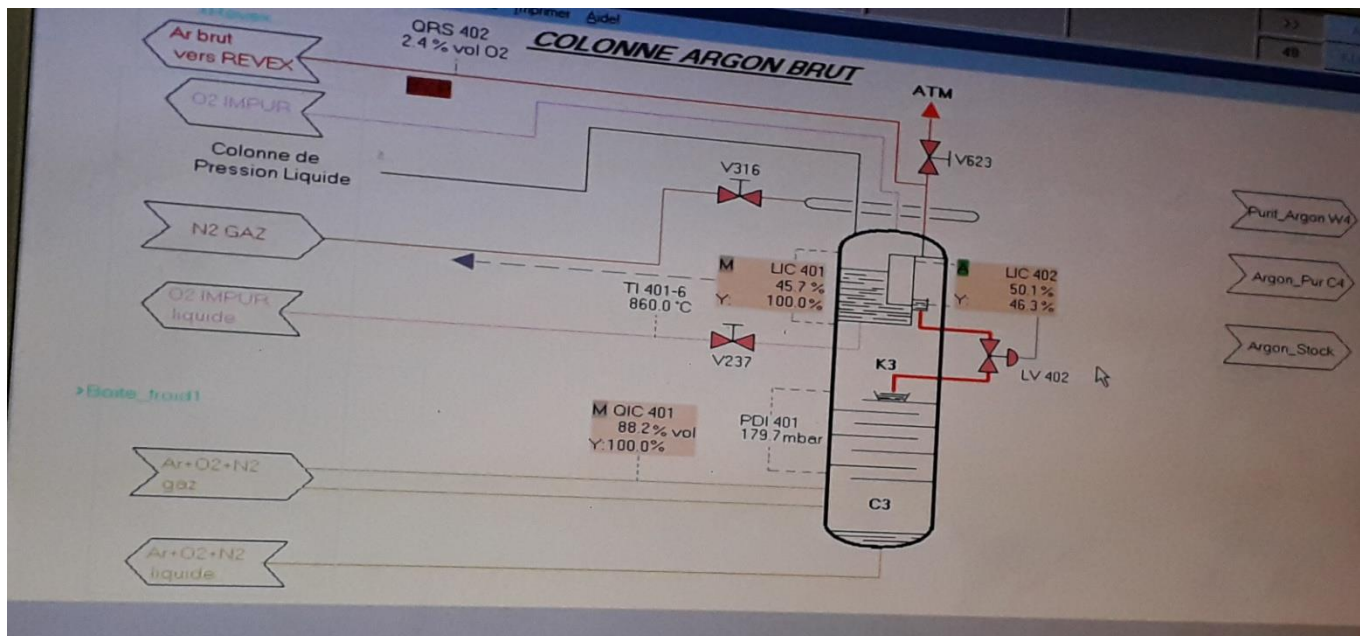


Figure I.26 : Schéma de colonne d'argon brut.

A la fin des étapes de production du « liquide et gaz » tous les produits passent au stockage. Les figures suivantes représentent ces étapes.

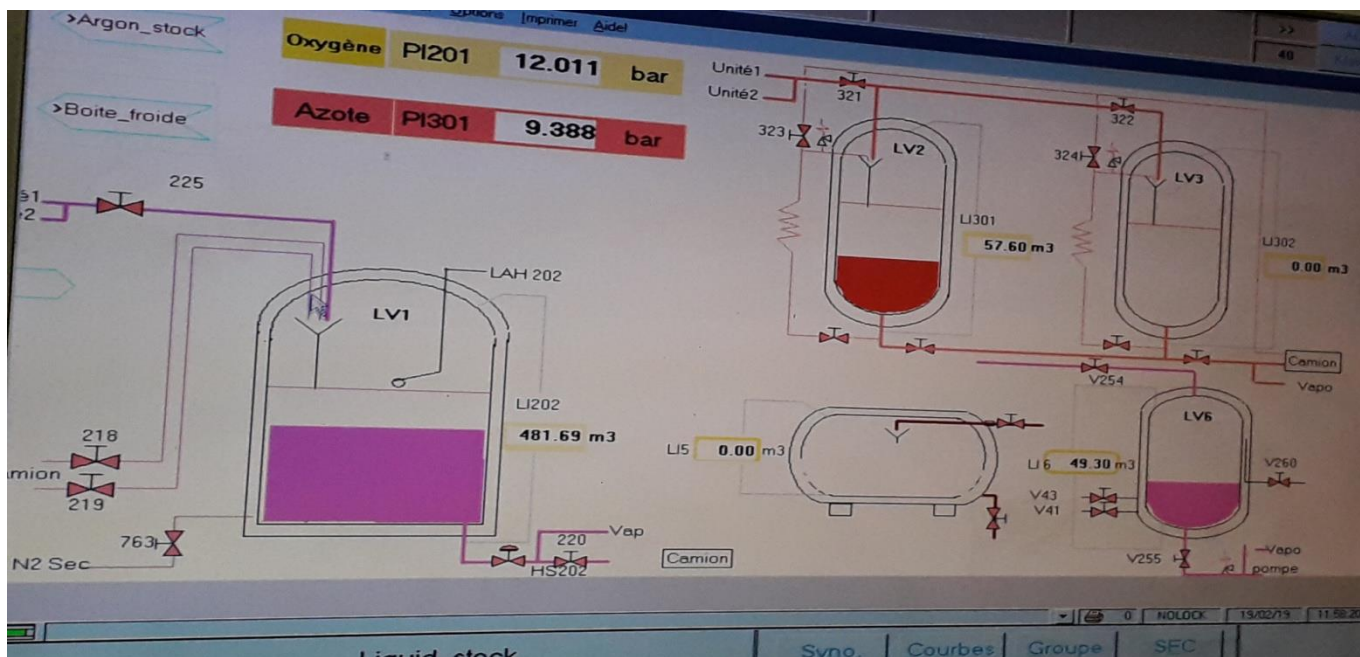


Figure I. 27 : Stockage d'azote et oxygène liquide.

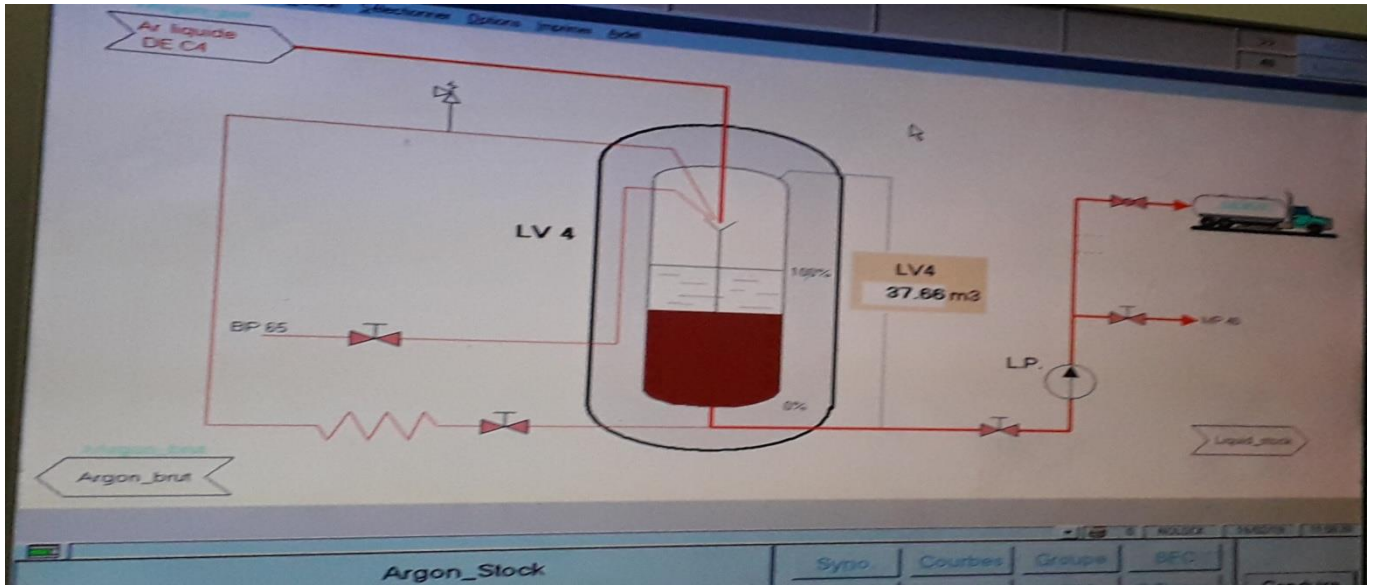


Figure I.28 : Stockage d'argon.

I.6 Organisation technique des unités de la COX

- 04 compresseurs à piston communs
- 02 pour l'oxygène
- 02 pour l'azote
- Chaque unité se compose de :
 - 01 turbocompresseur
 - 02 tamis moléculaires
 - 4 pompes à eau
 - 02 tours de refroidissement
 - 02 échangeurs thermiques (2 blocs d'échangeurs)
 - 01 colonne de rectification d'air
 - 02 adsorbants d'oxygène liquide (A3/A4)
 - 02 turbines
 - 02 pompes à oxygène liquide de 21,3 m³/h
 - 01 installation d'argon de l'unité N 3
 - 01 Colonne de mixture d'argon
 - 01 compresseur d'argon brut
 - 01 groupe frigorifique
 - 01 colonne de rectification

II.1 Introduction :

Le présent chapitre, a pour but de citer les différents types des compresseurs et plus particulièrement les compresseurs volumétriques.

II.2 Généralité sur les turbomachines :

Les compresseurs sont des types de turbomachine.

Toutes les turbomachines qui sont les turbocompresseurs, les ventilateurs, les turbines à vapeur; à gaz; hydrauliques; les pompes centrifuges; et axiales !etc., fonctionnent théoriquement d'après les mêmes principes

II.3 Définitions :

Les compresseurs sont des appareils utilisés pour comprimer le gaz pour réaliser un accroissement de pression d'un fluide à l'état gazeux.

Les fluides traversant les compresseurs peuvent être de nature diverse : gaz pur, mélange gazeux, vapeur surchauffée ou saturée, cette augmentation de pression peut être effectuée à l'aide de deux techniques différentes occupées par le gaz

Les compresseurs à déplacement positif augmentent la pression en réduisant le volume occupé par le gaz

Les compresseurs dynamiques fonctionnent d'abord en accélérant le gaz à une vitesse élevée et en empêchant son mouvement de telle sorte que l'énergie cinétique du gaz soit convertie en pression statique [1]

II.4 classification générale :

Si la température d'un gaz est maintenue constante, sa pression est inversement proportionnelle au volume spécifique, un accroissement de pression peut donc être obtenue au moyen d'une réduction du volume occupé par le gaz. Dans ce cas l'élévation de pression résulte d'une compression, c.-à-d d'une action directe sur le volume d'une masse gazeuse donnée. La diminution du volume du gaz conduit toujours à un accroissement de la pression. Selon ce principe de fonctionnement on peut classer les compresseurs en deux grandes familles :

- Les turbocompresseurs
- Les compresseurs volumétriques

II.4.1: Les turbocompresseurs :

Les turbocompresseurs sont des compresseurs dynamiques mini d'aube. Ils sont des compresseurs dans lesquels l'augmentation de pression du fluide s'obtient par transformation d'énergie cinétique en énergie potentielle, avec écoulement continu de l'aspiration au refoulement.

