

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A.MIRA-BEJAIA



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa



Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Projet de Fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master en électromécanique

Thème

Dimensionnement et simulation d'une chaîne pneumatique. Applications.

Présenté et soutenu publiquement le 18/06/2023

Préparé par :

Kizi Yacine,
Djabour Samy.

Dirigé par :

Mokrani Ahmed,
Mezghrani Mustaphapha.

Composition du jury:

Président	Mr Yahiaoui Belkacem
Promoteur	Mr Mokrani Ahmed
Examineur	Mr Mebarki Youcef
Invité	Mr Amri Athmane

Année Universitaire : 2022/2023

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

Nous tenons expressément et chaleureusement à remercier nos parents pour leur soutien et leurs encouragements tout au long de nos études.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur **Mr. AHMED MOKRANI**, ses précieux conseils et son aide durant toute la période du travail ainsi que notre co-promoteur **Mr. MEZGHRANI MUSTAPHA** nous avoir été en charge lors de notre stage et Tout le personnel de complexe GENERALE EMBALLAGE qui nous ont beaucoup aidés à réaliser ce travail dans les bonnes conditions.

Sans oublier **Mr. AMRI ATHMANE** pour ces précieuses informations.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail Et de l'enrichir par leurs propositions.

Nous exprimons aussi nos remerciements à l'ensemble des enseignants de génie Electrique qui ont contribué à notre formation de master.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents pour vos encouragements, vos multiples soutiens et votre affection quotidienne. Merci d'être présents dans toutes circonstances. Je prie le tout puissant de vous donner une longue vie et nous aider à être toujours votre fierté ;

*A la mémoire de mes grands-parents paternels et maternels
Que dieu les accueille dans son propre paradis.*

*A mes très chères grandes sœurs Khadidja et Lilia;
A toute ma famille Kizi et Moussaoui qui m'ont donné la force
de ne pas abandonné ;
A tous mes amis Meziane, Akram, Adel, Younes, Ali, Samir, ...;*

*A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin ;
Ainsi qu'à mon binôme Samy.*

*A mes profs qui m'ont formé durant toutes ces années
d'études;
Veuillez trouver dans ce travail, le témoignage de ma
gratitude et mon profond respect.*

Yacine

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents pour vos encouragements, vos multiples soutiens et votre affection quotidienne. Merci d'être présents dans toutes circonstances. Je prie le tout puissant de vous donner une longue vie et nous aider à être toujours votre fierté ;

*A la mémoire de mes grands-parents paternels et maternels
Que dieu les accueille dans son propre paradis.*

*A mes très chères petites sœurs;
A toute ma famille qui m'ont donné la force de ne pas
abandonné ;
A tous mes amis;*

*A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin ;
Ainsi qu'à mon binôme Yacine.*

*A mes profs qui m'ont formé durant toutes ces années
d'études;
Veuillez trouver dans ce travail, le témoignage de ma
gratitude et mon profond respect.*

Samy

Sommaire.

SOMMAIRE

Page

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Présentation Général Emballage SPA.....1

Introduction Générale.....5

Chapitre 1 : Présentation des composants d'un circuit pneumatique industrielle.

1. Introduction.....	6
1.1. Le fluide pneumatique.....	6
1.2. L'énergie pneumatique.....	6
1.3. Les différentes énergies de puissance.....	7
1.3.1. Pneumatique contre Hydraulique.....	7
1.3.2. Pneumatique contre électrique.....	7
1.4. Circuit pneumatique.....	7
1.5. Définition des pressions.....	8
1.6. Production d'énergie pneumatique.....	8
1.6.1. Purification de l'air comprimé.....	9
1.6.2. Types de pollueurs.....	9
1.7. Réseau de distribution de l'air.....	9
1.8. Alimentation et protection des machines.....	10
1.8.1. Unité FRL (Groupe conditionnement d'air)	10
1.8.2. Le sectionneur.....	11
1.8.3. Démarreur progressif.....	11
1.9. Pré-actionneurs.....	11
1.9.1. Les distributeurs.....	11
1.9.2. Electrovanne.....	16
1.10. Auxiliaire pneumatique.....	16
1.10.1. Bloqueur.....	16
1.10.2. Le réducteur de débit.....	17
1.11. Actionneur pneumatique.....	17
1.11.1. Les vérins.....	17
A) Vérins simples effet (VSE)	17
B) Vérins Doubles effet (VDE)	18
C) Principaux vérins spéciaux.....	20
1.11.2. Les moteurs.....	21
1.11.3. Venteuse, effet venturi.....	22
1.12. Repérage des composants des chaînes fonctionnelles.....	23
1.13. Conclusion.....	24

Chapitre 2: Généralité sur la production de l'air comprimé.

2.1. Introduction.....	25
2.2. L'air atmosphérique.....	25
2.3. L'air pneumatique.....	25
2.4. Définition de l'air comprimé.....	26
2.5. But de la compression.....	26
2.6. Utilisation de l'air comprimé.....	26
2.7. Avantages et inconvénients de l'air comprimé.....	27
2.8. Définition compresseur.....	27
2.9. Types des compresseurs.....	28
2.9.1. Compresseurs dynamiques.....	30
A) Compresseur axial.....	30
B) Compresseur centrifuge (radial).....	31
2.9.2. Compresseurs volumétriques.....	31
A) Compresseurs alternatifs.....	31
B) Compresseurs rotatifs.....	33
2.9.3. Avantages, inconvénients et domaines d'utilisations des compresseurs.....	37
2.10. Production de l'air comprimée.....	37
2.11. Traitement de l'air comprimé.....	39
2.11.1. Prétraitement de l'air comprimé.....	39
2.11.2. Traitement de l'air après la compression.....	40
2.11.3. Traitements de l'air avant la consommation.....	41
2.11.4. Méthode de séchage.....	41
2.11.5. Les avantages de l'air comprimé traité.....	45
2.11.6. Conséquence d'un mauvais traitement d'air comprimé.....	45
2.12. Conclusion.....	46

Chapitre 03 : Evaluation des besoins en air comprimé.

3.1. Introduction.....	47
3.2. Problématique.....	47
3.3. Description du réseau d'air comprimée.....	49
3.4. Principe de dimensionnement.....	50
3.5. Débit total de l'air comprimé et débit massique.....	50
3.6. Vitesse d'écoulement de fluide compressible et diamètre de la conduite.....	51
3.7. Calcul de La pression que doit assurer le compresseur.....	52
3.8. Calcul des pertes charges.....	52
3.8.1. Différents régimes d'écoulement.....	52
3.8.2. Pertes de charges linéaires.....	53
3.8.3. Perte de charge singulière.....	54
3.8.4. Différence de pression due à la hauteur.....	55
3.9. Applications.....	55
3.9.1. Calcul de débit d'air comprimé de l'installation.....	55

3.9.2. Vitesse d'écoulement de fluide compressible et diamètre de la conduite.....	56
3.9.3. Calcule des pertes charges de la conduite principale.....	57
A) Pertes charges linéaires.....	57
B) Pertes charges singulière.....	57
3.9.4. Différence de pression due à la hauteur.....	59
3.9.5. Pertes de charge dans les sècheurs et les filtres.....	59
3.9.6. Plage de régulation de la pression.....	59
3.9.7. Calcul de La pression que doit assurer le compresseur.....	59
3.10. Conclusion.....	59

Chapitre 04 : Etude et calcule thermodynamique de compresseur à vis et choix des accessoires.

4.1. Introduction.....	60
4.2. Les divers modes de compression.....	60
a) Compression isotherme.....	60
b) Compression isentropique.....	60
c) Compression Polytropique.....	61
4.3. Rendement effectif du compresseur.....	61
4.4. Travail de la compression.....	62
4.5. Puissance du compresseur.....	63
4.6. Puissance du compresseur.....	63
4.6.1. Pertes mécaniques.....	63
4.6.2. La puissance utile sur l'arbre.....	63
4.7. Application.....	63
4.7.1. Calcul du travail théorique du compresseur.....	63
4.7.2. Calcul du travail réel du compresseur.....	63
4.7.3. Calcul de la puissance du compresseur.....	63
4.7.4. Calcul de la puissance utile.....	64
4.7.5. Calcul de la puissance utile sur l'arbre du moteur électrique.....	64
4.7.6. Choix du compresseur à vis lubrifié.....	64
4.7.7. Choix du vase/tampon.....	65
4.7.8. Choix du sècheur.....	65
4.7.9. Comparaison entre l'ancienne et la nouvelle installation air comprimé.....	66
4.8. Conclusion.....	67

Chapitre 05: Présentation du processus de fabrication, transformation du carton ondulé Et Simulation de la machine 618.

5. Introduction.....	68
5.1. Description du processus de fabrication et transformation du carton ondulé.....	68
5.1.1. Définition et structure du carton ondulé.....	68
5.1.2. Présentation des différentes machines de production et transformation.....	69
5.2. Simulation de la machine 618.....	75

5.2.1. Logiciel de simulation : Automation Studio.....	75
5.2.2. Version professionnelle.....	75
5.2.3. Version éducative.....	76
5.2.4. Bibliothèques.....	76
5.2.5. Cas étudié.....	77
5.3. Conclusion.....	80
Conclusion Générale.....	81
Références	
Annexes	

LISTE DES ABRÉVIATIONS

Symbole	Définition	Unités (SI)
D_0	Diamètre du coude	m
K_u	Facture d'utilisation	/
K_s	Facture de simultanéité d'un groupe de récepteurs.	/
N	Coefficient polytropique	/
P	Pression du gaz	Pa
P_D	Pression de déclenchement du compresseur	Pa
P_E	Pression d'enclenchement du compresseur.	Pa
P_u	Puissance utile sur l'arbre du moteur électrique	kW
Q_V	Débit volumique	m ³ /s
Q_m	Débit massique	kg/s
Q_V	Débit d'air comprimé total, consommé par les différents récepteurs	m ³ /s
q_{vi}	Débit d'air comprimé consommé par la charge <<i></i>	m ³ /s
R	Constante du gaz parfait.	J.kg ⁻¹ .k ⁻¹
R_0	Rayon de courbure de coude.	M
Re	Nombre de Reynolds	//
t	Temps	S
T	Température du gaz.	K
\tilde{V}	Volume	m ³
v	Volume occupé par la masse m de gaz	m ³
V	Vitesse moyenne	m. s ⁻¹
L	La longueur de canalisation	m
S	Section de la canalisation	m ²
W	Puissance du compresseur	Kw
W'	Travail théorique du compresseur	kJ/kg
$W_{réel}$	Travail réel du compresseur	kJ/kg
P_m	Pertes mécaniques	Kw
u	Viscosité cinématique	m ² . s ⁻¹
μ	Viscosité dynamique du fluide	kg/ms
ρ	Masse volumique de l'air	kg.m ⁻³
Δ	Rugosité.	M
Δ'	Rugosité relative	M
ΔP_{ser}	Pression de service	Pa

ΔP_h	Différence de pression due à la hauteur	Pa
ΔP_{charge}	Perte de charge dans le réseau (linière et singulière), sécheur et le filtre	Pa
$\Delta P_{rég}$	Écart de régulation	Pa
ΔP_{LP}	Pertes de charge linéaires	Pa
ΔP_{SP}	Pertes de charge singulières	Pa
ΔP_{rdp}	Pertes dans le réseau de distribution principale	Pa
ΔP_{rds}	Pertes dans le réseau de distribution secondaire	Pa
δ	Angle du coude	Degré
η_{eff}	Rendement effectif du compresseur	/
λ	Coefficient de perte de charge linière	/
ξ	Coefficient de perte de charge de la charge singulière (Sans dimension).	/
γ	Rapport des chaleurs (pour l'air $\gamma=1.4$)	/
τ	Taux de compression	/
A_1	Coefficient tenant compte de l'effet de l'angle au centre δ du coude	/
B_1	Coefficient tenant compte de l'effet du rayon relatif du coude	/
C_1	Coefficient tenant compte de l'effet de la longueur relative de la section du coude	/

Liste des Figures

Figure I.1: Synoptique d'un S.A.P.....	6
Figure I.2: Synoptique d'un circuit pneumatique.....	7
Figure I.3: Graphique des pressions.....	8
Figure I.4 : Production de l'énergie pneumatique.....	8
Figure I.5: Symbole du compresseur intégré.....	9
Figure I.6 : Exemple de réseau de distribution d'énergie pneumatique.....	9
Figure I.7 : Cols de cygne à chaque raccordement	10
Figure I.8 : Une légère pente sur chaque canalisation.....	10
Figure I.9: Unité de conditionnement FRL et ses symboles.....	10
Figure I.10: Photo d'une unité FRL.....	11
Figure I.11 : Principe de symbolisation des distributeurs.....	12
Figure I.12: Exemple de représentation et symbolisation des positions repos et activation (distributeur 3/2).....	13
Figure I.13: Normalisation des principaux distributeurs et des dispositifs de pilotages correspondants.....	14
Figure I.14: Bloqueur.....	16
Figure I.15: Vérin simple effet classique, rappel par ressort	17
Figure I.16: Vérin simple effet plat à diaphragme	17
Figure I.17: Vérin simple effet à soufflet.....	18
Figure I.18: Vérin simple effet à membrane, rappel par ressort	18
Figure I.19: Vérin double effet	18
Figure I.20: Vérin double effet à amortissement non réglable.....	19
Figure I.21: Vérin double effet à amortissement réglable.....	19
Figure I.22: Principe du réglage de débit.....	19
Figure I.23: Constitution d'un vérin pneumatique double effet à amortissement réglable des deux côtés	19
Figure I.24: Vérin simple effet à tige télescopique.....	20
Figure I.25: 360°. Un amortissement est possible.....	20
Figure I.26: Exemple de réalisation d'un vérin rotatif (unité de couple).....	20
Figure I.27: Multiplicateur de pression.....	20
Figure I.28: Exemple d'un vérin double effet sans tige avec amortissement des deux côtés...	21
Figure I.29: Exemple et symbole d'un vérin double tige.....	21
Figure I.30: Principes de fonctionnement et schémas.....	21
Figure I.31: Principe d'un moteur pneumatique à pistons en étoile.....	22
Figure I.32: Venturi associé à une ventouse.....	22
Figure I.33: Repérage à trois blocs.....	23
Figure II.1: Schéma d'un compresseur.....	27
Figure II.2 : Evolution du débit en fonction de la pression pour les différents types de compresseurs.....	29
Figure II.3 : Diagramme de classification de compresseur.....	29
Figure II.4: Le compresseur axial.....	30
Figure II.5: Le compresseur centrifuge (radial).....	31

Figure II.6 : Fonctionnement d'un compresseur à piston durant la phase d'aspiration.....	32
Figure II.7 : Fonctionnement d'un compresseur à piston durant la phase de refoulement.....	33
Figure II.8 : Le compresseur à membrane.....	33
Figure II.9 : Compresseur à palettes.....	34
Figure II.10 : Le compresseur à lobes.....	35
Figure II.11 : Compresseur spirale.....	35
Figure II.12 : Le compresseur à double vis.....	36
Figure II.13 : Exemple de l'installation de l'air comprimé.....	38
Figure II.14 : diagramme de méthode de séchage.....	42
Figure II.15 : Classification des déshydratants.....	44
Figure III.1 : Ancienne conduite du réseau air comprimé en argent galvanisé.....	48
Figure III.2 : Nouvelle conduite du réseau air comprimé en argent galvanisé à dimensionné.....	49
Figure IV.1 : Les divers modes de compression.....	60
Figure V.1 : Processus de fabrication du carton ondulé.....	71
Figure V.2 : Vue de la machine 618.....	72
Figure V.3 : Composants de la machine 618.....	72
Figure V.4 : Vue de face de margeur.....	73
Figure V.5 : Vue de face des imprimantes.....	73
Figure V.6 : Vue de face de découpeur.....	74
Figure V.7 : Vue da face de Slotter.....	74
Figure V.8 : Vue de face de Plieuse colleuse.....	75
Figure V.9 : GRAFCET de bon fonctionnement de la machine 618.....	78
Figure V.10 : GRAFCET de l'élément compteur éjecteurs de la 618.....	78
Figure V.11 : Schéma structurel de la machine 618 sous le progiciel Automation studio.....	80

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : Comparaison des différentes énergies de puissance.....	7
Tableau I.2 : Type de matériel.....	23
Tableau II.1 : Composition molaire de l'air.....	25
Tableau II.2 :Avantages et inconvénients de l'air comprimé.....	27
Tableau II.3 : Avantages, inconvénients et domaines d'utilisations des compresseurs.....	37
Tableau II.4 : Caractéristique de chaque sécheur.	45
Tableau III.1 : Régime d'écoulement.	52
Tableau III.2 : Consommation débit d'air comprimé de différentes machines.....	56
Tableau III.3 : Différents résultats.	57
Tableau IV.1 : Caractéristique des compresseurs choisis sur catalogue Atlas Copco.....	64
Tableau IV.2 : caractéristique du compresseur Compair LS75.....	65
Tableau IV.3 : stockage de chaque compresseur.....	65
Tableau IV.4 : Choix du sécheur pour chaque compresseur.....	65
Tableau IV.5 : caractéristiques de chaque sécheur.....	65
Tableau IV.6 : Choix du sécheur pour chaque compresseur.....	66
Tableau IV.7 : caractéristiques de chaque sécheur.....	66
Tableau IV.8 : Comparaison entre l'ancienne et nouvelle installation air comprimé.....	66
Tableau V.1 : Caractéristique de différents profils cannelure.....	68
Tableau V.2 : Tables des nomenclatures des entrées et des sorties.....	79

Présentation de la
société Générale
Emballage SPA.

I. Présentation de Général Emballage :

General Emballage est un leader de l'industrie algérienne du carton ondulé. Selon la commande, elle peut fabriquer des plaques double-face/double-double, emballer, afficher et produire des post-impressions haute résolution jusqu'à 6 couleurs avec des vernis intégraux ou sélectifs. Leur équipe maîtrise toutes les tâches de production :

Etudes et recherche, prototypage, production de films découpés et imprimés, fabrication d'emballages et de présentoirs, livraison.

General Emballage a été créée en 2002 sous la forme d'une société de capitaux au capital social de 2 000 000 000 DZD, opère sur 3 sites industriels (Akbou, Oran et Sétif), compte près d'un millier de salariés et un chiffre d'affaires de 6 milliards de DZD.

Général Emballage est une entreprise certifiée ISO 9001:2008.

Le siège social est à ZAC Taharacht, Akbou, dans la wilaya de Bejaïa.

RC N° : 00 B 0183268 du 05/08/2009

NIF : 000006018326879

Article d'imposition : 06256000300

NIS : 099806250344426.



Generale Emballege akbou SPA.

I.1. Historique de l'entreprise :

- **1^{er} Août 2000 :**

Création de Général Emballage SPA par Ramdane Batouche avec un capital de 32 millions de dinars dans la Zone d'activités de Taharacht (Akbou. W de Bejaïa) (décision APSI N°13051 du 06 juin 1998).

- **2002 :**

Entrée en production de l'usine d'Akbou avec un effectif de 83 employés.

- **2006 :**

Le capital est porté à 150 millions de dinars.

- **2007 :**

Le capital est porté à 1,23 milliards de dinars.

Entrée en production de l'usine de Sétif avec un effectif de 425 employés.

Trophée de la Production (Euro-Développement PME)

- **2008 :**

Début d'exportation vers la Tunisie.

Entrée en exploitation de l'unité d'Oran.

- **3 Juin 2009 :**

Augmentation du capital à 2 milliards de DA et entrée de MAGHREB PRIVATE EQUITY FUND II « Cyprus II » (MPEF II) avec une participation de 40%. Général Emballage devient une société de capitaux (Société par actions).

Effectif : 597 employés.

- **2010 :**

Effectif : 630 employés

- **Novembre 2011 :**

Effectif : 699 employés

Cotation COFACE

- **2012 :**

- **Mars :** Les capacités de production sont portées à 130.000 tonnes.

- **Juin :** L'usine d'Oran est transférée à la ZI Hassi-Ameur.

- **Juin :** Production des premiers ouvrages en Haute résolution.

- **02 Juillet :** Signature d'une Convention cadre de partenariat avec l'Université de Bejaïa.

- **17 Décembre :** Notation COFACE

- **2013 :**

- **23 Janvier :** Certification ISO 9001:2008 .

- **8 Octobre :** Démarrage de la 1^{ère} promotion de Licence en Emballage & Qualité à l'Université de Bejaïa « *L'Université de Bejaïa et Général Emballage lancent, à partir de la rentrée universitaire de septembre 2013 une licence professionnelle en Emballage et qualité. L'inscription est ouverte, à partir du 04 septembre 2013, aux étudiants de l'Université de Bejaïa ayant accompli avec succès une 1^{ère} année de Tronc commun (ST, SM ou SNV). Durée d'études : 02 années avec de fréquents séjours en entreprise. Un Master pro est ouvert au profit des licenciés ayant accompli 03 années d'expérience professionnelle* »

- **2014 :**

Début des exportations vers la Libye.

➤ 22 Février

Signature d'un protocole d'accord de recrutement avec l'Agence Nationale de l'Emploi (ANEM).

▪ 2015

➤ **Janvier** : Démarrage d'unité de production à Sétif.

➤ **02 Juin** : Prix d'encouragement du Trophée Export 2014 (World Trade Center)

▪ 2016

La sortie de Maghreb Private Equity Fund et entrée de Développement Partners International (DPI) à hauteur de 49 % du capital social.

I.2. Les valeurs de l'entreprise :

➤ **Leadership :**

Les politiques d'investissement, de recrutement et de formation reposent sur deux principes fondamentaux : répondre aux besoins et anticiper les futurs besoins du marché. Il en résulte une escalade continue des compétences humaines et des processus techniques.

➤ **Proximité :**

Général Emballage nous rapproche de nos clients afin de mieux comprendre leurs besoins, réduire le coût et le délai de livraison de nos produits et garantir le meilleur rapport qualité/prix.

➤ **Citoyenneté :**

Général Emballage est une entreprise citoyenne qui inscrit son intérêt dans celui de la société et de l'humanité en général.

➤ **Développement Durable :**

Général Emballage s'engage à :

- Recycler tous les déchets de production et industriels.
- N'achetez qu'auprès d'industries qui respectent les principes du développement durable.
- Promouvoir les efforts visant à protéger l'environnement, notamment les actions de reboisement.

I.3. Le rôle de chaque département et de chaque direction :

Afin de répondre aux demandes et aux besoins du marché, Générale Emballage dispose d'une main-d'œuvre planifiée (cadres supérieurs et intermédiaires, etc.) chargée de plusieurs tâches préalablement fixées.

➤ **Direction générale :**

Cette direction tient à superviser toutes les opérations qui s'effectuent au sein de Général Emballage.

➤ **Secrétariat de direction :**

Cette direction s'occupe de la liaison entre les différentes missions (courrier, messages, archives des dossiers.).

➤ **Direction commerciale :**

- ✓ Service commercial
- ✓ Service facturation
- ✓ Service force de vente
- ✓ Service étude statistique et gestion clientèle

- **Direction des finances :**
 - ✓ Service de finance
 - ✓ Service de comptabilité
- **Département des achats :**
 - ✓ Service achat extérieur.
 - ✓ Service achat local.
- **Direction logistique industrielle :**
 - ✓ Service expédition et moyen logistique.
 - ✓ Service gestion des stocks.
 - ✓ Service moyen généraux.
- **Direction industrielle :**
 - ✓ Service contrôle de qualité
 - ✓ Service méthode production

- **Unité de Sétif :**
 - ✓ Structure de production
 - ✓ Structure commerciale
 - ✓ Structure maintenance
 - ✓ Administration.

- **Unité d'Oran :**
 - ✓ Structure production
 - ✓ Structure commerciale
 - ✓ Structure maintenance
 - ✓ Administration

La direction industrielle se compose de 03 départements principaux :

- **Département technique :**
 - ❖ Section infographie.
 - ❖ Section forme de découpe.
 - ❖ Section préparation d'encre.
 - ❖ Section programmation.
- **Département maintenance :**
 - ❖ Section méthode M. N. T
 - ❖ Section mécanique O.N.D
 - ❖ Section mécanique T.R.S.F
 - ❖ Service électricité.
 - ❖ Services généraux.
- **Département de production :**
 - ❖ Service transformation.
 - ❖ Service onduleuse.

Introduction générale.

De nos jours, la pneumatique joue un rôle important dans l'automatisation d'un grand nombre de machines et de procédés industriels. Elle est complémentaire avec d'autres formes d'énergie, telles que l'électricité, la mécanique et l'hydraulique. L'air comprimé est considéré comme la quatrième énergie, après l'électricité, le gaz naturel et l'eau et l'une des énergies les plus utilisées actuellement par l'industrie grâce à sa souplesse de mise en œuvre.

La compression de l'air se fait à l'aide des compresseurs qui sont juste pour aspirer de l'air, de le comprimer puis le refouler. Cela nous à encourager à étudier le procédé de production d'air comprimé et les équipements de cette installation.

La société algérienne industrielle du carton ondulé " Générale Emballage " s'occupe de plusieurs secteurs d'activité qui nécessitent l'utilisation de l'air comprimé servant au fonctionnement de différentes machines.

La production de cet air comprimé est assurée par trois salles de compression de zones différentes, constituée de trois compresseurs en marche et un à l'arrêt.

La société « Générale Emballage » comporte deux services distincts pour lequel l'utilisation de l'air comprimé est plus qu'indispensable, ces services sont comme suit :

- Production des plaques en carton.
- Transformation des plaques brutes en boites.

Nous nous sommes intéressés au niveau de l'entreprise « GE » sur l'étude et le dimensionnement des moyens de production d'air comprimé, et au fonctionnement du système de cette installation. Ce système est doté de quatre compresseurs d'air à vis lubrifié chacun entraîné par un moteur électrique. Les compresseurs qu'elle exploite sont répartis dans différentes zones et fournissent une tuyauterie en boucle fermée. Si l'un des trois compresseurs est en maintenance ou en réparation, le GA30 peut également être utilisé, mais ne peut pas satisfaire les besoins de l'installation exigé et maintenir la pression de service et le débit, et ce particulièrement en été avec les fortes températures. Pour remédier à ce problème, l'entreprise envisage de rassembler ces compresseurs dans un seul local avec un compresseur de secours, et de redimensionner toute l'installation pour un fonctionnement optimale.

Notre étude sera composée de cinq chapitres :

-Le premier chapitre est une présentation de l'énergie pneumatique, et des différents composants utilisés dans les circuits pneumatiques industrielles.

-Le deuxième chapitre sera consacré aux généralités sur l'air comprimé dans lequel nous allons présenter le processus de production de l'air comprimé et différents équipements.

-Dans le chapitre trois, nous allons évaluer les besoins en air comprimé, et présenter le dimensionnement énergétique de l'installation, pertes de charge et leurs applications pour assurer la pression et le débit nécessaire des services. Ce calcul passe d'abord par la détermination du débit total de l'installation, ce qui implique le calcul des diamètres de la tuyauterie principale de cette installation, en utilisant les vitesses les plus existantes dans les installations de l'air comprimé.

-Dans le quatrième chapitre, après détermination de la pression et du débit de l'installation, nous allons déterminer les caractéristiques des compresseurs qui répondent aux besoins susmentionné à partir d'un calcul thermodynamique, ensuite dans une deuxième étape, choisir les équipements adéquats de cette l'installation (compresseurs ,sécheurs et ballons de stockages).

-Dans le cinquième et dernier chapitre, nous allons s'axer sur la description du processus de production et fabrication du carton ondulé, puis la simulation de la machine 618.

Enfin notre travail sera terminé par une conclusion générale.

chapitre 1 :

Présentation des composants d'un
circuit pneumatique industrielle.

1. Introduction :

L'hydraulique et la pneumatique ont des domaines d'application. Ils diffèrent par leurs propriétés fluides sous pression qu'ils utilisent : un liquide quasiment incompressible utilisé en hydraulique, un gaz hautement compressible utilisé en pneumatique. C'est pourquoi les deux techniques font l'objet d'études séparées. Utiliser l'énergie pneumatique pour effectuer automatisation avec des composants simples et robustes, en particulier dans les environnements difficiles : hautes températures, Environnement explosif, environnement humide, etc.

Dans ce chapitre, on va ce basée sur la présentation des différents composants d'un circuit pneumatique.

1.1. Le fluide pneumatique :

Le fluide pneumatique le plus couramment utilisé est l'air habituellement, la pression de travail est comprise entre 3 et 8 Bar (soit 3.10⁵ à 8.10⁵ Pascals, l'unité de pression du système international d'unités SI). Dans certains cas, vous pouvez utiliser l'azote.

Rappel : 1 bar = 1 daN / cm²

L'air comprimé est utilisé comme fluide énergétique (air de travail ou air moteur) pour alimenter l'actionneur (vérins et moteur pneumatique). Il peut aussi intervenir chaînes de contrôle ou de mesure (air instrument).

De plus, il peut être en contact direct avec le produit procédé de fabrication (procédé à l'air) ou avec l'utilisateur (air respirable) risque potentiel de contamination et ivre. Exemple:

- Aération, brassage, pressurisation des cuves ;
- Transport pneumatique de produits légers ou pulvérulents ;
- Refroidissement, pulvérisation, soufflage ;
- Bouteilles de plongée, hôpitaux, etc.

1.2. L'énergie pneumatique :

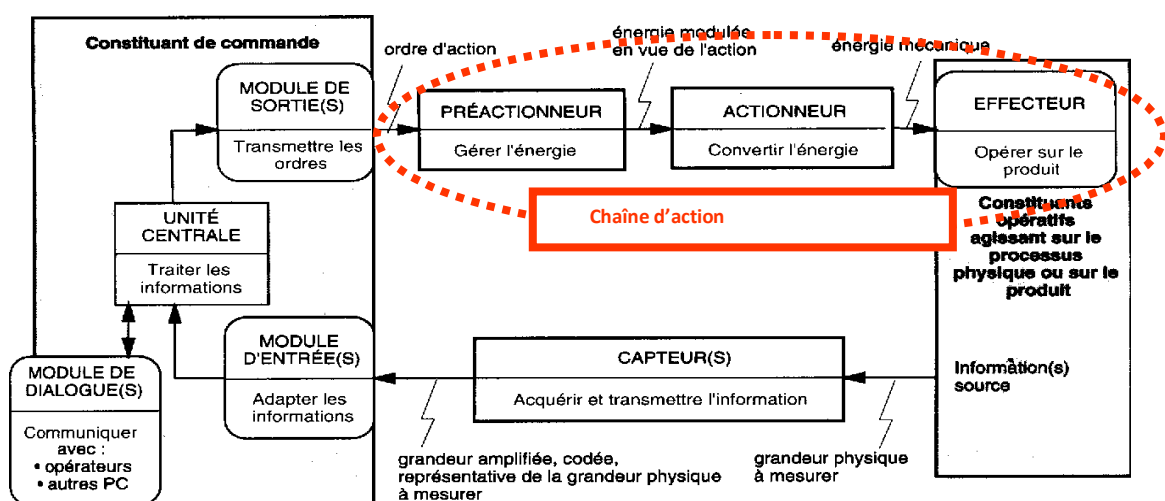


Figure I.1: Synoptique d'un S.A.P. [5]

L'énergie pneumatique est essentiellement présente dans la chaîne de mouvement d'un système de production automatisé.

1.3. Les différentes énergies de puissance :

	Pneumatique	Hydraulique	Electrique
Production	Compresseur 1 par atelier	Compresseur 1 par système	Réseau EDF
Liaison	Tubes, flexibles (pertes de charge selon distance et forme)		Câbles, fils
Rendement	0,3 à 0,5	0,7 à 0,9	0,9

Tableau I.1 : Comparaison des différentes énergies de puissance [5]

1.3.1. Pneumatique contre Hydraulique :

1. Hydraulique : P → 300 bar

- Forces supérieures à 50 000 N.
- Positionnement intermédiaire et précis des vérins.
- Vitesse d'avancement normale (puisque l'huile est incompressible).

2. Pneumatique : P → 10 bar

- Forces inférieures à 50 000 N.
- Faibles coûts d'installation (production centralisée d'air comprimé).
- Transfert de fluide plus facile et plus rapide (jusqu'à 15 à 50 m/s contre 3 m/s pour les systèmes hydrauliques).

1.3.2. Pneumatique contre électrique :

Les actionneurs pneumatiques sont préférés aux actionneurs électriques face aux alternatives :

- Si le temps de réponse n'est pas important (minimum 10 à 20 ms).
- Pour les machines séquentielles simples.
- Dans des environnements "difficiles" (température élevée, environnements explosifs ou humides, etc.).
- Faible coût d'entretien.
- Maintenir les qualifications minimales requises.

1.4. Circuit pneumatique :

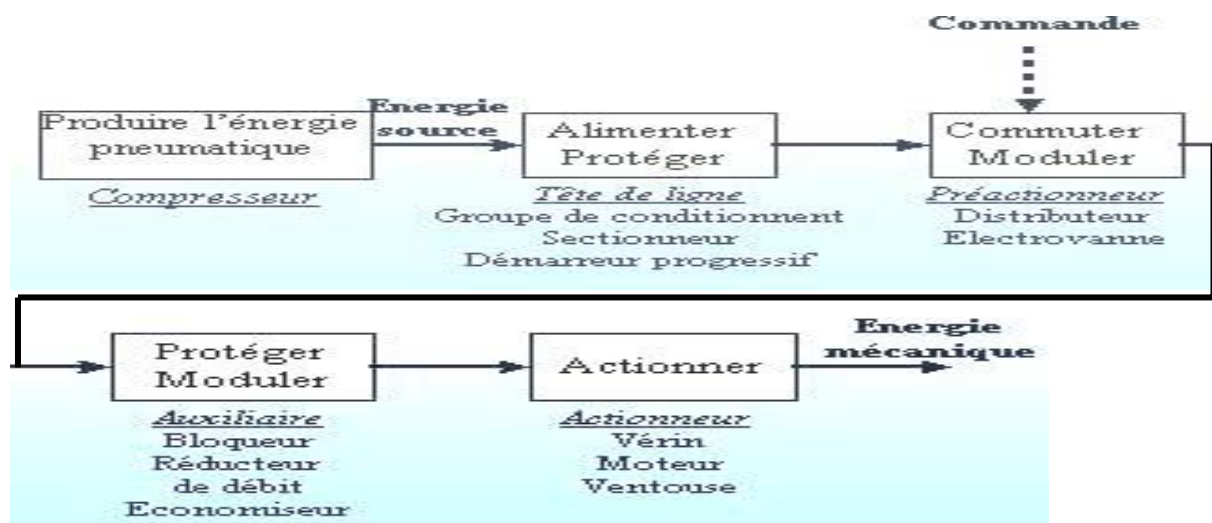


Figure I.2: Synoptique d'un circuit pneumatique [5]

1.5. Définition des pressions : [7]

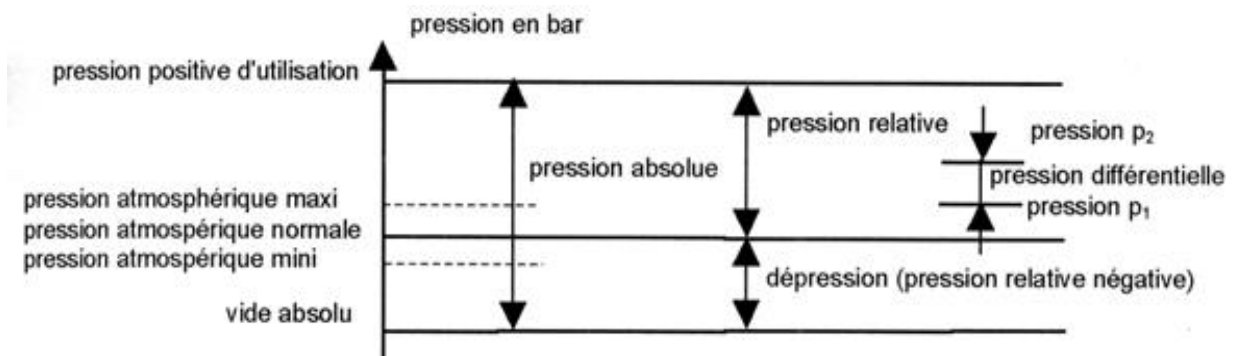


Figure I.3: Graphique des pressions [24]

- **Pression atmosphérique normale de référence (ANR)** : Pression atmosphérique de 1013 mbar, à 20°C et 65 % d'humidité relative.
- **Pression relative ou effective** : Pression positive ou négative par rapport à la pression ANR.
- **Pression absolue** : Pression par rapport au vide absolu. Pression absolue = pression relative + pression atmosphérique normale.
- **Pression atmosphérique normale** = 1 atm = 760 mmHg = 1, 0132.10⁵ Pa = 1, 0132 bar ≈ 1 bar.
- **Dépression ou vide relatif** : Pression relative négative par rapport à la pression ANR.
- **Pression différentielle** = $\Delta p = p_2 - p_1$.

Remarque : La pression absolue est égale, approximativement, à la pression relative augmentée de 1 bar. Sur le terrain, on mesure des pressions relatives (manométriques), mais dans les formules, on utilise les pressions absolues.