Les turbocompresseurs se divisent en appareils centrifuges et axiaux

II.4.2: Les compresseurs volumétriques :

Dans ces appareils, l'énergie nécessaire pour produire l'élévation de pression est dépensée sous forme de travail qui est fourni par un moteur d'entraînement.

Les compresseurs volumétriques sont divisés en deux types (à pistons et rotatifs) [2]

La figure II.1 représente une classification des compresseurs :

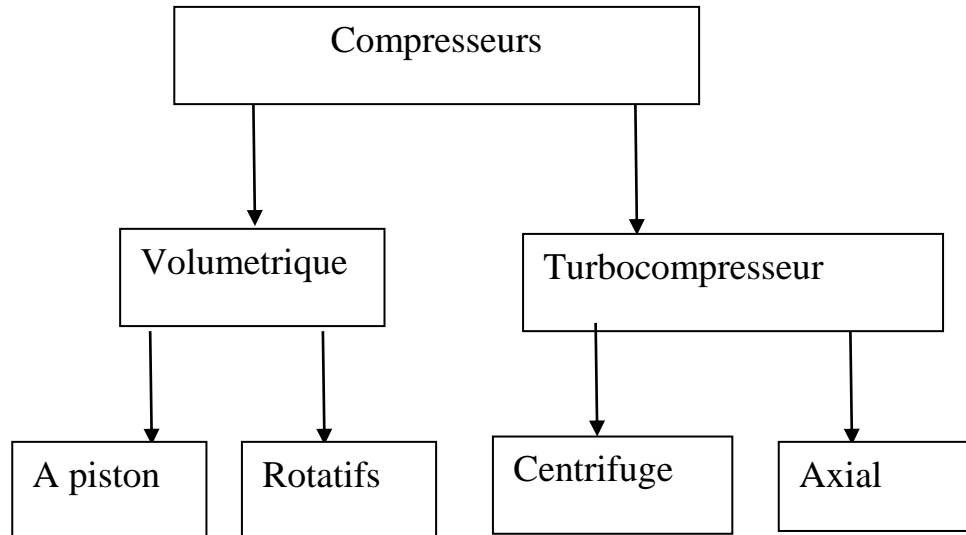


Figure II.1 : Classification des compresseurs.

II-5 : Les turbocompresseurs :

II.5.1 : les compresseurs axiaux :

C'est un type des compresseurs dynamique dans lequel la compression parallèle à l'axe de rotation de fluide, ils sont caractérisés par le nombre d'étage important et le taux de compression n'est pas élevé, ils sont utilisés dans l'aviation « le turboréacteur » et dans les turbines à grande puissance.

II.5. 2 : les compresseurs centrifuges :

Les turbocompresseurs centrifuges augmentent l'énergie du gaz comprimé grâce à la force centrifuge qui est provoquée par le mouvement de rotation des roues munies d'aubes.

L'indice principal de ses compresseurs est la continuité de l'écoulement de l'entrée à la sortie. À l'intérieur de la roue se passe la compression du gaz et l'augmentation de l'énergie cinétique obtenue par le gaz est transformée en énergie potentielle dans les éléments d'immobilité.

La différence entre ces deux types est le sens de l'écoulement à travers la machine, les compresseurs centrifuges comptent parmi les compresseurs les plus largement utilisés dans l'industrie [3].

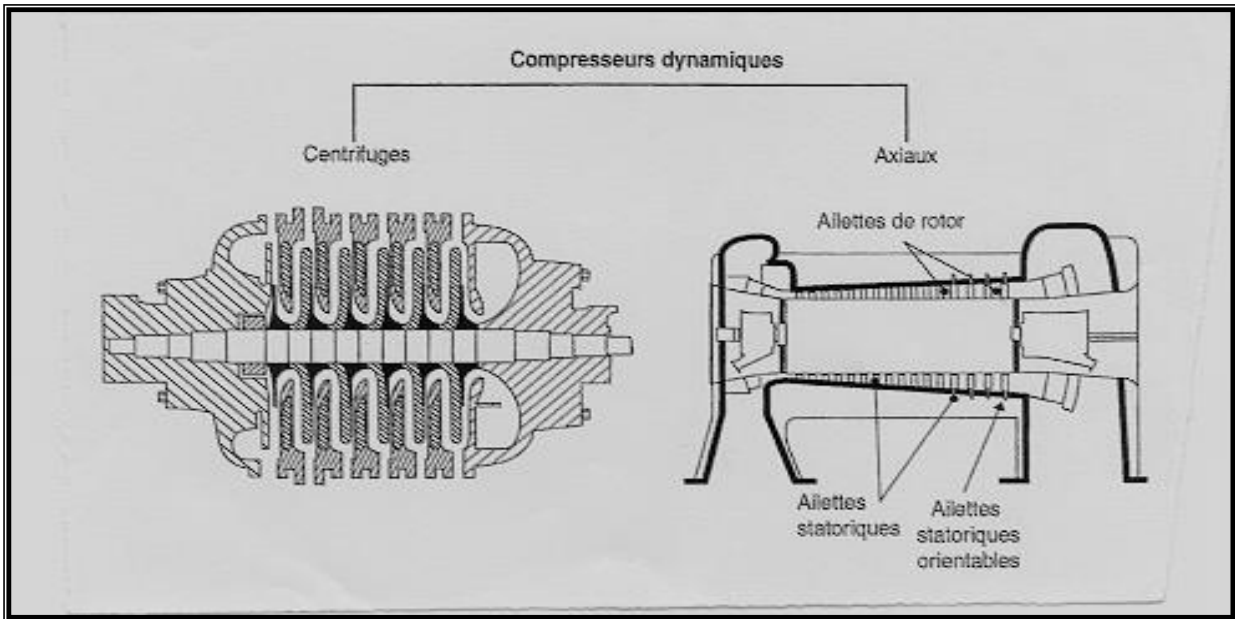


Figure II.2 : Les compresseurs dynamiques.

Les compresseurs alternative a sont tour se composent de 2 types le schéma suivant représente les types

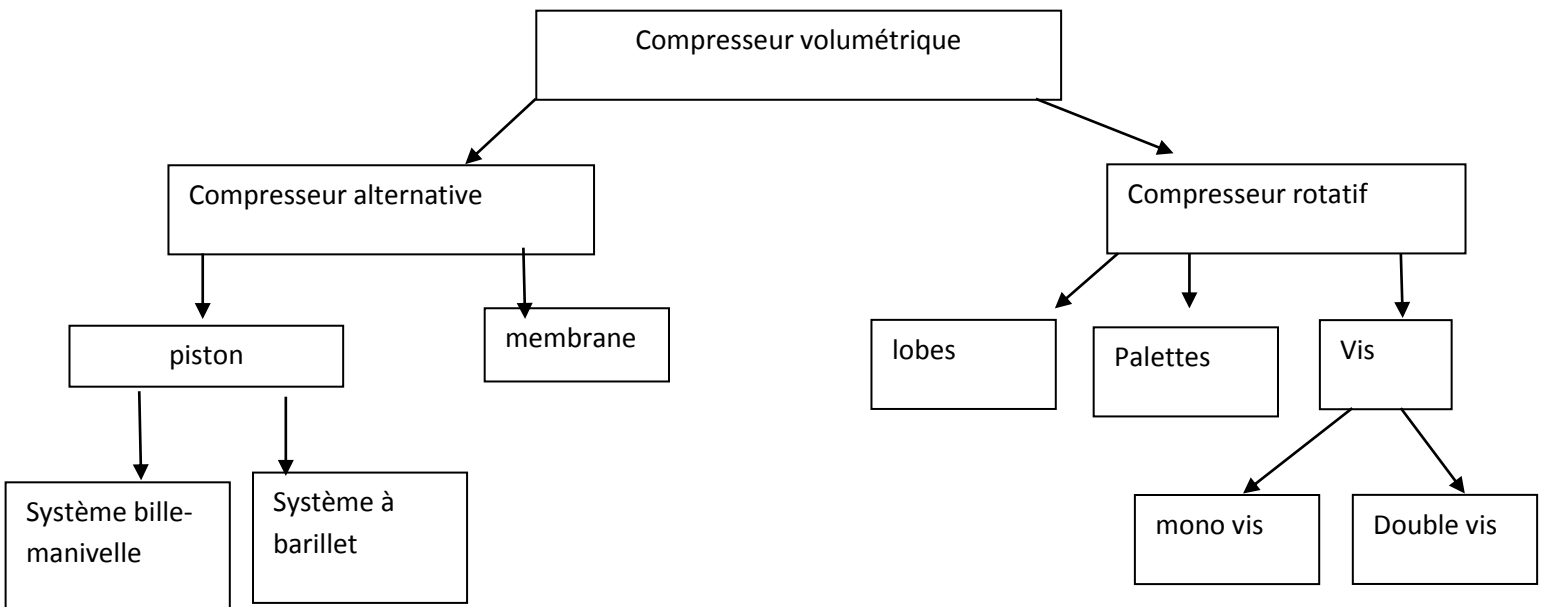


Figure II.3 : Classification des compresseurs.

II.6.1 Compresseur rotatif :

II.6.1 : compresseur a palettes :

Dans un cylindre et autour d'un axe excentré tourne un rotor tangent au cylindre et pourvu de palettes radiales qui coulisent librement dans leur logement et sont constamment appliquées sur la paroi par la force centrifuge.

Le volume compris entre deux palettes consécutives est variable. On distingue trois phases :

1. **L'aspiration** : le volume de la cellule de compression est compris, entre deux palettes consécutives, immédiatement après la génératrice de contact se remplit de gaz et augmente progressivement pendant la rotation d'une valeur nulle jusqu'à un maximum.
2. **La compression** : le volume de cellule de compression compris entre les deux palettes décroît régulièrement et provoque la compression du gaz.
3. **Le refoulement** : la cellule de compression se présente devant les lumières de refoulement, le gaz comprimé s'échappe dans le collecteur de sortie.

Généralement ce type se compose des éléments suivants :

- Un arbre par lequel est transmise l'énergie mécanique du moteur au compresseur.
- Un rotor, claveté sur cet arbre (ou solidaire de cet arbre), présentant extérieurement une surface cylindrique de génératrice parallèle à l'axe de l'arbre.
- Un carter entourant ce rotor, constitué de deux flasques perpendiculaire à l'axe du rotor, ainsi que d'un corps tubulaire dont la surface intérieure cylindrique, appelée surface statorique, possède des génératrices parallèles à l'axe du rotor, la directrice étant appelée courbe statorique.
- Un ensemble de palettes coulissant dans des rainures disposées soit dans le rotor, soit dans la partie tubulaire du carter, ces palettes reste en contact permanent avec le rotor et la partie intérieure du carter, de manière à séparer en plusieurs cellules de travail de volume utile compris entre le rotor et le carter.
- Des lumières, ou des clapets commandes ou automatiques, disposés dans les flasques ou dans la partie intérieure du carter ou plus rarement dans le rotor, de manière à permettre l'admission et l'échappement du gaz.

Ce type est sans aucun doute le plus ancien de la famille des compresseurs rotatifs .la première réalisation connue date de 1588[5]

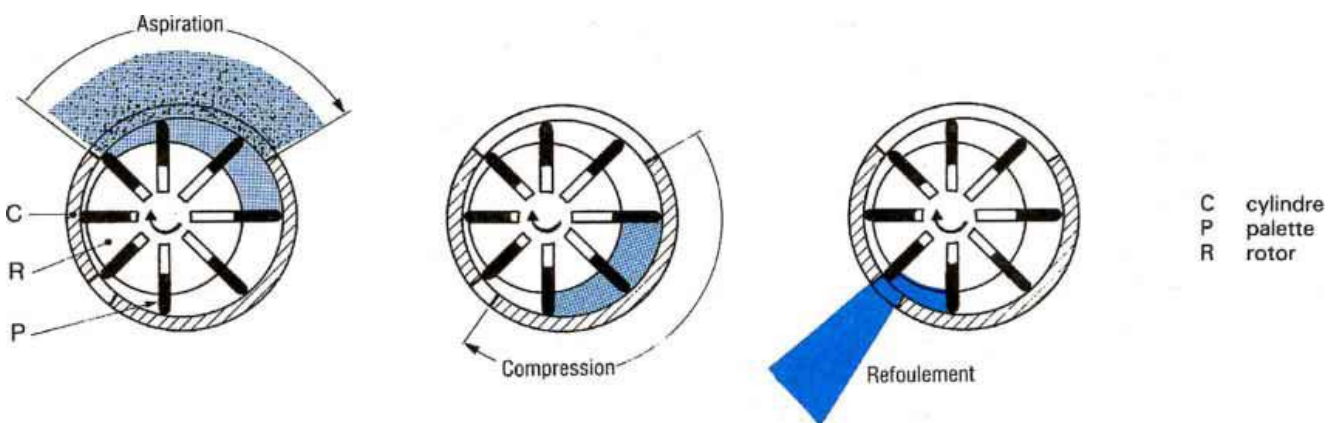


Figure II.4 : Compresseur à palettes : principe de fonctionnement.

II.6.2 : Compresseur à lobes :

Compresseurs à dents ou à piston rotatifs pour les uns, à lobes pour les autres ,ils utilisent un principe identique .Dans un même stator se trouvent deux rotors non lubrifiés, ces deux rotors ,synchronisés en rotation ,tournent en sens inverse et comportent chacun une ou deux [dents] qui vont permettre en un tour d'effectuer un ou deux cycles d'aspiration-compression puis refoulement ,et cela en masquant ou dégageant des orifices d'aspiration et autre pour le refoulement pratiques sur les cotes du carter.

On trouve l'origine de cette technologie dans les brevets de l'Américain A. J. Northey, déposés en 1934 et 1937. À cette époque, ces brevets ne furent pas exploités, car la machine présentait un très mauvais rendement, les recherche était continue jusqu'au développement d'un compresseur avec un lobe au lieu de deux, pour des débits de 6 à 12 m³/min par la société Atlas Copco (Suède) [4]

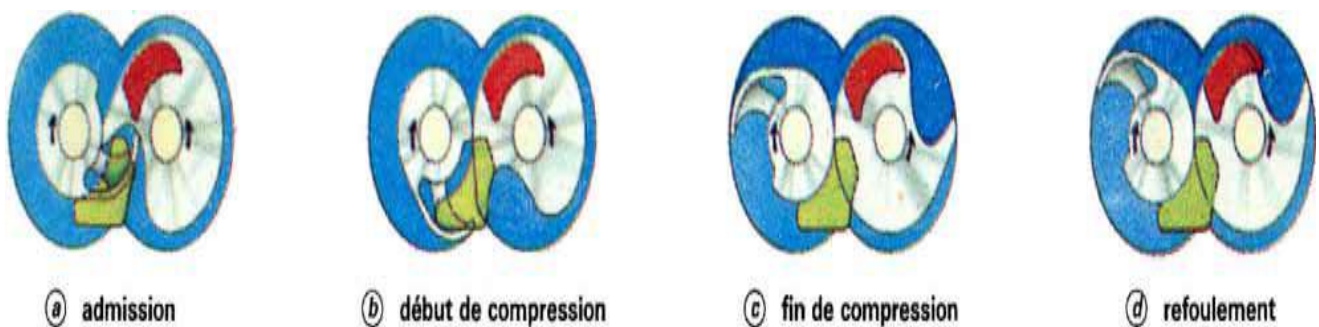


Figure II.5 : Principe de fonctionnement pour un compresseur à lobes.

II.6.3 : Compresseur à vis :

Les compresseurs à vis sont à leur tour divisés en deux types : les compresseurs mono-vis et les compresseurs double vis.

II.6.3.1 : Le compresseur mono-vis :

Pour expliquer le principe de fonctionnement, nous présentons la structure la plus rencontrée industriellement : le ZCP (Zimmern Cylindrical screw / Planar gaterotor) (figure II.6).

Le cycle est bien entendu décomposé en trois étapes : aspiration, compression et refoulement. L'aspiration se fait par la partie inférieure ; le gaz occupe alors les volumes compris entre les filets (1, 2 et 3). Il est ensuite balayé par les dents des pignons pendant la rotation de la vis. Le volume du gaz diminue (de 4 à 5) et la pression augmente jusqu'au moment où la rotation de la vis dévoile l'orifice de refoulement (ouverture triangulaire pratiquée dans le carter). Il s'agit donc d'une *machine à rapport volumétrique fixé par la géométrie*. Chaque volume compris entre deux filets est comprimé deux fois

par tour. Le compresseur mono-vis Zimmern vient d'une idée originale du Français B. Zimmern. La première licence couvrant certains compresseurs d'air a été cédée en 1963 à la société Peugeot (usine de Saint-Étienne). Celle-ci lança sur le marché en 1967 un compresseur mobile de 4 m³/min de type ZCP, puis étendit sa gamme de 2 à 9 m³/min pour des compresseurs de chantier et industriels [4].

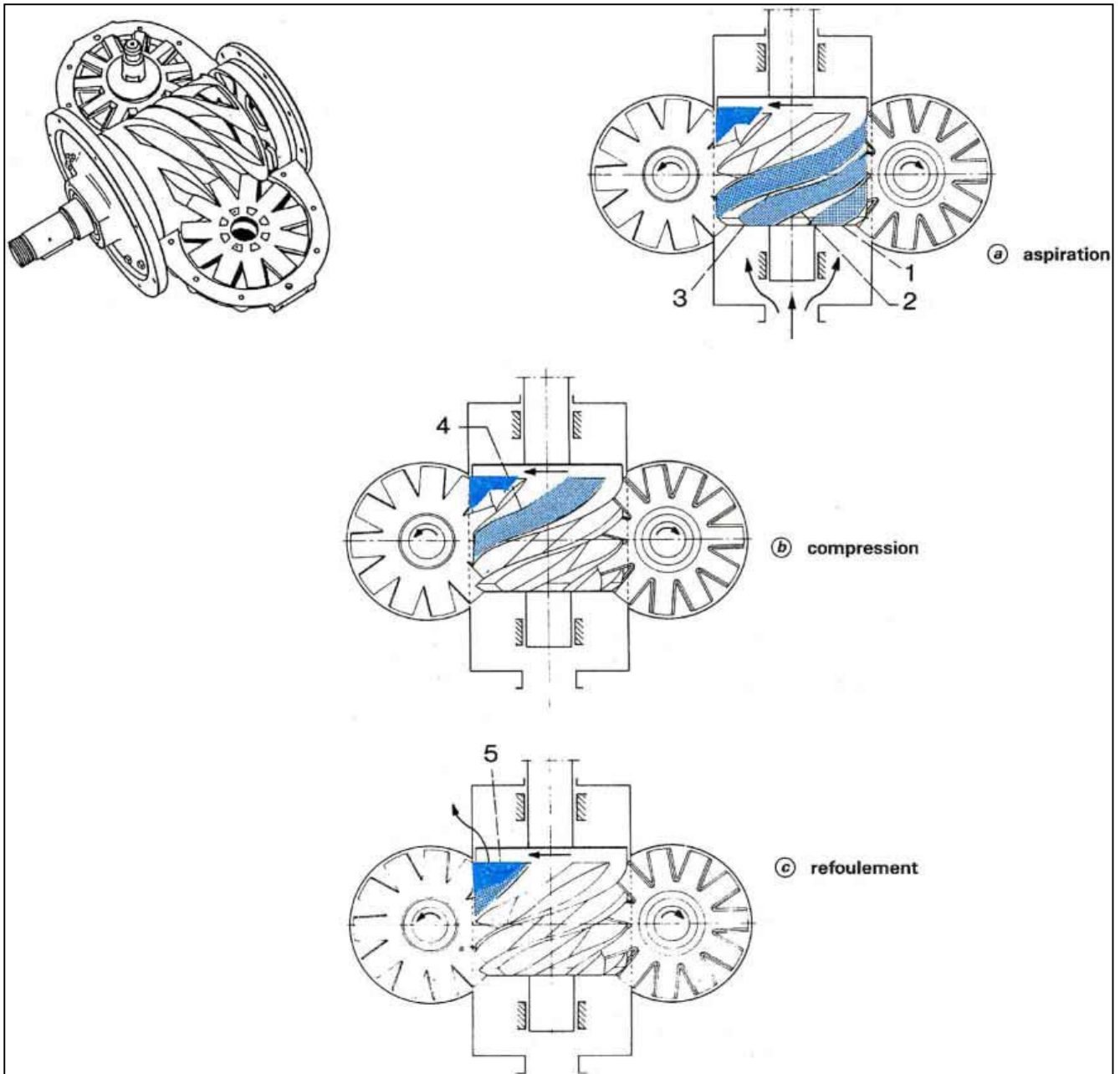


Figure II.6 : Principe de fonctionnement Compresseur mono-vis Zimmern.

II.6.3.2 : Le compresseur double vis :

Pour expliquer le principe de fonctionnement, nous présentons le compresseur double vis SRM. La variation du volume occupé par le gaz que l'on désire comprimer est obtenue par le déplacement relatif de deux rotors à l'intérieur d'un carter de forme appropriée (figures II.7 et II.8). Dans les années 30,

SRM (Sveridge Rotor Maskiner), bailleur de licences des compresseurs double vis, appelé en ce temps-là Ljungstrom Stream Turbine and Co, s'engagea dans le domaine des turbines à gaz. [4]