1.6. Production d'énergie pneumatique :

Il est assuré par un compresseur entraîné par un moteur électrique. Ce compresseur intégré se compose d'un filtre, d'un système de compression d'air, d'un sécheur par refroidissement et d'un filtre final. Des réservoirs régulent la consommation et accumulent le compresseur.

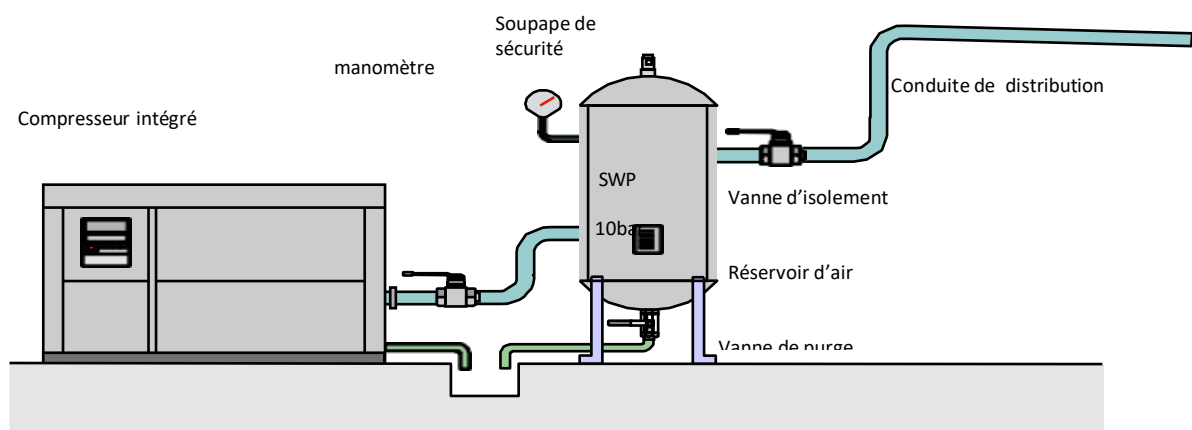


Figure I.4 : Production de l'énergie pneumatique [5]

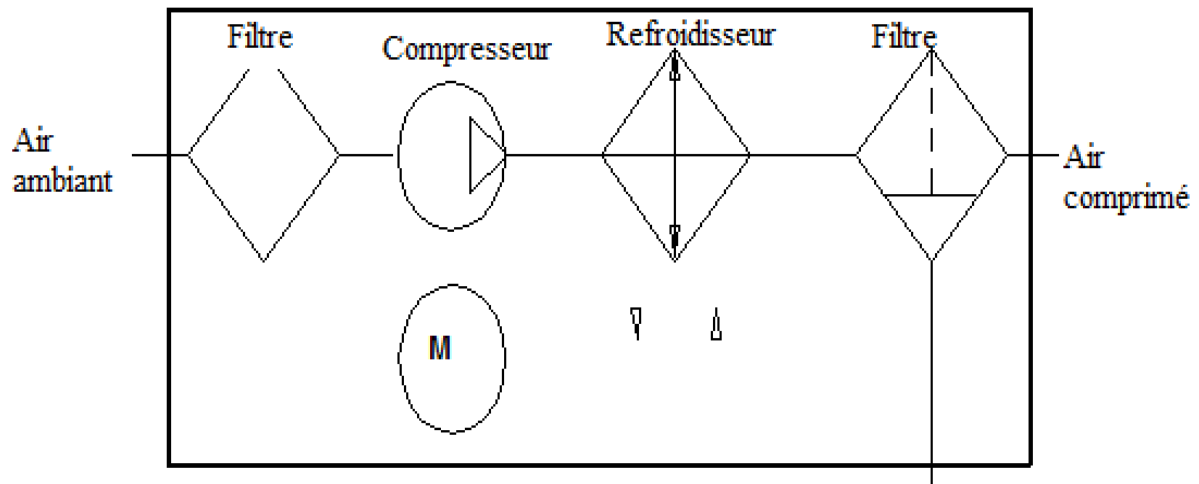


Figure I.5: Symbole du compresseur intégré [5]

1.6.1. Purification de l'air comprimé :

L'air polluer peut causer des problèmes ou endommager le réseau d'air comprimé. L'air propre maintient les composants connectés tels que les vannes et les vérins en bon état de fonctionnement. La fiabilité des appareils pneumatiques dépend de la qualité de l'air comprimé.

1.6.2. Types de pollueurs :

Les pollueurs sont essentiellement :

- Les particules solides (poussières, suies, produits d'usure et de corrosion, etc.), qui peuvent être classées selon leur taille (grosses $> 10 \mu\text{m}$, petites $1 \text{ à } 10 \mu\text{m}$, très fines $< 1 \mu\text{m}$) ;
- Eau : Lorsque l'air comprimé se refroidit, de grandes quantités de condensation se forment. Si l'air n'est pas sec, la corrosion peut commencer et endommager les composants ;
- Huile : les huiles à certaines concentrations peuvent obstruer les composants pneumatiques sensibles et laver ou endommager la couche protectrice grasse.

1.7. Réseau de distribution de l'air :

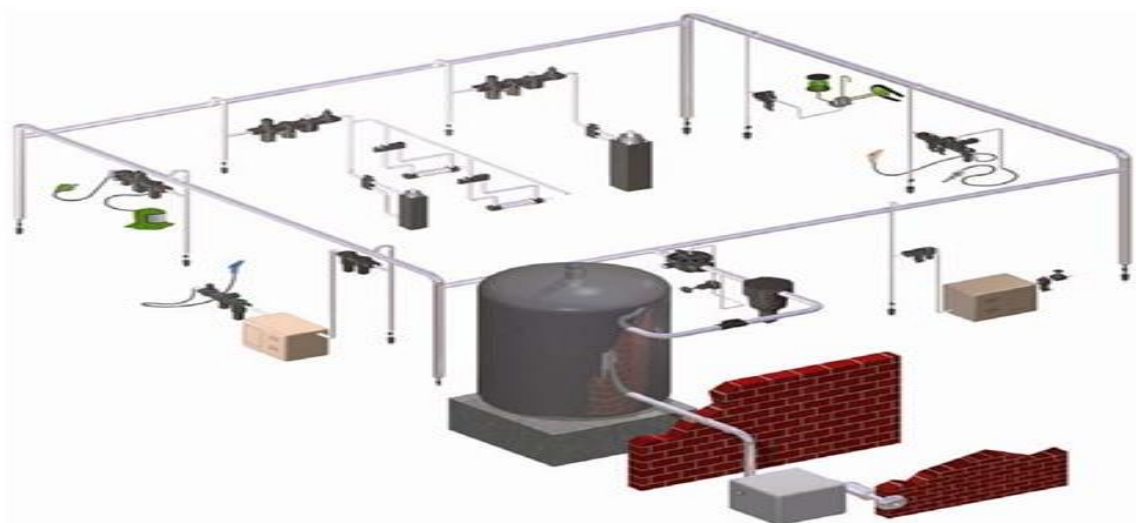


Figure I.6 : Exemple de réseau de distribution d'énergie pneumatique [5]

La distribution de l'énergie pneumatique se fait par des tuyauteries rigides reliées par des cols de cygne pour éviter de recevoir des impuretés ou de l'eau pouvant rester dans la tuyauterie.

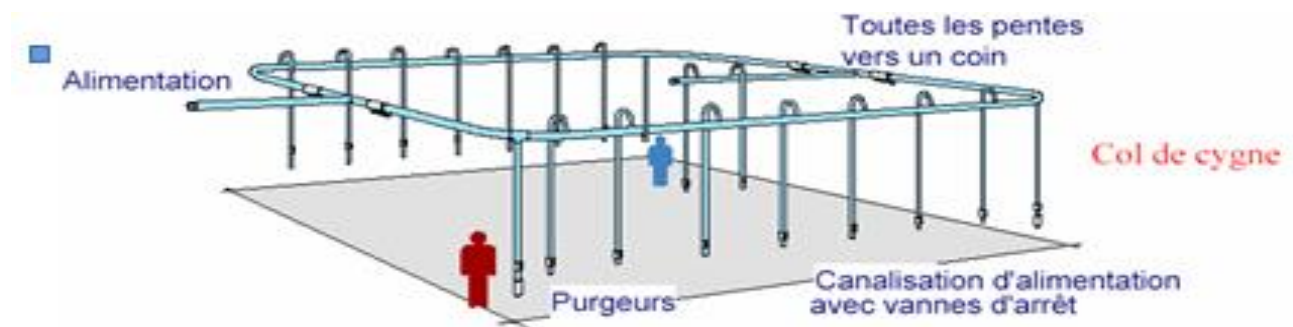


Figure I.7 : Col de cygne à chaque raccordement [18]

Afin de se débarrasser de ces impuretés ou de l'eau accumulée, des purgeurs sont prévus aux points bas de chaque raccordement, et les canalisations présentent une légère pente. Les filtres sont utilisés pour sécher l'air et filtrer la poussière.

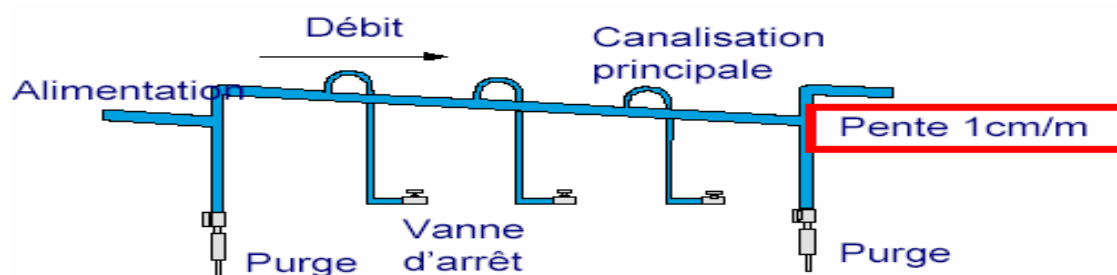


Figure I.8 : Une légère pente sur chaque canalisation [18]

1.8. Alimentation et protection des machines :

1.8.1. Unité FRL (Groupe conditionnement d'air) :

Unité FRL L'air doit être filtré, séché, lubrifié et régulé en pression avant utilisation. Par conséquent, avant chaque SAP (système de production automatisé), une unité de régulation FRL (également appelée "tête de ligne") est placée, qui adapte l'énergie pneumatique au système. Cette unité FRL se compose d'un filtre, d'un régulateur et lubrificateur.

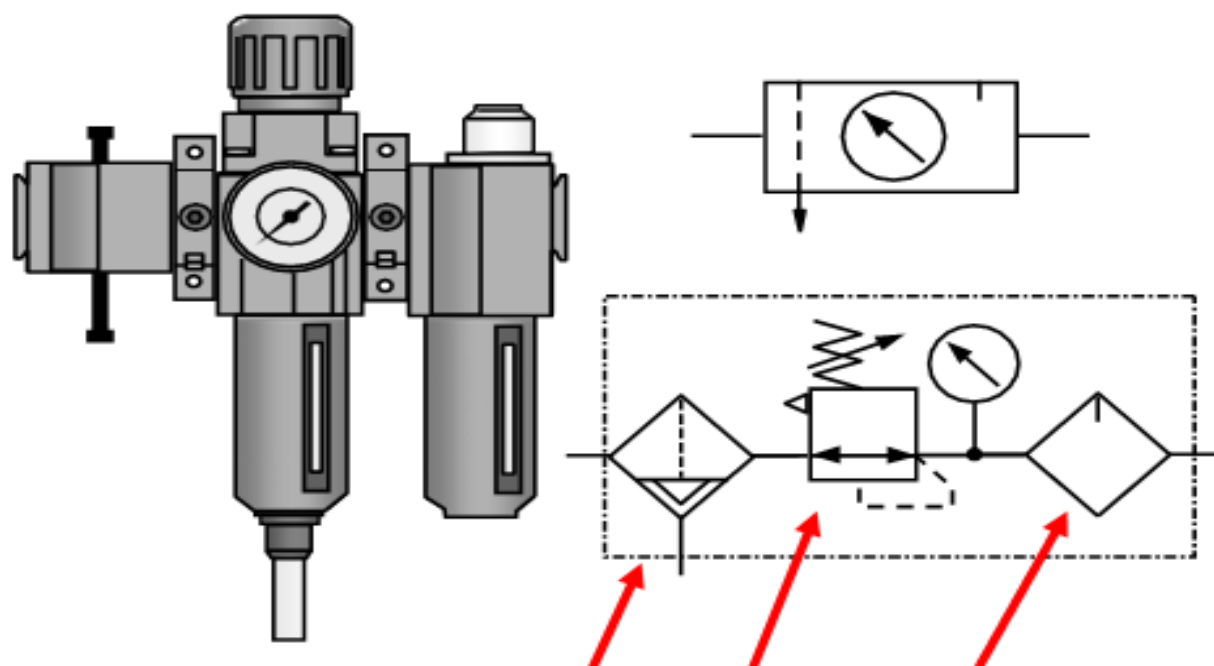


Figure I.9: Unité de conditionnement FRL et ses symboles [5]

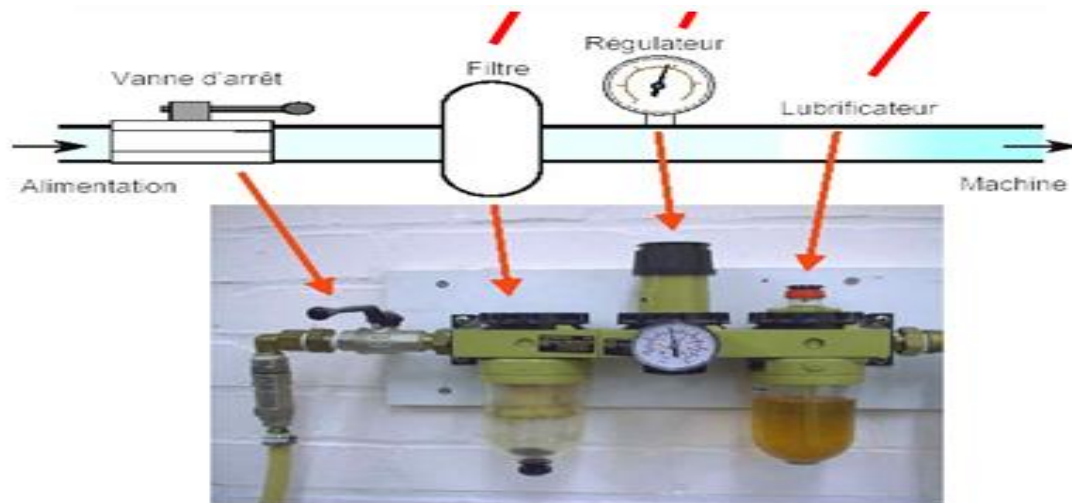
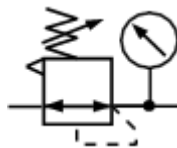


Figure I.10:Photo d'une unité FRL [18]

Les filtres sont utilisés pour sécher l'air et filtrer la poussière. Leur symbole :



Les régulateurs de pression sont utilisés pour réguler et régler la pression d'air. Leur symbole :



Les lubrificateurs sont utilisés pour prévenir la corrosion et améliorer le glissement. Leur symbole :



1.8.2. Le sectionneur :

Pour activer ou désactiver le système, un sectionneur pneumatique est utilisé. Il s'agit d'une vanne de type 3/2 et peut être actionnée manuellement ou électriquement. Sa fonction est d'isoler le circuit pneumatique du système de la source d'air et d'évacuer le circuit lorsque l'alimentation est coupée.

1.8.3. Démarreur progressif :

Il assure une montée en pression progressive dans l'unité en agissant sur le taux de remplissage du circuit. Il est installé du côté sortie du FRL et avant le sectionneur principal pour empêcher le personnel de remettre brusquement l'actionneur en service.

1.9. Pré-actionneurs :

1.9.1. Les distributeurs :

➤ Fonction :

Ils sont utilisés pour commuter et contrôler le débit des fluides sous pression, comme une sorte de déviateur de débit, après avoir reçu un signal de commande qui peut être mécanique, électrique ou pneumatique. Ils permettent:

Chapitre 1 : Présentation des composants d'un circuit pneumatique industrielle.

- Contrôler le mouvement des tiges de vérin ou la rotation des moteurs hydrauliques ou pneumatiques (distributeurs de puissance) ;
- Sélectionner le sens d'écoulement du fluide (inverser, tourner, etc.) ;
- Exécuter des fonctions logiques (fonctions ET, OU, mémoire, etc.) à partir de fluides ;
- Démarrer ou arrêter la circulation du fluide (vannes d'arrêt, bloqueur, etc.) ;
- Capteur de position (course du vérin).

➤ Symbolisation :

Symbolique Les distributeurs se caractérisent par :

- Par nombre de orifices : 2, 3, 4 ou 5 ;
- Par le nombre des modes de distribution ou positions: 2 ou 3 ;
- Par le type de commande du pilotage assurant le changement de position : simple pilotage avec ressort de rappel ou double pilotage, avec éventuellement rappel au centre par ressort dans le cas des distributeurs à 3 positions ;
- Par technologie de commande : pneumatique, électropneumatique ou mécanique ;
- Par la technologie de commutation: vannes, tiroirs cylindriques, tiroirs plats, clapets.

➤ Principe de symbolisation :

- **Nombre de cases** : Indique le nombre de positions de commutation possibles, une case par position. S'il existe une position intermédiaire, les cases sont séparées par des lignes pointillées.
- **Flèches** : Dans chaque case ou position, les voies sont représentées par des flèches indiquant le sens de circulation du fluide entre les orifices.
- **T** : les orifices inutilisés à la position sont symboliquement fermés par un T droit ou inversé. Le nombre d'orifice est déterminé pour un emplacement et est égal pour tous les emplacements.
- **Sources de pression** : indiquées par des cercles noirs dans les systèmes hydrauliques et des cercles clairs dans les systèmes pneumatiques.
- **Échappement** : Indiqué par un triangle noir dans les systèmes hydrauliques et un triangle noir dans les systèmes pneumatiques.

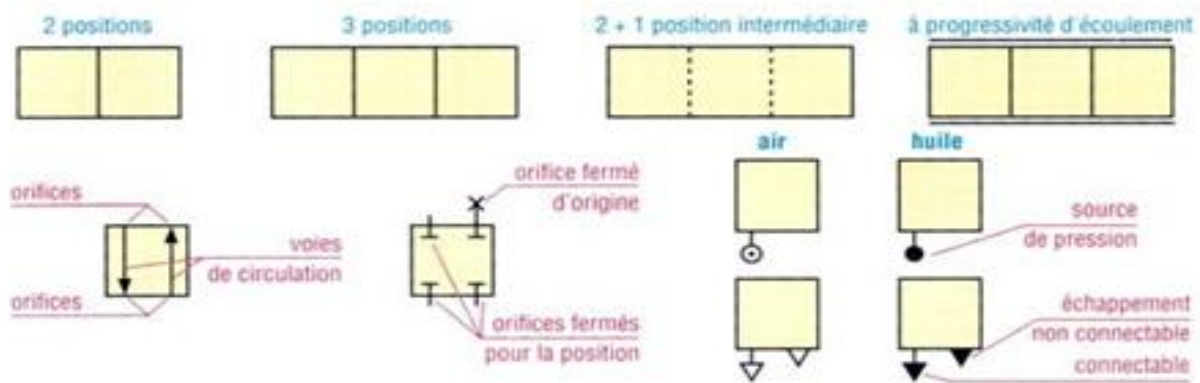


Figure I.11 : Principe de symbolisation des distributeurs [10]

- **Position initiale** : La ligne de liaison entre le réseau et le distributeur se termine toujours par une case représentant la position initiale ou de repos ; pour les distributeurs à deux positions, cette case est à droite, et pour les distributeurs à trois positions, la case est au centre.

Le symbole de pression (cercle) se trouve à droite de la case restante s'il n'y a qu'un seul échappement (triangle) et au milieu s'il y a deux échappements. Ces orifices sont identifiés par des lettres dans les systèmes hydrauliques et des chiffres dans les systèmes pneumatiques (voir page 14).

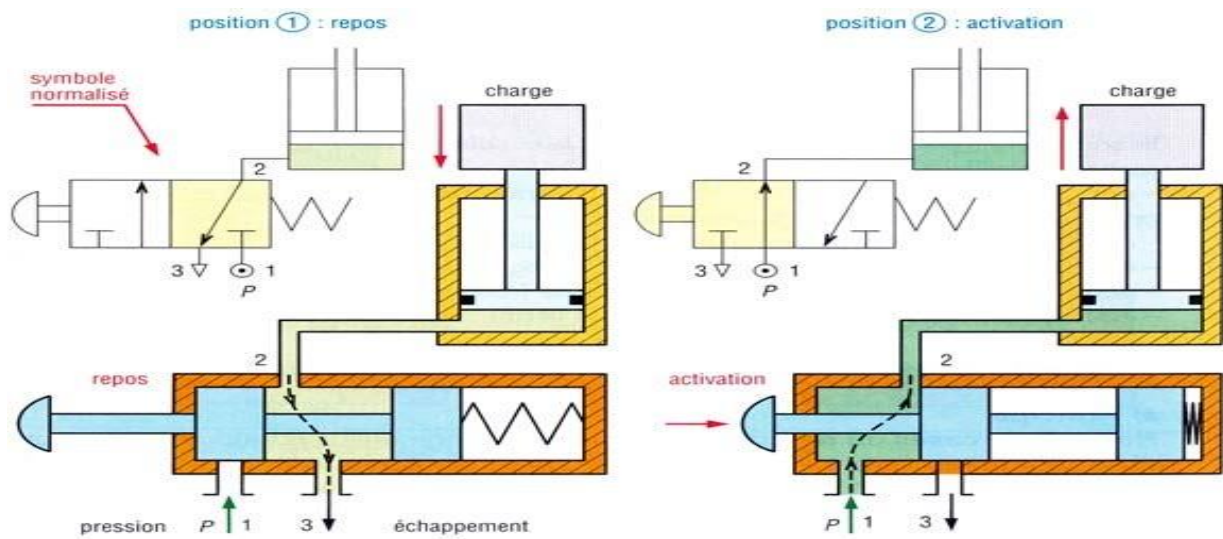


Figure I.12: Exemple de représentation et symbolisation des positions repos et activation (distributeur 3/2) [10]

➤ Désignation des distributeurs :

Il prend en compte le nombre de trous et le nombre d'emplacements. Exemple : vanne 5/2 indique un distributeur 5 orifices, 2 positions.

- **Distributeur normalement Fermée (NC) :** Lorsqu'il n'y a pas de circulation de fluide à travers le distributeur dans sa position de repos (ou initiale), le distributeur est dit normalement fermée.
- **Distributeur Normalement Ouvert (NO) :** C'est l'inverse du cas précédent ; au repos, le fluide circule dans le distributeur.
- **Distributeur monostable :** Un distributeur avec une seule position stable. Dans ce type de construction, des ressorts de rappel ramènent systématiquement le dispositif dans sa position initiale ou état de repos dès que le signal de commande ou d'activation est interrompu.
- **Distributeur bistable :** Admet deux positions stables ou d'équilibre. Pour passer de l'une à l'autre, des impulsions de commande sont nécessaires. Le positionnement est maintenu par adhésion ou aimantation. Leur fonctionnement peut être assimilé à une mémoire à deux états : 0 ou 1, oui ou non.
- **Centre fermé, pour 4/3 ou 5/3 :** En position neutre ou lorsque le centre fermé est au repos, le fluide ne peut pas circuler entre la chambre et la lumière d'échappement, bloquant la tige de soupape ou l'arbre moteur. il est intéressant de redémarrer sous charge (ex : charge suspendue, etc.).
- **Centre ouvert pour 4/3 ou 5/3 :** En position médiane, le centre ouvert permet au fluide de circuler librement. La purge de la chambre et le libre mouvement de la tige (libre rotation de l'arbre moteur) sont ainsi possibles. Ce cas est très intéressant, enlève l'effort développée et faites des réglages. Ces distributeurs ont également d'autres types de centres.

Principaux distributeurs et principaux dispositifs de pilotage		
symboles en pneumatique	symboles en hydraulique	symboles de pilotages
<p>2/2 N.F.</p>	<p>2/2 N.F.</p>	général bouton poussoir levier pédale
<p>2/2 N.O.</p>	<p>2/2 N.O.</p>	
<p>3/2 N.F.</p>	<p>3/2 N.F.</p>	poussoir ressort galet
<p>3/2 N.O.</p>	<p>3/2 N.O.</p>	
<p>4/2</p>	<p>4/3</p>	1 enroulement 2 enroulements inversés
<p>5/2</p>	<p>centre fermé</p> <p>centre ouvert en H</p> <p>centre tandem</p>	
<p>5/3</p>	<p>centre ouvert</p> <p>centre partiellement ouvert</p>	par détente électro-aimant + distributeur pilote électro-aimant ou distributeur pilote
<p>N.F. : normalement fermé N.O. : normalement ouvert</p>	<p>● 1 (air) ● P (huile)</p>	

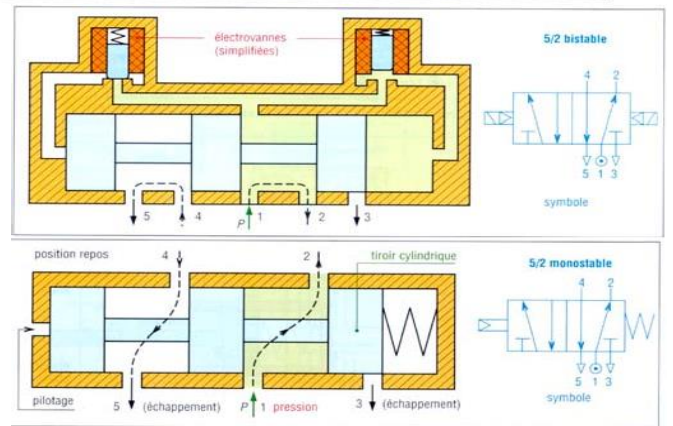
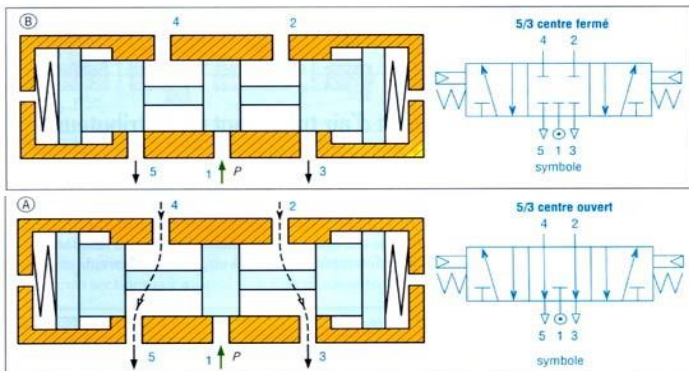


Figure I.13: Normalisation des principaux distributeurs et des dispositifs de pilotages correspondants

[10]

▪ Principe de repérage des orifices :

L'identification de l'orifice par numéro et des pilotages par numéro sont normalisés :

- Repère 1 pour l'orifice d'alimentation en air comprimé,
- Repères 2 et 4 pour les orifices d'utilisation,
- Repères 3 et 5 pour les orifices d'échappement,
- Repère 12 pour l'orifice de pilotage mettant la voie 1-2 en pression,
- Repère 14 pour l'orifice de pilotage mettant la voie 1-4 en pression,
- Repère 10 pour l'orifice de pilotage ne mettant aucune voie en pression.

➤ Symboles des commandes des distributeurs :

Le changement de position est contrôlé en déplaçant le tiroir ou des clapets, la partie mobile essentielle des distributeurs. Cette commande peut être simple ou double. Des commandes simples sont associées au rappel par ressort. Le pilote doit être indiqué pour chaque position du distributeur et apparaît dans le symbole.

➤ Choix d'un distributeur pneumatique :

▪ Choix de la fonction (nombre d'orifices) :

Ce choix dépend naturellement de l'actionneur à alimenter :

- 2/2 moteurs pour mouvement unidirectionnel, butées ou ventouses ;
- 3/2 pour vérins simple effet, ventouses ou purge circuit ;
- 4/2 ou 5/2 pour vérins double effet ou actionneurs double effet ;
- 5/3 pour moteurs pneumatiques ou vérins double effet.
- Les distributeurs 4/3 sont largement utilisés dans les systèmes hydrauliques.

Les distributeurs à 5 ports permettent un réglage indépendant de l'entrée et de la sortie de la tige, en ajustant la vitesse de la tige en agissant sur le débit d'air au niveau de l'orifice d'échappement.

▪ Choix de la position de repos

Cette sélection détermine le comportement de l'actionneur électrique lorsque l'énergie de commande est coupée.

Distributeur monostable :- 2/2, le circuit est coupé au repos (le canal est fermé dans les deux sens);

- 3/2, le circuit utilisateur est à l'échappement (purgé), donc s'il s'agit d'un vérin simple effet l'actionneur reviendra en position repos, s'il est de type différent l'actionneur est libre.

- 4/2, la coupure de la commande provoque l'inversion du mouvement de l'actionneur.

Par conséquent, en commande monostable, il faut prêter attention à l'impact d'une coupure de courant sur la sécurité du personnel et des équipements. De plus, des dispositions doivent être prises dans les commandes pour maintenir l'ordre lorsque cela est nécessaire, ce qui peut entraîner une consommation d'énergie importante, voire excessive.

Distributeur bistable (double pilote) : L'actionneur poursuit son action. La vanne bistable réalise la fonction de mémoire à travers la structure et n'a pas besoin de maintenir la séquence pilote, réduisant ainsi la consommation l'énergie, mais peut poser des problèmes de sécurité.

▪ Choix de la commande ou du pilotage :

Cette sélection concerne principalement trois familles :

Pilote pneumatique : Recommandé pour les environnements explosifs, humides ou corrosifs. Grâce à l'interface électropneumatique à distance et à l'armoire protégée, ce type de commande est possible même avec des composants de commande électriques.

Pilotage électropneumatique : Le mouvement du tiroir distributeur est assuré par l'air comprimé, mais celui-ci est réalisé par une mini-électrovanne à clapet. Ce type de commande est le plus répandu car il convient aux sections de commande électrique tout en garantissant une consommation électrique minimale.

Pilote électrique : Le déplacement du clapet du distributeur est directement assuré par l'électroaimant. Ces pilotes sont couramment utilisées dans les mini-vérins, les ventouses et les interfaces électropneumatiques.

S'il est encore possible de choisir entre les trois technologies, il est recommandé de vérifier les temps de commutation lorsque cette caractéristique est importante.

Il existe d'autres types de commande : pilotage manuel ou pilotage mécanique.

1.9.2. Electrovanne :

Une électrovanne est un relais d'interface utilisé pour convertir un signal d'entrée électrique en un signal de sortie pneumatique. Ils sont généralement compacts, avec la bobine montée directement sur le corps de la vanne. Un noyau mobile coulisse dans le tube autour de la bobine. Cela produit une vanne compacte et entièrement étanche.

➤ Principe de fonctionnement :

Les électrovannes se composent de deux parties de base :

1. Tête électromagnétique (électroaimant) et son noyau de fer mobile (piston).
2. Une vanne dont l'orifice est obturée par un clapet ou un pointeau.

L'ouverture et la fermeture de la vanne dépendent de la position du noyau de fer mobile se déplaçant sous l'action du champ magnétique généré par l'excitation de la bobine.

Dans l'électrovanne à action directe, le noyau du piston est relié mécaniquement au tiroir à clapet, et le tiroir à clapet ouvre ou ferme l'orifice de la vanne selon que la bobine est alimentée ou non.

Le fonctionnement ne dépend ni du débit ni de la pression, que celle-ci soit nulle ou atteigne le maximum admissible.

1.10. Auxiliaire pneumatique :

1.10.1. Bloqueur : C'est un distributeur monostable 2/2. Le vérin s'arrête en raison d'un blocage brutal de la circulation de l'air pendant le mouvement. Ce type d'arrêt peut convenir pour :

- Un positionnement fonctionnel le long de la course du vérin.
- Assurez la sécurité du vérin lors du déplacement vertical d'objets lourds.
- Pour être efficace, il doit être le plus près possible du vérin, voire vissé sur l'échappement de ce vérin.

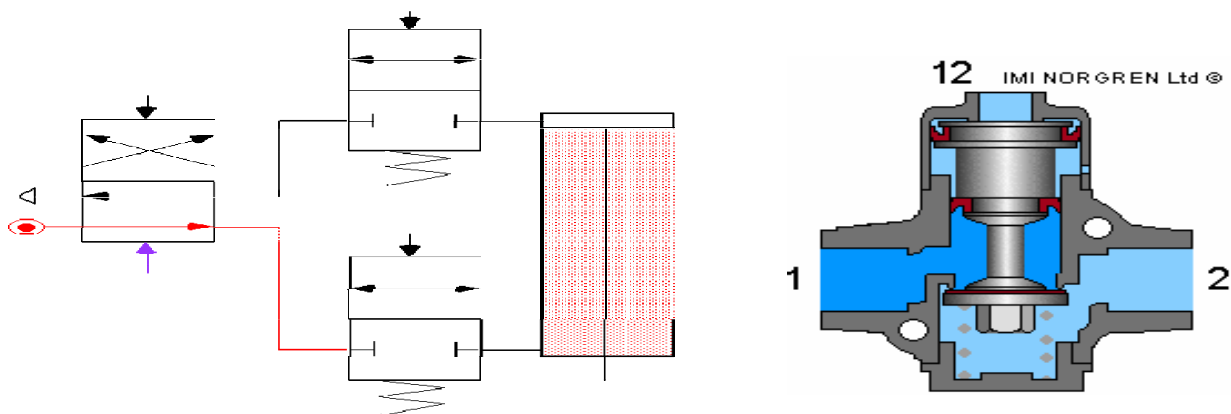
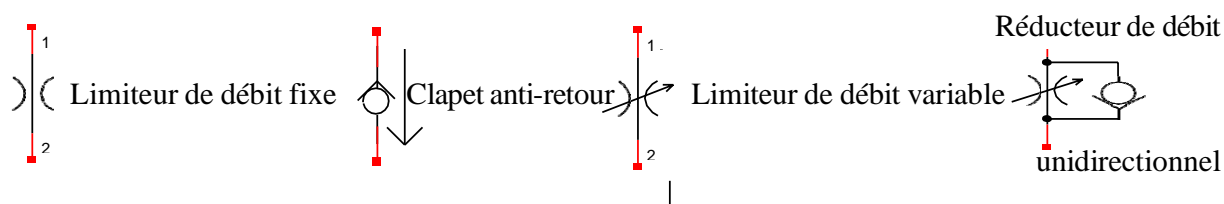


Figure I.14: Bloqueur

Remarque : Le bloquer est monostable, le vérin est au repos, toutes les pièces doivent être évacuées, sauf pour les procédures de sécurité.

1.10.2. Le réducteur de débit :

Il se compose de 2 éléments : clapet anti-retour et limiteur de débit.



L'élément de retour bloque le flux d'air dans une direction de sorte que le flux d'air puisse circuler dans cette direction à travers l'étranglement réglable. Le flux d'air provenant de la direction opposée soulève le joint de la pièce de retour de son siège. Par conséquent, l'air comprimé peut circuler presque librement dans cette direction. La soupape doit être installée le plus près possible du vérin.

1.11. Actionneur pneumatique :

Les actionneurs pneumatiques convertissent l'énergie de puissance pneumatique en énergie mécanique de translation, de rotation ou d'aspiration. Leurs principales caractéristiques sont : la course, la force et vitesse. Les actionneurs pneumatiques comprennent principalement des vérins, des moteurs et des ventouses comme suit :

1.11.1. Les vérins :

Ils convertissent l'énergie d'un fluide sous pression en énergie mécanique (mouvement avec effort). Ils peuvent soulever, pousser, tirer, presser, tourner, bloquer, frapper et plus encore.

Leur classification tient compte de la nature du fluide, pneumatique ou hydraulique, et du mode d'action de la tige : simple effet (l'air comprimé n'entre que d'un côté du piston), double effet (l'air comprimé entre des deux côtés du piston)...

Les vérins utilisent de l'air comprimé, typiquement 2 à 10 bars. Ils sont très nombreux dans les systèmes d'automatisation industrielle en raison de leur simplicité de mise en œuvre.

Remarque: Un grand nombre de fonctions supplémentaires peuvent y être intégrées : amortissement de fin de course, capteurs de position, dispositifs de fin de course, dispositifs de détection, distributeurs, guidage, etc.

A) Vérins simple effet (VSE) :

L'ensemble tige de piston se déplace dans un seul sens sous l'action d'un fluide sous pression. Le retour se fait par d'autres moyens que l'air comprimé : ressorts, charges. Lors du retour, l'orifice d'admission de l'air comprimé est mis à l'échappement.

- **Principes de réalisation et symboles normalisés :**

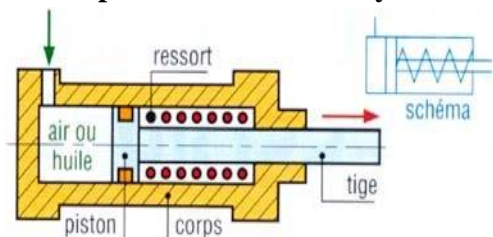


Figure I.15: Vérin simple effet classique, rappel par ressort [10]

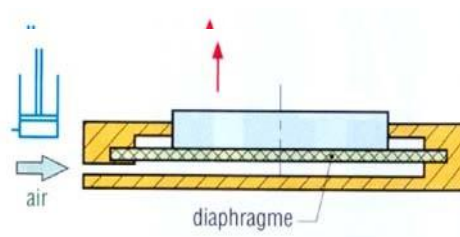


Figure I.16: Vérin simple effet plat à diaphragme [10]

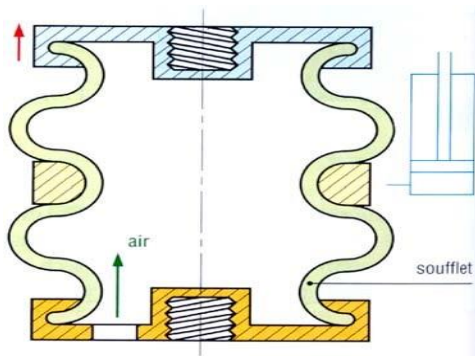


Figure I.17: Vérin simple effet à soufflet [10]

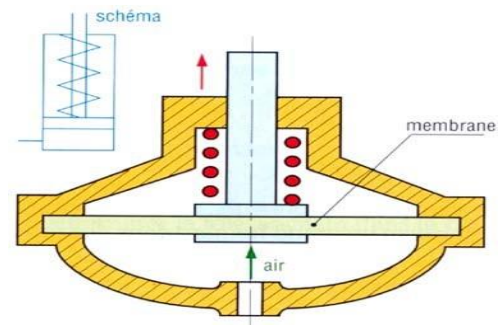


Figure I.18: Vérin simple effet à membrane, rappel par ressort [10]

- **Avantages** : Les vérins simple effet sont économiques, avec une consommation de fluide réduite.
- **Inconvénients** : Même course, plus long que les vérins double effet ; la vitesse de la tige est difficilement réglable en pneumatique et offre une course limitée (jusqu'à 100 mm).
- **Utilisations** : Opérations simples (serrage, éjection, levage, assemblage, etc.)

B) Vérins Doubles effet (VDE) :

L'ensemble tige de piston peut se déplacer dans les deux sens sous l'action d'un fluide sous pression (air comprimé). La force de poussée (sortie de la tige) est légèrement supérieure à la force de traction (entrée de la tige) car la pression n'agit pas sur la partie de la surface occupée par la tige.

- **Principe de réalisation** :

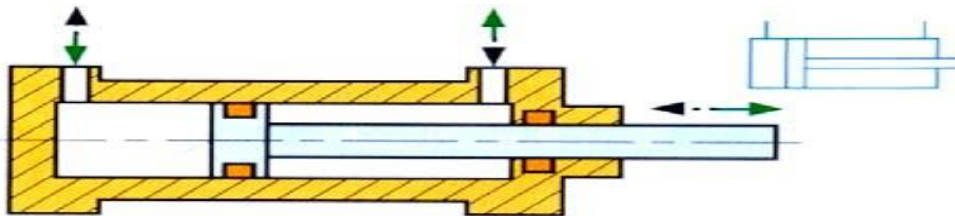


Figure I.19: Vérin double effet [10]

- **Avantages** : plus grande souplesse d'utilisation ; réglage plus facile de la vitesse en maîtrisant le débit d'échappement ; amortissement de fin de course, réglable ou non, dans un ou deux sens. Ils offrent de nombreuses réalisations et options.
- **Inconvénients** : Ils sont plus chers.
- **Utilisations** : Ce sont les vérins les plus utilisés dans l'industrie et ils ont un grand nombre d'applications.
- **Amortissement de fin de course** : Cet amortissement est indispensable à haute vitesse ou cadence et sous fortes charges.

Lorsque l'énergie à amortir est modérée, un bloc élastomère est suffisant, pour des énergies plus élevées un tampon amortisseur est préconisé. Une fois que le tampon est dans son alésage, le fluide d'échappement est forcé à travers le plus petit orifice B au lieu de l'orifice A. La réduction du débit provoque une surpression qui crée un amortissement.

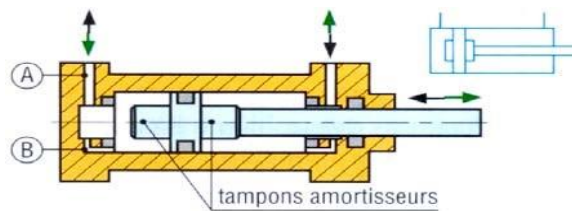


Figure I.20: Vérin double effet à amortissement non réglable [10]

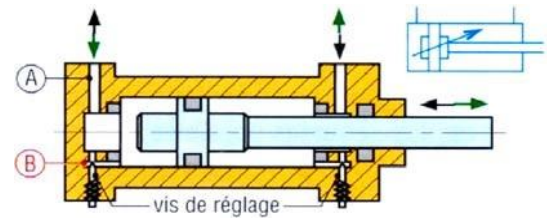


Figure I.21: Vérin double effet à amortissement réglable [10]

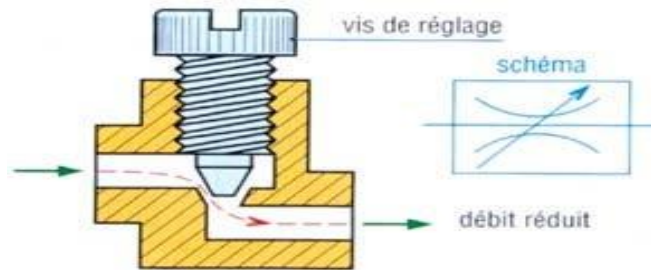


Figure I.22: Principe du réglage de débit [5]

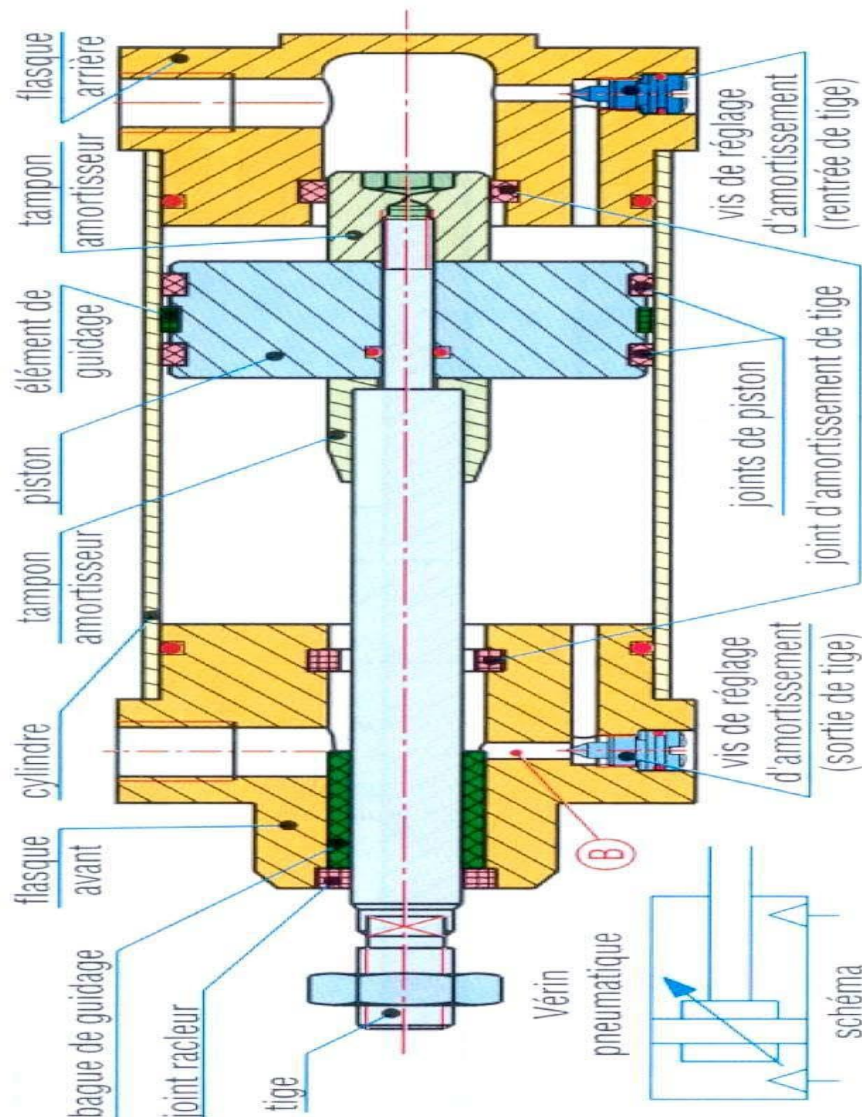


Figure I.23: Constitution d'un vérin pneumatique double effet à amortissement réglable des deux côtés. [10]

C) Principaux vérins spéciaux :

Ce sont des variantes du cas précédent et offrent les mêmes options possibles : amortissement, etc.

➤ **Vérin à tige télescopique** : Simple effet et généralement hydraulique, permettant une course importante tout en conservant une longueur pliée raisonnable.

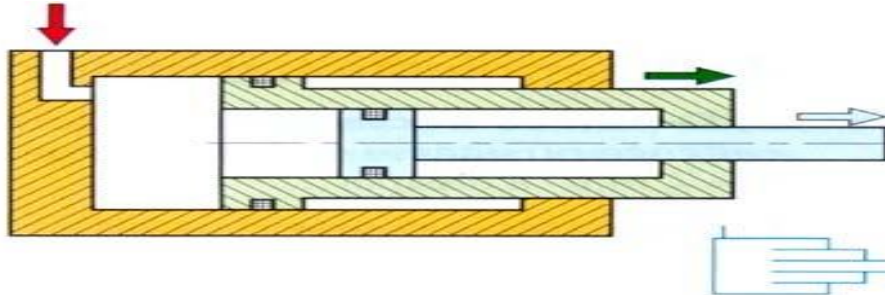


Figure I.24: Vérin simple effet à tige télescopique [10]

➤ **Vérin rotatif** : convertit l'énergie d'un fluide en mouvement rotatif ; par exemple, un vérin à double effet qui entraîne un système à pignon-crémaillère. L'angle de rotation peut varier de 90 à 360°.

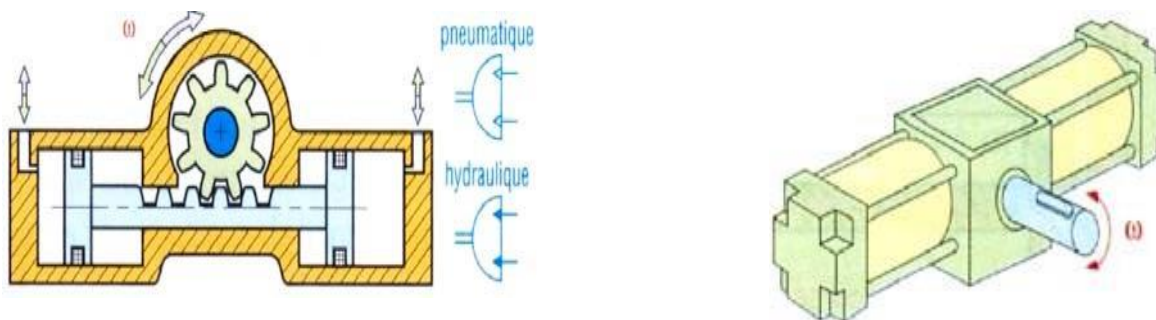


Figure I.25: Un amortissement est possible. Figure I.26: Exemple de réalisation d'un vérin rotatif (unité de couple) [10]

➤ **Multiplicateur de pression** : Typiquement utilisé en oléopneumatique, il permet un débit d'huile à pression plus élevée (P en Y : 10 à 20 fois supérieure à p) à partir de la pression d'air (p en X). Cela permet d'alimenter des vérins hydrauliques avec des vitesses de tige plus précises.

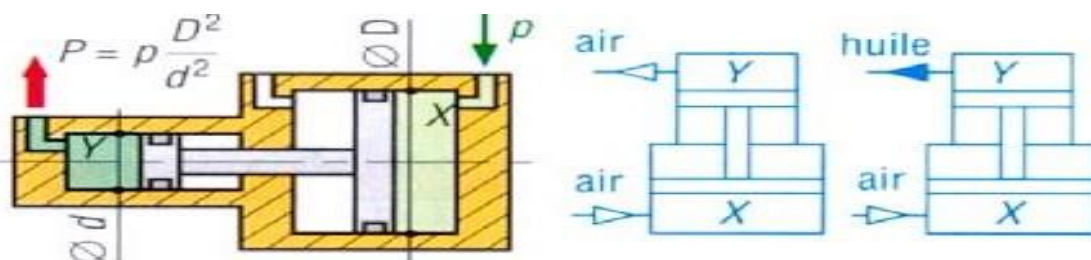


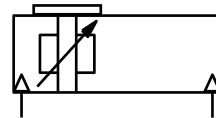
Figure I.27: Multiplicateur de pression [10]

➤ **Vérin sans tige** : il s'agit d'un vérin pneumatique à double effet. C'est deux fois le volume des vérins à tige conventionnels et l'espace d'installation est divisé par deux.



Figure I.28: Exemple d'un vérin double effet sans tige avec amortissement des deux côtés [5]

- **Symbole :**



- **Propriétés :**

Rotation sans tige ; la vitesse de déplacement peut être élevée (3 m/s ou plus) ; la course peut être très importante (7 m ou plus) ; aucun problème associé au flambage de la tige ; forces dans les deux sens et même vitesse, mais étanchéité plus fragile. De nombreuses variantes et combinaisons sont possibles : assemblages croisés...

- **Vérin double tige :**

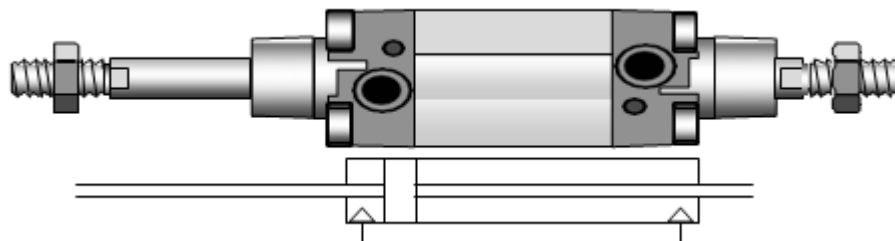


Figure I.29: Exemple et symbole d'un vérin double tige [5]

1.11.2. Les moteurs :

Il existe plusieurs façons de créer un mouvement rotatif continu à l'aide d'un débit d'air comprimé.

Les plus courants sont les moteurs à palettes couramment utilisés dans les outils pneumatiques (visseuses, meuleuses, perceuses, clés à chocs, etc.).

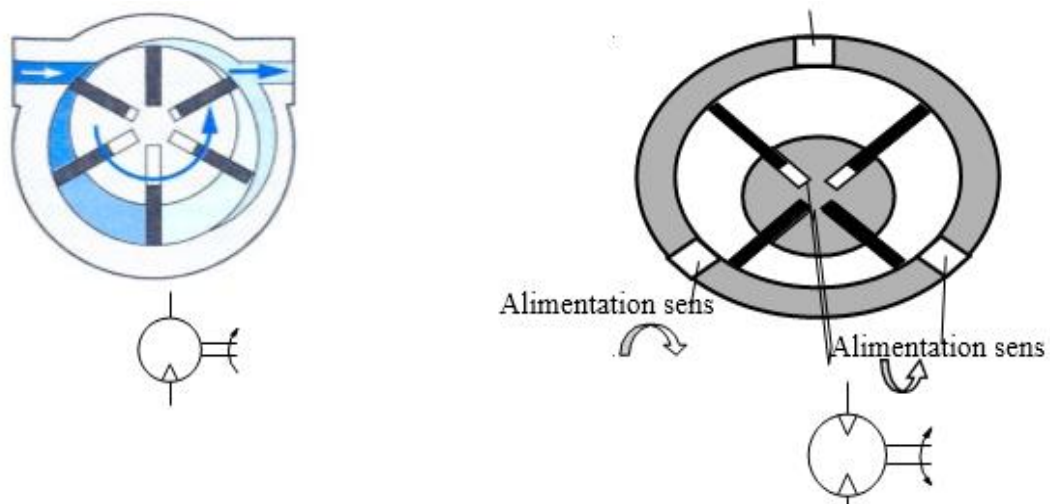


Figure I.30: Principes de fonctionnement et schémas :

moteur à palettes un sens de rotation [5]

et

moteur à palettes deux sens de rotation [5]

Il existe d'autres types de moteurs pneumatiques sur le marché :

- Moteurs pneumatiques à pistons radiaux (voir ci-dessous);
- Moteur pneumatique à piston coulissant;
- Motoréducteur pneumatique;
- Moteur à turbine à air.

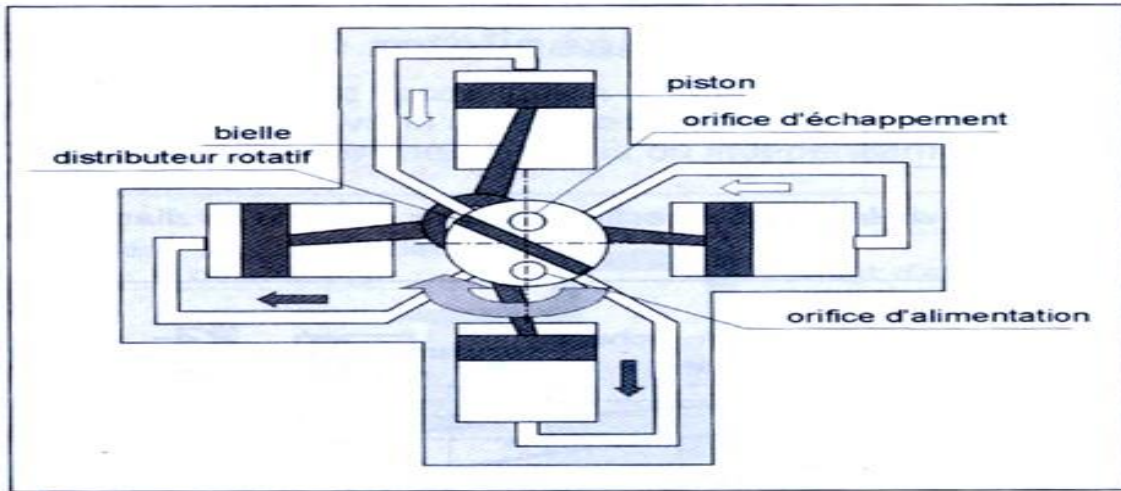
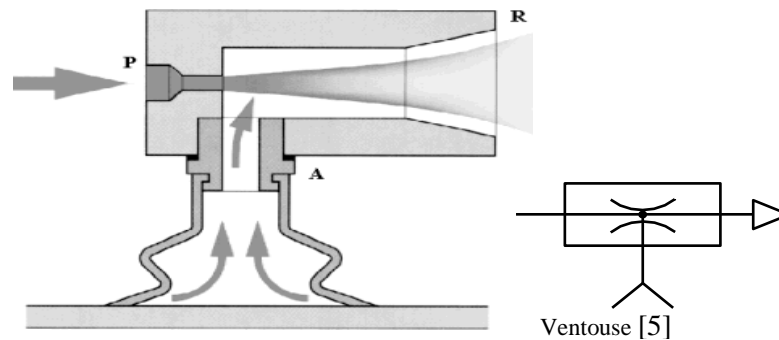


Figure I.31: Principe d'un moteur pneumatique à pistons en étoile [24].

1.11.3. Venteuse, effet venturi :



L'air traversant des canaux rétrécis augmente la vitesse de l'air et réduit sa pression ($p_2 < p_1$). Une dépression est alors créée afin que de l'air ou du fluide puisse être aspiré de la ventouse. Ce phénomène s'appelle l'effet Venturi.

La ventouse produit une force $F = Pr \cdot S$, où S : la surface en contact avec la pièce à serrer et soumise au vide, et Pr : la pression relative ($Pr = Patm - Pi$, Pi est la pression interne = le "vide" créé)

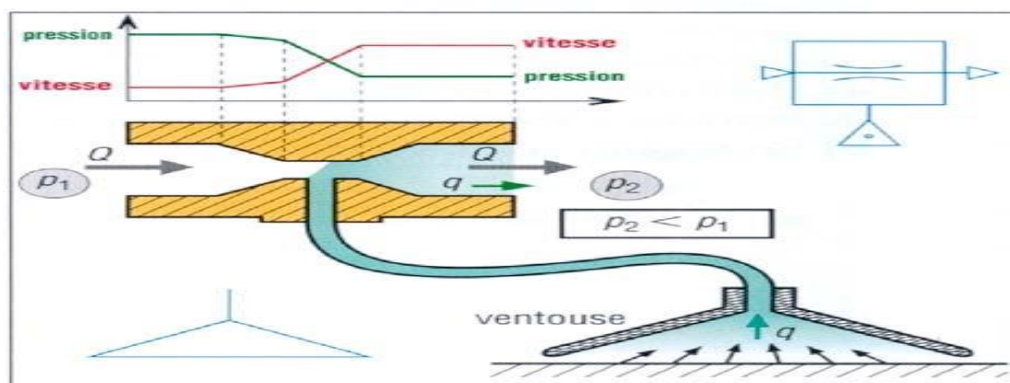


Figure I.32: Venturi associé à une ventouse [10]

Les ventouses entraînées par des buses à effet Venturi sont une source de forte consommation d'air comprimé et de bruit pendant le fonctionnement normal et doivent être évaluées avant de sélectionner un tel actionneur. Si un grand nombre de ventouses sont utilisées, il est préférable d'utiliser une pompe à vide mécanique (par exemple à palettes) pour générer la basse pression.

1.12. Repérage des composants des chaînes fonctionnelles :

La réalisation et l'exploitation de schémas nécessitent l'identification et le repérage des composants.

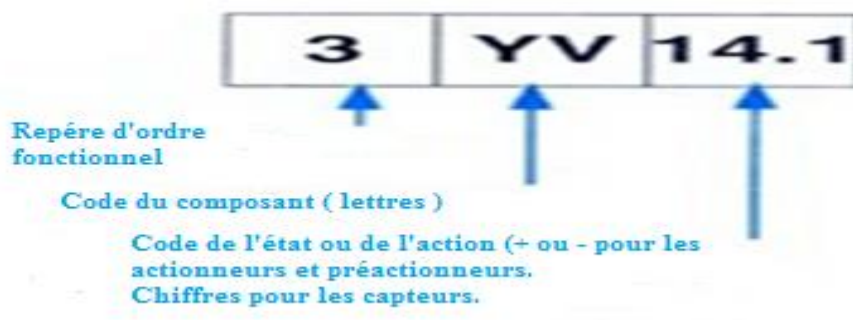


Figure I.33: Repérage à trois blocs [2]

- **Principe :** la norme E 04-157 préconise un codage en trois parties :
 - un repère d'ordre de fonction (par exemple un numéro de chaîne de fonction) pouvant contenir plusieurs caractères ;
 - un code du composant (voir tableau ci-dessous) :
 - un code d'état ou d'action (pour les pré-actionneurs, un chiffre 0 est affecté au pilotage qui donnera la mise en position initiale ; pour les capteurs associés aux actionneurs, le chiffre 0 pour le capteur actionné à l'état initial du cycle, les chiffres 1, 2, 3, ... pour le capteur actionné dans l'ordre du cycle ; pour les composants auxiliaires, le repère de l'orifice de liaison).

Code	Type de matériel	Exemple
A	Accumulateurs	
B	Multiplicateurs et échangeurs de pression	
C	Vérins	Vérin
D	Distributeurs	Distributeur
F	Appareils de conditionnement	Filtre
G	Appareil de mesurage	Manomètre
M	Moteurs	
N	Clapets antiretour	
P	Pompes et compresseurs	
Q	Appareils de réglage du débit	Réducteur de Débit
R	Appareils de réglage de la Pression	
S	Détecteurs mécaniques	Bouton
T	Réservoirs	
U	Organes de ligne et de raccordement	Silencieux Raccord
YV	Commande électrique	Électrovanne

Tableau I.2: Type de matériel.

1.13. Conclusion :

L'air comprimé est une source d'énergie essentielle pour la plupart des industries, qui cherche à améliorer leurs gains de production et qui utilisent des équipements pneumatiques de plus en plus pointus.

Ce chapitre est une présentation générale du circuit pneumatique et différents composants pneumatique de la structure d'une chaîne pneumatique.

Chapitre 2:

Généralité sur la production de l'air
comprimé.

2.1. Introduction :

L'air comprimé est connu pour être l'une des plus anciennes formes d'énergie utilisée par l'être humain reconstituer la force physique. L'un des premiers à utiliser la pneumatique à notre connaissance comme fluide de travail est le grec BIOS KTESI. Il y a plus de 2 000 ans, il a construit une catapulte à air comprimé. L'un des premiers livres décrivant l'utilisation de l'air comprimé comme source d'énergie.

Le terme « Pneuma » vient du grec ancien [32], et signifie vent, souffle et corps philosophie, âme. " Pneumatique " est un dérivé du mot " Pneuma " : c'est une science qui étudie l'aérodynamique et les phénomènes qui en découlent. Aujourd'hui, aucune usine moderne ne serait possible sans air comprimé. Les équipements à air comprimé ont désormais leur place dans toutes les branches d'activité industrielle.

2.2. L'air atmosphérique :

L'air est un mélange gazeux incolore, inodore et sans goût. C'est un mélange de plusieurs gaz, principalement composé d'oxygène (21%) et d'azote (78%). Cette composition est relativement constante du niveau de la mer jusqu'à 25 km d'altitude. L'air n'est pas une substance chimique pure, mais un mélange. C'est pourquoi il peut être séparé en ses éléments constitutifs, par exemple par liquéfaction.

L'air atmosphérique est toujours plus ou moins contaminé avec des particules solides, par exemple, poussière, sable, cristaux de suie et de sel. Le degré de contamination est plus élevé dans les zones peuplées et plus bas dans les campagnes et à des altitudes plus élevées [28].

Composants	Concentration molaire	Masse molaire kg/kmol
Azote	0.7809	28.0134
Oxygène	0.2095	31.9988
Argon	0.0093	39.9480
Autres gaz	0.0030	/

Tableau II.1: Composition molaire de l'air.

Quelques caractéristiques physiques de l'air sec

1 m³ à 0° C (273° K) et à la pression de 101300 Pascal (1,013 bar) possède une masse de 1, 293 kg.

Une masse d'air de 1 kg occupe dans ces conditions 0,774 m³. L'air se liquéfie à – 192°C

2.3. L'air pneumatique :

L'air comprimé est le fluide de base utilisé dans les circuits pneumatiques. Il se compose d'air atmosphérique sous une pression supérieure à la pression atmosphérique, appelée pression relative ou pression manométrique. L'air pneumatique doit être aussi sec que possible et exempt de tout agent agressif et polluant. L'air comprimé crée de l'eau « condensation », surtout à basse température. De plus, l'air doit être propre, c'est-à-dire filtré. La pression d'air comprimé pour les applications pneumatiques jusqu'à 10 bar (145 psi) et sont généralement entre 6 et 8 bars (87 et 116 psi). L'air doit être sec, non humide. Pour cela, un séparateur d'eau ou sécheur est installé pour répartir l'air dans le réseau. L'air peut être utilisé sec ou lubrifié. Certains équipements, tels que l'équipement d'instrumentation, de

l'air sec est nécessaire. D'autres, comme les cylindres, distributeurs, régulateurs et autres équipements courants sont alimentés avec de l'air lubrifié.

Cet air sert à deux fins : empêche l'oxydation causé par l'humidité dans l'air et lubrifie les composants Pneumatique mobile.

2.4. Définition de l'air comprimé :

L'air comprimé est de l'air prélevé dans l'atmosphère et amené mécaniquement de la pression atmosphérique à une pression supérieure à l'aide d'un système pneumatique. L'air comprimé est considéré comme le quatrième fluide utilisé dans l'industrie, après l'électricité, le gaz naturel et l'eau. C'est une source d'énergie intéressante qui est utilisée dans de nombreux domaines. L'air comprimé est propre, simple et efficace. Lors de la compression de l'air, il n'y a aucun risque de fuite de gaz dangereux ou d'autres substances nocives. C'est une source d'énergie qui ne brûle ni ne pollue. Lorsque l'air est comprimé, la concentration d'humidité et de polluants augmente.

Si ce mélange corrosif est toléré dans le système, il a cependant un effet néfaste sur l'équipement pneumatique : temps d'arrêt de production, détérioration de la machine et réduction de la durée de vie des équipements [3].

2.5. But de la compression :

La compression peut souvent être imposée par la nécessité technique de déplacer une certaine quantité de gaz d'un système à une certaine pression vers un autre système à une autre pression plus élevée. Cette action vise à :

- Faire circuler un gaz dans un circuit fermé.
- Produire des conditions favorables (de pression) pour des réactions chimiques.
- Envoyer un gaz dans un pipe-line de la zone de production vers l'utilisateur.
- Obtenir de l'air comprimé pour la combustion.

2.6. Utilisation de l'air comprimé :

L'air peut être utilisé comme une source d'énergie dans des circuits de commande complexe ou comme source d'énergie de puissance pour actionner des vérins ou des moteurs tournants.

Les applications de l'air comprimé sont très diverses, on donne quelques exemples d'utilisation de ces machines :

- Circuits de commande pneumatiques et automatisés.

Pour les robots automatisés, l'industrie textile, les industries agroalimentaires, emballage, et l'impression, etc.

- Outils pneumatiques

Utilisé dans les chaînes de montage, la fabrication de métaux, les industries du bois/PVC/aluminium et les applications médicales.

- air de processus

Pour nettoyage industriel, sablage, microbillage, cryogénique (CO₂), humidification par atomisation.

- Transport pneumatique

Utilisé en cimenterie, industrie céréalière [25].

2.7. Avantages et inconvénients de l'air comprimé :

Avantages.	Inconvénients.
<ul style="list-style-type: none"> - Fluide ambiant donc gratuit. - Disponible partout en quantité illimitée. - Anti déflagrant. - Echappement à l'air libre, utilisation très souple. - Facile à transporter, à stocker. - Facilité de détection. - Insensible à la température. - Compressibilité. - Une bonne fiabilité des appareils. - Capable d'absorber une grande quantité d'énergie. - Il se déplace à une grande vitesse (10 fois plus vite qu'un fluide hydraulique). - Sa pression et son volume peuvent varier par réfrigération ou apport de chaleur. - Eliminer les lignes de retour dans les circuits, car l'air est rejeté dans l'atmosphère immédiatement après son utilisation. 	<ul style="list-style-type: none"> - Difficultés d'étanchéité d'où fuites. - Énergie faiblement concentrée. - Régulation est difficile en raison de la compressibilité de l'air et des forces d'inertie des organes en mouvement. - Obtenu à partir de l'air ambiant, l'air comprimé doit être purifié et séché pour éviter l'usure des équipements. - Pression limitée : de 0 à 10 bars. - Les échappements d'air sont bruyants et imposent l'installation de silencieux. - La production et le traitement restent d'un coût assez élevé. - Les systèmes pneumatiques exigent de l'entretien. - Pour un même effort à réaliser, les éléments pneumatiques nécessitent 10 à 30 fois plus de volume que les éléments hydrauliques.

Tableau II.2:Avantages et inconvénients de l'air comprimé.

2.8. Définition compresseur :

Un compresseur est une machine dont la fonction est d'augmenter la pression d'un fluide par sa compressibilité.

Son nom traduit le fait que le fluide se comprime « son volume diminue » au fur et à mesure de l'augmentation de pression. Les gaz étant des fluides compressibles nécessitent des compresseurs, alors que les liquides pratiquement incompressibles, nécessitent des pompes [5].

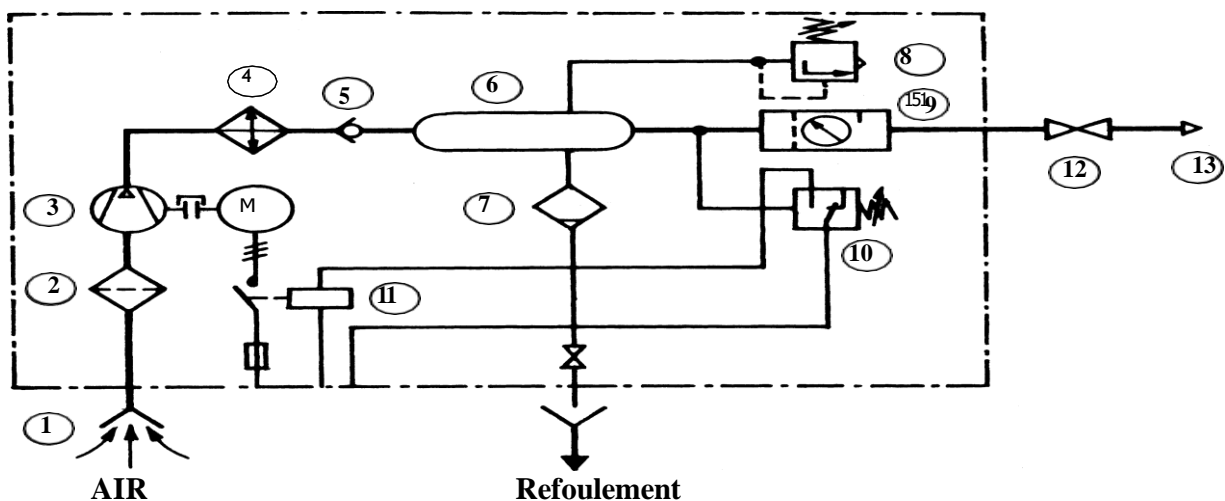


Figure II.1: Schéma d'un compresseur. [23]

La figure II.1 représente un équipement compresseur d'air, qui se compose généralement des éléments suivants :

1. Point de prise d'air.
2. Filtration de l'air aspiré.
3. Groupe moto-compresseur.
4. Équipement réfrigérant.
5. Clapet anti-retour.
6. Récipient accumulateur d'air.
7. Purgeur manuel ou automatique destiné à évacuer l'air condensé.
8. Vanne de sécurité régulatrice de pression.
9. Matériel de filtration, manomètre indicateur de pression, lubrificateur.
10. Pressostat (pression maximale et minimale). Lorsque le pressostat détecte une pression minimale, le moteur se met en marche et enclenche en même temps le compresseur. Lorsque la pression maximale est atteinte, le moteur s'arrête.
11. Vanne d'isolement.
- 12 et 13. Tuyauterie vers l'utilisation. L'air comprimé qui se dirige vers l'utilisation aura le degré d'humidité que peuvent supporter les appareils dans l'utilisation. On obtiendra ainsi :
 - soit un air normal, avec un degré d'humidité acceptable,
 - soit un air chargé, le plus courant,
 - soit un air frais, utilisé pour l'instrumentation.

2.9. Types des compresseurs :

Un compresseur ou une pompe à air est une machine qui réduit le volume d'une certaine quantité d'air par des moyens mécaniques pour augmenter la pression. L'air comprimé a une énergie potentielle élevée. Lorsque la pression externe est supprimée, l'air se dilate rapidement. Le marché le plus important pour les compresseurs est sa puissance qui varie de (10 à 300 kW) est dominée par les compresseurs à vis lubrifiées (75 % des ventes), car ils sont robustes, leur simplicité et leurs coûts d'investissement peu élevé. Il existe cependant, un nombre important d'autres technologies : à piston, à palettes, à spirales, à centrifuge, etc. Pour exercer la même fonction sur un liquide, quasi incompressible, on utilise une pompe [1].

Il existe généralement deux grandes familles de compresseurs, les compresseurs volumétriques et les compresseurs dynamiques. Tout d'abord, la montée en pression est obtenue par réduction d'un volume de gaz par action mécanique. Dans ce dernier, la pression est augmentée par la conversion continue de l'énergie cinétique transmise au gaz en énergie de pression due à l'écoulement autour des aubes de la roue.