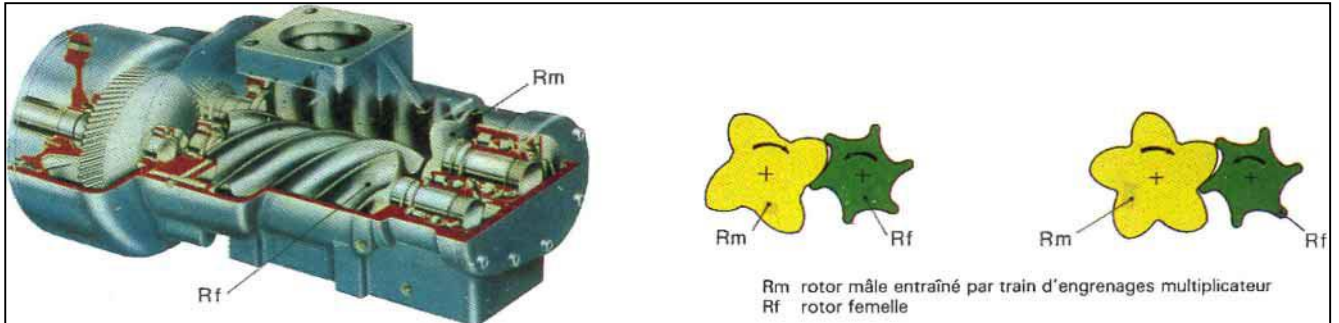


Figure II.7 : Compresseur double vis SRM

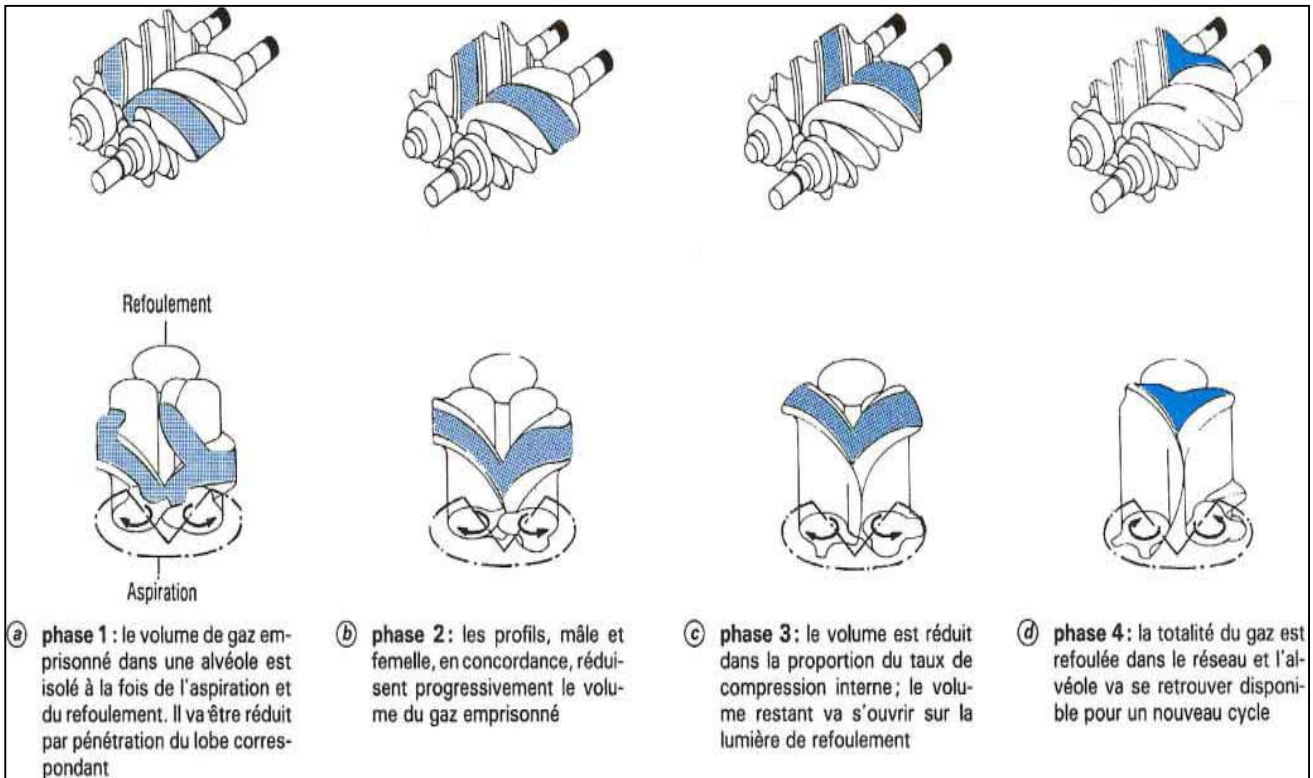


Figure II.8: Principe de fonctionnement

II.7 : Les compresseurs alternatifs :

II.7.1 : Compresseur à membranes :

Ce type de compresseur à membranes métalliques commandé hydrauliquement est constitué principalement par une partie mécanique et une tête de compression, ce type est utilisée Dans l'industrie chimique notamment, les compresseurs à membranes sont employés pour la compression de gaz dangereux.[5]

II.7.2 : Système à barillet

La transformation du mouvement dans ce système est assurée par un plateau pivotant appelé transformateur de mouvement. Ce transformateur, sous l'action de la soie oblique du vilebrequin, l'envoie sur une sphère de grande surface appelée rotule de fond, fixe par rapport au carter du mécanisme. Un engrenage dit « de retenue de couple » assure le maintien du transformateur en empêchant sa rotation par rapport à l'axe du compresseur ; il est constitué de deux couronnes dentées coniques, l'une mobile solidaire du transformateur, l'autre fixe solidaire de la rotule de fond. Les bielles sont constituées d'un tube formant le corps de bielle, Le mécanisme à barillet était prévu à l'origine pour assurer la transformation de mouvement d'un moteur thermique. Mais en 1952, à la demande des services techniques de la Marine nationale, il fut transformé pour un compresseur d'air haute pression. Pour cela, on adapta des clapets automatiques et on eut recours à l'utilisation des cylindres de plus grande taille et de petites sphères formant la tête et le pied de bielle [4].

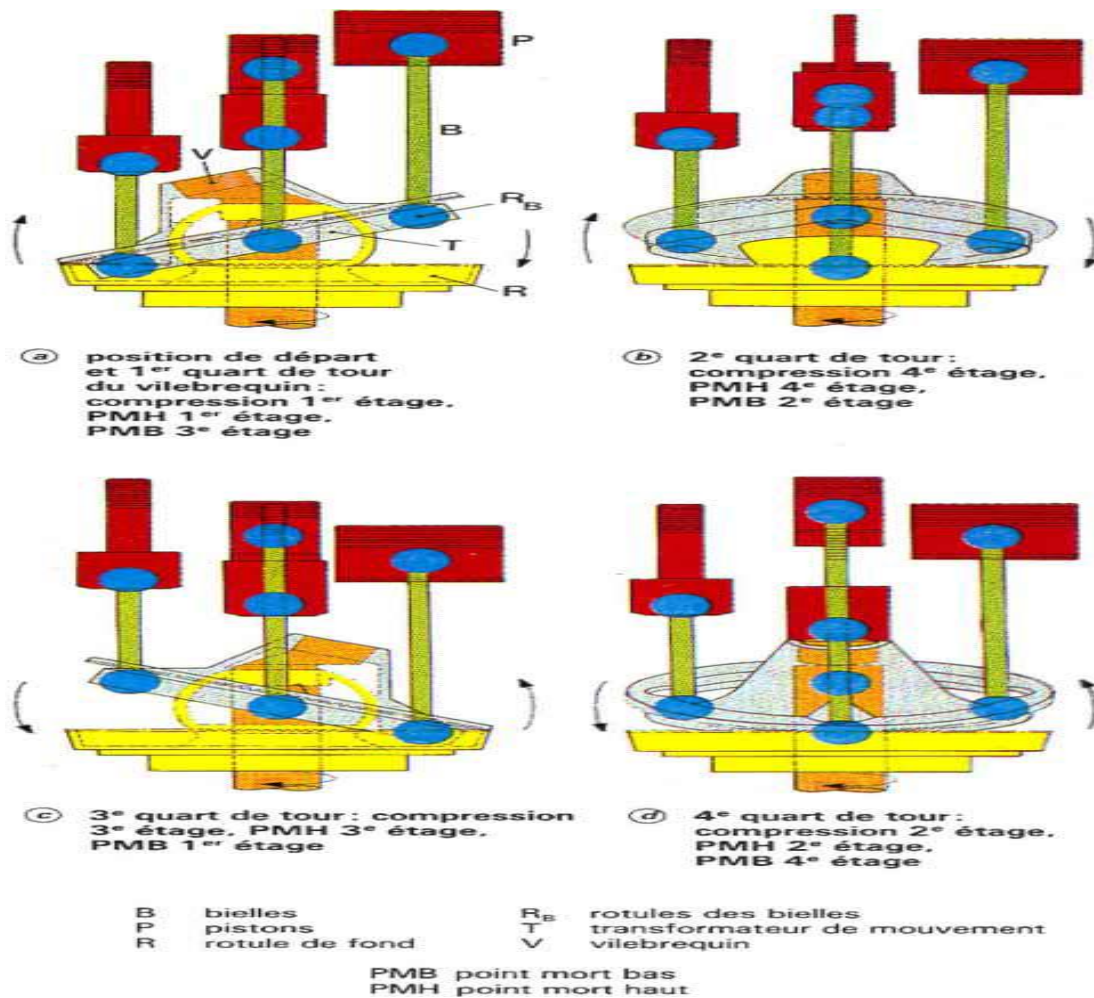


Figure II.9 : Fonctionnement d'un Compresseur à pistons à barillet.

II.7.3 : Compresseur a piston (système bille-manivelle) :

Le compresseur à piston accumule la pression souhaitée par un mouvement alternatif ou réciproque d'un piston dans un cylindre. C'est le genre de modèle que l'on retrouve dans différentes industries, notamment les secteurs industriels, de l'alimentation et des produits d'emballage.

Le compresseur alternatif à piston comporte un vilebrequin actionné par une machine motrice extérieure, ce vilebrequin via la bielle engendre un mouvement alternatif au piston[4]. La variation de volume et la compression du gaz sont obtenues par le mouvement alternatif d'un piston à l'intérieur d'un cylindre, ce mouvement étant créé par un système bille-manivelle.

II.8 Historique :

Les premiers compresseurs, qui découlaient de la construction des machines à vapeur, étaient en disposition horizontale avec une ou deux lignes de cylindres disposées de part et d'autre d'un volant ou d'un moteur. Vers le milieu du 19^e siècle, la connaissance des grands principes de la thermodynamique permit de voir l'intérêt d'une compression multi-étagée, avec refroidissement intermédiaire. À la fin du 19^e siècle, les constructeurs souhaitaient augmenter les vitesses de rotation afin de diminuer l'encombrement et d'augmenter les performances de ces machines. On vit alors la nécessité d'utiliser des clapets automatiques. Hanns Hörbiger, en 1895, à Vienne, rendit possible le souhait des constructeurs en leur proposant les premiers clapets automatiques. L'augmentation de la vitesse de rotation du vilebrequin les obligea à repenser la composition de la structure, pour des raisons d'équilibrages des efforts. La société Crépelle proposa, dès 1954, les premiers compresseurs auto-équilibrés avec deux cylindres à double effet opposés et horizontaux. Les efforts d'inertie et de pression ont pu ainsi être équilibrés, ce qui permet des vitesses de rotation qui atteignent actuellement 1 500 tr/min.

Les types des compresseurs à piston :

Les compresseurs à piston sont classés selon leur structures en plusieurs modèles :

- **Compresseur à piston simple effet :** la compression ne s'effectue que d'un seul côté du piston. Les clapets d'aspiration et de refoulement sont disposés dans la tête du cylindre. C'est la version la plus simple du compresseur à piston parce qu'il travaille sur une seule face, l'autre face donne sur le carter d'embellage. La bielle peut être articulée directement sur un axe de piston, comme dans les moteurs thermiques à pistons et le graissage peut s'effectuer par barbotage. Le volume engendré est égal au produit de la course par la section du piston. Le couple est irrégulier car il n'y a qu'une compression par tour, ce type est réservé aux machines de faibles puissances inférieures de 75KW.