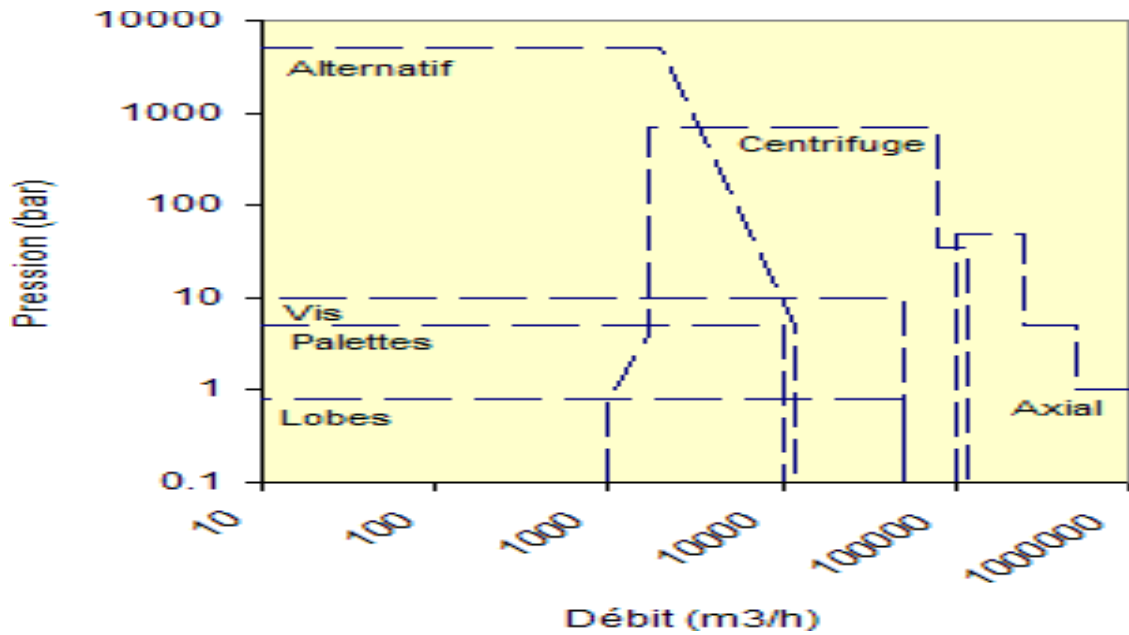


Figure II.2 : Evolution du débit en fonction de la pression pour les différents types de compresseurs [30].

La classification des compresseurs est présentée par le diagramme ci-dessous :

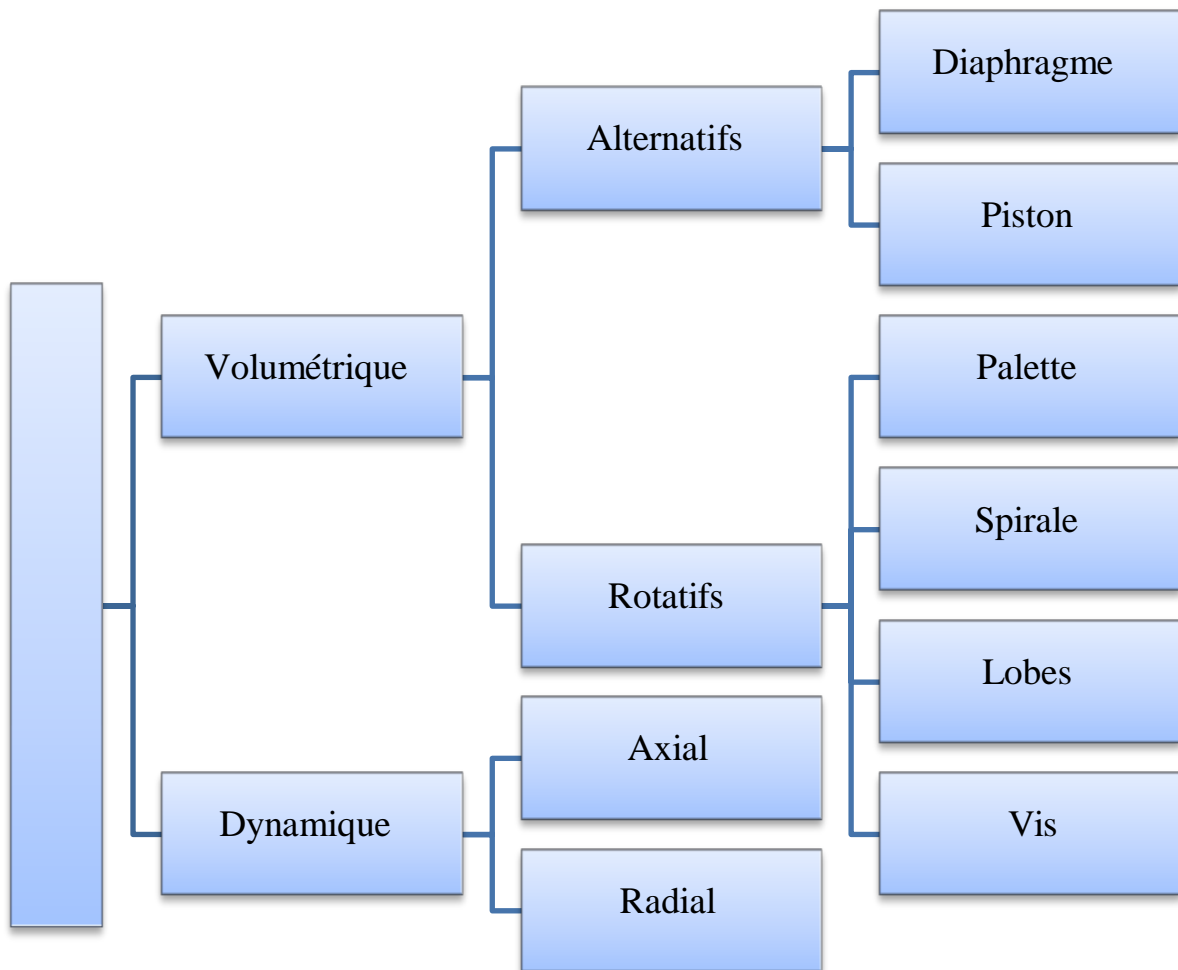


Figure II.3 : Diagramme de classification de compresseur [26].

2.9.1. Compresseurs dynamiques :

Les compresseurs dynamiques sont généralement des machines de forte puissance soumises à des vitesses de rotation élevées dont le fonctionnement est absolument critique pour l'unité dans laquelle ils sont installés.

La performance d'un compresseur dynamique est affectée par les conditions extérieures, par exemple, un changement dans la température d'entrée résulte dans un changement de capacité [6].

Ce sont des machines dont l'échange d'énergie à lieu entre un rotor muni d'aubages tournant autour d'un axe et un fluide en écoulement continu, ce écoulement peut être axial ou radial et pour cela il comprends deux types de compresseurs[9] :

- Compresseur axial.
- Compresseur radial.

A) Compresseur axial :

Les compresseurs axiaux (figure II.3) sont des turbomachines dans lesquelles l'air s'écoule dans un plan axial, alternant à travers un certain nombre d'étages rotatifs. La compression s'effectue en un certain nombre d'étages, placés en série. Chaque étage est constitué d'une couronne d'aubes de rotor (rotor) et d'une couronne d'aubes de stator (stator). Les aubes de rotor sont fixées sur le tambour, et les aubes de stator sont intégrées au carter.

Le travail fourni par la turbine sous forme d'énergie mécanique transmise à l'aube du compresseur est transformé en énergie cinétique du gaz à comprimer grâce à la rotation des aubes; celle-ci est à son tour transforme en énergie de pression dans le diffuseur [9].

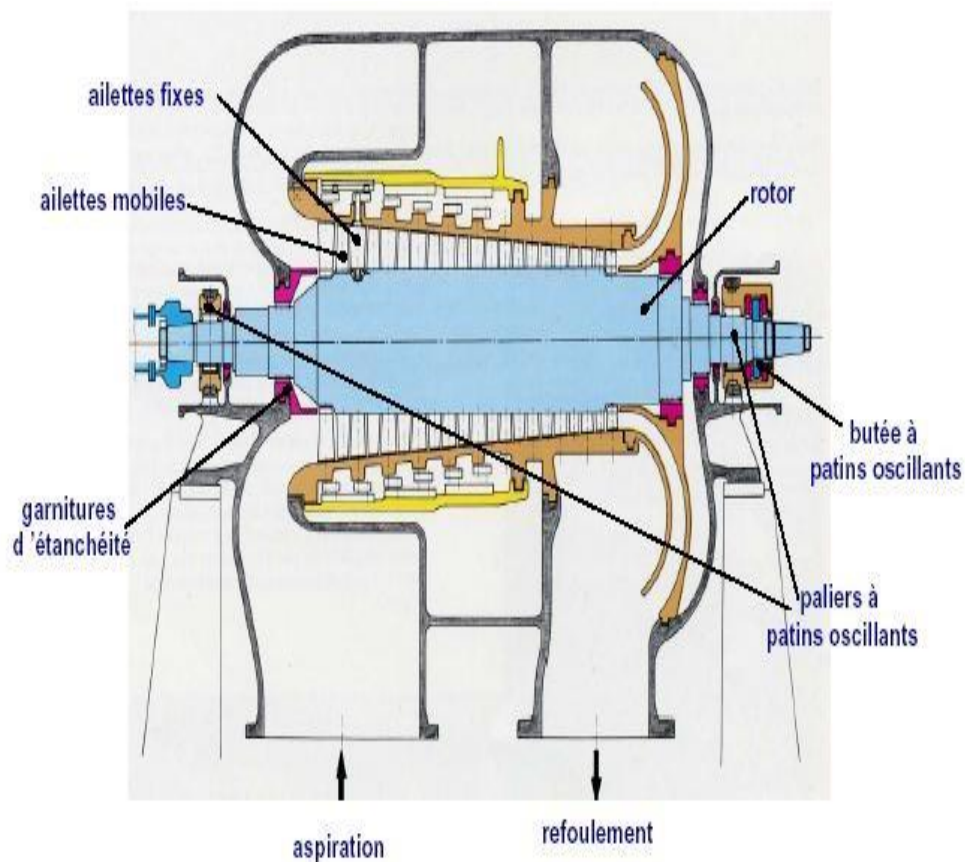


Figure II.4: Le compresseur axial.

B) Compresseur centrifuge (radial) :

Les compresseurs centrifuges (figure II.4) sont des turbines dans lesquelles l'air circule principalement radialement. L'air inhalé est éjecté à la périphérie sous l'action de la force centrifuge. La montée en pression est obtenue en faisant passer de l'air accéléré à travers le diffuseur (stator) avant qu'il atteigne la pale suivante. L'énergie cinétique (énergie produite par la vitesse) se transforme en pression statique [9].

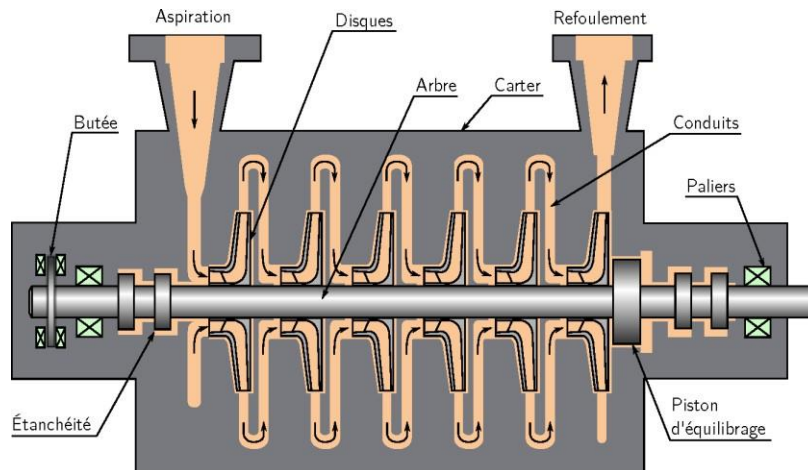


Figure II.5: Le compresseur centrifuge (radial) [13].

2.9.2. Compresseurs volumétriques :

Le principe général des compresseurs volumétriques est la variation de volume de la cavité entre l'entrée et la sortie de la machine. Dans cette machine, la montée en pression est réalisée par l'introduction continue d'un volume de gaz dans une enceinte fermée et refoulée par un équipement mobile.

Ces unités à moteur peuvent gagner de la pression à partir de l'accélération initiale du moteur, gagner un couple important à basse vitesse, mais tirer une puissance importante à haute vitesse par rapport à un débit d'air limité.

On distingue dans cette classe les compresseurs suivants [9]:

- les compresseurs alternatifs: Diaphragme, piston.
- les compresseurs rotatifs : Vis, lobe (Root), spirale, palette.

A) Compresseurs alternatifs :

Les compresseurs alternatifs sont les compresseurs volumétriques les plus courants. Les petits compresseurs fournissent un débit d'air modéré dans les garages, les usines de fabrication, les ateliers, les réservoirs sous pression et sont utilisés pour contrôler les équipements de mesure et les outils pneumatiques.

Les gros compresseurs sont utilisés pour alimenter les systèmes pneumatiques des usines industrielles, faire fonctionner l'équipement et les machines, agir comme souffleurs de suie dans les chaudières et alimenter certains appareils de mesure. On utilise également les compresseurs alternatifs pour comprimer des gaz comme le gaz carbonique, l'hydrogène, l'azote, et les réfrigérant. [33].

➤ **Compresseur à piston :**

Dans un compresseur à piston (figure II 5), un piston effectue un mouvement alternatif dans un cylindre. Ce mouvement est produit par un système bielle-manivelle. Dans la course allée d'expansion et d'aspiration, le piston aspire le fluide avec une certaine pression, puis

comprime le fluide dans la course de retour, c'est-à-dire la décharge et la compression. A cet effet, le piston comporte une entrée et une sortie avec clapet anti-retour. La soupape d'admission ne peut faire passer le fluide que dans la chambre du piston. A l'inverse, une soupape d'échappement ne laisse passer que du fluide dans le circuit extérieur. De plus, la soupape d'échappement a une certaine résistance et ne s'ouvrira que lorsque la pression dans la chambre du cylindre atteindra une valeur suffisante. Nous pouvons voir cela en action de plus près dans les quatre étapes suivantes :

- **La première étape :**

Le piston est au point mort bas, le point le plus bas du cycle de compression. Lors de la descente du piston, le clapet d'aspiration s'ouvre lorsque la pression dans la chambre de compression est inférieure à la pression du circuit extérieur côté aspiration. Cela permet le remplissage de la chambre de compression (Fig. II.5) :

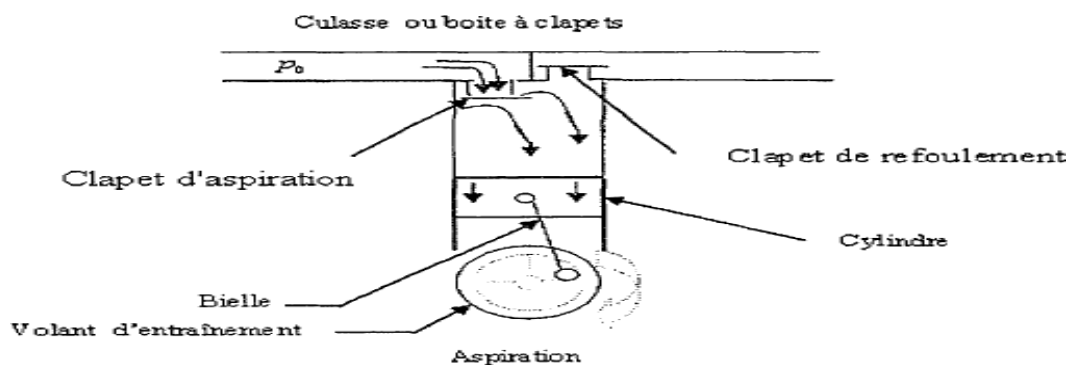


Figure II.6 : Fonctionnement d'un compresseur à piston durant la phase d'aspiration.

- **La deuxième étape :**

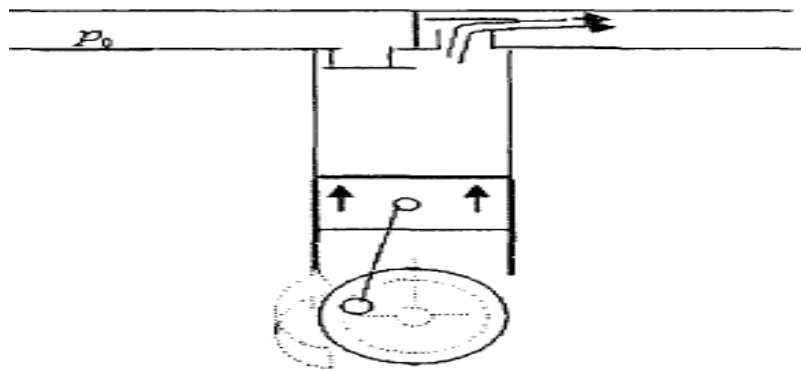
Une fois que le piston atteint son point mort bas, il commence à se déplacer dans la direction opposée et commence à se comprimer, provoquant la fermeture de la soupape d'aspiration. Pendant ce temps, la soupape de décharge reste fermée car la pression dans la chambre de compression est encore inférieure à la pression dans le circuit de décharge externe et pas assez élevée pour vaincre l'inertie de la soupape de décharge (figure II 6).

- **La troisième étape :**

La pression dans la chambre de compression non seulement atteint la pression dans le circuit de décharge externe, mais la dépasse légèrement pour vaincre l'inertie de la soupape de décharge et ainsi permettre son ouverture. Le fluide comprimé pourra alors s'échapper, et cela jusqu'à ce que le piston atteigne son point mort haut.

- **La quatrième étape :**

Lorsque le piston reprend sa course descendante, la soupape de décharge se ferme. Dès que la pression dans la chambre de compression devient inférieure à la pression dans le circuit d'aspiration externe, le clapet d'aspiration s'ouvre, autorisant ainsi un nouveau cycle. Un compresseur peut avoir plusieurs cylindres et être mono étage si chaque cylindre aspire de l'air et le refoule à la même pression.



Refoulement

Figure II.7 : Fonctionnement d'un compresseur à piston durant la phase de refoulement.

➤ **Compresseurs à diaphragme (membrane) :**

Les compresseurs à membrane (figure II.7) sont des compresseurs volumétriques. La compression est créée par une membrane élastique qui assure l'admission des gaz et la compression. Le système hydraulique assure la flexion de la membrane : le piston se déplace dans le cylindre et agit sur le fluide hydraulique qui transmet son mouvement oscillant à la membrane. Le rôle du plateau à trous est d'assurer une bonne répartition du fluide sous la membrane. Celui-ci est généralement constitué de trois disques métalliques : l'avantage de ce système est que la rupture de la membrane peut être détectée par mesure de pression. La membrane assure une étanchéité statique côté gaz de procédé. Par conséquent, les compresseurs à membrane sont utilisés pour les gaz dangereux, nocifs et corrosifs. Les diaphragmes assurent également l'étanchéité des composants mécaniques.

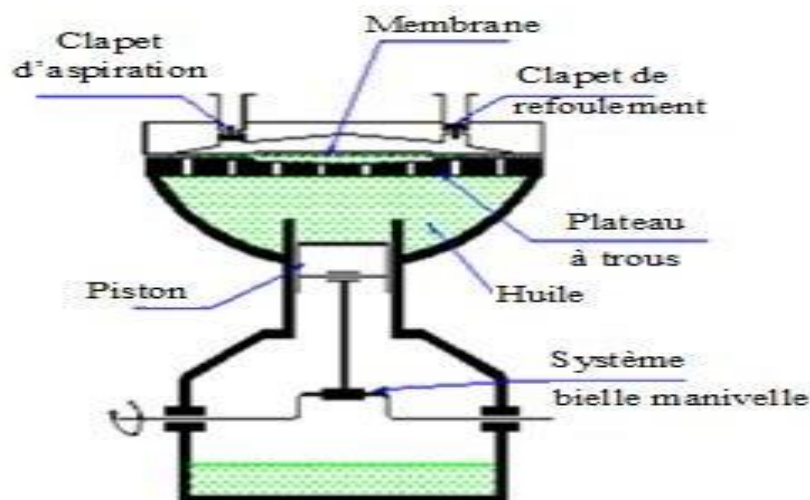


Figure II.8: Le compresseur à membrane.

B) Compresseurs rotatifs :

Les compresseurs rotatifs sont maintenant utilisés dans des applications qui nécessitent auparavant l'utilisation de compresseurs volumétriques. Les compresseurs rotatifs peuvent être directement connectés à un moteur d'entraînement et fonctionner à grande vitesse. Dans l'ensemble, leur poids, leur taille et leurs dépenses en capital sont généralement inférieures à ceux des compresseurs à pistons car ils n'ont pas de soupapes d'aspiration ou de refoulement et fonctionnent mal à faible charge. En fait, ils sont très inefficaces lorsqu'ils sont partiellement chargés en raison de fuites sur la surface de contact. Ces machines ont le même objectif que les machines alternatives moyennes. Leurs utilisations :

- Alimentation en air d'usines.

- Alimentation d'appareils de mesure et de commande.
- Procédé chimique et de raffinage d'huile.
- Séchage à vide.
- Transport pneumatique.
- Ventilation de mines et de tunnels.

➤ **Compresseurs multicellulaire (à palettes) :**

Dans un cylindre et tournant autour d'un axe excentrique le rotor est tangent au cylindre et est équipé de pales radiales qui coulissent librement dans son logement et agissent constamment sur la paroi par force centrifuge. Le volume entre deux palettes consécutives est variable. Trois étapes peuvent être distinguées :

- **Aspiration** : Le volume de cellule de compression est constitué de deux palettes consécutives après contact avec le générateur, remplis de gaz et augmentés progressivement au cours de la rotation, de la valeur nulle à la valeur maximale.
- **Compression** : Le volume de cellule de compression entre les deux palettes diminue régulièrement et provoque une compression du gaz.
- **Refoulement** : cellule de compression appuie devant l'orifice de refoulement, le gaz comprimé s'échappe dans le collecteur de sortie. La figure ci-dessous montre un compresseur à palettes.

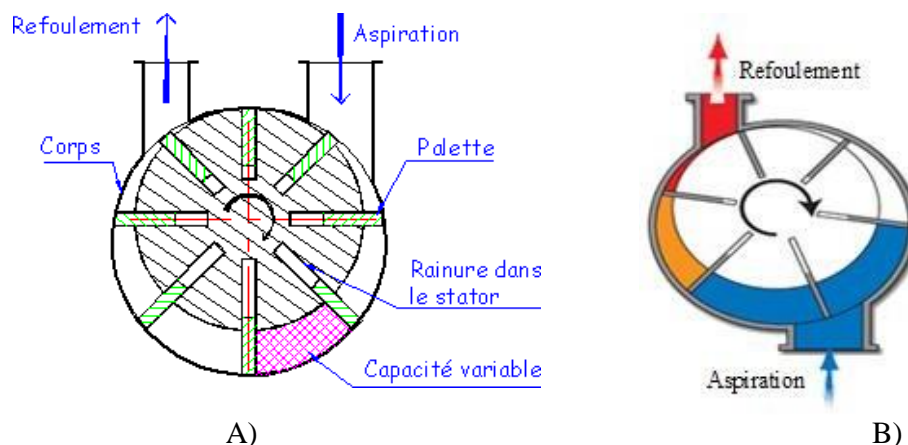


Figure II.9: Compresseur à palettes. [15].

➤ **Compresseur à lobes type roots :**

Le compresseur à lobes le plus connu (figure II.9) est le compresseur Roots. Il est constitué de deux lobes à deux dents aux profils conjugués qui tournent dans un carter dont la section est constituée de deux parties de cercle. Les deux lobes sont entraînés en rotation par un engrenage placé à l'extérieur de la chambre du compresseur tout en assurant la synchronisation. Les pignons sont lubrifiés via le niveau d'huile. Soit par une circulation à partir du graissage moteur. L'entraînement synchrone des lobes par engrenages supprime tout contact entre les lobes et entre ceux-ci et le carter, supprimant ainsi toute lubrification interne. L'air à comprimer est introduit dans le carter du compresseur depuis le côté aspiration. Il est emprisonné dans une chambre située entre les pales et le carter. Le gaz pénètre dans la conduite de pression et remplit la chambre de pression, Au fur et à mesure que les pales continuent de tourner, le volume de la chambre d'alimentation est soumis à une contre-pression et éjecté. La compression n'est pas constante. Par conséquent, le compresseur doit lutter avec une pression dynamique complète à tout moment.

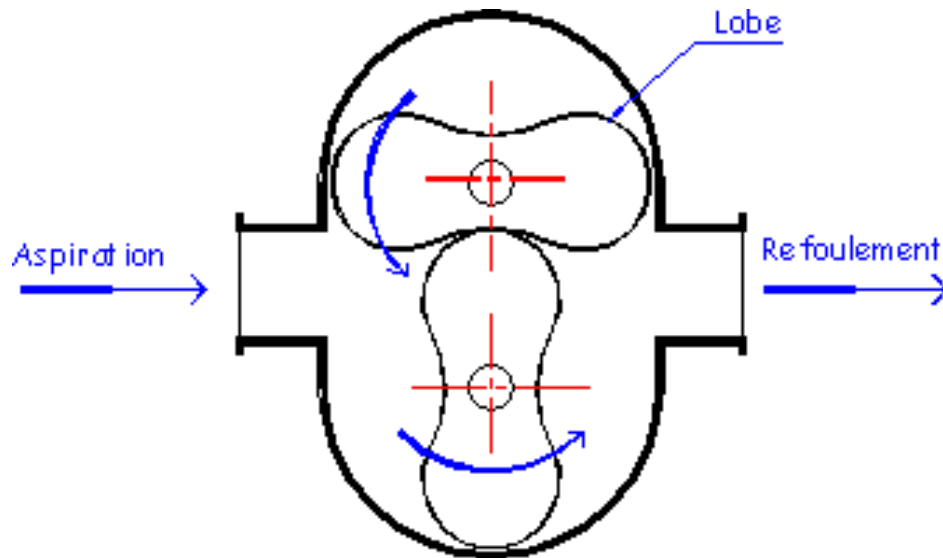


Figure II.10: le compresseur à lobes.

➤ **Compresseur spirale:**

Ce nouveau type de compresseur est constitué d'un carter fixe, dans lequel une ou plusieurs spirales sont usinées, et d'un rotor, lui-même spirales et animé d'un mouvement oscillant par rapport au carter. Le déplacement du point de contact de la spirale mobile sur la spirale fixe assure le transfert de l'air de l'orifice d'aspiration extérieur vers l'orifice de refoulement intérieur. Le taux de compression interne dépend de la forme de la spirale (Figure II.10).

La forme combinée des deux spirales et le contrôle du mouvement oscillant du rotor permettent à la fois de réduire les frottements (deux surfaces roulant l'une sur l'autre) et de limiter les fuites internes (l'écart évolue très lentement de part et d'autre du joint de contact). Le compresseur à spirale présente des performances intermédiaires entre le compresseur à lobes et le compresseur à palettes.



Figure II.11: Compresseur spirale [17].

➤ **Compresseur à vis :**

Un compresseur à vis est une machine volumétrique à taux de compression. Ces derniers sont de deux types : mono vis et double vis, avec étages de compression lubrifiés ou non.

❖ **Compresseur mono vis:**

L'aspiration se fait par la partie inférieure, puis le gaz occupe le volume entre les

mailles. Elles sont alors balayées par les dents du pignon lors de la rotation de la vis. Le volume de gaz diminue et la pression augmente jusqu'à ce que la vis tourne pour exposer l'orifice de refoulement.

❖ **Compresseur double vis:**

Un compresseur double vis (figure II.11) est constitué de deux rotors à plusieurs filetages à profil conjugué, un mauvais profil et un autre filetage femelle tournant dans un carter fixe. La compression se déroule en trois étapes :

- Etape d'aspiration : L'air entre dans la spire de rotor ouvert côté aspiration par les voies d'aspiration.
- Etape de compression : la rotation progressive du rotor provoque la fermeture de la lumière d'admission, Le volume diminue et la pression augmente. De l'huile est injectée au cours de ce processus.
- Phase d'évacuation : la compression se termine, la pression finale est atteinte et la décharge commence.

Les étapes de compression de ses machines peuvent être lubrifiées ou non lubrifiées:

a) Compresseur à double vis non lubrifiées :

Les compresseurs à vis non lubrifiées ont des rotors mâles et femelle contrarotatifs, synchronisés par des engrenages installés à l'extérieur de l'espace de compression. Étant donné que les rotors ne se touchent pas ou ne touchent pas le carter, aucune lubrification n'est nécessaire dans la chambre de compression ; par conséquent, l'air d'échappement est complètement exempt d'huile.

b) Compresseur à deux vis lubrifiées:

La différence avec la première est que l'huile de lubrification liquide entrera dans la chambre de séparation avec le gaz séparé. L'huile injectée à trois fonctions :

- **La lubrification** : Lubrifier les pièces d'usure dans la chambre de compression, c'est-à-dire lubrifier les roulements du rotor et les engrenages d'entraînement et de synchronisation.
- **Création d'une étanchéité** : L'étanchéité est réalisée par lubrification entre les surfaces en contact au fur et à mesure que cette huile est injectée dans la chambre de compression.
- **Refroidissement** : se rapprocher artificiellement de l'évolution isotherme en réduisant la surchauffe du gaz lors de la compression.



Figure II.12 : le compresseur à double vis [16].

2.9.3. Avantages, inconvénients et domaines d'utilisations des compresseurs :

Type de compresseur	Compresseurs Volumétriques		Compresseurs dynamiques	
	Alternatifs	Rotatifs	Centrifuge	Axiaux
Avantages	-Bien adaptés aux petits débits. -Peuvent véhiculer du gaz à toutes les pressions. Relativement souple à exploiter.	-Peuvent véhiculer du gaz dans une large plage de débit. -Débit régulier. -Fiabilité satisfaisante. -Débit plus régulier que les compresseurs alternatifs.	-Bien adaptés aux moyens et grands débits de gaz -Relativement souple à exploiter -Excellent fiabilité	-Très bon rendement. -Bien adaptés aux très grands débits et aux pressions modérées. Excellent fiabilité.
Inconvénients	-Débit pulsé -Fiabilité moyenne au niveau des soupapes -Obligation d'avoir une machine secours	-Pas appliqué Aux hautes pressions (maxi 50 Bars).	-Pas adapté aux faibles débits. -Pompage à faible débit rend l'exploitation délicate. -Prix élevé.	-Rotors de grande taille délicate à construire et coûteux.
Les domaines d'utilisations.	Comprissions de faibles volumes de gaz à très haute pression (supérieure à 1000 bars).	Comprissions de grands volumes de gaz à une pression limitée (entre 0 à 10 bars).	Compression de grands volumes de gaz par rapport aux compresseurs volumétriques à une pression inférieure a 1000 bars.	Compression de très grands volumes de gaz par rapport à tous les compresseurs à des pressions variables (entre 1 à 100 bars).

Tableau II.3: Avantages, inconvénients et domaines d'utilisations des compresseurs.

2.10. Production de l'air comprimée :

Pour alimenter les équipements pneumatiques d'un ensemble de production .il faut installer une centrale d'air dont le rôle est de comprimé d'air et de le stocker dans un réservoir ou il est maintenu à une pression suffisante à partir duquel il est distribué [4].

Un système d'air comprimé se compose de plusieurs sous-systèmes et composants principaux. Le système d'air comprimé peut également être divisé en deux parties : le côté de la production et le côté de la consommation.

Le côté production comprend les compresseurs, le traitement de l'air et les installations de stockage primaire. Un système bien géré produira de l'air propre, sec et stable et le fournira de manière fiable et économique à la pression requise. Les sous-systèmes de production d'air comprimé principaux comprennent généralement des prises d'air, des compresseurs d'air (à vitesse fixe et/ou variable), des refroidisseurs d'air à la sortie du compresseur, des moteurs électriques, des commandes (dispositifs de régulation), des équipements de traitement de l'air et des accessoires. Les équipements de contrôle permettent de réguler la quantité d'air comprimé à produire afin de maintenir une pression constante dans le système et de gérer l'interaction entre les différents composants du système. Les filtres à air et les sécheurs d'air éliminent l'humidité, l'huile et les impuretés dans l'air comprimé. Le stockage d'air comprimé (réservoirs humides et secs) est également utilisé pour améliorer les performances et la stabilité du système. L'eau accumulée est évacuée par des purgeurs de type manuel ou automatique. Les régulateurs de pression sont utilisés pour maintenir une pression constante dans l'équipement d'utilisation finale. Le côté consommation comprend les canalisations de distribution, le stockage secondaire et l'équipement des utilisateurs. Un système consommateur bien géré minimise la pression différentielle, réduit les pertes d'air dues aux fuites et à l'équipement de purge, et achemine l'air comprimé vers l'équipement et l'application appropriés. La tuyauterie de distribution transporte l'air comprimé du compresseur au point d'utilisation finale. Des réservoirs d'air comprimé sont également utilisés côté consommateur pour augmenter la stabilité de la pression du système.

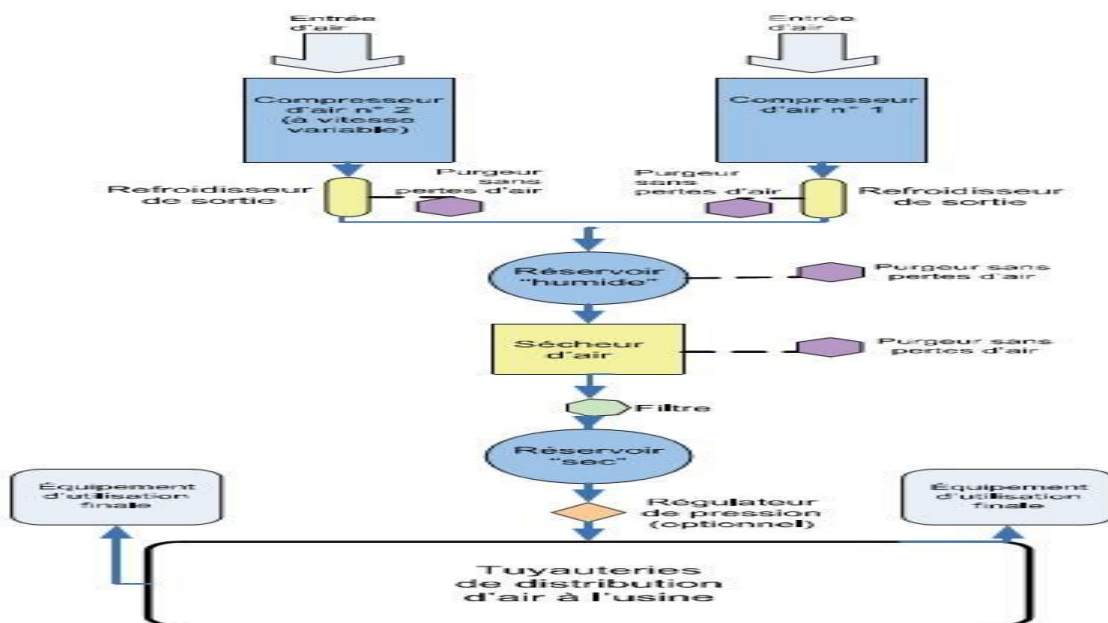


Figure II.13: Exemple de l'installation de l'air comprimé.

➤ **Élément de l'installation de l'air comprimé :**

- **Armoire de commande électrique** : chargée de contrôler le moteur selon les instructions d'utilisation et les informations fournies par le pressostat.
- **Compresseur** : responsable de l'augmentation de la pression d'air lorsqu'il est entraîné par le moteur.
- **Refroidisseur** : l'augmentation de la pression produite par le compresseur fait monter la température de l'air qui doit être refroidi.

- **Moteur** : responsable de l'entraînement du compresseur.
- **Réservoir** : réservoir d'air comprimé des compresseurs pour réduire les temps d'arrêt et réguler le débit d'air en aval de l'installation.
- **Manomètres** : permettent de mesurer la pression relative dans le réservoir.
- **Pressostat** : permet de définir la pression souhaitée dans le réservoir et de commander le démarrage ou l'arrêt du moteur. Dans le compresseur à vis, ce dispositif commande l'ouverture et fermeture de l'électrovalve. Ce dernier, sert au contrôle de la vanne d'entrée d'air à la chambre de compression.
- **Unité de conditionnement d'air** : chaque équipement (machines, systèmes, etc.) relié au réseau de distribution possède son propre groupe de conditionnement de l'air chargé de le filtrer, lubrifier et de régler la pression.
- **Tuyauterie** : tuyauterie principale, si possible, en circuit pour égaliser la pression, selon une légère pente (1% à 3%) pour permettre l'écoulement des condensats vers un coude composé d'un réservoir et d'une purge automatique ou manuel.
- **Vanne d'isolement** : permet d'isoler l'installation de la distribution d'énergie pneumatique générale.
- **Purge** : permet à la condensation de s'écouler et s'évacuer.
- **Sécheur** : un sécheur d'air (ou sécheur d'air comprimé) est un appareil technique utilisé pour réduire l'humidité relative de l'air comprimé afin d'éviter les problèmes liés à la condensation ou à la corrosion dans un réseau d'air comprimé.

2.11. Traitement de l'air comprimé :

La sécurité et la longévité des machines dépendent en grande partie du conditionnement de l'air comprimé entrant dans chaque machine. L'air contient toujours de la vapeur d'eau. Lorsqu'il est comprimé, il se réchauffe puis se refroidit dans le réseau de distribution, ce qui provoque la condensation d'une partie de la vapeur d'eau sous forme de condensats.

La norme ISO 8573 précise quels sont les polluants de l'air comprimé les plus importants, il s'agit principalement des particules solides, de l'eau et de l'huile. Il est donc logique de prendre, dès l'aspiration de l'air les précautions limitant la quantité de ces polluants [8].

2.11.1. Prétraitement de l'air comprimé :

➤ **Particules solides :**

C'est le polluant qui a le plus grand impact sur la fiabilité du compresseur. La prise d'air atmosphérique se produira là où les particules solides ne sont que petites quantités. En particulier, les prises d'air proches du sol doivent être évitées à un moment donné. La protection par des filtres mécaniques à très faible perte de charge est indispensable.

Les filtres d'aspiration sont souvent installés dans les compresseurs. Ils sont composés de plusieurs couches de toile, feutre, synthétiques, etc. ou se composent des systèmes suivants Déflecteur en tôle huilée.

➤ **Eau :**

Il existe en permanence dans l'air atmosphérique sous forme de vapeur d'eau, occasionnellement sous forme d'aérosols, où même sous forme de la pluie. L'entrée d'air doit être l'objet d'une attention particulière pour éviter toute introduction pluie directe.

➤ **Huile :**

A priori, on peut admettre qu'il n'y a pas d'huile dans l'air atmosphérique surtout si l'on considère que l'air comprimé est produit par des compresseurs lubrifiés. Il est souhaitable d'attirer l'attention sur les compresseurs dits secs, c'est-à-dire non lubrifiés. Dans ce cas, la pollution de l'air

comprimé est concentrée dans le rapport de compression du compresseur. Il n'est pas recommandé d'envisager une prise d'air, pour la salle des compresseurs, à proximité des zones riches en huiles dans l'atmosphère.

2.11.2. Traitement de l'air après la compression :

➤ **Séparateurs de l'huile**

Cet air, pré conditionné, est acheminé jusqu'au compresseur qui le conditionne en pression. Deux grandes familles de compresseurs à vis se disputent les applications industrielles [20].

- **Cas des compresseurs secs :**

Pour ce type de compresseur, il n'est pas nécessaire d'ajouter huile dans l'air percutant dans la zone de compression. En revanche, la pollution solide initiale est concentrée par la compression, il y aura pollution par particules solides supplémentaires provenant des pièces d'usure du compresseur en contact avec l'air.

- **Cas des compresseurs lubrifié :**

Pour les compresseurs à lubrification naturelle, seul le film d'huile couvre les cylindres qui entrent en contact avec l'air pendant la compression. Cet air, vapeur d'huile chaude et saturée entraînée par l'air pour la compression dans le cas d'une lubrification forcée, par exemple des vis de lubrifiée, l'huile est forcée dans l'air pendant la compression. Dans certains cas, l'air évacué est rempli d'huile, c'est Le compresseur est initialement équipé d'un séparateur qui récupère et recycle l'huile. D'autre part, certains aérosols et des vapeurs d'huile sont entraînés dans l'air.

➤ **Refroidisseurs de compresseurs :**

Les compresseurs qui fonctionnent en permanence peut engendrent d'importantes quantités de chaleur attribuable au processus de compression. Cette chaleur doit être extraite à la fois du refroidisseur d'air de sortie et du refroidisseur d'huile. Les compresseurs sont généralement refroidis par air ou par eau.

- **Refroidisseurs intermédiaires :**

De nombreux compresseurs multi-étages plus anciens, sont équipés de refroidisseurs intermédiaires qui sont chargés d'éliminer la chaleur de compression entre chaque étage. Ces refroidisseurs doivent être nettoyés régulièrement pour assurer un transfert de chaleur optimal et donc une meilleure efficacité énergétique.

- **Refroidisseurs de sortie :**

Ces refroidisseurs extraient la chaleur du lubrifiant et de l'air d'échappement du compresseur. Le refroidisseur d'air installé en aval du dernier étage de compression, est refroidi par air ou refroidi par eau. Il est essentiel de s'assurer qu'il fonctionne, car le contenu l'humidité de l'air dépend directement de la température de refoulement. Ces refroidisseurs d'air doivent être nettoyés régulièrement pour assurer une capacité optimale transfert de chaleur pour l'efficacité énergétique. Les températures supérieures à 38 °C entraînent généralement une surcharge au sécheur d'air et entraînent des problèmes d'humidité. Le refroidisseur abaisse la température de l'air de refoulement saturé et condensent la vapeur d'eau, qui doit ensuite être séparée du récipient et purgé du système. L'entretien du dispositif de nettoyage est essentiel pour éviter que l'eau ne pénètre aux équipements de séchage en aval. Pratiquement tous les systèmes d'air comprimé industriels sont équipés d'un type ou un autre de refroidisseurs de sortie.

- **Refroidisseurs à l'entrée de compresseur :**

Il est généralement admis que bien que l'idée soit Industrie, pour une efficacité énergétique maximale, l'air entrant dans le compresseur doit être aussi froid que possible. C'est parce que l'air froid est plus dense que l'air chaud. Plus l'air d'admission est froid, plus ses molécules le sont également, de sorte que davantage d'air est comprimé pour chaque tour du compresseur d'air. En outre, plus l'air de l'entrée est froid, moins il y a de refroidissement intermédiaire et refroidissement en sortie.

- **Réservoirs d'air comprimé :**

Ce sont de simples tubes cylindriques pour satisfaire, les différentes réglementations nationales et intentionnelles concernant les appareils sous pression leurs volumes dépend du débit moyen du compresseur et du débit de pointe consommé pour les applications moyennes, le volume minimum du réservoir et le volume drainé par le compresseur pendant environ 6 secondes (le volume revient aux conditions initiales). Un tel ordre de grandeur n'est généralement pas possible face à des variations importantes de consommation. Ces réservoirs servent de réserve d'air comprimé et offrent également les avantages permettent stabiliser l'air comprimé qui continue à refroidir et à condenser les vapeurs d'eau et d'huile.

Pour se conformer à la réglementation, les réservoirs doivent être équipés de certains nombre d'accessoires, principalement des soupapes de sécurité, des purgeurs automatiques ou manuels ainsi des manomètres. Cette soupape a une valeur de tarage, la valeur c'est la valeur de pression maximale d'utilisation du réservoir, appelée limiteur de pression. La valeur de cette tare compatible avec les besoins de l'installation, sert aussi à la protection et la sécurité. Le réservoir d'eau est constitué de plaques d'acier soudées. Ils sont à fond cylindrique bombés. Ils doivent résister à deux fois la pression de service maximale.

De nombreux fabricants proposent des purgeurs automatiques : ces appareils simples sont constitués d'un réservoir avec un flotteur pour contrôler l'évacuation de l'eau. Ils peuvent être à l'origine de nombreux accidents, de fuites d'air ou au contraire d'absence d'évacuation. Après recherche, ils seront installés dans un endroit facilement accessible, ils doivent en effet être contrôlés fréquemment (au moins une fois par mois).

2.11.3. Traitements de l'air avant la consommation :

- **Les filtres :**

Avant d'envoyer de l'air comprimé dans le réseau distribution en sortie de réservoir, il doit se débarrasser des particules solides et des aérosols qu'il peut encore souvent contenir. La température de l'air sortant du réseau est supérieure de quelques degrés à la température ambiante. Les tuyaux jouent le rôle d'échangeurs thermiques et laissez l'air finir de refroidir jusqu'à ce qu'il atteigne le poste utilisateur. En raison du refroidissement, il existe un risque de condensation. Donc nécessaire de prévoir :

- **Filtration en sortie de réservoir :**

Ces filtres coalescents à haut rendement éliminent les particules solides et toute trace d'aérosols, ils sont nécessaires mais pas suffisants.

- **Filtration au poste utilisateur :**

L'air doit être filtré, séché, lubrifié et régulé en pression avant utilisation. Ces filtres protègent les machines des particules solides et des grosses gouttes de condensation des canalisations. Ils sont généralement intégrés dans des organes de type FRL, aussi appelés tête de ligne. Cette unité est constituée d'un filtre, d'un mano- régulateur et d'un lubrificateur.

2.11.4. Méthode de séchage :

L'utilisation d'un filtre à air comprimé à haute efficacité avec purgeur de condensat pour éliminer l'huile, l'eau et les particules de votre système d'air comprimé. Dans de nombreux cas, cette mesure ne suffit pas.

En fait, les systèmes et processus de production d'aujourd'hui nécessitent une qualité d'air élevée, c'est pourquoi les sècheurs d'air sont nécessaires. Il existe plusieurs méthodes de séchage et les critères de sélection sont principalement basés sur le type d'air, le débit et la pression fournis. L'**annexe 5** nous présente les teneurs en eau de l'air à différents points de rosée.

Afin d'éliminer l'humidité contenue dans l'air et de rendre l'air comprimé très sec, la figure suivante présente les méthodes de séchage de l'air comprimé selon son principe de fonctionnement.

Une différence est toujours faite entre la condensation, la sorption et la diffusion [26]:

- **La condensation:** est la séparation de l'eau lors du passage en dessous du point de rosée.
- **La sorption:** est le séchage par extraction de l'humidité.
- **La diffusion:** est le séchage par transfert de molécules.

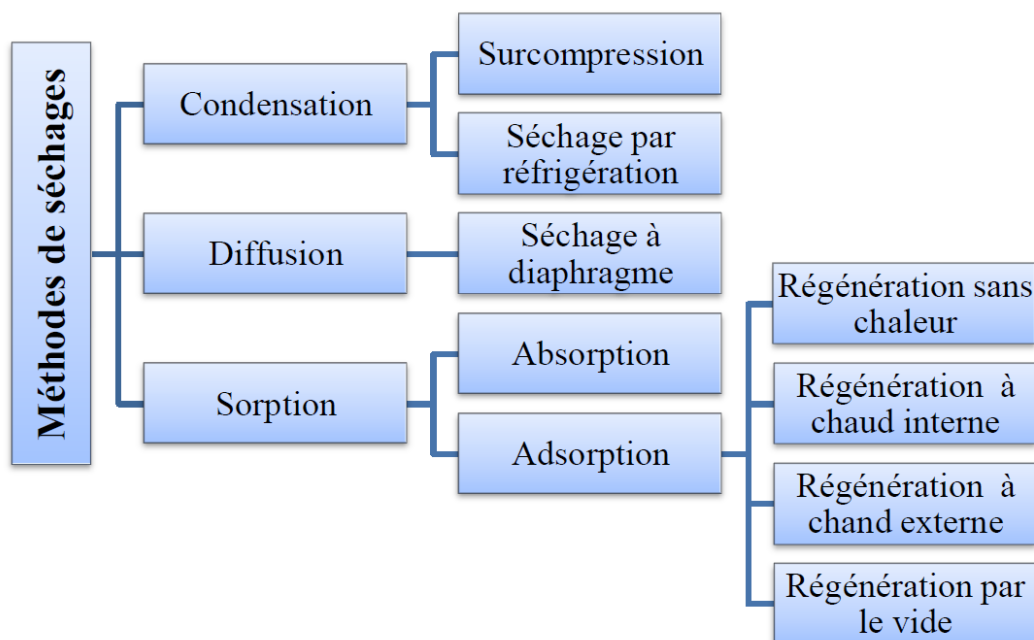


Figure II.14 : diagramme de méthode de séchage. [26]

Les sècheurs d'air comprimé les plus courants sont les sècheurs par réfrigération et les sècheurs par adsorption sans apport de chaleur et à apport de chaleur interne.

➤ **Condensation :**

❖ **Surcompression :**

La quantité d'eau contenue dans l'air diminue en raison de l'augmentation de la pression et de la diminution du volume. Lors de la pré-compression à haute pression (environ 35 bars), de grandes quantités de condensat se forment. L'eau condensée est ensuite évacuée et l'humidité absolue de l'air comprimé est réduite. Au fur et à mesure que l'air se dilate jusqu'à la pression réglée, l'humidité relative diminue. Ces avantages et inconvénients sont :

- Un processus simple permet un flux continu.
- Aucun système de refroidissement requis.
- Faible investissement pour les petits débits.
- Mauvaise efficacité énergétique.

❖ Séchage par réfrigération:

Le séchage par réfrigération est généralement effectué en deux étapes :

1. L'air entrant passe d'abord par un échangeur air-air pour refroidir l'air sortant, où 70 % de la vapeur d'eau est convertie en eau condensée.
2. L'air passe ensuite à travers l'évaporateur de l'unité de réfrigération, où il est refroidi à des températures proches du point de congélation (bien en dessous du point de rosée).

Le condensat est alors évacué avant d'être renvoyé vers l'échangeur précité.

Le refroidissement peut également être réalisé au moyen d'un volume tampon de fluide froid, auquel cas, on parle également de séchage par réfrigération cyclique. Ces avantages sont :

- Haute efficacité énergétique
- Séparation des impuretés (presque 100% des particules solides et des gouttelettes d'eau > 3µm sont séparées)
- Faible perte de charge (~0,2 bar).

➤ Diffusion :**❖ Séchage à diaphragme :**

L'air comprimé circule à l'intérieur des fibres creuses. Au cours de ce processus, la vapeur d'eau contenue dans l'air comprimé est expulsée vers l'extérieur à travers un fourreau de fibres creuses. Le gradient de concentration entre l'intérieur et l'extérieur de la fibre permet la migration de l'eau. Un flux d'air de rinçage est prélevé sur le flux d'air (sec) sortant de l'extérieur du fourreau, en maintenant un gradient d'humidité. L'air de rinçage est ensuite détendu et évacué. Ces avantages et inconvénients sont :

- Un filtre ultra-fin de 0,01 µm doit toujours être placé en amont du sécheur. La perte de charge pour ce type de filtre peut être équivalente à 1 bar, soit environ 7% de la surconsommation électrique au compresseur.
- Perte de charge du sécheur (~0,2 bar).
- Consommation d'air comprimé.
- Il n'y a pas de pièces mobiles.

➤ Sorption :**❖ Absorption:**

Pendant le processus d'absorption, de l'air comprimé traverse un déshydratant et une réaction chimique transfère une partie de la vapeur d'eau. Le système de drainage dirige le condensat vers un réservoir. Les déshydratants hygroscopiques, qu'ils soient liquides ou solides, perdent leur capacité absorbante avec le temps et doivent être renouvelés périodiquement. Ces inconvénients sont :

- Basse température d'entrée.
- Les déshydratants sont très corrosifs et peuvent être aspirés dans le réseau.
- Pas d'alimentation auxiliaire.
- Perte de charge
- Agent hygroscopique consommable.

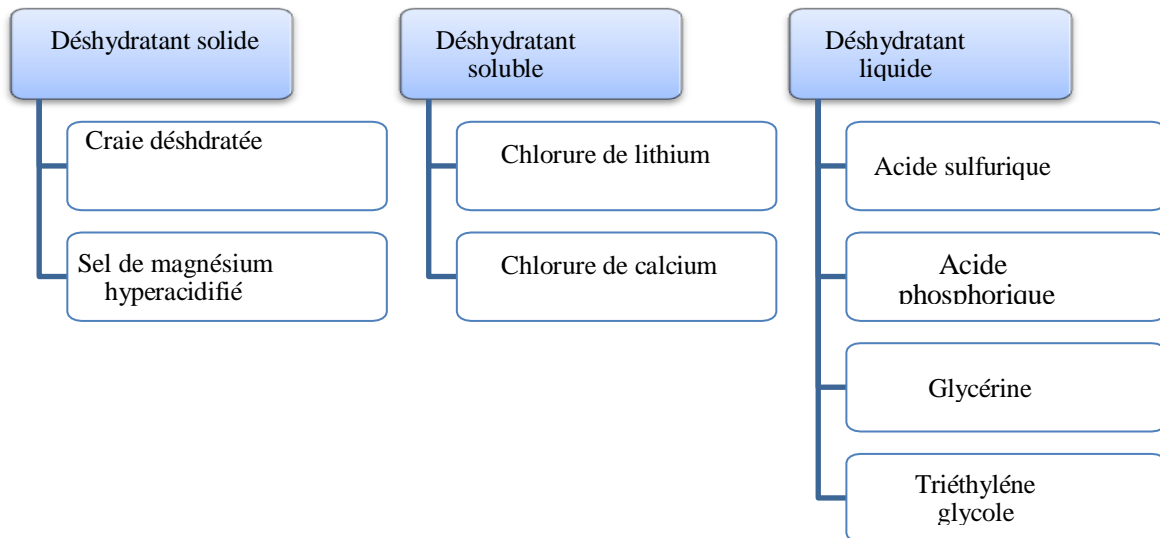


Figure II.15: Classification des déshydratants. [26]

❖ Adsorption :

Pendant le processus d'adsorption, de l'air comprimé passe à travers un réservoir contenant l'agent adsorbant. La vapeur d'eau adhère à l'agent adsorbant par force d'adhésion, puis l'air comprimé est séché mécaniquement. Au bout d'un certain temps, l'agent adsorbant devient saturé et doit être régénéré pour en extraire l'eau. Afin de pouvoir alimenter en continu le réseau d'air comprimé, ce type de sécheur dispose de deux réservoirs fonctionnant en alternance, l'un fonctionnant en phase d'adsorption et l'autre en phase de régénération (ou désorption).

Il existe 4 grands principes de régénération :

- Régénération sans chaleur, où le débit d'air de rinçage est prélevé à la sortie du sécheur.
- Régénération à chaleur interne, où une résistance chauffante placée à l'intérieur de l'enveloppe contenant l'adsorbant chauffe l'agent adsorbant jusqu'à ce que les forces d'adhésion soient vaincues. Inspirez une petite quantité d'air sec pour expulser l'eau.
- Régénération à chaleur externe, où une résistance chauffe l'air ambiant forcé à travers le réservoir par un ventilateur pour la régénération. L'air chaud absorbe la vapeur d'eau dans le réservoir et l'évacue par la soupape d'échappement.
- La régénération par le vide, qui fonctionne sur le même principe que la régénération à chaleur externe. En plus de l'air ambiant aspiré à travers le réservoir pour être régénéré par la pompe à vide, cet air se sature en humidité lors de son passage dans le réservoir puis s'évacue.

Les avantages et inconvénients du séchage par adsorption sont :

- Filtration en amont et en aval du sécheur (perte de charge).
- Utilisation à haute température.
- Coûts d'exploitation élevés en raison du besoin d'air sec pendant la phase de régénération (sauf pour la régénération sous vide).
- L'adsorbant a une longue durée de vie.
- Régénération possible grâce à la chaleur du compresseur.

Type de sécheur	Point de rosé sous pression en °C	Pression de service en bars	Volume débité en m ³ /h	Temperature d'entrée en °C
Condensation par surpression	-20 °C	Selon le compresseur	Selon le compresseur	-
Condensation par réfrigération	+2°C	<210 bars	11 à 35000 m ³ /h	< 60°C
Diffusion dans un diaphragme	0 à -20°C	5 à 12.5 bars	11 à 130 m ³ /h	2 à 60°C
Sorption par absorption	Diminué de 8 à 12%	-	-	<30°C
Sorption par adsorption	-40 à -90 °C	2 à 16 bars	200 à 15000 m ³ /h	40 à 150°C

Tableau II.4: Caractéristique de chaque sécheur. [11]

2.11.5. Les avantages de l'air comprimé traité :

L'air comprimé a l'avantage de pouvoir alimenter des équipements faciles à manipuler, donc particulièrement robustes et nécessitant peu d'entretien. De plus, l'air comprimé est peu dangereux, c'est pourquoi il est utilisé si fréquemment, dont l'utilisation permet :

- Durée de vie prolongée des outils de connexion.
- Qualité des produits améliorée et constante.
- Conduites d'air comprimé sans condensation et sans rouille.
- Défaillances de tuyauterie moins fréquentes sans collecteurs de condensat.
- Coûts d'entretien réduits.
- Réduction des pertes de pression dues aux fuites et aux chutes de pression.
- Réduction de la consommation d'énergie grâce à une perte de pression moins importante.

2.11.6. Conséquence d'un mauvais traitement d'air comprimé :

Les impuretés atmosphériques et l'eau restant dans l'air comprimé peuvent avoir des conséquences néfastes. Cela concerne à la fois le réseau de canalisations et les machines. Les produits peuvent également être affectés par une mauvaise qualité de l'air. L'utilisation d'air comprimé mal traité peut être dangereuse dans de nombreux domaines d'application, par exemple :

- Les particules solides telles que la poussière et d'autres particules provoquent une usure, qui devient plus forte lorsque les particules se combinent avec de l'huile ou de la graisse pour former une patte abrasive.
- Les huiles usées, les huiles godroneuses contenus dans les systèmes pneumatiques, peuvent entraîner une réduction de diamètre et des conduites obstruées, entraînant des bouchages et des pertes de charge plus élevées.
- L'eau contenue dans l'air comprimé peut provoquer de la corrosion et de la rouille, ce qui peut endommager les appareils de valeur et même geler le réseau d'air à basse température.

2.12. Conclusion :

L'air comprimé est une source d'énergie essentielle pour la plupart des industries cherchant à augmenter les rendements de production et à utiliser des équipements pneumatiques de plus en plus avancés. Tous les réseaux de production d'air comprimé sont constitués des mêmes composants dont les principes de fonctionnement varient d'une station à l'autre.

Ce chapitre est une présentation générale de l'air comprimé, ainsi qu'une série de généralités et de définitions des différents types de compresseurs et composants des équipements de production d'air comprimé.

Chapitre 03 :

Evaluation des besoins en air
comprimé.

3.1. Introduction :

Le dimensionnement d'une station d'air comprimé à pour but de fournir de l'air à la bonne pression et en quantité suffisante pour assurer le bon fonctionnement des équipements qu'elle alimente.

Dans ce chapitre, on définit la méthode et la procédure de dimensionnement et de calculs de débit totale et la pression que doit assurer le compresseur.

3.2. Problématique :

La station de production d'air comprimé de la société Générale Emballage SPA est constituée de quatre compresseurs à vis lubrifié dont trois (Compair LS75, deux Atlas Copco Ga75 et GA55) fonctionnent en continu et un compresseur (Atlas Copco GA30) est à l'arrêt. Les compresseurs qu'elle exploite sont répartis dans différentes zones et fournissent une tuyauterie en boucle fermée. Si l'un des trois compresseurs est en maintenance ou en réparation, le GA30 peut également être utilisé, mais ne peut pas satisfaire les besoin de l'installation exigé et maintenir la pression de service et le débit, et ce particulièrement en été avec les fortes températures. Pour remédier à ce problème, l'entreprise envisage de rassembler ces compresseurs dans un seul local avec un compresseur de secours, et de redimensionner toute l'installation pour un fonctionnement optimale. Notre travail a pour but de répondre à cette problématique.

Les deux figures qui suivent sont :

- La figure 3.1 : est l'ancienne conduite du réseau air comprimé en acier galvanisé et différentes zones des salles des compresseurs.
- La figure 3.2 : est la nouvelle conduite du réseau air comprimé en acier galvanisé à dimensionner et la zone de compression.

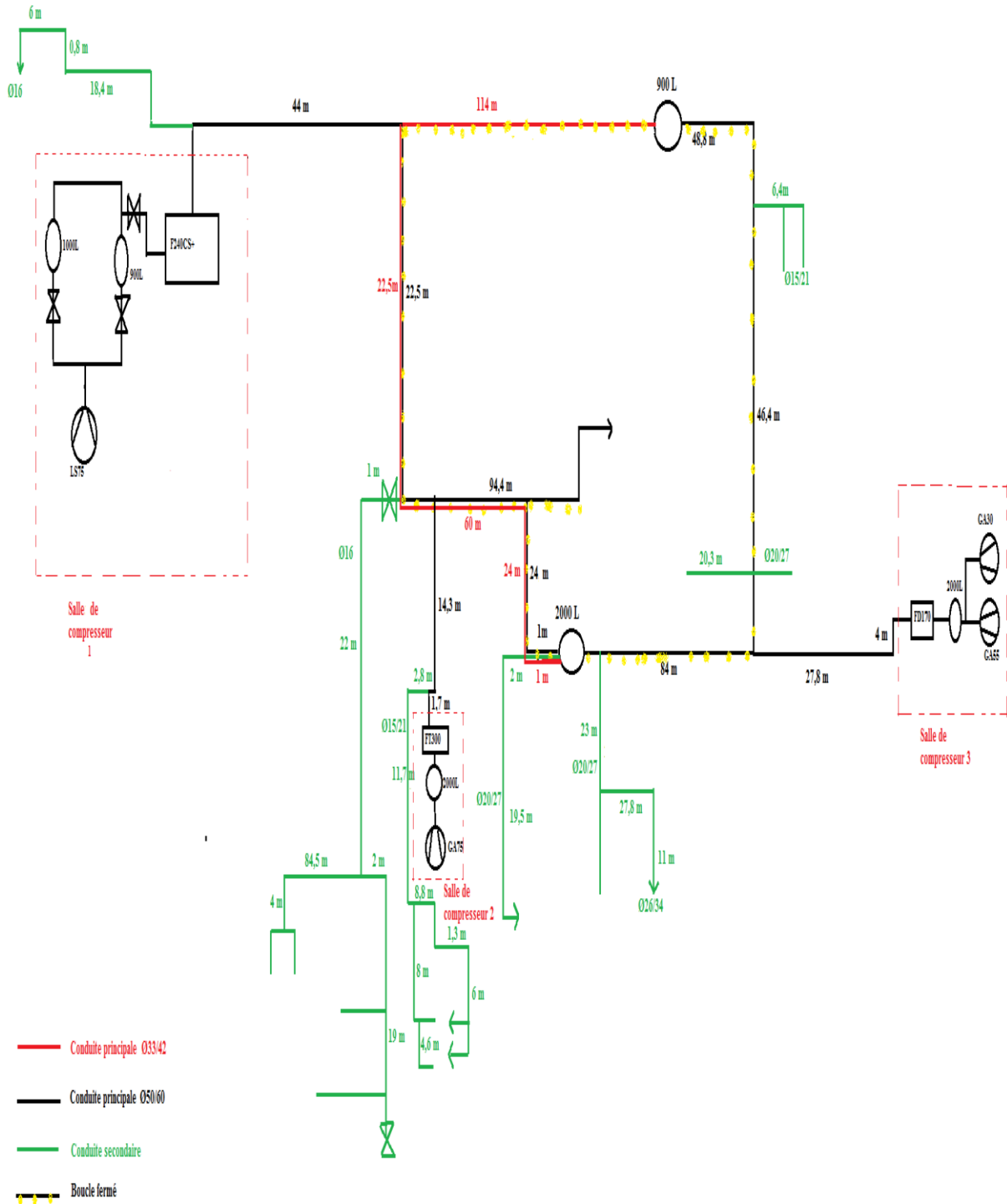


Figure III.1 : Ancienne conduite du réseau air comprimé en acier galvanisé.

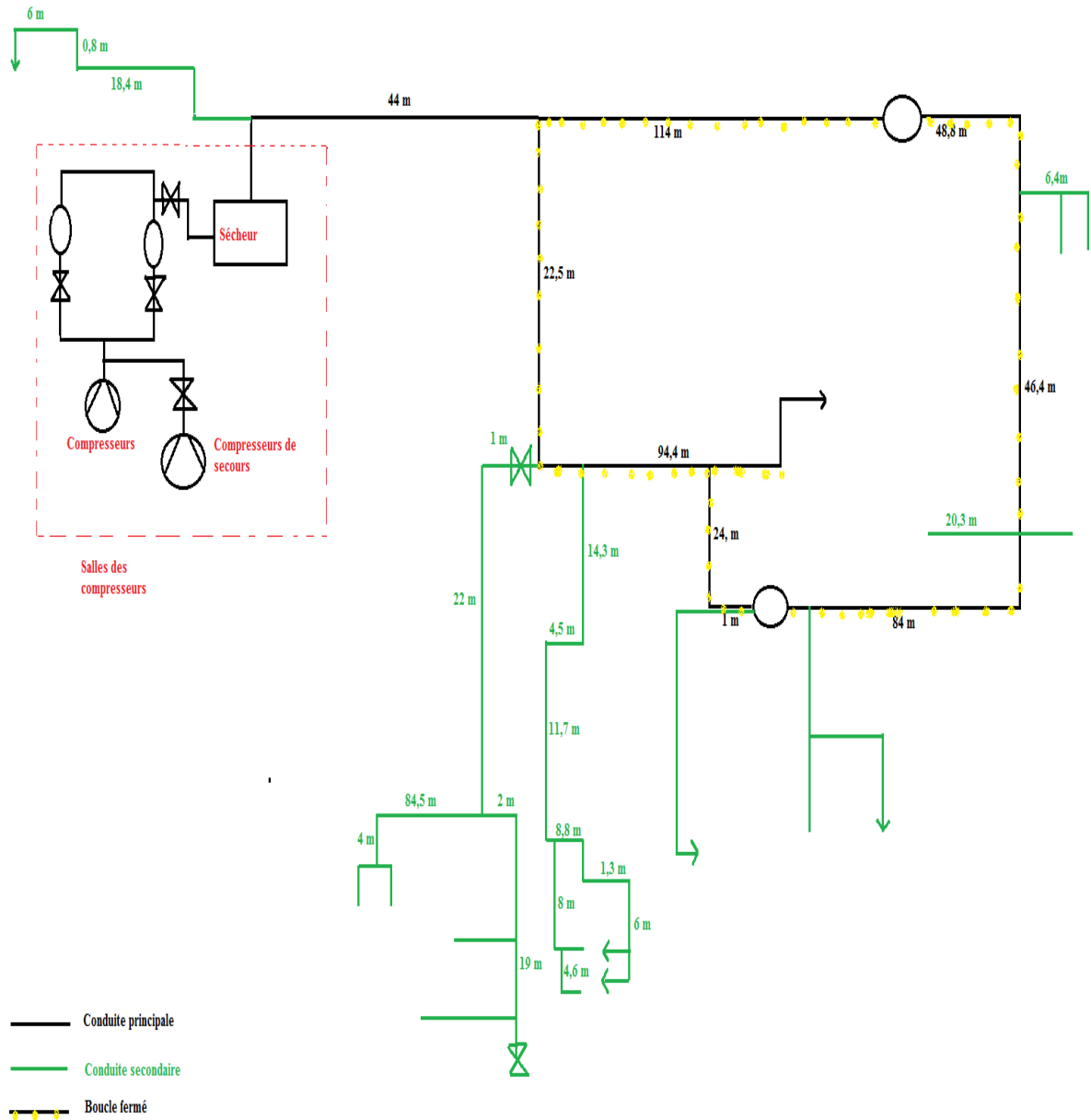


Figure III.2 : Nouvelle conduite du réseau air comprimé en acier galvanisé à dimensionné.

3.3. Description du réseau d'air comprimée :

L'air comprimé généré par la station doit passer par un réseau de distribution parfait. Passons en revue, à ce sujet, quelques règles à prendre lors de l'étude d'une installation :

- La dimension de la tuyauterie doit être calculée de manière à être suffisamment grande pour que la perte de charge entre le réservoir de stockage et le point d'utilisation ne dépasse pas 10 % pression initiale.
- Avec la conduite principale en boucle fermée, il peut réaliser pression de service égale.
- Chaque ligne principale doit être équipée au plus près possible depuis le point d'utilisation, et éviter les conduites enterrées (difficile surveillance et entretien).
- Toute la tuyauterie doit être installée sur une pente descendante vers une purge pour faciliter l'évacuation et empêcher l'eau de s'écouler dans les équipements.

- Trouver le plus petit nombre de restrictions brusques (raccords, tés, Les courbes, etc.), qui sont des obstacles et des freins à l'écoulement des fluides. Ils produisent la perte de charge affaiblit la pression de service.
- En s'assurant que la condensation d'humidité dans l'air du réseau est évitée, les tuyaux sont légèrement inclinés (surtout le collecteur principal), placés à chaque point bas un réservoir avec purgeur et en prévoyant tous les piquages de prises d'air sur la génératrice supérieure des canalisations.
- Utilisez des robinetteries et des outils entièrement étanches pour minimiser les risques de fuites et de pertes de puissance.

En effet, le réseau d'air comprimé du processus est réparti dans toutes les pièces Production ; il fournit des types de charge :

- Actionneur pour vanne.
- Distributeur pour vanne toute ou rien.
- Vérins

3.4. Principe de dimensionnement :

La conception d'une station de compression d'air et du réseau de conduites correspondant se résume dans les étapes suivantes :

- La première étape consiste à déterminer la consommation totale de l'installation et par conséquent le débit d'air totale que doit assurer le compresseur.
- La seconde étape consiste à la sélection du diamètre et la vitesse de l'écoulement du fluide compressible.
- La troisième étape sert à déterminer la pression que doit assurer le compresseur, en passant par le calcul des pertes charges.
- La quatrième étape : détermination des performances du compresseur par une étude thermodynamique.
- La cinquième et dernière étape : choix du compresseur, sécheur et calcule des vases/tampons.

3.5. Débit total de l'air comprimé et débit massique :

Le débit volumique est calculé en divisant le volume d'air par une période de temps. L'unité de mesure la plus courante est mètre cube par seconde, (SI) ; il y a aussi les litres par minute. (LPM) [21] :

$$Q_v = \frac{\tilde{V}}{t} \quad \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad \text{(III.1)}$$

Q_v : Débit volumique en [m3/s]

\tilde{V} : Volume en [m3]

t : Temps en [s]

La relation entre le débit massique et le débit volumique est :

$$Q_m = \rho * Q_v \quad \left[\frac{Kg}{s} \right] \quad \text{(III.2)}$$

Q_m : Débit massique en [kg/s]

ρ : Masse volumique de l'air en [kg/m3]

Équation d'état de gaz parfait :

$$P.v = r. T \quad \text{(III.3)}$$

$$v = \frac{1}{\rho} \quad \text{(III.4)}$$

D'après (II.3) on a déterminé :

$$\rho = \frac{P}{r * T} \quad (III.5)$$

v : Volume occupé par la masse m de gaz [m³]

P : La pression du gaz en [Pa]

r : Constante des gaz (r air= 287 [J. kg⁻¹. K⁻¹]).

T : Température du gaz [K].

Le débit total d'air de l'unité dans l'installation de l'air comprimé est défini comme la somme du débit nécessaire pour les différentes charges [28].

$$Q_{vt} = \sum_i^n K_i q_{vi} \quad (III.6)$$

Q_{vt} : Débit d'air comprimé total consommé par les différents récepteurs.

$$K_i = K_u \cdot K_s \quad (III.7)$$

K_u : Facture d'utilisation.

K_s : Facture simultanéité d'un groupe de récepteurs.

q_{vi} : Débit d'air comprimé consommé par la charge <i>.

Le débit total d'air de l'installation est défini comme la somme du débit nécessaire pour les différentes charges, du débit de fuite, du débit pour extension tout en tenant compte de l'erreur d'estimation [28] :

$$Q_{vt} = Q_v + 10\% Q_v + 25\% Q_v + 10\% Q_v \quad (III.8)$$

Débit nécessaire pour les différences charge Q_{v-charge}

Débit de fuite 10% Q_v

Débit d'extension 5 à 10 ans : 25% Q_v

Erreur d'estimation : 10% Q_v

3.6. Vitesse d'écoulement de fluide compressible et diamètre de la conduite :

En théorie, les pertes de charge ne devraient pas excéder 0.3 à 0.5 bar entre le réservoir et les utilisateurs. La vitesse d'écoulement est comprise entre 5 à 20 m/s. [14]

Une autre méthode couramment utilisé dans la pratique est de se limiter à une chute de pression de 5% (10% tout au plus). [19]

En fixant la vitesse à différentes valeurs on peut avoir une valeur approximative du diamètre de la tuyauterie, mais en introduisant le paramètre de longueur, le diamètre diminue pour les longues distances pour avoir une pression de service constante pour tous les équipements de l'installation.

La relation entre le débit, vitesse et diamètre :

$$Q_v = S * V \quad (III.9)$$

$$S = \frac{\pi * D^2}{4} \quad (III.10)$$

$$Q_v = \frac{\pi * D^2}{4} * V \quad (III.11)$$

D'après la relation (III.11) on peut avoir :

$$V = \frac{Q_v * 4}{\pi * D^2} \quad (III.12)$$

Où :

$$D = \sqrt{\frac{Q_v \cdot 4}{\pi \cdot V}} \quad (\text{III.13})$$

3.7. Calcul de La pression que doit assurer le compresseur :

$$P_c = P_{ser} + \Delta P_{char} + \Delta P_{reg} + \Delta P_H \quad (\text{III.14})$$

ΔP_{ser} : Pression de service.

ΔP_{char} : Perte de charge dans le réseau (linéaire et singulière), sécheur et le filtre.

ΔP_H : Différence de pression due à la hauteur.

ΔP_{reg} : Ecart de régulation.

$$\Delta P_{reg} = P_D - P_E \quad (\text{III.15})$$

P_D : Pression de déclenchement du compresseur.

P_E : Pression d'enclenchement du compresseur.

3.8. Calcul des pertes charges :

La pression d'un fluide réel diminue tout au long d'une canalisation dans laquelle il s'écoule à cause du frottement lié à sa viscosité, ce frottement provoque une perte de charge dite Perte de charge linéaire [22].

La pression d'un fluide réel diminue après le passage d'une singularité, telle que Tels que : coudes, vannes ou rétrécissement, etc. Cette perte est appelée perte de charge singulière.