- **Compresseur à piston double effet** : ce type de compresseur fonctionne sur deux directions (effets), donc la compression s'effectue des deux côtés du piston, alternativement coté tête (effet 1) et coté vilebrequin (effet 2). Chaque chambre est équipée de clapets d'aspiration et de refoulement connectés à des circuits d'aspiration et de refoulement communs. Les capacités d'aspiration des deux effets peut être légèrement différente en raison du volume occupé par la tige du piston coté vilebrequin et des volumes morts qui peuvent être différents. Ainsi, le volume engendré est égal à deux fois le produit de la section du piston par la course et le couple, comportant deux compressions par tour, devient plus régulier. Mais il est nécessaire de prévoir une tige de piston glissant dans une garniture et d'articuler la bielle sur une crosse coulissant dans une glissière, ce type est réservé aux machines de fortes puissances supérieures de 75KW
- **Compresseur à piston étagée** : dans la conception mécanique d'un compresseur multi étage les éléments sont placés d'une façon superposés et ils coulisent dans deux cylindres concentriques et de diamètres différents. L'étage 1 est affecté au cylindre de plus grande capacité. Les efforts sur l'entraînement sont très irréguliers puisque les phases de compression des deux étages sont simultanées. Il comporte un piston de grand diamètre qui peut travailler soit à simple effet, soit à double effet, l'autre ou les autres pistons sont nécessairement à simple effet. Cette disposition est généralement adoptée sur des machines de fortes puissances (supérieures à 75 kW).
- ❖ **Compresseur à piston différentielle** : C'est un compresseur qui comporte deux cylindres avec un seul piston, L'étage 2 doit nécessairement avoir la section la plus faible, les efforts sur l'entraînement sont moins intenses qu'avec un piston étagé puisque le début de la détente d'un étage correspond au début de la compression de l'autre[4].



Figure II.10 : Différents modes de travail du piston

II.9 Cycle de compression :

Le cycle de compression peut être décomposé en quatre phases :

- **Compression** : Le volume du gaz est réduit par le mouvement du piston. La température et la pression augmentent, l'évolution de la pression suit la loi suivante : $PV^\gamma = \text{constant}$. L'augmentation de pression du gaz provient de la réduction de volume et de l'augmentation de la température. L'échauffement du gaz dépend de sa nature du gaz. Les gaz dont les $k = c_p/c_v$ sont les plus élevés s'échaufferont plus.
- **Refoulement** : Lorsque la pression à l'intérieur de la chambre dépasse la pression du circuit de refoulement, le clapet de refoulement peut s'ouvrir et le gaz est refoulé. La pression cesse de croître. Elle doit néanmoins être supérieure à la pression du circuit de refoulement pour vaincre la perte de charge des clapets. La perte de charge comme le débit ne sont pas constants, car le piston, entraîné par un système bielle manivelle, ne se déplace pas à une vitesse constante, elle est maximum à mi-course, et nulle aux points morts.
- **Expansion** : Lorsque le piston s'éloigne de la tête du cylindre, le gaz emprisonné sous pression dans le volume mort se détend d'abord. Comme dans la phase de compression, l'évolution de la pression suit la loi $PV^\gamma = \text{constant}$. Cette expansion s'accompagne d'un refroidissement qui dépend de la nature du gaz.
- **Aspiration** : Lorsque la pression dans la chambre devient inférieure à la pression du circuit d'aspiration, le clapet d'aspiration peut s'ouvrir. Le gaz pénètre dans la chambre. Le graphe suivant (figure II.11) montre clairement que :
 - a) Le volume de gaz aspiré par le compresseur est inférieur à sa cylindrée.
 - b) Le volume aspiré dépend également de la nature du gaz et plus exactement de la valeur de k .

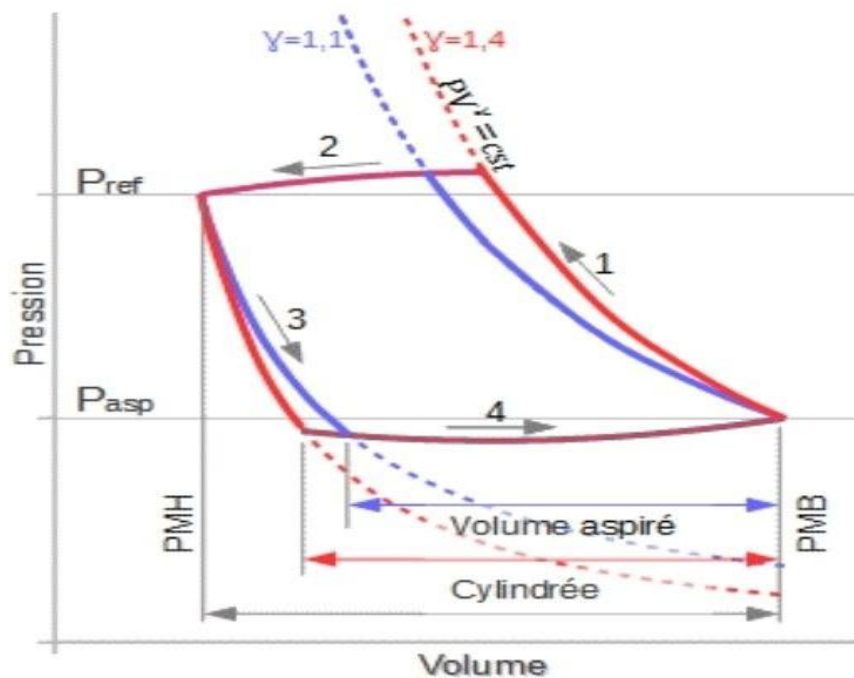


Figure II.11 : Cycle de compression d'un compresseur à piston.

III-1 Introduction:

Ce chapitre sera consacré à la description et au fonctionnement du compresseur à piston installé au niveau de la centrale à oxygène. Il existe 6 compresseurs à piston dans cette centrale : 02 compresseurs sont en panne et 02 servent à comprimer l'oxygène (PC₂, PC₃) et les deux autres sont réservés à la compression d'azote (PC₅, PC₆).

III-2 Description et fonctionnement d'un compresseur Sulzer

III-2-1 Description :

Le compresseur Sulzer est un compresseur à piston alternatif vertical, il est composé de 3 étages de compression. Le premier étage contient deux cylindres, le deuxième et le troisième contiennent un cylindre pour chaque étage.

Les deux cylindres du 1^{er} étage sont disposés dans un bloc commun. Il en est de même pour les cylindres des 2^{ème} et 3^{ème} étages. Tous les cylindres sont munis de chambres de réfrigération par circulation d'eau. Ces chambres sont construites pour une pression de service maximale de 2kP/cm². Chaque bloc est alimenté en eau de refroidissement par sa propre conduite d'amenée.

La machine est protégée contre des pressions d'étage trop élevées par des soupapes de sûreté à ressort. L'installation est munie d'une conduite de by-pass pour le 1^{er} étage, permettant de faire varier le débit de compresseur dans certaines limites en refoulant une certaine quantité de gaz de l'aspiration au 2^{ème} étage à l'aspiration du 1^{er} étage. Le compresseur est muni d'une pompe à huile principale et d'une pompe à huile auxiliaire. [6]

III-2-2 Fonctionnement :

Le compresseur est entraîné par un moteur électrique asynchrone triphasé de chez ALSTHON.ATLANTIQUE « type :RAV 165.71-1900Kw-5500V-368tr/min -50hz » accouplé rigidement.

Un piston coulisse dans un cylindre obturé à une extrémité. Le volume compris entre le piston et la tête du cylindre est nommé la chambre. La tête du cylindre est équipée de deux clapets; un clapet d'aspiration et un clapet de refoulement. Ces clapets mettent en communication le cylindre avec deux circuits distincts le circuit d'aspiration et le circuit de refoulement.

Le piston est raccordé à un vilebrequin au moyen d'une bielle. Le vilebrequin est entraîné par un moteur externe dans un mouvement de rotation. Celui-ci entraîne le piston dans un mouvement linéaire alternatif. Donc il y a deux phases principales :

- **aspiration:** le piston s'éloigne de la tête du cylindre, le clapet d'aspiration s'ouvre sous l'effet de la dépression créée par le mouvement du piston ; le gaz « l'oxygène ou l'azote » entre dans la chambre.

- **refoulement:** le piston se rapproche de la tête du cylindre, le clapet de refoulement s'ouvre sous l'effet de la surpression créée, le gaz est refoulé à l'extérieur de la chambre.

La position la plus proche de la tête du cylindre est appelée Point Mort Haut (PMH)

La position la plus éloignée est appelée Point Mort Bas (PMB)

Cette dénomination se réfère à un compresseur dont le cylindre serait vertical, les clapets disposés en point haut et le vilebrequin en point bas. Mais en fait le cylindre peut être disposé dans n'importe quelle orientation, aussi bien vertical qu'horizontal, la tête de cylindre aussi bien en haut qu'en bas. Les définitions des PMH et PMB restent identiques.

La distance entre le PMH et le PMB est appelée COURSE du piston. Le volume entre le PMH et le PMB est appelée CYLINDRÉE

Le volume entre le piston en PMH et la tête du cylindre est appelé VOLUME MORT. Ce volume n'est pas balayé par la course du piston. Il doit être le plus faible possible pour optimiser le rendement volumique du compresseur et à la fin de compression on obtient O₂ et N₂ prêts pour le stockage.

Pour un fonctionnement correct, les points suivants sont à contrôler toutes les heures :

- Les pressions d'aspiration, intermédiaires et de refoulement. Les aiguilles doivent toujours osciller légèrement.
- La pression de la pompe d'huile de 3,5 à 4 bars, lorsque l'huile a atteint la température de service (pression minimale admissible 1,5 bar.)
- La température de l'huile (température maximale 60⁰c) .
- La température maximale admissible à l'aspiration de chaque étage doit être d'environ 40⁰c .
au refoulement, les températures suivantes doivent être observées :

1^{er} étage 170⁰c

2^{eme} étage 190⁰c

3^{eme} étage 140⁰c

- Les débits aux différents points de refroidissement doivent être réglés de telle manière que les températures de sortie d'eau ne dépassent pas la valeur de 45⁰c.
- Purger la condensation éventuellement accumulée dans les réfrigérants
- Le comportement correct des presses étoupes de tiges de piston et des dispositifs de raclage d'huile.
- La marche régulière de la machine.

- La circulation de gaz de balayage du bâti et la pression correspondante qui doit être au maximum de 10 mm CE. Les soupapes de sureté, prévues pour protéger la machine contre des pressions d'étages trop élevées, commencent à échapper aux pressions indiquées ci-dessous :

1^{er} étage relativement à l'atmosphère : P=4 bar

2^{ème} étage relativement à l'atmosphère : P= 14,5 bar

3^{ème} étage relativement à l'atmosphère : P= 34 bar

Par mesure de sécurité, la conduite d'échappement doit mener à l'air libre. [6]

III-3-1 Présentation géométrique du compresseur à Piston :

Ces compresseurs sont composés d'un moteur électrique et de pièces mécaniques constituant un compresseur : (arbre à manivelle, bielle(s), Piston(s), Plaque à clapets, culasse...). Seulement dans ce cas le corps fait l'objet d'une pièce unique de fonderie avec des trappes d'accès aux organes tels que (Clapets, pistons, bielles, Arbre à manivelle, moteur électrique...).

Cette accessibilité des organes permet de changer des pièces défectueuses pour dépanner le compresseur et de changer des pièces pour une maintenance préventive. [6]

III-3-2 Les différentes pièces composant le compresseur à piston :

A. Le vilebrequin (ou arbre à cames, arbre à manivelle) :

Le vilebrequin c'est un dispositif mécanique qui a pour but de transférer le mouvement rotatif en mouvement de translation.



Figure.III.1 : Vue réelle d'un ancien vilebrequin.

B. La bielle :

La bielle transmet le mouvement de translation du vilebrequin au piston. La bielle est fabriquée en 2 pièces adaptées exactement l'une à l'autre. Ces 2 pièces sont maintenues ensemble à l'aide de 2 boulons spéciaux fixés par des écrous de verrouillage.

C. Segment et piston :

Les pistons doivent être légers, étanches au fluide, et ajustés dans les cylindres avec le minimum de jeu afin d'éviter les pertes par les fuites du fluide entre piston et cylindre, le jeu entre piston et cylindre peut être de 4 à 5 microns, pour parer à ces fuites on utilise des segments (2 à 5), un film d'huile se crée sur ces segments créant une parfaite étanchéité.

D. Système de lubrification

La lubrification des compresseurs à piston peut se faire par barbotage (Bielle baignant dans l'huile), mais généralement elle se fait par pression d'huile forcée. L'huile est aspirée en fond de carter, et est refoulé par une pompe à 4 bars au-dessus de la pression du carter (Pression BP.)

L'huile doit servir de :

- Lubrification des paliers, de coussinets de bielles, des garnitures d'étanchéité et des cylindres / pistons.
- Mais aussi d'étanchéité entre le piston et le cylindre.
- Parfois de refroidissement du compresseur (refroidissement de l'huile externe par échangeur à air ou à eau).

E. Pompes à huile :

Dans un circuit de lubrification de compresseur à piston aussi important, elle aspire l'huile depuis le carter et la refoule vers tous les organes en mouvement à une pression qui varie entre (8 à 12 bars). [6]

III-4 : Caractéristiques du compresseur Sulzer

Type	4D.375.3A
Désignation	Refoulement d'O ₂ .ou N ₂
Année	1976
Volume aspiré	8979 m ³ /h
Pression finale	22 bar
Vitesse en tr/min	370
Puissance absorbé	1650 KW
Contenance totale du carter	Approximativement 590 litres
Pression d'huile	Environ 4-4,2
Nombre d'étages	3
1 ^{er} étage	2 cylindres
Diamètre des cylindres	720 mm
2 ^{ème} étage	1 cylindre
Diamètre de cylindre	580 mm
3 ^{ème} étage	1cylindre
Diamètre de cylindre	310 mm

Tableau III.1 Caractéristique du compresseur.

III.5 Calcul des performances du compresseur SULZER

Dans cette partie on va calculer les performances du compresseur SULZER pour aider l'entreprise à choisir un autre dans le cas où celui serait défaillant.

III.5.1 Calcul du taux de compression global :

La connaissance du taux de compression global ou total r_c nous permet de donner une première estimation de nombre d'étage avec correction basée sur la limitation température.[7]

$$r_c = P_2/P_1 \quad (3.1)$$

D'où : P_2 : pression de refoulement.

P_1 : pression d'aspiration.

❖ Taux de compression global (r_c de l'oxygène) :

$$r_c = \frac{22}{0.5} = 44 \text{ bars}$$

❖ Taux de compression global (r_c de l'azote) :

$$r_c = \frac{20}{0.9} = 22 \text{ bars}$$

III.5.2 : Rapport de chaleurs spécifiques

Le rapport des chaleurs spécifiques, est obtenu à partir du tableau des chaleurs spécifiques à pression constante prise à deux valeurs de températures.[8]

$$K = C_p/C_v \quad (3.2)$$

C_p : Chaleur spécifique à pression constante.

C_v : Chaleur spécifique à volume constant.

$$K_{O_2} = C_{p(O_2)}/C_{v(O_2)} = 0.917/0.658 = 1.3936 \text{ kJ/kg.K}$$

$$K_{N_2} = C_{p(N_2)}/C_{v(N_2)} = 1.036/0.74 = 1.4 \text{ kJ/kg.K}$$

III.5.3 : La masse molaire :

$$\gamma_{sp.gr} = M_{w-gaz}/M_{w-air} \quad (3.3)$$

M_{w-gaz} : la masse molaire de gaz

M_{w-air} : la masse molaire d'air (28.96)

$$\gamma_{sp.gr} = M_{w-O_2}/M_{w-air} = 16/28.96 = 0.5524 \text{ g.mol}^{-1}$$

$$\gamma_{sp.gr} = M_{w-N_2}/M_{w-air} = 14/28.96 = 0.48 \text{ g.mol}^{-1}$$

III.5.4 : Facteur de perte :

Les pertes par frottement dans les pistons et les cylindres, les pulsations dues aux surpressions de gaz et les oscillations des vannes sont calculées par plusieurs méthodes.

Nous avons utilisé la relation de Ludwig [9] .

$$L_0 = -0.002188(r_c)^7 + 0.05778 (r_c)^6 - 0.635 (r_c)^5 + 3.7711 (r_c)^4 - 13.036 (r_c)^3 + 29.019 (r_c)^2 + 14.929 \quad (3.4)$$

III.5.5 : Le taux de compression approximatif :

$$r_{c-stg} = r_c^{\left(\frac{1}{N_{stg}}\right)} \quad (3.5)$$

avec :

N_{stg} : Le nombre d'étage (3 étages)

Il est connu depuis longtemps que les compresseurs monocylindriques sont réservés aux rapports de pression faibles. Pour des ratios de pression élevée, le compresseur multi-étage constitue un choix judicieux. Alors, la compression est partagée sur plusieurs étages. Ce type de compresseurs est généralement équipé par des refroidisseurs.

Cas d'oxygène : $r_{c-stg} = r_c^{\left(\frac{1}{N_{stg}}\right)} = 44^{\frac{1}{3}} = 3.5299$

Cas d'azote : $r_{c-stg} = r_c^{\left(\frac{1}{N_{stg}}\right)} = 22^{\frac{1}{3}} = 2.802$

III.5.6 : Pression d'aspiration par étage

Par défaut de ne pas avoir la valeur de la perte par pulsation de ce compresseur, on l'a prise égale à zéro.

$$P_s = P_1 - \text{Perte par pulsation} \quad (3.6)$$

Dans le cas de ce compresseur la perte de pulsation =0

Cas d'O₂: 1^{er} étage : $P_s = P_1 - 0 = 0.5 \text{ bars}$

2^{eme} étage : $P_s = P_2 - 0 = 3.3166 \text{ bars}$

3^{eme} étage : $P_s = P_3 - 0 = 6.6333 \text{ bars}$

Cas d' N₂ 1^{er} étage : $P_s = P_1 - 0 = 0.9 \text{ bars}$

2^{eme} étage: $P_s = P_2 - 0 = 3.8183 \text{ bars}$

3^{eme} étage : $P_s = P_3 - 0 = 7.1377 \text{ bars}$

III.5.7 : La pression de refoulement approximative par étage :

$$P_{d-stg} = (r_{c-stg})(P_s) \tag{3.7}$$

- Cas d'O₂ ➡ 1^{er} étage : (3.5299) (0.5) = 1.76495 bars
 2^{eme} étage: (3.5299) (3.3166) = 11.70 bars
 3^{eme} étage : (3.5299) (6.6333) = 23.41 bars
- Cas d' N₂ ➡ 1^{er} étage : (2.802) (0.9) = 2.52218 bars
 2^{eme} étage: =(2.802) (3.8183) = 10.698 bars
 3^{eme} étage = (2.802) (7.1377) = 19.999 bars

PC ₂ et PC ₃		
Fluide	O ₂	
	Valeurs Mesurées	Valeurs calculées
Pression d'aspiration 1 ^{er} étage (bar)	0,5	/
Refoulement 1 ^{er} étage (bar)	2,3	1.76495
Aspiration 2 ^{eme} étage (bar)	/	3.3166
Refoulement 2 ^{eme} étage (bar)	9,5	11.70
Aspiration 3 ^{eme} étage (bar)	/	6.6333
Refoulement 3 ^{eme} étage (bar)	22	23.41
Température d'entrée 1 ^{er} étage (degré Celsius)	33	/
Température de sortie 1 ^{er} étage (degré Celsius)	172	/
Température d'entrée 2 ^{eme} étage (degré Celsius)	35	/
Température de sortie 2 ^{eme} étage (degré Celsius)	179	/
Température de d'entrée 3 ^{eme} étage (degré Celsius)	36	/
Température de sortie 3 ^{eme} étage (degré Celsius)	124	/

Tableau III .2 : Comparaison entre valeurs calculées et mesurées pour l'oxygène (PC2, PC3)

PC ₅ et PC ₆		
Fluide	N ₂	
	Valeurs Mesurées	Valeurs calculées
Pression d'aspiration 1 ^{er} étage (bar)	0,9	/
Refoulement 1 ^{er} étage (bar)	2,6	2.52218
Aspiration 2 ^{eme} étage (bar)	/	3.8183
Refoulement 2 ^{eme} étage (bar)	9	10.698
Aspiration 3 ^{eme} étage (bar)	/	7.1377
Refoulement 3 ^{eme} étage (bar)	20	20
Température d'entrée 1 ^{er} étage (degré Celsius)	33	/
Température de sortie 1 ^{er} étage (degré Celsius)	163	/
Température d'entrée 2 ^{eme} étage (degré Celsius)	32	/
Température de refoulement 2 ^{eme} étage (degré Celsius)	163	/
Température d'entrée 3 ^{eme} étage (degré Celsius)	53	/
Température refoulement 3 ^{eme} étage (degré Celsius)	67	/

Tableau III.3 : Comparaison entre valeurs calculées et mesurées pour l'azote (PC₅, PC₆)

Les tableaux III.2 et III.3 résument les différentes pressions calculées pour l'oxygène et l'azote.

III.5.8 : Chute de pression entre les étages :

Le refroidissement du gaz entre les étages, en tenant compte de la chute de pression dans les refroidisseurs intermédiaires, nous permet de faire un ajustement de calcul pour la décharge réelle.

[10]

$$P_{i-drop} \cong 0.1(P_{d-stg})^{0.7} \tag{3.8}$$

Pour l'O₂ ➔ 1^{er} étage : $P_{i-drop} \cong 0.1(1.76495)^{0.7} = 0.148837 \text{ bars}$

2^{eme} étage : $P_{i-drop} \cong 0.1(11.70)^{0.7} = 0.5594 \text{ bars}$

3^{eme} étage : $P_{i-drop} \cong 0.1(23.41)^{0.7} = 0.909 \text{ bars}$

Pour l'N₂ ➔ 1^{er} étage : $P_{i-drop} \cong 0.1(2.52218)^{0.7} = 0.1910 \text{ bars}$

2^{eme} étage : $P_{i-drop} \cong 0.1(10.698)^{0.7} = 0.5251 \text{ bars}$

3^{eme} étage : $P_{i-drop} \cong 0.1(20)^{0.7} = 0.8141 \text{ bars}$

III.5.9 : Pression de refoulement réelle :

La pression de refoulement réelle nécessitera de prendre en compte la chute de pression entre les étages en ajustant la pression de refoulement approximative qui est fonction de la pression

l'aspiration ajustée en raison des pertes de pulsation, ainsi que du taux de compression approximatif de l'étage, ceci est donné par l'équation suivante.

$$P_{d-actual} = P_{d-stg} + P_{i-drop} \tag{3.9}$$

Pour l'O₂ ➡ 1^{er} étage : $P_{d-actual} = 1.76495 + 0.148837 = 1.9137876 \text{ bars}$

2^{eme} étage : $P_{d-actual} = 11.70 + 0.5594 = 12.2594 \text{ bars}$

3^{eme} étage : $P_{d-actual} = 23.41 + 0.909 = 24.319 \text{ bars}$

Pour l'N₂ ➡ 1^{er} étage : $P_{d-actual} = 2.52218 + 0.19109 = 2.71327 \text{ bars}$

2^{eme} étage : $P_{d-actual} = 10.698 + 0.5251 = 11.2231 \text{ bars}$

3^{eme} étage : $P_{d-actual} = 20 + 0.8141 = 20.81 \text{ bars}$

III.5.10 : Niveau de compression réelle par étage :