3.8.1. Différents régimes d'écoulement :

Des expériences de Reynolds (1883) montrant que lors de l'écoulement de liquide dans des conduites cylindriques rectilignes, dans lesquelles se trouvaient également des filets de liquide coloré, ont montrée l'existence de trois états d'écoulement : laminaire, transitoire et turbulent. Reynolds a montré que le paramètre par lequel un écoulement peut être déterminé comme étant laminaire ou turbulent est un nombre sans dimension appelé nombre de Reynolds (Re), donné par :

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (\text{III.16})$$

ρ : Masse volumique de fluide (kg/m³)

V : Vitesse moyenne (m.s-1)

D : Diamètre de la conduite (m)

μ : Viscosité dynamique du fluide (kg.m-1s-1)

ν : Viscosité cinématique (m². s-1)

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{III.17})$$

Loi valable pour l'air : 100<T<2000K $\mu = 1,458 \cdot 10^{-6} \frac{T^{\frac{3}{2}}}{110.4+T}$ (III.18)

$$\rho = \frac{P}{rT} \quad (\text{III.19})$$

L'expérience montre que :

Re	Régimes d'écoulement
Re < 2000	Laminaire
2000 < Re < 3000	Intermédiaire (appelé aussi transitoire)
Re > 3000	Turbulent

Tableau III.1 : Régime d'écoulement.

3.8.2. Pertes de charges linéaires :

Cette perte est causée par le frottement interne qui se produit dans le liquide ; il existe à la fois dans les tuyaux lisses et rugueux. Dans un tuyau de diamètre (D), une perte de charge se produit entre deux points séparés par une longueur (L). ΔP est représenté par la formule suivante :

$$\Delta P = \lambda \frac{\rho \cdot V^2}{2} \cdot \frac{L}{D} \quad [Pa] \quad \text{(III.20)}$$

ρ : Masse volumique [kg/m³].

λ : Coefficient de frottement.

W : Vitesse d'écoulement du fluide dans la canalisation [m/s].

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{8 \cdot \lambda \cdot L}{\pi^2 \cdot r \cdot T} \cdot \frac{Q_p^2}{D^5} \quad \text{(III.21)}$$

r : Constante des gaz (J/kg. K)

T : Température du fluide. [K].

➤ **Détermination du coefficient de perte de charge linéaire (λ):**

a) Cas écoulement laminaire Re<2000 :

Dans ce cas on prend le coefficient λ en fonction du nombre de Reynolds et l'état de surface n'intervient pas.

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad \text{(III.22)}$$

b) Cas d'un écoulement turbulent : Re>3000 :

Ces phénomènes sont beaucoup plus complexes, et la détermination du coefficient de perte de charge provient de mesures expérimentales. Ceci explique la diversité des formules anciennes proposées pour la détermination. Dans les régimes turbulents, l'état de surface devient sensible et son effet devient plus important avec l'augmentation du nombre de Reynolds. Tous les travaux ont montré l'effet de la rugosité, puis on a essayé de trouver la variation des coefficients en fonction du nombre de Reynolds Re et de la rugosité ε du tuyau.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left(\frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{\lambda}} \right) \quad \text{(III.23)}$$

Du fait de sa forme implicite, l'utilisation directe de cette formule nécessite un calcul par approximations successives. Pour simplifier la relation précédente, on peut essayer de comprendre si l'écoulement est lisse ou rugueux pour évaluer la force des deux termes entre parenthèses dans la relation de Colebrook.

Remarque : On fait souvent appel à des formules empiriques plus simples valables pour des cas particuliers et dans un certain domaine du nombre de Reynolds, par exemple [27] :

Formule de BLASIUS : pour des tuyaux lisses et Re<10⁵

$$\lambda = (100 \cdot Re)^{-0.25} = 0.316 \cdot Re^{-0.25} \quad \text{(III.24)}$$

Pour : Re >10⁵

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log \left(\frac{Re\sqrt{\lambda}}{2.51} \right) \quad \text{(III.25)}$$

Relation qui peut être approchée par :

$$\lambda = \frac{1}{\left[2 \cdot \log \left(\frac{Re}{4.522 \cdot \log Re - 3.8215} \right) \right]^2} \quad \text{(III.26)}$$

3.8.3. Perte de charge singulière :

Ainsi que les expériences le montrent, dans beaucoup de cas, les pertes de charge sont à peu près proportionnelles au carré de la vitesse et donc on a adapté la forme suivante d'expression : [5]

$$\Delta P = \xi \frac{\rho \cdot V^2}{2} \quad [\text{Pa}] \quad \text{(III.27)}$$

$$\frac{\Delta P}{P} = \xi \frac{8 \cdot \lambda \cdot L}{\pi^2 r T} \cdot \frac{Q_g^2}{D^4} \quad \text{(III.28)}$$

V : Vitesse de l'écoulement [m/s]

ξ : Est appelé coefficient de perte de charge singulière (sans dimension). La détermination de ce coefficient se fait comme suit :

- **Cas des coudes :**

$$\xi = K_{\Delta} K_{Re} \xi_m + \xi_f \quad \text{(III.29)}$$

Le coefficient tenant compte de la perte de charge singulière des coudes concentriques continus (arrondis) est calculé selon la formule suivante proposée par Abramović.

$$\xi_m = A_1 B_1 C_1 \quad \text{(III.30)}$$

$$\xi_f = 0.0175 \lambda \frac{R_0}{D_0} \delta^0 \quad \text{(III.31)}$$

A_1 : Coefficient tenant compte de l'effet de l'angle au centre δ^0 du coude.

B_1 : Coefficient tenant compte de l'effet du rayon relatif du coude $\frac{R_0}{D_0}$

C_1 : Coefficient tenant compte de l'effet de la largeur relative de la section du coude $\frac{a_0}{b_0}$

D'après les données de Nekrassov A_1 prend les valeurs suivantes :

$$\delta = 90^\circ \quad A_1 = 1 \quad \text{(III.32)}$$

$$\delta < 70^\circ \quad A_1 = 0.9 \sin \delta \quad \text{(III.33)}$$

$$\delta > 100^\circ \quad A_1 = 0.7 + 0.35 \frac{\delta}{90} \quad \text{(III.34)}$$

La grandeur B_1 peut être calculée d'après les formules approximatives suivantes :

$$\frac{R_0}{D_0} < 1 \quad B_1 = \frac{0.21}{\left(\frac{R_0}{D_0}\right)^{2.5}} \quad \text{(III.35)}$$

$$\frac{R_0}{D_0} > 1 \quad B_1 = \frac{0.21}{\sqrt{\left(\frac{R_0}{D_0}\right)}} \quad \text{(III.36)}$$

Les grandeurs $K_{\Delta}, K_{Re}, A_1, B_1, C_1$ sont déterminées d'après les tableaux **annexes (2)** en tenant compte des valeurs suivantes :

Re : Nombre de Reynolds.

V : Vitesse d'écoulement.

ν : Viscosité cinématique.

μ : Viscosité dynamique.

δ : Angle du coude.

R_0 : Rayon de courbure de coude.

D_0 : Diamètre du coude.

$\frac{a_0}{b_0}$: La largeur relative de la section du coude.

Δ_i : Rugosité.

Δ' : Rugosité relative.

$$\Delta' = \frac{\Delta_i}{D_0} \quad (\text{III.37})$$

- Cas des tés :

$$\xi = k \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 \quad (\text{III.38})$$

V_1, V_2 : Vitesse d'entrée ou de sortie d'air.

K = Constante dépend de la géométrie de tés est déterminée d'après les tableaux de l'annexe (2).

3.8.4. Différence de pression due à la hauteur :

L'expression différentielle de la relation de base de l'hydrostatique est :

$$\frac{dP}{dz} = -\rho g \quad (\text{III.39})$$

Avec :

$$\rho = \frac{P}{r.T} \quad (\text{III.40})$$

Considérant que l'air circule à une température constante, alors dans ce cas, nous pouvons intégrer la relation d'antécédente :

$$\int_1^2 \frac{dP}{P} = \frac{g}{r.T} \int_1^2 dZ \rightarrow \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) = -\frac{g}{r.T} (Z_2 - Z_1) \quad (\text{III.41})$$

Posant : $\Delta H = Z_2 - Z_1$

$$P_2 = e^{\left(-\frac{g}{r.T} * \Delta H \right)} P_1 \quad (\text{III.42})$$

D'où :

$$\Delta P_H = P_1 - P_2. \quad (\text{III.43})$$

3.9. Applications :

3.9.1. Calcul de débit d'air comprimé de l'installation :

L'objectif de cette étude est de sélectionner un compresseur, un sécheur, la conduite principale correspondante et les ballons de stockage dans le but de couvrir les besoins en termes d'air comprimé. On note que une partie cet air, doit subir un traitement spécifique par séchage ; cette partie est destinée pour l'usage des instruments.

Le tableau ci-dessous présente les différentes machines consommatrices de l'air comprimé, tel que la consommation d'air au niveau de la société Générale emballage :

Equipement	Consommation en m ³ /H
MARTIN 924	167
MARTIN 618	165
FOSBER	330
MEDESA	420 estimé
UNITECH N°01	4
EMMEPI N°01	4
UNITECH N°02	4
EMMEPI N°02	4
MISE SUR PALETTE N°01	50 estimé
MISE SUR PALETTE N°02	50 estimé
INSTALLATION WSA	100 estimé
TMZ N°01	15
TMZ N°02	15
CAVIFES	15 estimé
Rexon	36
INKMAKER	36
Soufflette	Quantité 32
Fisleuse ISB13 mano	4 estimé
Fisleuse ISB13 mano	4 estimé
Station Step d'épuration	165 estimé
Séparateur cyclonique DLT	50 estimé
Cumule	1638

Tableau III.2 : Consommation débit d'air comprimé de différentes machines.

En remplaçant dans l'équation (III.6), on trouve le débit d'air comprimé total consommé par les différents récepteurs:

$$Q_{vt \text{ rec}} = 917,28 \text{ m}^3 / \text{h}.$$

Avec : pour différentes machines on prend :

$$K_u : 0,8 \text{ et } K_s : 0,7.$$

La société générale emballage n'a aucune intention d'extension dans l'avenir. D'après la relation (III.8), sans débit d'extension 5 à 10 ans, on trouve un débit totale de l'installation :

$$Q_{vt} = 1100,74 \text{ m}^3 / \text{h} = 0,30576 \text{ m}^3 / \text{s}.$$

3.9.2. Vitesse d'écoulement de fluide compressible et diamètre de la conduite :

Après avoir trouvé le débit d'air totale pour l'installation, on calcule les différents diamètres en utilisant les vitesses les plus existant dans les installations d'air comprime.

Vitesse (m/s)	5	10	15	20
Diamètre (mm)	279	197	161	139

Tableau III.3 : Différents résultats.

A l'aide de la relation (III.13), on a trouvé les résultats suivants :

En introduisant le paramètre de la longueur de la tuyauterie qui est en totale 487,1 m (435,1 m en boucle fermée, 44 m du sécheur à la boucle fermé et 8 m du compresseur au sécheur) pour avoir une pression égale et débit qui satisfait toutes les machines. D'après l'annexe 1, on a trouvé un diamètre qui est égale a : 102 mm.

En utilisant la formule (III.12), on a trouvé une vitesse qui est égale à : $V = 37,4$ m/s. Pour la suite des calculs on prend 102 mm comme diamètre de la tuyauterie et 37,4 m/s comme vitesse d'écoulement.

3.9.3. Calcul des pertes charges de la conduite principale :

A) Pertes charges linéaires :

- Du compresseur au sécheur :

Pour ce calcul on prend :

$P=6,2$ bars $T=353,15$ K $r=287,1$ J/Kg.K $L=8$ m $V=37,4$ m/s $D=102$ mm

- D'après la relation (III.5), on a trouvé : $\rho = 6,12$ Kg/m³
- D'après la relation (III.18), on a trouvé : $\mu = 12,2 \times 10^{-6}$ Kg⁻¹S⁻¹
- D'après la relation (III.16), on a trouvé : $Re = 19,137 \times 10^5$

$Re > 3000$: Le régime d'écoulement est turbulent.

On a : $Re > 10^5$:

- D'après la relation (III.26), on a trouvé : $\lambda = 0,0104$
- D'après la relation (III.21), on a trouvé : $\Delta P_{lin} = 0,0056$ bars

- Du sécheur à l'utilisation :

Pour ce calcul on prend :

$P=6,2$ bars; $T=305,15$ K; $r=287,1$ J/Kg.K; $L=479.1$ m; $V=37,4$ m/s; $D=102$ mm.

- D'après la relation (III.5), on a trouvé : $\rho = 7,077$ Kg/m³
- D'après la relation (III.18), on a trouvé : $\mu = 10,43 \times 10^{-6}$ Kg⁻¹S⁻¹
- D'après la relation (III.16), on a trouvé : $Re = 25,9 \times 10^5$

$Re > 3000$: Le régime d'écoulement est turbulent.

On a : $Re > 10^5$:

- D'après la relation (III.26), on a trouvé : $\lambda = 0,01$
- D'après la relation (III.21), on a trouvé : $\Delta P_{lin} = 0,375$ bars.

B) Pertes charges singulière :

- Du compresseur au sécheur :

Les vannes sont complètement ouvertes dans notre installation, donc on prend en considération que les coudes.

Pour ce calcul on prend :

$P=6,2$ bars; $T=353,15$ K; $r=287,1$ J/Kg.K; $L=8$ m; $V=37,4$ m/s; $D=108,3$ mm.

- D'après la relation (III.5), on a trouvé : $\rho = 6,12$ Kg/m³
- D'après la relation (III.18), on a trouvé : $\mu = 12,2 \times 10^{-6}$ Kg⁻¹S⁻¹
- D'après la relation (III.16), on a trouvé : $Re = 20,32 \times 10^5$

$Re > 3000$: Le régime d'écoulement est turbulent.

On a : $Re > 10^5$:

- D'après la relation (III.26), on a trouvé : $\lambda = 0,0103$

Pour : $R_0 = 162,45 \text{ mm}$; $D_0 = 108,3 \text{ mm}$;

- D'après la relation (III.36), on a trouvé : $\frac{R_0}{D_0} = 1,5 > 1 \Rightarrow B_1 = 0,172$;
- D'après la relation (III.32), on a trouvé : $\delta = 90^\circ \Rightarrow A_1 = 1$;
- D'après la relation (III.5), on a trouvé : $a_0 = b_0 \Rightarrow C_1 = 1$
- D'après la relation (III.30), on a trouvé : $\xi_m = 0,172$
- D'après la relation (III.37), on a trouvé : $\Delta' = 0,0018$
- D'après la relation annexe 2, on a trouvé : $K_\Delta = 2$; $K_{Re} = 1$
- D'après la relation (III.31), on a trouvé : $\xi_f = 0,0243$
- D'après la relation (III.29), on a trouvé : $\xi = 0,3674$
- D'après la relation (III.28), on a trouvé : $\Delta P_{sin} = 0,000164 \text{ bars}$

Pour 5 coudes :

$$\Delta P_{sin} = 0,00082 \text{ bars}$$

• **Du sécheur à l'utilisation :**

Les vannes sont complètement ouvertes dans notre installation, donc on prend en considération que les coudes.

Pour ce calcul on prend :

$P = 6,2 \text{ bars}$; $T = 305,15 \text{ K}$; $r = 287,1 \text{ J/Kg.K}$; $L = 479,1 \text{ m}$; $V = 37,4 \text{ m/s}$; $D = 108,3 \text{ mm}$.

- D'après la relation (III.5), on a trouvé : $\rho = 7,077 \text{ Kg/m}^3$
- D'après la relation (III.18), on a trouvé : $\mu = 10,43 \times 10^{-6} \text{ Kg}^{-1} \text{ S}^{-1}$
- D'après la relation (III.16), on a trouvé : $Re = 27,48 \times 10^5$

$Re > 3000$: Le régime d'écoulement est turbulent.

On a : $Re > 10^5$:

- D'après la relation (III.26), on a trouvé : $\lambda = 0,0099$

Pour : $R_0 = 162,45 \text{ mm}$; $D_0 = 108,3 \text{ mm}$;

- D'après la relation (III.36), on a trouvé : $\frac{R_0}{D_0} = 1,5 > 1 \Rightarrow B_1 = 0,172$;
- D'après la relation (III.32), on a trouvé : $\delta = 90^\circ \Rightarrow A_1 = 1$;
- D'après la relation (III.5), on a trouvé : $a_0 = b_0 \Rightarrow C_1 = 1$
- D'après la relation (III.30), on a trouvé : $\xi_m = 0,172$
- D'après la relation (III.37), on a trouvé : $\Delta' = 0,0018$
- D'après la relation annexe 2, on a trouvé : $K_\Delta = 2$; $K_{Re} = 1$
- D'après la relation (III.31), on a trouvé : $\xi_f = 0,0234$
- D'après la relation (III.29), on a trouvé : $\xi = 0,3674$
- D'après la relation (III.28), on a trouvé : $\Delta P_{sin} = 0,01097 \text{ bars}$

Pour 23 coudes :

$$\Delta P_{sin} = 0,2523 \text{ bars}$$

Pour le calcul des pertes charges dans les piquages et le réseau secondaire, on le néglige et on le prend une approximation de 0,3 bars pour toutes pertes linéaires et singulières dans les conduites vers les machines.

Pour les tés, on néglige aussi le calcul suite à 7 tés dans toutes la tuyauterie et on le prend 0,001 bars.

3.9.4. Différence de pression due à la hauteur :

Pour la suite de calcul on prend :

$g=9,81 \text{ m}^2/\text{s}$; $r=287,1\text{J}/\text{Kg.K}$; $T=305,15\text{K}$; $P=6,2\text{bars}$; $\Delta H=5\text{m}$.

En appliquant la relation (III.42) et (III.43) on trouve :

$$P_2=6,1965 \text{ bars}$$

D'où:

$$\Delta P_H = 0.0035 \text{ bars}$$

3.9.5. Pertes de charge dans les sécheurs et les filtres :

- **Sécheur**

D'après les tableaux (Annexe 3)

Température d'entrée d'air comprimé : 32°C

Perte de charge dans le filtre : $\Delta P_{\text{Sécheur}}=0.2 \text{ bars}$.

- **Filtre**

D'après les tableaux (Annexe 3)

Température d'entrée d'air comprimé : 32°C

Perte de charge dans le filtre : $\Delta P_{\text{filtre}}=0.3 \text{ bars}$.

3.9.6. Plage de régulation de la pression :

Pour toute installation de production d'air comprimé, des réservoirs de stockage sont nécessaires afin de réduire le temps de fonctionnement du compresseur et de donner de l'autonomie au fonctionnement du procédé ; à cet effet, nous définissons une plage de régulation de pression qui permet de définir la capacité de stockage du stockage réservoir.

$$\Delta P_{\text{Régulation}} = 0,8 \text{ bars.}$$

3.9.7. Calcul de La pression que doit assurer le compresseur :

On a la pression de service P_{ser} qui est égale à 6,2 bars, d'où d'après la relation (III.14) la pression que doit assurer le compresseur P_c est :

$$P_c = 8,4382 \text{ bars.}$$

3.10. Conclusion :

Dans ce présent chapitre, nous avons dimensionné l'installation de l'air comprimé au niveau de Générale Emballage. Nos calculs, sont axés à partir du débit total de l'installation. Nous avons ensuite calculé le diamètre de la tuyauterie en utilisant les quatre vitesses plus courant dans les installations d'air comprimé. Pour conserver plus précisément le même chemin d'installation, nous avons pris le diamètre correspondant pour satisfaire l'installation et nous avons calculés la nouvelle vitesse correspondante, dans le but de satisfaire l'installation avec la pression de refoulement souhaité.

D'après les calculs, nous avons constaté que l'installation nécessite une pression d'au moins 8,5 bars pour assurer le fonctionnement de tous les équipements.

Chapitre 04 :

Etude et calcul thermodynamique de
compresseur à vis et choix des
accessoires.

4.1. Introduction :

Les calculs thermodynamiques permettent d'évaluer Compresseurs, notamment en déterminant la puissance consommée par le compresseur et son rendement, pour sélectionner le compresseur, et les accessoires (sécheur et vases tampons).

Dans les procédés industriels, la compression de gaz est utilisée pour convertir les gaz de zone de basse pression à zone de haute pression. Cette compression est obtenue par réduire le volume de gaz par des moyens mécaniques avec compression de gaz. Cette augmentation de température est également communément appelée chaleur de compression. L'augmentation de température provoquée par la dilatation du gaz contribue également à augmentation de la pression. Ceci est représenté par la relation de Laplace : $PV^k = \text{constante}$. Le coefficient k représente l'influence de la température sur l'évolution de la pression, plus la valeur de K est grand, plus la température du gaz augmente, et son effet sur l'évolution de la pression.

4.2. Les divers modes de compression :

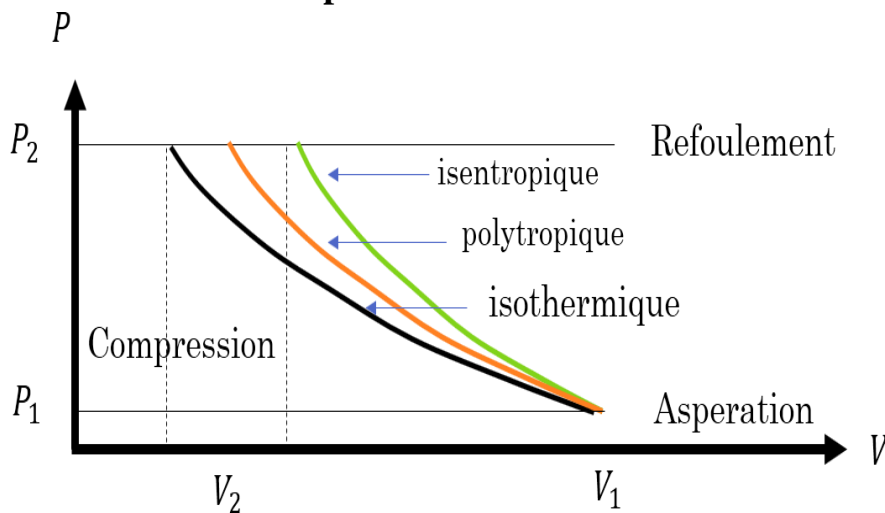


Figure IV.1: Les divers modes de compression.

L'évolution de la pression en fonction de la variation de volume peut être soit : Isotherme, isentropique ou polytropique.

- 1. Compression isentropique $k=\gamma$
- 2. Compression polytropique $1 < k < \gamma$
- 3. Compression isothermique $k=1$

a) Compression isotherme :

K = 1 : température constante.

Le compresseur est refroidi en continu de manière à ce que la température des gaz de sortie soit égale à Gaz entrant. La pression du gaz varie de cette façon : $P.V = \text{constante}$. Ce mode correspond à des transitions infiniment lentes pour permettre l'élimination des Chaleur continue.

b) Compression isentropique :

K = γ : le compresseur n'échange pas de chaleur avec l'extérieur (compression adiabatique) et La compression se fait sans perte ni frottement. Le gaz sortant sera plus chaud que le gaz entrant. Une augmentation de la température contribue également à une augmentation de la pression. La pression du gaz suit la loi de Laplace : $PV^\gamma = \text{constante}$.

γ dépend de l'atomicité (nombre d'atomes dans la molécule) du gaz.

La relation de Laplace nous donne :

$$T \cdot v^{(\gamma-1)} = Cste \quad (IV.1)$$

Cela permet de trouver la température à laquelle la compression se termine La température de fin de compression peut être déterminée par l'expression T_2 .

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (IV.2)$$

c) Compression Polytropique :

➤ **Polytropique refroidie :**

$K < \gamma$: Le compresseur échange de la chaleur avec le monde extérieur. Selon l'intensité de cet échange, la valeur de k peut être comprise entre 1 et γ . L'évolution de la pression sera plus faible, plus rapide que l'évolution isentropique. La pression du gaz obéit à la loi de Laplace généralisée : $PV^k = \text{constant}$.

L'énergie théorique fournie au compresseur est indépendante de la technologie du compresseur.

Cela dépend uniquement de la nature du gaz, des conditions de fonctionnement et de la manière dont faire face à la chaleur de compression.

$1 < K < \gamma$ dépend du refroidissement.

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} \quad (IV.3)$$

La valeur du coefficient k peut également être déterminée par l'expression suivante :

$$K = \frac{1}{1 - \left(\frac{\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)}{\ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)} \right)} \quad (IV.4)$$

➤ **Polytropique adiabatique :**

$K > \gamma$: Le compresseur n'échange pas de chaleur avec l'extérieur (compression adiabatique) mais La compression se fait par les pertes et les frottements, qui provoquent à transformer une partie de l'énergie fournie en chaleur transférée au gaz. Ceci est représenté par l'efficacité η_p .

Par conséquent, la température du gaz augmente plus que dans le cas isentropique. Cela provoque une accumulation plus rapide de la pression. La pression du gaz obéit à la loi Laplace généralisé : $PV^k = \text{constante}$.

Remarque : la notation utilisée ici est celle couramment utilisée dans la documentation Française. Dans la littérature anglo-saxonne, γ est généralement remplacé par K et K par n, c'est-à-dire source de confusion.

4.3. Rendement effectif du compresseur :

Soit le rendement effectif du compresseur égal à :

$$\eta_{eff} = \eta_i \eta_m \quad (IV.5)$$

Une relation de type de celle de Dehaussé peut être utilisée lorsqu'on ne dispose pas des données du constructeur. [31]

$$\eta_{eff} = 0.8 - 0.004(\tau - 5)^2 - \frac{0.5}{\tau - 0.3} \quad (IV.6)$$

Avec est le taux de compression

$$\tau = \frac{P_2}{P_1} \quad (\text{IV.7})$$

4.4. Travail de la compression :

On considère le fluide comme un gaz parfait obéissant à l'équation d'état :

$$Pv = mrT \quad (\text{IV.8})$$

P : pression du gaz [Pa]

v : Volume occupé par la masse m de gaz [m³]

T : Température absolue [K]

r : Constante des gaz [J/kg. K]

m : masse de gaz [kg]

Le travail théorique dans le cas des systèmes ouverts est défini comme suit :

$$W_{th} = -P_1v_1 - \int_1^2 PdV + P_2v_2 \quad (\text{IV.9})$$

En faisant une intégration par partie :

$$\int_{V_1}^{V_2} Pdv = +P_2v_2 - P_1v_1 \int_{P_1}^{P_2} vdp \quad (\text{IV.10})$$

L'équation () devient :

$$W_{th} = \int_1^2 vdp \quad (\text{IV.11})$$

- **Evolution isothermique :**

$$Pv = rT = Cste \rightarrow V = \frac{rT}{P} = \frac{Cste}{P} \quad (\text{IV.12})$$

Le travail W_{th} est égal à :

$$W_{th} = rT \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad (\text{IV.13})$$

- **Evolution isentropique :**

$$Pv^\gamma = Cste \text{ (Loi de Laplace)} \quad (\text{IV.14})$$

Le travail W_{th} est égal à :

$$W_{th} = \frac{\gamma.r}{(\gamma-1)} [T_2 - T_1] = Cp[T_2 - T_1] = h_2 - h_1 \quad (\text{IV.15})$$

- **Evolution polytropique :**

$$Pv^k = Cste \text{ (Loi de Laplace)} \quad (\text{IV.16})$$

Le travail W_{th} est égal à :

$$W_{th} = \frac{k.r}{(k-1)} [T_2 - T_1] \quad (\text{IV.17})$$

En raison du caractère irréversible de la transformation, le travail réel est toujours supérieur au travail réversible calculé à partir de l'expression précédente. Ce travail réel est égal au rapport de travail que la sortie correspondante considère comme une évolution réversible par le rendement effectif correspondant.

De même, le travail réel du compresseur est donné par l'expression suivante :

$$W_{réel} = \frac{W_{th}}{\eta_{eff}} \quad (\text{IV.18})$$

4.5. Puissance du compresseur :

La puissance consommée par le compresseur \dot{W} est donnée par :

$$\dot{W} = Q_m \cdot W_{réel} \quad (\text{IV.19})$$

4.6. Puissance du compresseur :

4.6.1. Pertes mécaniques :

L'équation empirique suivante permet d'estimer les pertes mécaniques dans les roulements et les joints d'étanchéité.

$$P_m = (\dot{W})^{0.4} \quad (\text{IV.20})$$

4.6.2. La puissance utile sur l'arbre :

La puissance utile est définie comme suit :

$$\dot{W}_u = \dot{W}_{reel} + P_m \quad (\text{IV.21})$$

4.7. Application :

Pour une pression de $P = 8.5$ bars et un débit volumique $Q_v = 18,3456 \text{ m}^3/\text{min}$, d'après l'annexe (4), le compresseur le plus adéquat est le compresseur l'un des compresseurs à vis. Ces machines sont souvent installées pour leur simplicité, leur facilité d'installation, la faible maintenance nécessaire, le faible place requise ainsi que leur bas niveau de bruit.

4.7.1. Calcul du travail théorique du compresseur :

On suppose que le compresseur est bien refroidi. La transformation associée à la compression de l'air est une transformation polytropique et pour un compresseur bien refroidi on prend $K=1,3$.

Avec : K : Coefficient polytropique.

Le travail théorique de compresseur sera déterminé d'après la relation (IV.17) :

$$W_{th} = \frac{K \cdot r}{(k - 1)} [T_2 - T_1] = \frac{1,3 \times 287,1}{(1,3 - 1)} [353,15 - 298,15] = 68,426 \text{ KJ/Kg}$$

Avec : T_2 : est la température de sortie du compresseur.

T_1 : est la température d'aspiration du compresseur.

En utilise la relation (IV.6) pour calculer le rendement effectif :

$$\eta_{eff} = 0.8 - 0.004(\tau - 5)^2 - \frac{0.5}{\tau - 0.3} = 0,693 = 69,3\%$$

$$\tau = \frac{P_2}{P_1} = 8,3278$$

4.7.2. Calcul du travail réel du compresseur :

Le travail réel de compresseur sera déterminé d'après la relation (IV.18) :

$$W_{réel} = \frac{W_{th}}{\eta_{eff}} = \frac{68,426}{0,693} = 98,73 \text{ KJ/Kg}$$

4.7.3. Calcul de la puissance du compresseur :

En appliquant la relation (IV.19) :

$$\dot{W} = Q_m \cdot W_{réel} = 184,63 \text{ KW}$$

Pour le débit massique Q_m , en appliquant la relation (III.2) :

$$Q_m = \rho \times Q_v = 6,12 \times 0,30576 = 1,87 \text{ Kg/s.}$$

4.7.4. Calcul des pertes mécaniques :

Les pertes mécaniques du compresseur sera déterminé d'après la relation (IV.20) :

$$P_m = (\dot{W})^{0.4} = 8,06 \text{ KW}$$

4.7.5. Calcul de la puissance utile sur l'arbre du moteur électrique :

En appliquant la relation (IV.21), on a trouvé le résultat suivant :

$$\dot{W}_u = \dot{W}_{reel} + P_m = 192,69 \text{ KW}$$

4.7.6. Choix du compresseur à vis lubrifié :

Sur la base de la définition des besoins présentés précédemment, le compresseur devra fournir 1100,74 m³/h (la demande de l'installation) sous une pression de 8,5 bars et une puissance utile du moteur électrique qui est de près de 192 Kw.

Les 4 compresseurs existant dans l'installation ont plus de 10 ans et leur états : 5/10 pour GA75 et 6/10 pour GA30 et GA55 de la gamme Atlas Copco et 8/10 pour LS75 de la gamme Compair, d'où on va garder que ce dernier comme compresseur de secours.

Le choix des compresseurs sera divisé en 3 compresseurs (deux GA75 et GA45), dont on a fait ce choix à cause des pannes et maintenances qui sont à prévoir à l'avenir, d'où la panne d'un compresseur va engendrer une interruption du fonctionnement de l'installation.

Pour notre choix de la gamme des compresseurs, on a choisis la société Atlas Copco comme fournisseurs.

On rappelle que la société Atlas Copco est chargée de fournir les besoins en termes de compresseur, notant qu'Atlas Copco offre deux gammes de fréquences à savoir 50 et 60 Hertz et que la fréquence du réseau algérien est 50 Hz.

L'annexe 4 présente, le catalogue des gammes de compresseurs offertes par la société Atlas Copco avec les caractéristiques de chaque compresseur.

Le tableau IV.1 présente le choix à partir de l'annexe 4, dont les compresseurs choisis sont des compresseurs sans variateur de vitesse.

Type du compresseur.	Pression maximale du compresseur. En bar	Débit d'air réel.		Puissance du moteur électrique du compresseur. En Kw	Niveau de bruit. En dB(A)	Poids workplace full-feature du compresseur. En Kg
		l/s	m ³ /h			
GA75	10	189	684	75	73	1379
GA75	10	189	684	75	73	1379
GA45	10	119	428	45	68	900

Tableau IV.1: Caractéristique des compresseurs choisis sur catalogue Atlas Copco.

Le tableau IV.2 présente les Caractéristiques du compresseur de secours Compair LS75 suivant la plaque signalétique du compresseur.

On constate après le choix de tous les compresseurs de l'installation que les compresseurs fournissent un débit d'air qui est la somme :

$$684 + 684 + 428 = 1796 \text{ m}^3/\text{h}$$

Type du compresseur.	Pression maximale du compresseur. En bar	Débit d'air réel. En m^3/min	Puissance du moteur électrique du compresseur. En Kw	Fréquence des phases électriques. Hz	Poids du compresseur. Kg
LS75	10	12,44	75	50	1765

Tableau IV.2: caractéristique du compresseur Compair LS75.

4.7.7. Choix des vases/tampons :

➤ **Stockage en aval du compresseur :**

Dans notre cas le stockage d'air comprimé est installé entre le compresseur et le sécheur. Le volume du stockage placé à proximité de chaque compresseur est calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$V_{stockage} = 0,3 \times Q_c (m^3/min)$$

Dans le **tableau IV.3**, on va présenter le stockage de chaque compresseur.

	GA75	GA75	GA45	LS75
Stockage (en m^3)	3,42	3,42	2,13	3,73

Tableau IV.3: stockage de chaque compresseur.

➤ **Stockage locale :**

Pour les réseaux d'air de longue distance, on installe toujours un réservoir d'air dit stockage d'air local au voisinage des machines à forte variation de demande d'air comprimé.

4.7.8. Choix du sécheur :

Les sécheurs d'air comprimé les plus courants sont les sécheurs par réfrigération et les sécheurs par adsorption sans apport de chaleur et à apport de chaleur interne.

Dans cette application, on va faire deux études séparément de choix sur catalogue d'Atlas Copco pour deux types de sécheurs, dont les sécheurs par réfrigérations et les sécheurs par adsorptions sans apport de chaleur.

➤ **Choix des sécheurs par réfrigérations pour chaque compresseur :**

L'**annexe 7** présente, le catalogue des gammes de sécheur par réfrigération par air, à une fréquence de 50Hz offertes par la société Atlas Copco avec les caractéristiques de chaque compresseur.

Le **tableau IV.4** présente le choix sur l'**annexe 7**, dont le sécheur choisis pour chaque compresseur.

	GA75	GA75	GA45	LS75
Type de sécheur	FD185	FD185	FD120	FD220

Tableau IV.4: Choix du sécheur pour chaque compresseur.

Le **tableau IV.5** présente les caractéristiques de chaque sécheur.

	FD185	FD185	FD120	FD220
Température d'entré en °C	50/60	50/60	50/60	50/60
Pertes charges à plein débit en bar	0,22	0,22	0,11	0,12
Consommation d'énergie en Kw	1,4	1,4	1	1,9
Pression maximal en bar	14	14	14	14
Poids en Kg	185	185	170	197

Tableau IV.5: caractéristiques de chaque sécheur.

➤ **Choix des sècheurs par adsorptions sans apport de chaleur pour chaque compresseur :**

L'annexe 6 présente, le catalogue des gammes de sécheur par adsorptions sans apport de chaleur 50Hz offertes par la société Atlas Copco avec les caractéristiques de chaque compresseur.

Le tableau IV.6 présente le choix sur l'annexe 6, dont le sécheur choisis pour chaque compresseur.

	GA75	GA75	GA45	LS75
Type de sécheur	CD185+	CD185+	CD110+	CD250+

Tableau IV.6: Choix du sécheur pour chaque compresseur.

Le tableau IV.7 présente les caractéristiques de chaque sécheur.

	CD185+	CD185+	CD110+	CD250+
Pertes charges à plein débit en bar	0,2	0,2	0,12	0,14
Débit d'air à l'entrée en l/s	185	185	110	250

Tableau IV.7: caractéristiques de chaque sécheur.

Commentaire : Parmi les avantages des sècheurs par adsorption est éliminé la majorité d'humidités pour avoir l'air comprimé purement sec, à une humidité qui tend vers 0. L'annexe 5 nous présente les différents teneurs en eau de l'air à leur points de rosée.

Le seul et unique inconvénient le plus important est le coût très élevé des sècheurs par adsorption d'où on va choisir un sécheur par réfrigération.

4.7.9. Comparaison entre l'ancienne et la nouvelle installation en air comprimé :

Le tableau IV.8 suivant vas nous permettent de faire la différence entre les 2 installations.