La puissance de gaz optimal est atteinte lorsque les taux de compression dans chacun des étages sont égaux pour les unités à plusieurs étages. Cependant, les limites de la capacité de puissance de gaz de chaque cylindre rendent impossible l'obtention de taux de compression égaux et donc équilibrés

$$R_{c-actual} = P_{d-actual} / P_s \tag{3.10}$$

Pour l'o₂ ➡ 1^{er} étage : $R_{c-actual} = 1.9137876 / 0.5 = 3.82$

2^{eme} étage : $R_{c-actual} = 12.2594 / 3.3166 = 3.6963$

3^{eme} étage : $R_{c-actual} = 24.319 / 6.6333 = 3.56$

Pour l'N₂ ➡ 1^{er} étage : $R_{c-actual} = 2.71327 / 0.9 = 3.014$

2^{eme} étage : $R_{c-actual} = 11.2231 / 3.8183 = 2.9392$

3^{eme} étage : $R_{c-actual} = 20.81 / 7.1377 = 2.9155$

III.5.11 : Perte d'aspiration dans le cylindre de remplissage:

$$\theta_s = (aU)^2 [M_w / 10^4 \times T_1] \tag{3.11}$$

avec :

θ_s : Perte d'aspiration

a : rapporte de surface de la vanne

pour O₂ : $a=13$ [11]

pour N₂ : $a=12$ [11]

U : vitesse moyenne du piston

$$U = 2(\text{tour}/\text{min})\text{course}$$

M_w : La masse molaire

pour O_2 : $M_w = 16$

pour N_2 : $M_w = 14$

T_1 : Température d'aspiration en kelvin

Calcul de vitesse moyenne :

$$\longrightarrow 1^{\text{er}} \text{étage} : U_1 = 2(370/60)0.72 = 8.88 \quad \text{m/s}$$

$$\longrightarrow 2^{\text{eme}} \text{étage} : U_2 = 2(370/60)0.58 = 7.15 \quad \text{m/s}$$

$$\longrightarrow 3^{\text{eme}} \text{étage} : U_3 = 2(370/60)0.31 = 3.82 \quad \text{m/s}$$

Pour l'oxygène: $\longrightarrow 1^{\text{er}} \text{étage} : \theta_s = (13 \times 8.88)^2 [16/10^4 \times 303] = 0.0692$

$$2^{\text{eme}} \text{étage} : \theta_s = (13 \times 7.15)^2 [16/10^4 \times 302] = 0.046$$

$$3^{\text{eme}} \text{étage} : \theta_s = (13 \times 3.5)^2 [16/10^4 \times 301] = 0.011$$

Pour l'azote : $\longrightarrow 1^{\text{er}} \text{étage} : \theta_s = (12 \times 8.88)^2 [14/10^4 \times 305] = 0.052$

$$2^{\text{eme}} \text{étage} : \theta_s = (12 \times 7.15)^2 [14/10^4 \times 306] = 0.033$$

$$3^{\text{eme}} \text{étage} : \theta_s = (12 \times 3.82)^2 [14/10^4 \times 306] = 0.00961$$

III.5.12 Pression de déplacement du cylindre requis :

$$\theta_d = \theta_s / r_c^{K-1/k} \quad (3.12)$$

Pour l'oxygène : $\longrightarrow 1^{\text{er}} \text{étage} : \theta_d = 0.0692 / 3.82^{1.3-1/1.3} = 0.0692 / 3.82^{0.23} = 0.051$

$$2^{\text{eme}} \text{étage} : \theta_d = 0.046 / 3.696^{0.23} = 0.0340$$

$$3^{\text{eme}} \text{étage} : \theta_d = 0.011 / 3.65^{0.23} = 0.0816$$

Pour l'azote : $\longrightarrow 1^{\text{er}} \text{étage} : \theta_d = 0.0692 / 3.014^{1.4-1/1.4} = 0.0692 / 3.014^{0.28} = 0.050$

$$2^{\text{eme}} \text{étage} : \theta_d = 0.0033 / 2.9392^{0.28} = 0.0024$$

$$3^{\text{eme}} \text{étage} : \theta_d = 0.00961 / 2.9155^{0.28} = 0.0071$$

III.5.13 : vitesse moyenne du piston :

$$U = 2NL \quad (3.13)$$

U : vitesse de piston

L :course

N: vitesse de rotation nominale en tour/ min

1^{er} cylindre $\Rightarrow U = 2 \times 720 \times 10^{-3} \times 370 = 532.8 \text{ m/min}$

2^{eme} cylindre $\Rightarrow U = 2 \times 580 \times 10^{-3} \times 370 = 429.2 \text{ m/min}$

3^{eme} cylindre $\Rightarrow U = 2 \times 310 \times 10^{-3} \times 370 = 229.4 \text{ m/min}$

III.5.14 : Facteur de correction :

$$B = (1 + \theta_d)/(1 - \theta_s) \quad (3.14)$$

Le facteur de correction intrinsèque B , peut être élargit au taux de compression normal r_c , qui représente le taux de compression effectif réel $r_{c-actual}$ dans le cylindre.

Pour l'oxygène : \Rightarrow 1^{er} étage : $B = (1 + 0.051)/(1 - 0.0692) = 1.12891$

2^{eme} étage : $B = (1 + 0.340)/(1 - 0.046) = 1.40$

3^{eme} étage : $B = (1 + 0.0816)/(1 - 0.011) = 1.0109$

Pour l'azote : \Rightarrow 1^{er} étage : $B = (1 + 0.050)/(1 - 0.052) = 1.10$

2^{eme} étage : $B = (1 + 0.0024)/(1 - 0.033) = 1.03660$

3^{eme} étage : $B = (1 + 0.0071)/(1 - 0.00961) = 1.017$

III.5.15 Efficacité de compression (rendement) :

C'est le rapport de l'efficacité adiabatique sur efficacité mécanique et donné par l'équation :

$$\eta_c = [r_c^{(K-1/K)} - 1]/[B r_c^{(K-1/K)} - 1] \quad (3.15)$$

\Rightarrow Pour l'oxygène : 1^{er} étage :

$$\eta_c = [44^{(1.3-1/1.3)} - 1]/[1.06070 \times 44^{(1.3-1/1.3)} - 1] = [44^{0.23} - 1]/[1.12891 \times 44^{0.23} - 1] = 0.88 = 88.5\%$$

2^{eme} étage : $[44^{0.23} - 1]/[1.40 \times 44^{0.23} - 1] = 0.71 = 71\%$

3^{eme} étage : $[44^{0.23} - 1]/[1.0109 \times 44^{0.23} - 1] = 0.98 = 98\%$

Pour l'azote : \Rightarrow 1^{er} étage : $[22^{0.28} - 1]/[1.10 \times 22^{0.28} - 1] = 0.90 = 90\%$

$$2^{\text{eme}} \text{ étage} = [22^{0.28} - 1] / [1.03660 \times 22^{0.28} - 1] = 0.96 = 96\%$$

$$3^{\text{eme}} \text{ étage} = [22^{0.28} - 1] / [1.017 \times 22^{0.28} - 1] = 0.98 = 98\%$$

III.5.16 : Débit massique :

Le débit massique ou débit massique du gaz est défini par l'équation suivante :

$$M = \varrho / \nu = \rho_{\text{gaz}} \cdot \varrho \quad (3.16)$$

Avec :

M : le débit massique

ϱ : le débit volumique

ν : volume spécifique du gaz

ρ_{gaz} : la masse volumique

$$\rho_{\text{O}_2} = 1.42768 \quad ; \quad \rho_{\text{N}_2} = 1.24922 = 1.24922$$

Le débit volumique : $\varrho = U \cdot S$

U : vitesse de piston

S : surface de chambre de compression $S = \pi d^2 / 4$

π : égal à 3.14

d : diamètre de la chambre

Calcul de surface :

$$1^{\text{er}} \text{ cylindre} \quad \Rightarrow \quad s = 3.14(0.72)^2 / 4 = 0.40 \text{ m}^2$$

$$2^{\text{eme}} \text{ cylindre} \quad \Rightarrow \quad s = 3.14(0.58)^2 / 4 = 0.26 \text{ m}^2$$

$$3^{\text{eme}} \text{ cylindre} \quad \Rightarrow \quad s = 3.14(0.31)^2 / 4 = 0.075 \text{ m}^2$$

Calcul de débit volumique ϱ :

$$1^{\text{er}} \text{ cylindre} \quad \Rightarrow \quad \varrho = (0.40)(532.8) = 213.12 \text{ m}^3 / \text{min}$$

$$2^{\text{eme}} \text{ cylindre} \quad \Rightarrow \quad \varrho = (0.26)(492.2) = 127.97 \text{ m}^3 / \text{min}$$

$$3^{\text{eme}} \text{ cylindre } \longrightarrow \rho = (0.075)(229.4) = 17.205 \text{ m}^3/\text{min}$$

Calcul du débit massique :

$$\text{Pour l'oxygène : } \longrightarrow \rho_{\text{gaz}} \cdot \rho \quad 1^{\text{er}} \text{ étage : } M = (1.42768)(213.12) = 304.2 \text{ Kg/min}$$

$$2^{\text{eme}} \text{ étage } M = (1.42768)(127.97) = 182.70 \text{ Kg/min}$$

$$3^{\text{eme}} \text{ étage } M = (1.42768)(17.205) = 24.68 \text{ Kg/min}$$

$$\text{Pour l'azote : } \longrightarrow 1^{\text{er}} \text{ étage } M = (1.24922)(213.12) = 266.23 \text{ Kg/min}$$

$$2^{\text{eme}} \text{ étage } M = (1.24922)(127.97) = 159.86$$

$$3^{\text{eme}} \text{ étage } M = (1.24922)(17.205) = 21.49 \text{ Kg/min}$$

III.5.17 : La compression adiabatique :

$$H_{\text{ad}} = Z_{\text{av}} RT (K/K - 1) [r_c^{(K-1/K)} - 1] \quad (3.17)$$

Z_{av} : compressibilité moyenne des gaz à l'aspiration et au refoulement

Pour calculer Z_{av} on utilise :

$$Z = PV/RT$$

Avec :