Tableau comparatif.	Ancienne installation.				Nouvelle installation.			
Nombres de compresseurs.	3 compresseurs fonctionnent et un à l'arrêt				3 compresseurs fonctionnent et un comme compresseur de secours.			
Caractéristiques de chaque compresseur.		Débit en m^3/min	Pression en bar			Débit en m^3/min	Pression en bar	
	GA75	12,23	9,8	GA75	11,4	10		
	LS75	12,44	10	GA75	11,4	10		
	GA55FF	10,44	8,25	GA45	7,13	10		
	GA30	5,46	7,5	LS75	12,44	10		
Puissances délivrées.	205 Kw + 30 Kw				195 Kw + 75 Kw			
Débit totale fournée par les compresseurs en marche.	2106,2 m^3/h				1796 m^3/h			
	GA75	LS75	GA55 FF	GA30	GA75	GA75	GA45	LS75
Vase/tampon pour chaque compresseur en litre.	2000	1000 +900	2000	C'est le même que le Ga55FF avec by-pass	3420	3420	2130	3730
Types sècheurs.	FD 300	F240 CS+	FD 170	//	FD185	FD 185	FD 120	FD 220
Diamètre de la tuyauterie en mm.	50/60				102			
Longueur de la tuyauterie d'alimentation en m.	44 m du compresseur à la boucle fermé+435,1 m de la boucle fermé=479,1 m				44 m du compresseur à la boucle fermé+435,1 m de la boucle fermé=479,1 m.			
Nombres de machines alimentées.	20				20			
Consommation totale des machines.	1100,74 m^3/h				1100,74 m^3/h			

Tableau IV.8: Comparaison entre l'ancienne et la nouvelle installation en air comprimé.

4.8. Conclusion :

En physique, les transformations polytropiques sont des modifications d'état thermodynamique dans un système thermique entre ce système et l'environnement. Dans le cas d'une transformation polytropique, l'échange thermique est partiel, donc tout juste entre le cas isotherme et le cas adiabatique.

Dans le but de redimensionnement de la station de production d'air comprimé pour un fonctionnement optimale. Tout d'abord, nous avons calculé le débit totale, diamètre recommandé, pertes de charge, la pression de refoulement de compresseur et la puissance du moteur du compresseur et nous avons prévu le remplacement des compresseurs avec un compresseur de secours, c'est-à-dire qu'en cas de panne d'un des compresseurs, la production devra être garantie.

Avant de sélectionner des équipements comprenant des compresseurs, des sécheurs et des réservoirs de stockage et de concevoir une centrale d'air comprimé, toutes les données nécessaires (pression, débit, température, fréquence d'alimentation, etc.) doivent être définies.

L'ensemble de l'installation est relié par des tuyaux en acier galvanisé d'un diamètre intérieur de 102 mm.

Dans ce projet de fin d'étude, nous sommes en mesure d'étudier des informations scientifiques, techniques et méthodologiques car nous recherchons les informations de manière très approfondie. De plus, nous avons eu l'occasion de mettre en pratique la théorie de notre spécialité et nous connaissons maintenant les critères de choix à respecter et les précautions à prendre pour la réalisation de cette technologie.

Chapitre 05:

Présentation du processus de
fabrication, transformation du carton
ondulé

Et

Simulation de la machine 618.

5. Introduction :

Ce chapitre est composé de deux parties, la première partie présente le processus de fabrication et de transformation du carton ondulé, et la seconde partie présente la partie simulation de la machine 618.

5.1. Description du processus de fabrication et transformation du carton ondulé :

GENERAL EMBALLAGE dispose de plusieurs ateliers de production de carton ondulé. Le processus de fabrication passe par différentes étapes assurées par plusieurs lignes de machines. Le hall de production est divisé en deux départements, le premier département est responsable de la production de carton ondulé sous forme de plaques, et le deuxième département est responsable de la transformation des plaques en cartons et barquettes.

5.1.1. Définition et structure du carton ondulé :

➤ **Définition** : le carton ondulé est un matériau cellulosique constitué par l'assemblage, à l'aide d'un joint de colle, de plusieurs feuilles planes maintenues équidistantes entre elle par une ou plusieurs « entretoises » de forme ondulée, qui confèrent au complexe son indéformabilité.

- Les feuilles planes extérieures sont appelées « couvertures »
- Les feuilles intermédiaires sont appelées « médianes »
- Les feuilles ondulées formant entretoises sont dénommées « cannelures »

➤ **Structure du carton ondulé** : l'expertise dans le domaine de fabrication de carton ondulé se concentre à plusieurs types d'emballage en carton :

- Simple face (S.F.) : constitué d'une feuille de papier cannelé, collée sur une feuille de papier ;
- Double face (D.F.) : constitué d'une feuille de papier cannelé, collée entre deux feuilles de papier ;
- Double double (D.D.) : constitué de deux feuilles de papier cannelé intercalées et collée sur trois feuilles de papier ;
- Triple cannelure (T.C.) : constitué de trois feuilles de papier cannelé intercalées et collée sur quatre feuilles de papier ;

- **Profils de cannelure :**

Les différents profils de cannelures sont donnés dans le tableau 4

Profils de cannelure	Epaisseur du carton ondulé en mm	Pas en mm	Nombre de cannelures au mètre	Coefficient d'ondulation
Grande cannelure(A)	5 mm environ	>8	110 à 116	1,48 à 1,52
Moyenne cannelure(C)	4mm environ	7 à 8	123 à 137	1,41 à 1,45
Petite cannelure (B)	3mm environ	6 à 7	152 à 159	1,33 à 1,36
Micro-cannelure(E)	<2mm environ	<4	294 à 313	1,23 à 1,30

Tableau V.1 : Caractéristique de différents profils cannelure.

Théoriquement, la forme idéale pour assurer la solidité du carton la plus adaptée à la quantité de papier utilisée est la forme en V "triangulaire". En pratique, les techniques de fabrication en continu ne permettent pas l'utilisation de profils triangulaires ou rectangulaires, ce qui conduit à des conceptions de profils pseudo-sinusoïdaux, proches à des dents des engrenages mécaniques

➤ **La colle :**

La colle est un élément essentiel nécessaire à la composition et à la structure du matériau en carton ondulé : elle assure la stabilité et la structure du composite. Parmi les types à base d'eau, les adhésifs actuellement utilisés sont à base d'amidon.

L'amidon est l'élément actif pour l'adhésivité de la colle et divers additifs sont incorporés au bain d'amidon :

- La soude, dont le rôle est d'abaisser la température de gélatinisation et de permettre ainsi un collage à plus grande vitesse.

- Le borax qui provoque la montée en viscosité de la colle et détermine sa « texture » (filante, etc.)

- Un fongicide pour prévenir le possible développement bactérien.

Le processus de collage comporte successivement les opérations suivantes :

- Dépôt de colle sur la crête des ondulations

- Formation du joint de colle au contact des papiers avec pénétration partielle dans leur épaisseur.

- Gélatinisation de l'amidon par la chaleur sur la presse lisse ou les tables chauffantes

➤ **Papier pour onduler :**

Pour réaliser le carton ondulé, les papiers utilisés requièrent des caractéristiques particulières. Trois catégories de papier sont distinguées :

- Les couvertures classiques

- Les couvertures blanches

- Les cannelures

5.1.2. Présentation des différentes machines de production et transformation :

Une machine est un ensemble de pièces ou d'organes reliés, dont au moins un est mobile, reliés entre eux pour une application déterminée, notamment pour la production, la transformation, la manutention, le déplacement et le conditionnement de "produits". Pour cette raison, ce chapitre est consacré à l'explication des équipements de l'entreprise.

➤ **La production :**

❖ **Onduleuse :(processus de fabrication du carton ondulé) :**

L'onduleuse est une machine qui fabrique le carton ondulé par la formation d'une cannelure au niveau du « bloc cannelure » grâce à l'assemblage de trois feuilles de papiers à l'aide d'une colle à base d'amidon de maïs.

L'apport énergétique est fourni par la vapeur à 190° C.

L'onduleuse qui fabrique le carton est la juxtaposition de plusieurs machines simples, synchronisées entre elles et qui constituent une chaîne cinématique parfaite et complètement synchronisées :

- ✓ Les dérouleurs de bobines équipés d'un système de freinage automatique, garantissent le défilement du papier à vitesse constante quel que soit le diamètre de la bobine.

Chapitre 5: Présentation du processus de fabrication, transformation du carton ondulé Et Simulation de la machine 618

✓ Les jonctionneurs qui raccordent automatiquement les papiers lors du changement de la bobine.

✓ Plusieurs blocs « simple face » composés de cylindres :

- ◆ Pré chauffeurs qui préparent le papier pour un bon collage.
- ◆ Canne leurs qui donne la forme au papier cannelure.
- ◆ Encolleur qui étale un film de colle sur la tête des cannelures.
- ◆ Presse lisse qui met en contact les cannelures enduites de colle et le papier de couverture.

L'ensemble est appelé « nappe simple face » qui est transportée par un « pont » vers un bloc « double face »

✓ le module double-fond composé de cylindres :

- ◆ pré chauffeurs qui préparent la nappe simple face
- ◆ pré chauffeurs qui préparent la couverture extérieure du carton
- ◆ Encolleurs qui apportent la colle sur la tête des cannelures la (les) nappe (s) et le papier de couverture sont assemblés sans écrasement à l'entrée de la table.

✓ La table de séchage est composée de plaques chauffantes sur lesquelles le carton est entraîné par un tapis.

La pression du contact entre le carton et les plaques est réglée en fonction du poids du carton et de la vitesse de la machine. Ainsi la partie fabrication est achevée, vient maintenant la partie coupage et dimensionnelles.

La partie dimensionnelle est composée :

- ◆ d'une traceuse coupeuse longitudinale la « CLM 350 CL »
- ◆ d'une coupe transversale la « CTM 350 »

La réception :

Les feuilles de carton sont empilées sur deux tables de sortie et évacuées par bloc

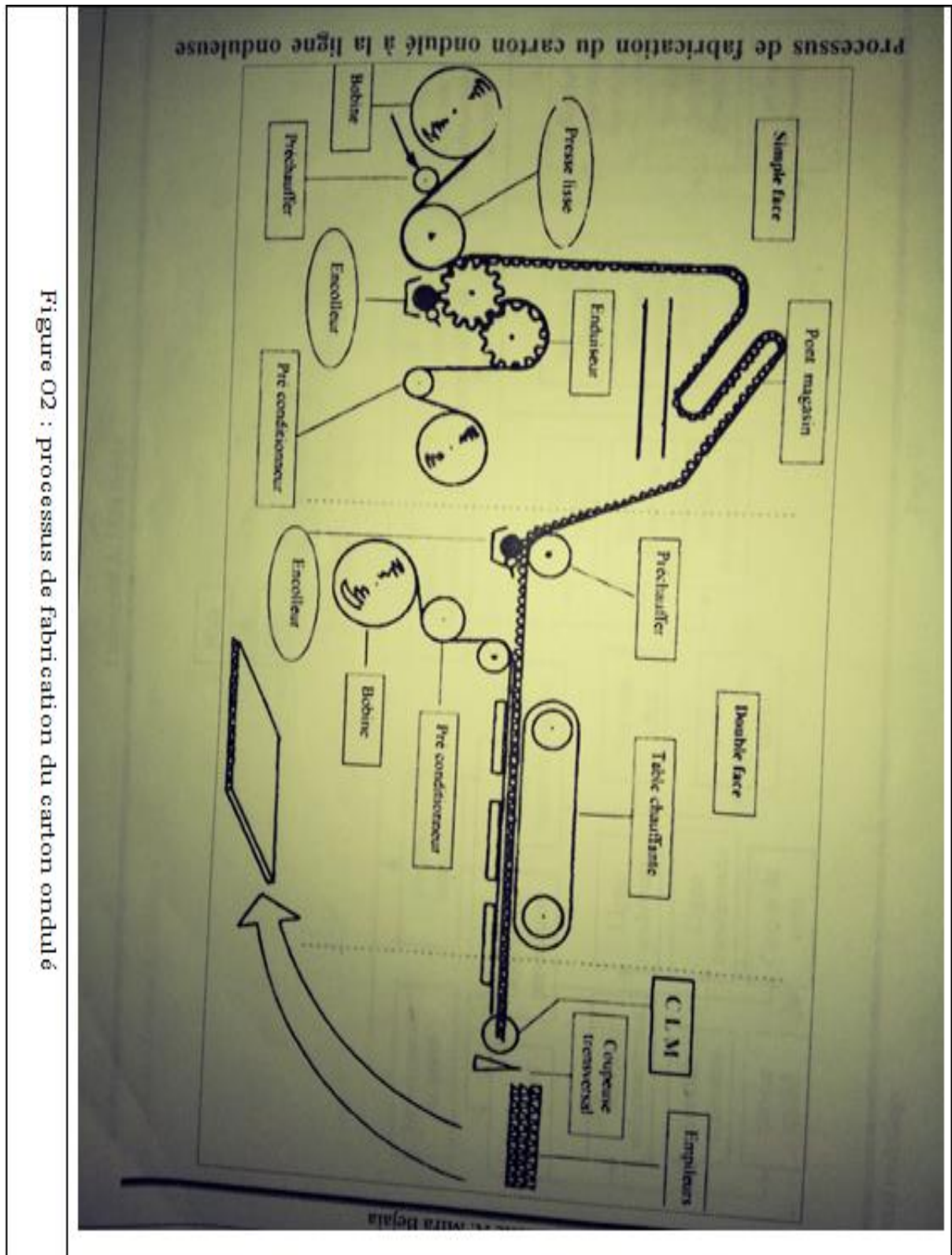


Figure 02 : processus de fabrication du carton ondulé

Figure V.1: Processus de fabrication du carton ondulé.

➤ **La transformation :**

❖ **La machine Martin 618**

La machine Martin 618 est une ligne de production rotative de formage de carton importée d'une capacité de 26000 C/h. Quelle que soit la vitesse de la ligne, la distance entre les

Chapitre 5: Présentation du processus de fabrication, transformation du carton ondulé Et Simulation de la machine 618

feuilles est constante : c'est la longueur de répétition, qui correspond à la distance parcourue par le carton en un cycle machine.



Figure V.2: Vue de la machine 618.

Constitution de la machine :

La machine Martin 618 est constituée de six compartiments qui sont :

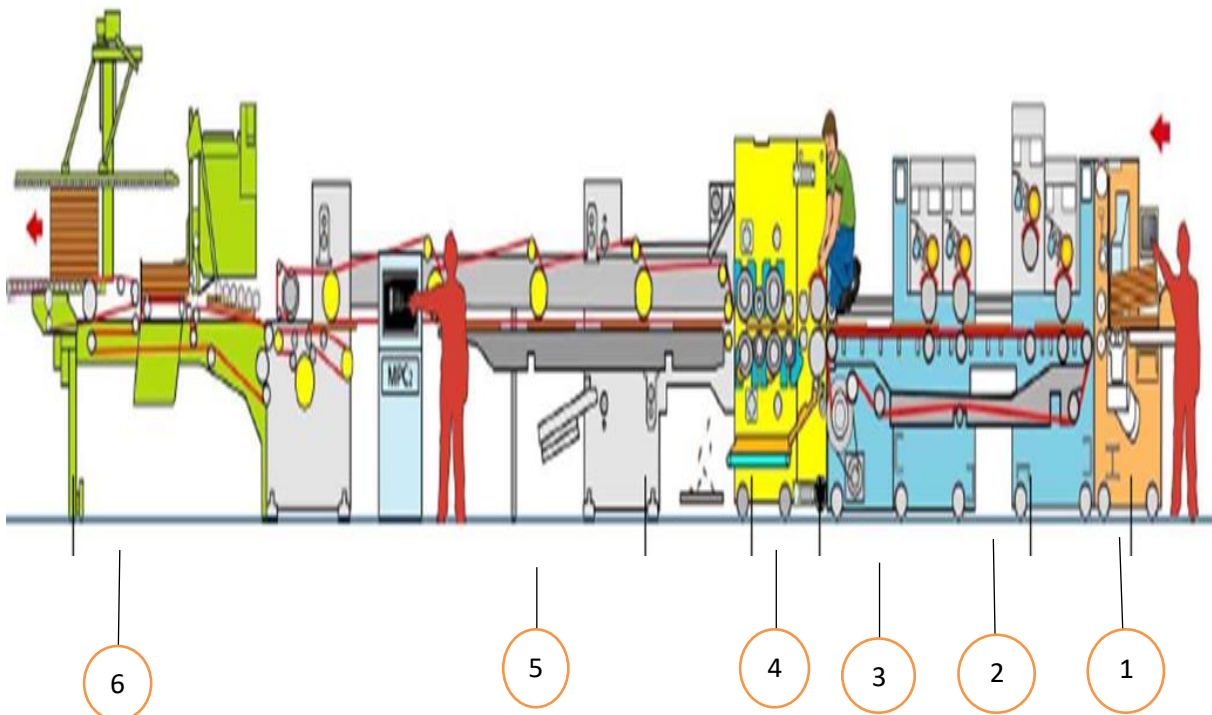


Figure V.3: Composants de la machine 618.

1) Margeur :

Le margeur est le premier compartiment de la machine 618 ; sa fonction est d'introduire les plaques du carton une par une tout au début du cycle de transformation à l'aide des roues de marges et les cylindres entraineurs.

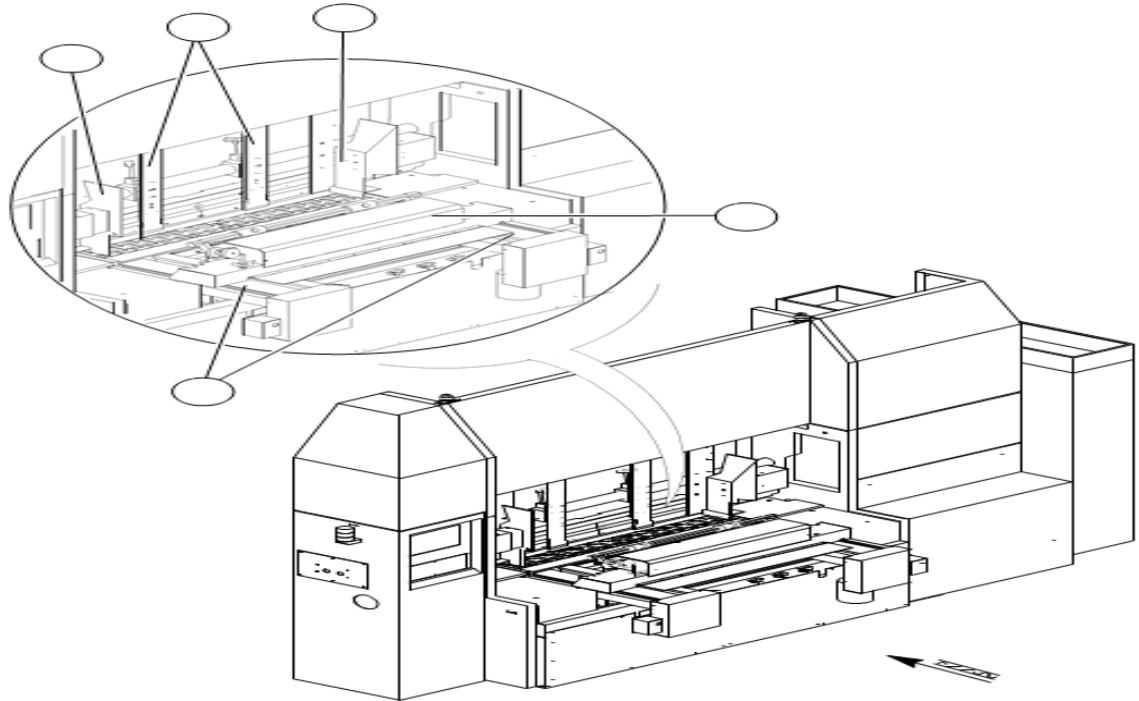


Figure V.4: Vue de face de margeur.

2) La quarto (04 imprimantes) :

Cet élément permet l'impression et le transfert des plaques vers l'élément aval qui est constitué de 4 imprimantes dont chacune ne peut sélectionner qu'une seule couleur à la fois.

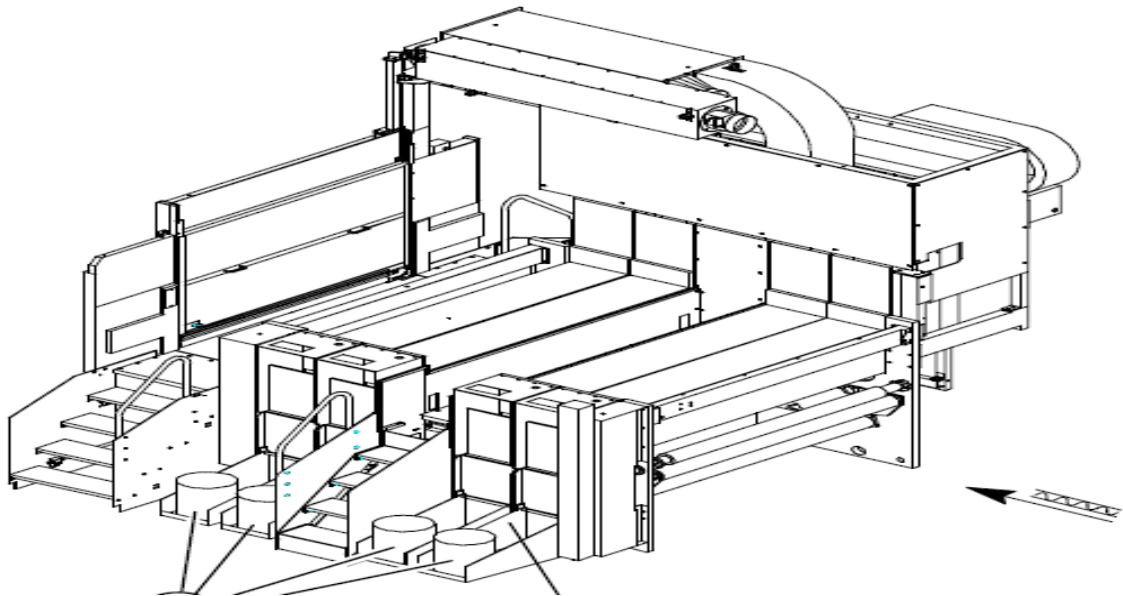


Figure V.5: Vue de face des imprimantes.

3) Découpeur :

Les feuilles de carton peuvent être découpées en différentes formes, qui peuvent ensuite être transférées en aval à l'aide de cette méthode.

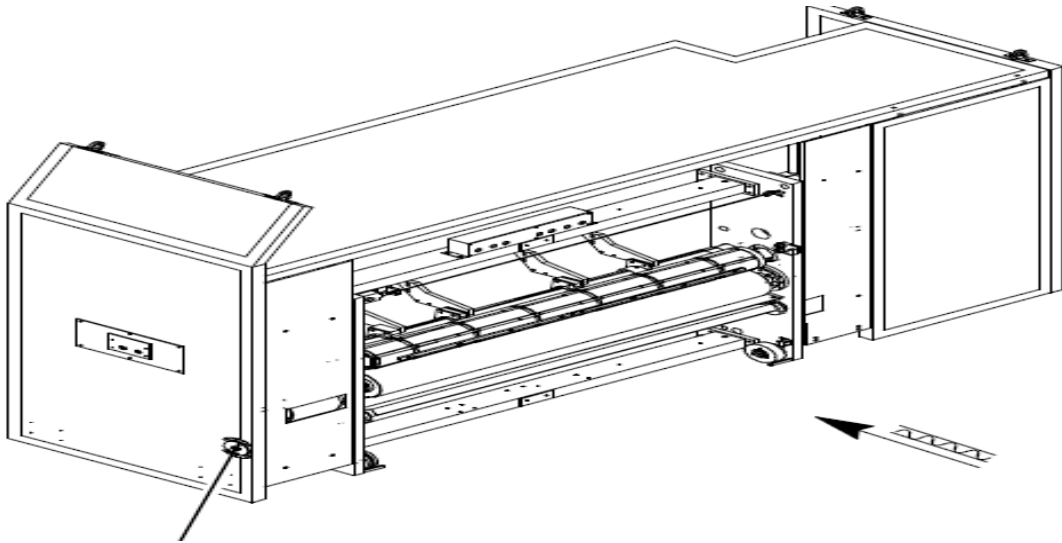


Figure V.6: Vue de face de découpeur.

4) Slotter :

Ce compartiment assure les fonctions suivantes :

- Refouler (rainer).
- Ecraser la patte de collage.
- Refendre (entailler).
- Transporter les plaques de carton dans l'élément aval.

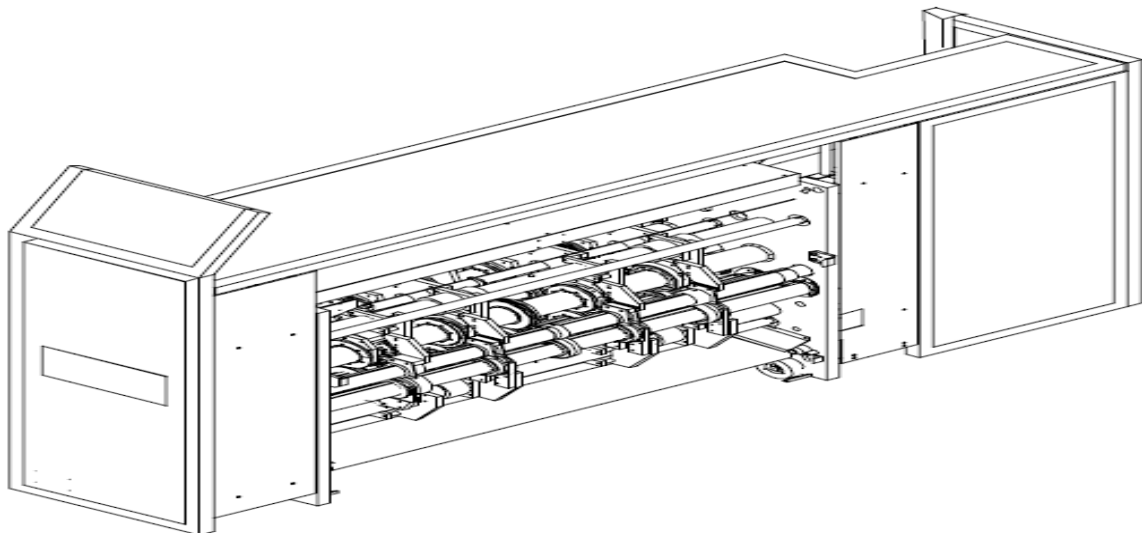


Figure V.7: Vue da face de Slotter.

5) Plieuse colleuse :

Cet élément permet :

- Le pliage des plaques de carton.
- Collage de la patte
- Assure la géométrie de la caisse

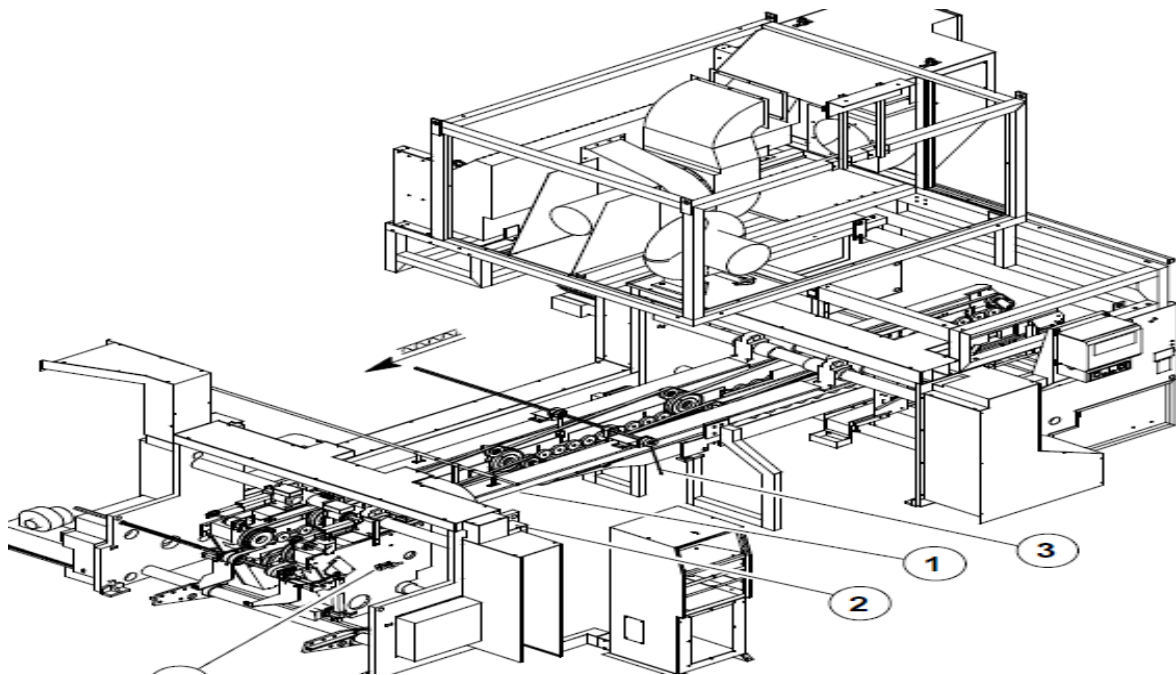


Figure V.8: Vue de face de Plieuse colleuse.

6) Compteur éjecteurs :

Il permet de :

- Empiler et compter les caisses par paquets.
- Transporter les paquets dans l'élément aval.

Dans général emballage on trouve aussi d'autre machine de fabrication telle que : martin 924 (machine rotative), TMZ et master cut (machine découpe à plat)

5.2. Simulation de la machine 618 :

5.2.1. Logiciel de simulation : Automation Studio :

Automation Studio est un logiciel édité par Famic Technologies. Domaines qu'il couvre simulation, conception assistée par ordinateur (CAO), maintenance et Diagnostic et documentation du projet.

Ce logiciel est principalement utilisé par des ingénieurs dans des domaines tels que l'hydraulique, Pneumatique, Synoptique, Electricité et électrotechnique. Deux versions principales du logiciel sont fournies :

- Edition Professional, qui est un outil de modélisation et de simulation.
- Edition éducative, qui est une version modifiée de la première édition, conçue pour les établissements enseignement.

5.2.2. Version professionnelle :

➤ Conception :

Le premier volet d'Automation Studio est son volet de conception : le logiciel permet de concevoir des GRAFCET, des circuits électriques, des schémas et des dessins de façon plus générale.

Il comprend une bibliothèque de symboles pour intégrer des éléments normalisés dans Schémas tels que interrupteurs, générateurs, bobines, bornes et Armoires électriques pour le

volets électriques, et composants tels que moteurs, transmission, la servo-direction et des dispositifs de contrôle pour le volet hydraulique et pneumatique.

➤ **Simulation :**

Les systèmes modélisés sur Automation Studio peuvent être testés avec le logiciel avant qu'un vrai modèle ne soit construit. Les simulations réalisées ont pris en compte diverses contraintes techniques, tels que la viscosité du fluide, le transfert de chaleur, la perte de pression, etc. Au cours de cette période de modélisation, les composants utilisés deviennent animés et colorés en fonction de leur comportement pendant la simulation.

5.2.3. Version éducative :

La version éducative d'Automation Studio est un outil disposant de moins de fonctionnalités que la version professionnelle, et qui est destinée à des établissements d'enseignement et écoles de matières techniques. La modélisation et la simulation du logiciel doivent servir d'exemple et d'illustration suite à une leçon de théorie.

Les matières qui sont enseignées à l'aide du logiciel sont par exemple l'électromécanique, l'électricité et l'électronique, et les technologies industrielles plus généralement.

5.2.4. Bibliothèques :

Les bibliothèques d'Automation Studio correspondent à des ensembles de symboles (pour des normes comme ISO, IEC, JIC et NEMA). Ces éléments servent à adapter les modèles réalisés aux différentes normes requises par ces organismes.

Les bibliothèques d'Automation Studio se divisent en 14 catégories :

- Électrotechnique
- Hydraulique proportionnelle et servovalve
- Outils d'analyse de systèmes
- Pneumatique proportionnel
- Dimensionnement de composants fluides et électriques
- Design de tiroirs et de configurateurs de pompes
- Nomenclatures et rapports
- Catalogue électronique
- Diagramme échelle
- Synoptique et panneau de contrôle
- Électronique numérique
- GRAFCET
- Électricité de commande
- Simulation multi-fluide
- Aspects du logiciel

***AS Hydraulique :**

Le volet hydraulique pour Automation Studio est un aspect du logiciel conçu pour l'ingénierie des systèmes hydrauliques en particulier. Il intègre une bibliothèque de symboles spécifique. Il utilise des modélisations comme celle de Bernoulli et la méthode du gradient. C'est l'aspect principal d'Automation Studio. AS Hydraulique pour conception et simuler des circuits hydrauliques, en intégrant des éléments de thermodynamique (contraintes thermiques internes et externes) et des éléments schématiques (vue en coupe, dimension). Une sous bibliothèque d'AS hydraulique proportionnelle et servovalve introduit des éléments tels que les dispositifs de commande et de contrôle : contrôle PID, CAN bus, direction assistée.

***AS pneumatique :**

Les volets pneumatiques d'Automation Studio sont similaires aux volets hydrauliques, la différence étant que les circuits d'AS Pneumatique sont dédiés aux circuits dans lesquels circulent des gaz. En effet, les contraintes techniques qui sont prises en compte ne sont plus les mêmes : l'hydrodynamique et la mécanique des fluides ont cédé la place à la mécanique des gaz.

***AS électrique :**

Le volet électrique d'Automation Studio est utilisée pour la simulation de circuits Inclure des contraintes supplémentaires de câblage, telles que la numérotation de fils, d'utilisation de borniers, de goulottes et d'autres outils d'ingénierie électrique plus traditionnels.

5.2.5. Cas étudié :

La 618 dispose de 6 éléments fonctionnant simultanément et en continu. La première section de ce chapitre décrit ce que fait chaque compartiment. Dans cette seconde partie, nous allons déterminer le fonctionnement de cette machine par un GRAFCET et le simuler par le logiciel "Automation studio".

➤ **Cahier de charge :**

La 618 dispose de 4 boutons : verrouillage, marche, marge et arrêt. L'appui sur le bouton verrouillage provoque le verrouillage par la sortie de 5 vérins entre chaque élément avec l'élément en aval. Cette partie a été ignorée dans la simulation en raison du manque d'information (sur la structure de la machine).

Après le verrouillage, l'opérateur met la machine en marche en cliquant sur le bouton démarrage. Les éléments de la machine fonctionnent à vide sans détection du carton.

Ensuite, la matière première qui est le carton ondulé sera détectée par un capteur de niveau qui est installé sur le margeur. Cette condition est essentielle pour que le margeur laisse passer les feuilles brutes. L'opération de marge n'est activées qu'en appuyant sur le bouton "marge". L'appuie sur ce dernier, à effet d'actionner le vérin de la table du margeur qui laisse ou bloque le passage du carton et l'application des cylindres tramés des 4 imprimantes. Dans la simulation, on néglige 3 imprimantes car elles ont un fonctionnement identique. La plaque est introduite à l'imprimante. Après l'impression, les feuilles peuvent être découpées à différentes formes par le découpeur. Celui-ci est entraîné par un moteur électrique.

La plaque se présente dans le slotter, ce dernier va entailler la forme du carton et écraser la colle au moyen d'un moteur électrique ainsi transporté la plaque dans l'élément en aval. Le pliage et collage est assuré par la plieuse qui comporte un moteur électrique.

Le dernier élément de la 618 qui est le compteur éjecteurs, sert à empiler et compter les cartons utiles par paquets de 15 et évacuer vers une autre machine 'fisleuse ISB13 mano' par un tapis.

Ce processus est répété jusqu'à ce que le bouton d'arrêt soit enfoncé ou que le détecteur de niveau installer sur le margeur détecte le manque de la matière première.

Remarque :

Le logiciel "Automation studio" ne dispose pas de tapis ni de carton animé, d'où pour le comptage on peut le faire manuellement avec deux boutons de contrôles, et on néglige la détection du niveau de carton comme condition initiale.

➤ GRAFCET de bon fonctionnement :

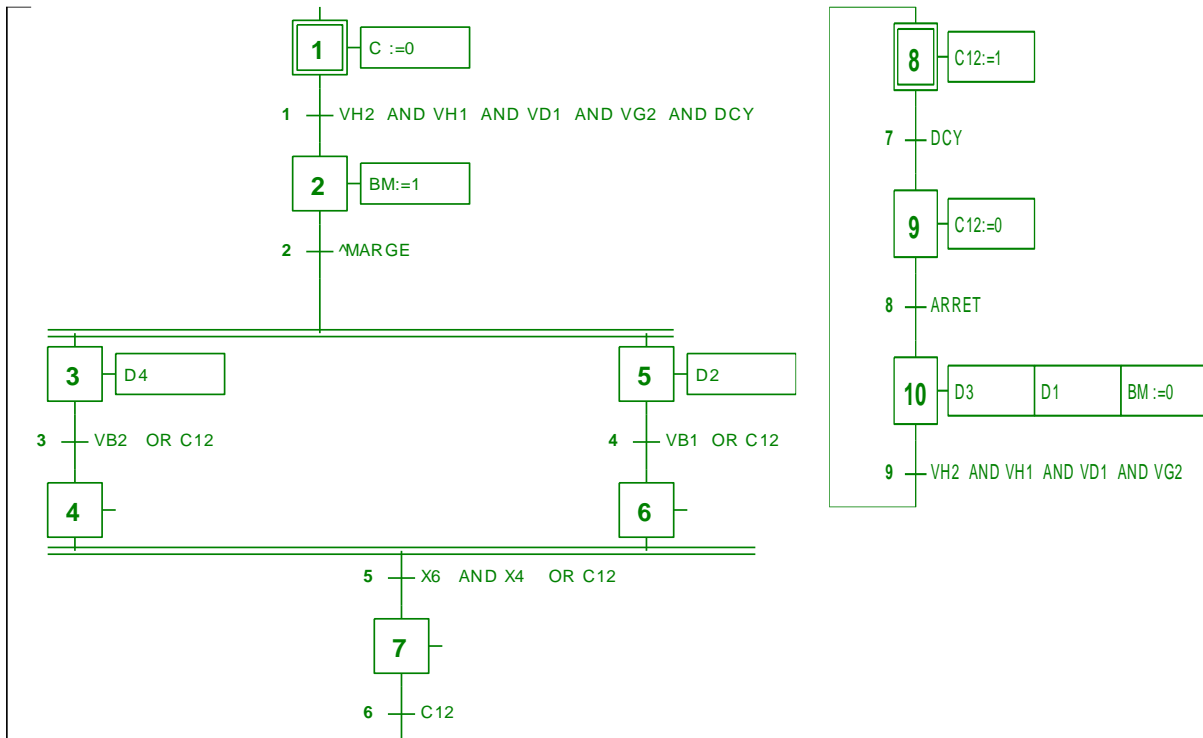


Figure V.9: GRAFCET de bon fonctionnement de la machine 618.

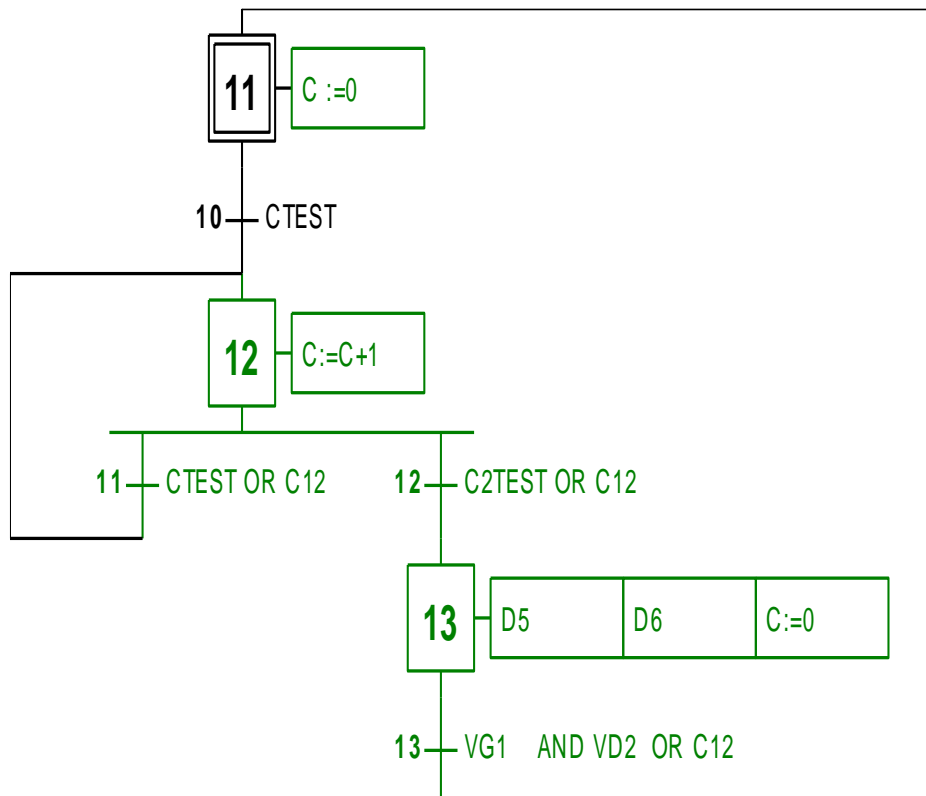


Figure V.10: GRAFCET de l'élément compteur éjecteurs de la 618.

➤ **Tables des nomenclatures :**

nomenclature	Commentaire
CTEST	Bouton d'incrémentation du compteur $c=c+1$.
C2TEST	Bouton d'initialisation du compteur si $c \geq 15$.
ARRET	Bouton d'arrêt.
DCY	Bouton marche.
MARGE	Bouton d'introduction de la plaque dans le margeur.
S1	Soupape de sécurité.
EN	Renvois (sortie et entrée).
R	Relais thermique de surcharge.
BM	Contact NO.
M1	Moteur tapis 1.
M2	Moteur tapis 2.
M3	Moteur tapis 3.
M11	Moteur du découpeur.
M12	Moteur du slotter.
V1	Vérin de la table du margeur.
V2	Vérin de l'imprimante.
V3	Vérin 1 bloqueur du compteur éjecteurs.
V4	Vérin 2 bloqueur du compteur éjecteurs.
VB1	Détecteur de proximité du vérin V1 (position basse).
VH1	Détecteur de proximité du vérin V1 (position haute).
VB2	Détecteur de proximité du vérin V2 (position basse).
VH2	Détecteur de proximité du vérin V2 (position haute).
VD1	Détecteur de proximité du vérin V3 (position droite).
VG1	Détecteur de proximité du vérin V3 (position gauche).
VD2	Détecteur de proximité du vérin V4 (position droite).
VG2	Détecteur de proximité du vérin V4 (position gauche).
NH	Détecteur de présence carton (Niveau haut).
NB	Détecteur de présence carton (Niveau bas).
D1	Sortie de la tige du vérin 1.
D2	Rentée de la tige du vérin 1.
D3	Rentée de la tige du vérin 2.
D4	Sortie de la tige du vérin 2.
D5	Sortie de la tige du vérin 3.
D6	Rentée de la tige du vérin 4.
L1	Phase 1.
L2	Phase 2.
L3	Phase 3.
Régulateur de débit	Variation du débit d'écoulement.
Compresseur principale	Compression et fourniture de l'air comprimé.
Compresseur de secours	Compression et fourniture de l'air comprimé en cas de panne.
Sécheur	Élimination d'humidité en air comprimé.
Filtre	Élimination de toutes particules.
Vanne d'isolement	Vanne régulatrice de débit (tout ou rien).
C	Compteur.
C12	Forçage.

Tableau V.2 : Tables des nomenclatures des entrées et des sorties.

➤ **Simulation avec Automation studio :**

Nous avons pu élaborer le mécanisme du système à l'aide des composants de l'atelier pneumatique. Le schéma suivant porte les différents composants tout en respectant les tables des nomenclatures. La partie entourée dans la figure, représente une partie opérative (OP) qui est un pupitre de commande.

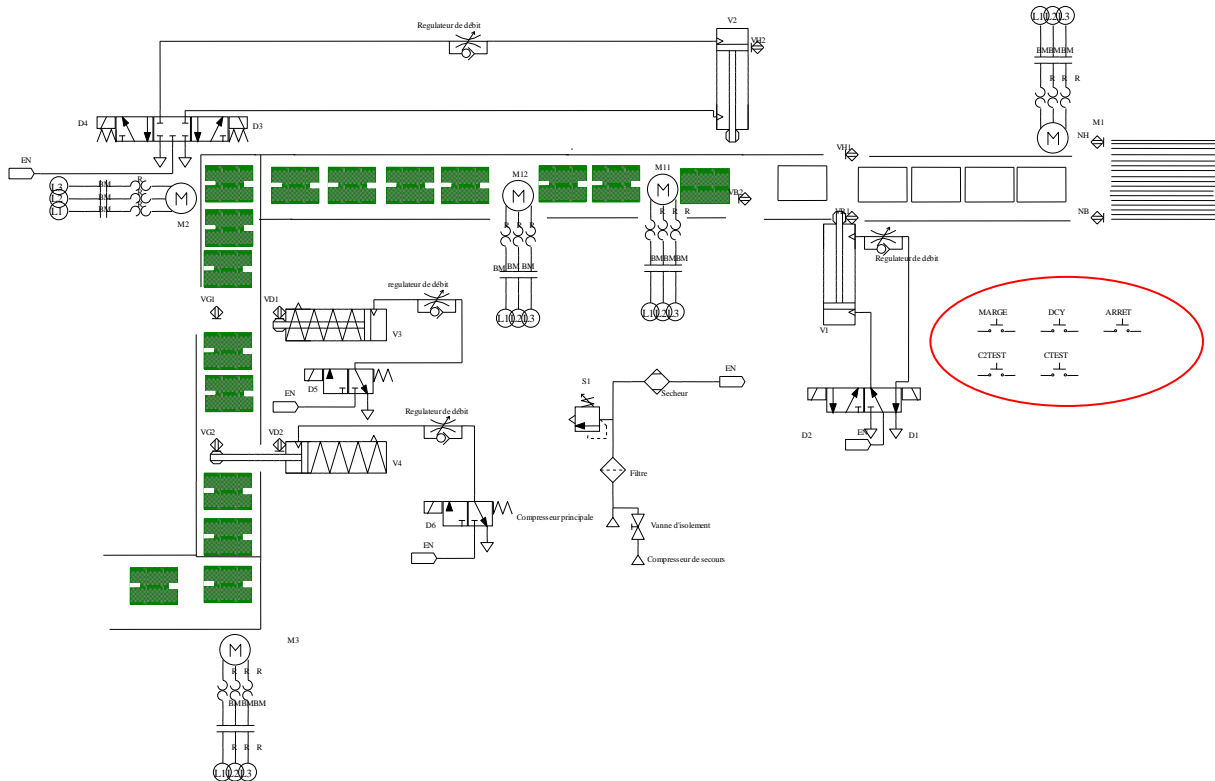


Figure V.11: Schéma structurel de la machine 618 sous le progiciel Automation studio.

5.3. Conclusion :

La réalisation de ce projet nous a permis plus exactement de mettre en œuvre nos connaissances théoriques pour la compréhension d'une machine en répondant à un cahier de charge.

Cette étude a été clôturée par la simulation de notre système qui est la machine 618 sur un logiciel technique appelé « Automation studio ».

Conclusion générale.

Les solutions dans l'utilisation d'un réseau d'air comprimé performant résident dans la production, l'emmagasiner et la distribution d'un volume d'air comprimé suffisant, égal ou supérieur à la consommation totale des outils et applications d'air comprimé.

Tout défaut de production, emmagasinage, et distribution d'air comprimé, provoquera une chute de pression excessive et un rendement médiocre de l'outillage.

Ainsi, notre travail s'est axé sur le redimensionnement de la station de production d'air comprimé pour un fonctionnement optimale pour satisfaire la demande en énergie pneumatique. Tout d'abord, nous avons calculé le débit total, le diamètre recommandé, pertes de charge, la pression de refoulement et la puissance du moteur du compresseur. De ce fait, nous avons effectué le remplacement des compresseurs avec nouvelle station, dont 3 sont fonctionnels et un quatrième de secours. Ainsi, en cas de panne qui affecte l'un des compresseurs, la production est garantie.

Avant de sélectionner les équipements comprenant les compresseurs, les sécheurs et les réservoirs de stockage, et de concevoir une centrale d'air comprimé, toutes les données nécessaires (pression, débit, température, fréquence d'alimentation, etc.) doivent être définies.

L'ensemble de l'installation est relié par des tuyaux en acier galvanisé d'un diamètre intérieur de 102 mm.

Dans la deuxième partie de notre projet, nous avons présenté le fonctionnement de la machine 618, dont laquelle, nous avons présenté ses éléments, et à partir d'un cahier de charge, nous avons élaboré un GRAFCET de fonctionnement qui nous a permis, d'obtenir une structure de simulation avec "Automation studio " version 3.0.5.

Lors de notre travail nous avons constatés que :

- Les pertes de charges au niveau de chaque ligne de production (boucle fermée) et l'une des étapes essentielles dans le dimensionnement de l'installation.

- Il existe une relation importante entre le mécanisme et l'automate pour assurer le bon fonctionnement des compresseurs cela peut se faire à travers une régulation bien précise.

Le travail qu'on a réalisé nous a permis d'avoir un contact avec le milieu industriel pour appliquer toutes nos connaissances théoriques concernant la production d'air comprimé et c'était une occasion pour s'adapter avec le mode de travail dans l'industrie.

En perspective, il est souhaitable d'automatiser le démarrage du compresseur de secours "Compair LS-75".

LISTE DES RÉFÉRENCES

- [1]ADEME : Agence de l'Environnement et la Maitrise de l'énergie France / 2013 / ISBN 2-908131-40-4.
- [2]Automatique, Informatique Industrielle, 1^{ère} et T^{em}, Collection Sciences et Techniques Industrielles, par Christian Merlaud, Jacques Perrin et Jean-Paul Trichard, Editions Dunod.
- [3]Bernard GOURMELEN et Jean-François LEONE, « Air comprimé dans l'industrie », Technique d'ingénieur 2006.
- [4]Bois Saint-Jean 15, 4102 Seraing, Belgique.
- [5]Circuit puissance pneumatique, PowerPoint de Jean-Louis Hù, téléchargeable à l'adresse suivante : <http://perso.wanadoo.fr/hu.jean-louis/ressourc/auto/telecha/puispneu.zip>
- [6]Compressed Air Manual, Atlas Copco Airpower NV, Belgium, 2010.
- [7]Cours sur la pneumatique, Lycée Lislet Geoffroy, 2TSELEC, 2004 – 2005.
- [8]DIMITRIOS NIKOLAIDIS énergie et mécanisation pneumatique Initiation à la pneumatique 2014 Rue JAQUE FAISENDIER et Call mécanisme hydraulique et pneumatique 8eme Edition/réf : 621.2/05.2
- [9]ENSPM Formation Industrie-IFP Training 2005.
- [10]Guide des Sciences et Technologies Industrielles, par Jean-Louis Fanchon, Editions Nathan.
- [11]G. Wégria, Guide de choix pour la sélection d'un sécheur d'air comprimé, 3j-Consult, Août 2013.
- [12]<http://dspace.univ-ouargla.dz/bitstream>.
- [13]<http://eduscol.education.fr/sti/system/files/images/concours-examens/834/834-schema-coupe-compresseur.png>.
- [14]https://energypedia.info/images/2/2a/Economie_d%27%C3%A9nergie_Sur_les_Installations_d%27air_Comprim%C3%A9.pdf.
- [15]<http://fr.academic.ru/dic.nsf/frwiki/414602>.
- [16]<http://frkmotorsport.forumactif.fr/t81-le-compresseur-volumetrique>.
- [17]<http://www.polo-land.fr/forum/viewtopic.php?t=9546>.
- [18]<http://www.prm.ucl.ac.be/cours/meca2755/docu/pneumatique1.pdf>
- [19]<https://www.thermexcel.com/french/ressourc/aircomp.htm#:~:text=Dans%20la%20pratique%20on%20admet,r%C3%A9duire%20les%20consommations%20d'%C3%A9nergie>.
- [20]IVOR F. DA CUNHA hydro- one Guide de référence sur l'efficacité énergétique de l'air comprimé /2007 CEAT Technologie Inc.
- [21]JAQUE FAISENDIER et Call mécanisme hydraulique et pneumatique 8eme Edition/ref : 621.2/05.2
- [22]J. CARBONNET et M. ROQUES, Mécanique des fluides académie de Nancy-Metz.
- [23]José Roldan Viloría, Aide-mémoire de pneumatique industrielle, Traduit de l'espagnol par Stéphanie Lemièrre.
- [24]La Pneumatique dans les Systèmes Automatisés de Production, par S. Moreno et E. Peulot, Editions Educavivres. <http://perso.wanadoo.fr/edmond.peulot>
- [25]Manuel de formation TOTAL (Les compresseurs).
- [26]Manuel d'instruction Air Energie BOGE.
- [27]MARCO CALEFFI Hydraulique (8), perte de charge linière. Dans les installations France La Masaltière Quartier Pélingron 26120 Montmeyran octobre 2015.
- [28]MICHAEL BAHR, ERWIN RUPPELT, KAESER, constructeur de compresseur et de déférent dispositif de traitement d'air comprimé Postfach 2143 –96410 Coburg – Allemagne.
- [29]OLIVER SONNENTAG, Notions de base de l'atmosphère (effets, composition, structure, histoire) janvier 2012
- [30]Processs.Free.Fr.

- [31]Renaud Gicouel, Système énergétique Tome1 : Méthodologie d'analyse, Bases de thermodynamique, Composant Thermooptim.
- [32]SAMI REKIK. Circuits pneumatiques. (Conception et maintenance). Mars 2016.
- [33]Thierry DESTOOP Compresseurs volumétriques Ingénieur de l'École Universitaire d'Ingénieurs de Lille (EUDIL).

Annexes.

Annexe 1

Débit d'air	Longueur des tuyaux en mètres									
	l/s	25	50	75	100	150	200	300	400	500
10	16	18	20	21						
20	21	24	26	27	30					
30	24	28	30	32	34	36	39			
50	29	33	38	41	44	47	51			
75	33	39	42	44	48	51	55	58	61	
100	37	43	46	49	53	56	61	65	68	
125	41	47	50	53	58	61	67	70	74	
150	43	50	54	62	66	71	75	79	83	
200	48	55	60	64	69	73	79	84	88	
300	56	64	70	74	80	85	92	97	102	102
400	62	71	77	82	89	94	102	108	113	113
500	68	78	83	89	97	102	111	117	123	123
600	72	83	90	95	103	109	119	126	131	131

Annexe 2

Coefficient de pertes de charges des coudes

A_1 est exprimé en fonction de δ° sur le graphique a) ou approximativement dans le tableau 6.2.

Tableau 6-2

δ°	$< 70^\circ$	90°	$> 100^\circ$
A_1	$0,9 \sin \delta^\circ$	1,0	$0,7 + 0,35 \frac{\delta^\circ}{90^\circ}$

B_1 est exprimé en fonction de R_0/D_H sur le graphique b) ou approximativement dans le tableau 6.3.

Tableau 6-3

R_0/D_H	0,5 - 1,0	$> 1,0$
B_1	$\frac{0,21}{\left(\frac{R_0}{D_H}\right)^{2,5}}$	$\frac{0,21}{\sqrt{R_0/D_H}}$

$\frac{a_0}{b_0}$	0,25	0,50	0,75	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
C_1	1,30	1,17	1,05	1,00	0,90	0,85	0,85	0,90	0,95	0,98	1,00	1,00

Δ^1	R_0/D_H									
	0,5 - 0,55					0,55 - 1,5				
	Re									
	3.10 ³ - 4.10 ⁴		> 4.10 ⁴		3.10 ³ - 4.10 ⁴		4.10 ⁴ - 2.10 ⁵		> 2.10 ⁵	
	k_{Re}	k_Δ	k_{Re}	k_Δ	k_{Re}	k_Δ	k_{Re}	k_Δ	k_{Re}	k_Δ
0	$45 \lambda_{Re}$	1,0	1,0	1,0	$64 \lambda_{Re}$	1,0	$64 \lambda_{Re}$	1,0	1,0	1,0
0 - 0,001	$45 \lambda_{Re}$	1,0	1,0	$1 + 0,5 \cdot 10^{-3} \Delta$	$64 \lambda_{Re}$	1,0	$64 \lambda_{Re}$	λ_Δ/λ_r	1,0	$1 + \Delta \cdot 10^3$
> 0,001	$45 \lambda_{Re}$	1,0	1,0	$\approx 1,5$	$64 \lambda_{Re}$	1,0	$64 \lambda_{Re}$	$\approx 2,0$	1,0	$\approx 2,0$

Coefficient pour le calcul des pertes de charges au niveau des coudes.

Annexe 3

5 Technical data 16 bar filters

5.1 Reference conditions

Air inlet pressure	7 bar(e)	102 psig
Air inlet temperature	20°C	68 °F
Ambient temperature	20°C	68 °F

5.2 Principal data

Maximum compressed air inlet pressure	16 bar(e)	232 psig
Minimum compressed air inlet pressure	1 bar(e)	15 psig
Minimum compressed air inlet temperature	1°C	34°F
Maximum compressed air inlet temperature for QD+	35°C	95 °F
Minimum ambient temperature	1°C	34 °F
Maximum ambient temperature for QD+ filters.	35°C	95 °F
Maximum ambient temperature for other types	65°C	149 °F
Maximum recommended pressure drop (not for QD+ filters)	0.35 bar(e)	5 psig

5.3 Specific data

DD+/PD+ filter

		DD+		PD+		
Challenge/inlet oil concentration	mg/m ³	3	10	0.1	3	10
Dry pressure drop filter element	mbar	60		75		
Wet pressure drop filter element	mbar	150	155	165	185	190
Dry pressure drop filter	mbar	85		100		
Wet pressure drop filter	mbar	170	180	190	210	215
Oil carry-over (aerosol)	mg/m ³	0.02	0.07	< 0.001	0.002	0.008
Total mass efficiency	%	99.3		99.92		
Remark		Typical installation (1)		Typical installation (1)		
Air purity class ISO 8573-1:2010		[2:-:3]		[1:-:2]		

(1) Typical installation: Compressor + refrigerant dryer/WSD + DD+ + PD+

Annexe 4

CARACTERISTIQUES TECHNIQUES GA 30+-90 (VERSIONS 50 HZ)

TYPE DE COMPRESSEUR	Variante de pression	Pression maxi du compresseur WorkPlace		Débit d'air réel (FAD)*			Puissance		Niveau de bruit**	Poids WorkPlace		Poids WorkPlace Full-Feature	
		bar(e)	psig	l/s	m³/h	cfm	kW	ch		kg	lbs	kg	lbs
GA 30+	7,5	7,5	109	99	357	210	30	50	65	626	1380	796	1755
	8,5	8,5	123	91	327	193	30	50	65	626	1380	796	1755
	10	10	145	82	294	173	30	50	65	626	1380	796	1755
	13	13	189	71	254	150	30	50	65	626	1380	796	1755
GA 37	7,5	7,5	109	116	419	247	37	60	67	683	1506	853	1881
	8,5	8,5	123	108	390	229	37	60	67	683	1506	853	1881
	10	10	145	102	367	216	37	60	67	683	1506	853	1881
GA 37+	7,5	7,5	109	122	438	258	37	50	65	902	1989	987	2176
	8,5	8,5	123	118	426	250	37	50	65	902	1989	987	2176
	10	10	145	102	366	216	37	50	65	902	1989	987	2176
GA 45	7,5	7,5	109	137	493	290	45	75	68	692	1526	900	1984
	8,5	8,5	123	129	464	273	45	75	68	692	1526	900	1984
	10	10	145	119	428	252	45	75	68	692	1526	900	1984
GA 45+	7,5	7,5	109	149	534	315	45	60	66	970	2138	1060	2337
	8,5	8,5	123	139	498	295	45	60	66	970	2138	1060	2337
	10	10	145	128	462	270	45	60	66	970	2138	1060	2337
GA 55	7,5	7,5	109	169	612	369	55	75	69	1229	2709	1329	2930
	8,5	8,5	123	159	500	336	55	75	69	1229	2709	1329	2930
	10	10	145	148	534	313	55	75	69	1229	2709	1329	2930
GA 55+	7,5	7,5	109	184	666	390	55	75	66	1358	2994	1458	3214
	8,5	8,5	123	174	624	369	55	75	66	1358	2994	1458	3214
	10	10	145	156	570	331	55	75	66	1358	2994	1458	3214
GA 75	7,5	7,5	109	226	810	478	75	100	73	1259	2776	1379	3040
	8,5	8,5	123	209	756	444	75	100	73	1259	2776	1379	3040
	10	10	145	189	684	401	75	100	73	1259	2776	1379	3040
GA 75+	7,5	7,5	109	248	894	526	75	100	68	1413	3115	1533	3380
	8,5	8,5	123	235	846	497	75	100	68	1413	3115	1533	3380
	10	10	145	210	756	445	75	100	68	1413	3115	1533	3380
GA 90	7,5	7,5	109	281	1014	596	90	125	73	1425	3142	1545	3406
	8,5	8,5	123	275	990	582	90	125	73	1425	3142	1545	3406
	10	10	145	250	900	529	90	125	73	1425	3142	1545	3406
	13	13	189	216	780	458	90	125	73	1425	3142	1545	3406

Annexe 5

Point de rosée °C	g/m³	Point de rosée °C	g/m³	Point de rosée °C	g/m³	Point de rosée °C	g/m³
+ 100	588,208	58	118,199	16	13,531	-26	0,51
98	550,375	56	108,2	14	11,987	-28	0,41
96	514,401	54	98,883	12	10,611	-30	0,33
94	480,394	52	90,247	10	9,356	-32	0,271
92	448,308	50	82,257	8	8,243	-34	0,219
90	417,935	48	74,871	6	7,246	-36	0,178
88	389,225	46	68,056	4	6,356	-38	0,144
86	362,124	44	61,772	2	5,571	-40	0,117
84	336,661	42	55,989	±0	4,868	-42	0,093
82	311,616	40	50,672	-2	4,135	-44	0,075
80	290,017	38	45,593	-4	3,513	-46	0,061
78	268,806	36	41,322	-8	2,984	-48	0,048
76	248,841	34	37,229	-12	2,156	-52	0,031
72	212,648	30	30,078	-14	1,81	-54	0,024
70	196,213	28	26,97	-16	1,51	-56	0,019
68	180,855	26	24,143	-18	1,27	-58	0,015
66	166,507	24	21,587	-19	1,05	-60	0,011
64	153,103	22	19,252	-20	0,88	-70	0,0033
62	140,659	20	17,148	-22	0,73	-80	0,0006
60	129,02	18	15,246	-24	0,61	-90	0,0001

Annexe 6

Caractéristiques techniques

SÈCHEURS PAR ADSORPTION SANS CHALEUR

TYPE DE SÈCHEUR	Débit d'air libre d'entrée 7 bar(e)(1)			Perte de charge (filtres exclus)		Raccords d'entrée/ de sortie	Dimensions des filtres (recommandé)			Dimensions						Poids	
	l/s	m ³ /h	cfm	bar	psi		Préfiltres		Filtre final	mm			po			kg	lbs
							1 µm 0,1 ppm	0,01 µm 0,01 ppm	1 µm	L	I	H	L	I	H		
CD 1*	1	4	2	0,2	2,90	1/4"	N/A	PD3	Intégré	106	172	540	7	4	21	7	15
CD 1,5*	1,5	5	3	0,2	2,90	1/4"	N/A	PD3	Intégré	106	172	590	7	4	23	8	17
CD 2*	2	8	4	0,2	2,90	1/4"	N/A	PD3	Intégré	106	172	720	7	4	28	9	19
CD 2,5*	2,5	9	5	0,2	2,90	1/4"	N/A	PD3	Intégré	106	172	830	7	4	32	10	22
CD 3*	3	11	6	0,2	2,90	1/4"	N/A	PD3	Intégré	106	172	855	7	4	33	11	24
CD 5*	5	18	11	0,2	2,90	1/2"	N/A	PD9	Intégré	149	295	640	11	6	25	19	41
CD 7*	7	25	15	0,2	2,90	1/2"	N/A	PD9	Intégré	149	295	730	11	6	28	22	48
CD 10*	10	36	21	0,2	2,90	1/2"	N/A	PD9	Intégré	149	295	875	11	6	34	25	55
CD 12*	12	43	25	0,2	2,90	1/2"	N/A	PD17	Intégré	149	295	1015	11	6	40	29	63
CD 17*	17	61	36	0,2	2,90	1/2"	N/A	PD17	Intégré	149	295	1270	11	6	50	35	77
CD 22*	22	79	47	0,35	5,08	1/2"	N/A	PD17	Intégré	149	295	1505	11	6	59	44	97
CD 25*	25	90	53	0,06	0,87	1/2"	DD32	PD32	DDp32	550	201	1233	21,7	7,9	48,5	50	110
CD 30*	30	108	64	0,085	1,23	1/2"	DD32	PD32	DDp32	550	201	1233	21,7	7,9	48,5	50	110
CD 35*	35	126	74	0,095	1,38	1/2"	DD32	PD32	DDp32	550	201	1478	21,7	7,9	58,2	60	132
CD 50*	50	180	106	0,35	5,08	1"	DD60	PD60	DDp60	550	201	1846	21,7	7,9	72,7	80	176
CD 60*	60	216	127	0,12	1,74	1"	DD60	PD60	DDp60	550	364	1233	21,7	14,3	48,5	100	220
CD 70*	70	252	148	0,16	2,32	1"	DD60	PD60	DDp60	550	364	1479	21,7	14,3	58,2	120	265
CD 80*	80	288	170	0,12	1,74	1 1/2"	DD120	PD120	DDp120	550	364	1846	21,7	14,3	72,7	160	353
CD 100*	100	360	212	0,35	5,08	1 1/2"	DD120	PD120	DDp120	550	364	1846	21,7	14,3	72,7	160	353
CD 145*	145	522	307	0,35	5,08	1 1/2"	DD150	PD150	DDp150	550	526	1846	21,7	20,7	72,7	240	529
CD 110*	110	396	233	0,12	1,74	1 1/2"	DD120	PD120	DDp120	950	728	1695	37,4	28,7	66,7	340	750
CD 150*	150	540	318	0,16	2,32	1 1/2"	DD150	PD150	DDp150	1089	848	1731	42,9	33,4	68,1	415	915
CD 185*	185	666	392	0,2	2,90	1 1/2"	DD175	PD175	DDp175	1089	848	1731	42,9	33,4	68,1	445	981
CD 250*	250	900	530	0,14	2,03	2"	DD280	PD280	DDp280	1106	960	1816	43,5	37,8	71,5	600	1323
CD 300*	300	1080	636	0,19	2,76	2"	DD280	PD280	DDp280	1173	1116	1854	46,2	43,9	73,0	650	1433
CD 330*	330	1188	700	0,1	1,45	DN80	DD 425+	PD 425+	DDp 425+	1088	1776	2537	43	69,92	99,88	950	2109
CD 400*	400	1440	848	0,1	1,45	DN80	DD 425+	PD 425+	DDp 425+	1088	1776	2537	43	69,92	99,88	1030	2287
CD 550*	550	1980	1166	0,1	1,45	DN80	DD550+	PD550+	DDp550+	1091	1884	2592	43	74,17	102	1310	2908
CD 850*	850	3060	1802	0,1	1,45	DN100	DD850+	PD850+	DDp850+	1259	2359	2655	50	92,87	104,5	2120	4706
CD 1100*	1100	3960	2332	0,1	1,45	DN100	DD1100+	PD1100+	DDp1100+	1259	2472	2637	50	97,32	103,8	2600	5772
CD 1400*	1400	5040	2968	0,11	1,60	DN125	DD1400+	PD1400+	DDp1400+	1428	2693	2576	56	106	101,4	3700	8215

Débit d'air libre aux conditions de référence.

Température de l'air ambiant : 35 °C

Humidité ambiante relative : 60 %

Pression effective d'entrée de l'air comprimé : 7 bar

Température d'entrée d'air comprimé : 20 °C (120 °C pour les modèles XD+)

Humidité d'entrée relative de l'air comprimé : 100 %

Température de l'eau de refroidissement : 26,7 °C

Annexe 7

Caractéristiques techniques

Modèle	Conditions d'entrée maximales à plein débit (temp. ambiante/ d'entrée)	Débit d'entrée avec un point de rosée sous pression (PDP) de 3 °C/37,4 °F		Perte de charge à plein débit		Consommation d'énergie		Pression maxi		Raccordements d'air comprimé	Dimensions						Poids	
	°C	l/s	cfm	bar	psi	kW	ch	bar	psi		mm	in	mm	in	mm	in	kg	lb
Refroidi par air : 50 Hz																		
FD 5	50/60	6	13	0,07	1,02	0,2	0,27	16 (1)	233 (1)	R 3/4	525,5	20,7	390	15,4	530	20,9	27	60
FD 10	50/60	10	21	0,11	1,6	0,2	0,27	16 (1)	233 (1)	R 3/4	525,5	20,7	390	15,4	530	20,9	27	60
FD 15	50/60	15	32	0,12	1,75	0,33	0,45	16 (1)	233 (1)	R 3/4	525,5	20,7	390	15,4	530	20,9	32	70
FD 20	50/60	20	42	0,12	1,75	0,41	0,56	16 (1)	233 (1)	R 3/4	525,5	20,7	390	15,4	530	20,9	34	75
FD 25	50/60	25	53	0,17	2,47	0,41	0,56	16 (1)	233 (1)	R 3/4	525,5	20,7	390	15,4	530	20,9	34	75
FD 30	50/60	30	64	0,25	3,64	0,41	0,56	16 (1)	233 (1)	R 3/4	525,5	20,7	390	15,4	530	20,9	34	75
FD 40	50/60	40	85	0,2	2,91	0,57	0,76	16 (1)	233 (1)	R 1	716	28,2	389	15,3	679	26,8	57	125
FD 50	50/60	50	106	0,2	2,91	0,54	0,72	16 (1)	233 (1)	R 1	716	28,2	389	15,3	679	26,8	58	128
FD 60	50/60	60	127	0,22	3,2	0,63	0,84	13	189	R 1	795	28,2	482	19,0	804	31,7	80	176
FD 70	50/60	70	148	0,22	3,2	0,87	1,17	13	189	R 1	795	28,2	482	19,0	804	31,7	81	178
FD 95	50/60	95	201	0,22	3,2	1,18	1,58	13	189	R 1	795	28,2	482	19,0	804	31,7	87	192
FD 120	50/60	120	254	0,11	1,6	1	1,3	14	203	1 1/2	1015	40	675	26,6	881	34,7	170	375
FD 150	50/60	150	318	0,15	2,18	1	1,3	14	203	1 1/2	1015	40	675	26,6	881	34,7	170	375
FD 185	50/60	185	392	0,22	3,19	1,4	1,9	14	203	2 1/2	1024	40,3	816	32,1	943	37,1	185	408
FD 220	50/60	220	466	0,12	1,74	1,9	2,5	14	203	2 1/2	1024	40,3	816	32,1	943	37,1	197	434
FD 245	50/60	245	519	0,18	2,61	2,1	2,8	14	203	2 1/2	1024	40,3	816	32,1	943	37,1	197	434
FD 285	50/60	285	604	0,22	3,19	2,2	2,9	14	203	2 1/2	1024	40,3	816	32,1	943	37,1	197	434
FD 310	40/50	310	657	0,23	3,3	2,8	3,75	14	203	G 3	986	38,8	850	33,5	1190	46,9	198	437
FD 310	46/56	310	657	0,23	3,3	2,8	3,75	14	203	G 3	986	38,8	850	33,5	1190	46,9	200	441
FD 310	50/60	310	657	0,23	3,3	2,9	3,89	14	203	G 3	986	38,8	850	33,5	1190	46,9	202	445
FD 410	40/50	410	869	0,21	3	3	4,02	14	203	G 3	986	38,8	850	33,5	1375	54,1	220	485
FD 410	46/56	410	869	0,21	3	4,6	6,17	14	203	G 3	1250	49,2	850	33,5	1375	54,1	240	529
FD 410	50/60	410	869	0,21	3	4,8	6,44	14	203	G 3	1525	60	850	33,5	1375	54,1	290	639
FD 510	40/50	510	1081	0,20	2,9	4,5	6,03	14	203	G 3	1250	49,2	850	33,5	1375	54,1	260	573
FD 510	46/56	510	1081	0,20	2,9	6,4	8,58	14	203	G 3	1525	60	850	33,5	1375	54,1	310	683
FD 510	50/60	510	1081	0,20	2,9	6,9	9,25	14	203	G 3	1525	60	850	33,5	1375	54,1	315	694
FD 610	40/50	610	1293	0,17	2,47	4,8	6,4	14	203	DIN100	1040	40,9	1060	41,7	1580	62,2	320	705
FD 760	40/50	760	1611	0,17	2,47	5,3	7,1	14	203	DIN100	1245	49	1060	41,7	1580	62,2	380	838
FD 760 VSD	40/50	760	1611	0,17	2,47	5,3	7,1	14	203	DIN100	1245	49	1060	41,7	1580	62,2	380	838
FD 870	40/50	870	1844	0,15	2,17	6,6	8,8	14	203	DIN150	1245	49	1060	41,7	1580	62,2	400	882
FD 870 VSD	40/50	870	1844	0,15	2,17	5,8	7,8	14	203	DIN150	1245	49	1060	41,7	1580	62,2	400	882
FD 1010	40/50	1010	2141	0,17	2,47	7,4	9,9	14	203	DIN150	1580	62,2	1060	41,7	1580	62,2	460	1014
FD 1010 VSD	40/50	1010	2141	0,17	2,47	6,6	8,8	14	203	DIN150	1580	62,2	1060	41,7	1580	62,2	460	1014