Z : compressibilité du gaz

R : constante des gaz parfait = $8314/M_w$

V : volume spécifique des gaz $1/\rho_{\text{gaz}}$

$$\text{Pour l'oxygène : } \longrightarrow 1^{\text{er}} \text{ étage : l'aspiration : } Z_1 = (0.5)(0.70)/(8314/16)(33) = 2.04 \times 10^{-5}$$

$$\text{Refoulement : } Z_2 = (2.3)(0.70)/(8314/16)(172) = 1.80 \times 10^{-5}$$

$$2^{\text{eme}} \text{ étage : l'aspiration : } Z_1 = (3.3166)(0.70)/[(8314/16)(35)] = 1.27 \times 10^{-4}$$

$$\text{Refoulement : } Z_2 = (9.5)(0.70)/[(8314/16)(179)] = 7.14 \times 10^{-5}$$

$$3^{\text{eme}} \text{ étage : l'aspiration : } Z_1 = (6.633)(0.70)/(8314/16)(36) = 2.48 \times 10^{-4}$$

$$\text{Refoulement : } Z_2 = (22)(0.70)/(8314/16)(124) = 2.39 \times 10^{-4}$$

$$\text{Pour l'azote : } \longrightarrow 1^{\text{er}} \text{ étage : l'aspiration : } Z_1 = (0.9)(0.80)/(8314/14)(33) = 3.67 \times 10^{-5}$$

$$\text{Refoulement : } Z_2 = (2.6)(0.80)/(8314/14)(163) = 2.148 \times 10^{-5}$$

$$2^{\text{eme}} \text{ étage : l'aspiration : } Z_1 = (3.8183)(0.80)/(8314/14)(32) = 1.60 \times 10^{-4}$$

$$\text{Refoulement : } Z_2 = (9)(0.80)/(8314/14)(163) = 7.43 \times 10^{-5}$$

$$3^{\text{eme}} \text{ étage : l'aspiration } Z_1 = (7.1377)(0.80)/(8314/14)(53) = 1.81 \times 10^{-4}$$

$$\text{Refoulement } Z_2 = (10)(0.80)/(8314/14)(67) = 2.010 \times 10^{-4}$$

Calcul de la compressibilité moyenne :

$$Z_{av} = (Z_{asp} + Z_{ref})/2 \quad (3.18)$$

Pour l'oxygène \rightarrow 1^{er} étage : $Z_{av} = (2.04 \times 10^{-5} + 1.80 \times 10^{-5})/2 = 1,92 \times 10^{-5}$

$$2^{\text{eme}} \text{ étage : } Z_{av} = (1.27 \times 10^{-4} + 7.14 \times 10^{-5})/2 = 9.92 \times 10^{-5}$$

$$3^{\text{eme}} \text{ étage : } Z_{av} = (2.48 \times 10^{-4} + 2.39 \times 10^{-4})/2 = 2.435 \times 10^{-4}$$

Pour l'azote : \rightarrow 1^{er} étage : $Z_{av} = (3.67 \times 10^{-5} + 2.14 \times 10^{-5})/2 = 2.90 \times 10^{-5}$

$$2^{\text{eme}} \text{ étage : } Z_{av} = (1.60 \times 10^{-4} + 7,43 \cdot 10^{-5})/2 = 1.17 \cdot 10^{-4}$$

$$3^{\text{eme}} \text{ étage : } Z_{av} = (1.81 \times 10^{-4} + 2.0180 \times 10^{-4})/2 = 1.91 \times 10^{-4}$$

Calcul de la compression adiabatique : H_{ad}

Pour l'oxygène \rightarrow

$$1^{\text{er}} \text{ étage : } H_{ad} = 1.92 \times 10^{-5} (8314/16) (33)(1.3/1.3 - 1)[44^{(1.3-1/1.3)} - 1] = 1.97$$

$$2^{\text{eme}} \text{ étage : } H_{ad} = 9.92 \times 10^{-5} (8314/16) (35)(1.3/1.3 - 1)[44^{(1.3-1/1.3)} - 1] = 10.84$$

$$3^{\text{eme}} \text{ étage : } H_{ad} = 2.43 \times 10^{-4} (8314/16) (36)(1.3/1.3 - 1)[44^{(1.3-1/1.3)} - 1] = 27.318$$

Pour l'azote : \rightarrow 1^{er} étage : $H_{ad} = 3.67 \times 10^{-5} (8314/14) (32)(1.4/1.4 - 1)[22^{(1.4-1/1.4)} - 1] = 3.35$

$$2^{\text{eme}} \text{ étage : } H_{ad} = 1.60 \times 10^{-4} (8314/14) (33)(1.4/1.4 - 1)[22^{(1.4-1/1.4)} - 1] = 15.10$$

$$3^{\text{eme}} \text{ étage : } H_{ad} = 1.81 \times 10^{-4} (8314/14) (53)(1.4/1.4 - 1)[22^{(1.4-1/1.4)} - 1] = 27.43$$

III.5.18: puissance de compression:

$$GP = MH_{ad}/\eta_c \quad (3.19)$$

GP : puissance de compression ou puissance du gaz (KW)

Pour l'oxygène : \rightarrow 1^{er} étage $GP = (304.2)(1.97)/0.88 = 680.99 K_w$

$$2^{\text{eme}} \text{ étage : } GP = (182.7)(10.84)/0.71 = 2789.91549 K_w$$

$$3^{\text{eme}} \text{ étage } GP = (24.68)(27.318)/0.98 = 687.96 K_w$$

Pour l'azote : \Rightarrow $1^{\text{er}} \text{ étage : } GP = (266.23)(3.35)/0.90 = 990.96 K_w$

$$2^{\text{eme}} \text{ étage: } GP = (159.86)(15.10)/0.96 = 2514.46 K_w$$

$$3^{\text{eme}} \text{ étage: } GP = (21.49)(27.43)/0.98 = 455.23 K_w$$

III.5.19 : Efficacité volumétrique :

$$\varepsilon_V = 0.97 - C_c [(r_c^{1/K} - 1)/(Z_2/Z_1)] \quad (3.20)$$

L'efficacité volumétrique, définie comme la quantité de volume de gaz déplacée à chaque course du piston, diminue avec l'augmentation du taux de compression.

Les volumes retenus à la fin de la course du piston est le jeu au cylindre c_c exprimé en pourcentage du volume balayé est généralement fourni par les fabricants d'équipements de compression.

Pour les calculs suivants, on utilise les valeurs mesurées de pression.

Pour $C_c = 3 \text{ mm}$, on a :

Pour l'oxygène \Rightarrow $1^{\text{er}} \text{ étage : l'aspiration : } Z_1 = (0.5)(0.70)/(8314/16)(33) = 2.04 \times 10^{-5}$

$$\text{Refoulement : } Z_2 = (2.3)(0.70)/(8314/16)(172) = 1.80 \times 10^{-5}$$

$$2^{\text{eme}} \text{ étage : l'aspiration : } Z_1 = (9)(0.70)/(8314/16)(35) = 3.46 \times 10^{-4}$$

$$\text{Refoulement : } Z_2 = (9.5)(0.70)/(8314/16)(179) = 7.14 \times 10^{-5}$$

$$3^{\text{eme}} \text{ étage : l'aspiration : } Z_1 = (20)(0.70)/(8314/16)(36) = 7.48 \times 10^{-4}$$

$$\text{Refoulement : } Z_2 = (22)(0.70)/(8314/16)(124) = 2.39 \times 10^{-4}$$

Pour l'azote \Rightarrow $1^{\text{er}} \text{ étage : l'aspiration : } Z_1 = (0.9)(0.80)/(8314/14)(33) = 3.67 \times 10^{-5}$

$$\text{Refoulement : } Z_2 = (2.6)(0.80)/(8314/14)(163) = 2.128 \times 10^{-5}$$

$$2^{\text{eme}} \text{ étage : l'aspiration : } Z_1 = (8)(0.80)/(8314/14)(32) = 3.36 \times 10^{-4}$$

$$\text{Refoulement : } Z_2 = (9)(0.80)/(8314/14)(163) = 7.43 \times 10^{-5}$$

$$3^{\text{eme}} \text{ étage : l'aspiration } Z_1 = (9.5)(0.80)/(8314/14)(53) = 7.43 \times 10^{-5}$$

$$\text{Refoulement } Z_2 = (10)(0.80)/(8314/14)(67) = 2.010 \times 10^{-4}$$

Pour l'oxygène : \Rightarrow

$$1^{\text{er}} \text{ étage : } \varepsilon_V = 0.97 - 3 \times 10^{-3} [(44^{1/1.3} - 1)/(1.8 \times 10^{-5}/2.04 \times 10^{-5})] = 0.41 = 41\%$$

$$2^{\text{eme}} \text{ étage: } \varepsilon_V = 0.97 - 3 \times 10^{-3} [(44^{1/1.3} - 1)/(7.14 \times 10^{-5}/3.46 \times 10^{-4})] = 0.72 = 72\%$$

$$3^{\text{eme}} \text{ etage: } \varepsilon_V = 0.97 - 3 \times 10^{-3} [(44^{1/1.3} - 1) / (2.39 \times 10^{-4} / 7.48 \times 10^{-4})] = 0.62 = 60\%$$

Pour l'azote 

$$1^{\text{er}} \text{ étage: } \varepsilon_V = 0.97 - 3 \times 10^{-3} [(22^{1/1.4} - 1) / (2.14 \times 10^{-5} / 3.36 \times 10^{-4})] = 0.6 = 60\%$$

$$2^{\text{eme}} \text{ étage: } \varepsilon_V = 0.97 - 3 \times 10^{-3} [(22^{1/1.4} - 1) / (7.43 \times 10^{-5} / 3.36 \times 10^{-4})] = 0.8 = 87\%$$

$$3^{\text{eme}} \text{ étage: } \varepsilon_V = 0.97 - 3 \times 10^{-3} [(22^{1/1.4} - 1) / (2.41 \times 10^{-4} / 7.34 \times 10^{-5})] = 0.96 = 80\%$$

Conclusion

La réalisation de ce projet de fin d'études nous a permis de se familiariser avec le monde de la production des gaz. On a pu constater que la machine la plus importante dans cette production est le compresseur. Dans ce mémoire on a mis en exergue le fonctionnement de du compresseur SULZER 4D.375.3A à 3 étages.

Le calcul des performances du compresseur à piston constitue la pierre angulaire pour procéder à son dimensionnement. Le calcul devient onéreux lorsqu'on tient à prendre en considération le maximum de phénomènes intervenant dans son fonctionnement.

Le calcul de performance que nous avons effectué s'est axé sur les indicateurs suivants :

- Le taux de compression global.
- Le taux de compression approximatif.
- La pression d'aspiration pour chaque étage.
- Les pressions de refoulement approximatif par chaque étage.
- Le rendement de pression.
- Les chutes de pression entre les étages.
- Les pressions de refoulement réelles.
- Le niveau de compression réelle par étage.
- Perte d'aspiration dans le cylindre de remplissage.
- Le rendement volumétrique.

Les résultats des calculs effectués sont en concordance avec les caractéristiques données en conditions opératoires du constructeur.

Références bibliographiques

[1] CENTRE DE PERFECTIONNEMENT. La séparation des gaz de l'air, SULZER manuel d'utilisation.

[2] JOHAN LIEDMAN et ROBERT MANSSON; Dynamic simulation of centrifugal compressor system; Chalmers university of technology Gothenburg, Sweden, 2013.

[3] MOHAMED TAIBI; machines hydrauliques et compresseurs ; office des publications universitaires, 2014.

[4] JOHAN LIEDMAN et ROBERT MANSSON; dynamic simulation of centrifugal compressor system; Chalmers university of technology Gothenburg, Sweden, 2013.

[5] THIERRY DESTOOP ; Compresseurs volumétriques ; Technique de l'ingénieur B 4 220,1989.

[6] SULZER No 993f, Manuel d'instruction pour compresseur pour compresseur d'oxygène et azote sec type 4D375-3A, MARS 1976.

[7] TONYE K JACK; A computer program for sizing and performance evaluation of reciprocating process gas compressors; International Journal of Computational Engineering Research;2012; pp 2250-3005.

[8] https://diren.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/_Arborescence_web.html(Logiciel Thermoptim)

[9] H. MAK; Handheld calculator program Helps Size New Reciprocating compressors, Oil and Gas Journal, June 25, 1984, pp.86-89

[10] R.F.NEERKEN; Keys to Compressor Selection; Chemical Engineering, 1979,pp.17-33.

[11] SCHEEL, J.F., Gas Machinery, Gulf Publishing, Houston, 1997.

[12] AVALLONE, E.A, ed.; BAUMEISTER III, T.ed. ,SADAGH, A.M, ed. Mark's Standard Handbook of Mechanical engineers ,11th end ,90th anniversary ed.,MaGraw-hill,2007,pp.-4:27.