

Manipulation 2

Le compresseur

Consignes de sécurité

- De long cheveux doivent être cachés.
- Des vêtements libres (par exemple écharpe) enlevés.
- Des lunettes de protection sont obligatoires pour la manipulation 2.
- La protection oreille est obligatoire pour la manipulation 2.
- Ne pas toucher les bornes électriques sur le moteur.
- Ne pas touchez les balais du moteur électrique.
- **En cas d'accident, avertissez immédiatement l'assistant. Si une intervention des urgences est nécessaire, appelez le "7" (téléphones ULB) ou le "112".**

2.1 Introduction

Un compresseur est une machine réceptrice chargée de comprimer un gaz. Il faut distinguer les turbocompresseurs (centrifuges et axiaux où la compression est liée à l'interaction du fluide avec les aubes du rotor) des compresseurs volumétriques où la compression est liée à une variation du volume de l'enceinte contenant le gaz.

Dans le cadre de cette manipulation, nous étudierons plus particulièrement un compresseur volumétrique alternatif à pistons.

La variation du volume de l'enceinte de travail est obtenue par déplacement linéaire d'un ou plusieurs pistons dans un ou plusieurs cylindres. Le cycle de fonctionnement de ce type de machine peut être représenté dans un diagramme "pression-volume". Les phases successives sont :

- 0-1 Ouverture de l'enceinte en 0 pour **aspiration**,
- 1-2 Fermeture de l'enceinte pour la phase de **compression**,
- 2-3 Ouverture de l'enceinte pour **refoulement** vers un volume de stockage,
- 3-4 **Détente** du fluide encore contenu dans l'espace mort.

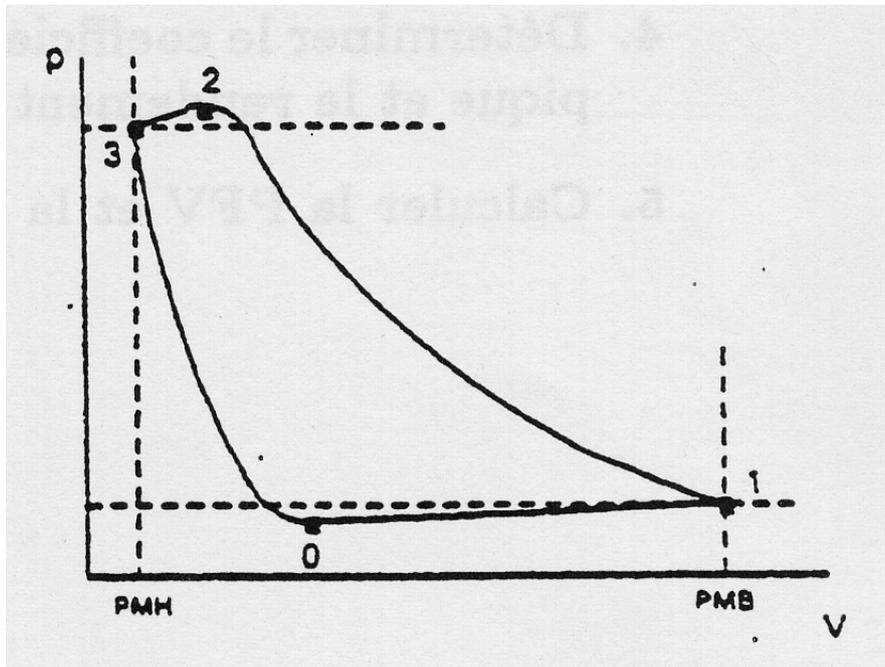


FIGURE 2.1. Cycle de compression dans une machine volumétrique.

2.1.1 But de la manipulation

Le compresseur analysé durant cette manipulation est un compresseur comportant deux cylindres et deux étages de compression. Ce laboratoire permettra d'établir et d'interpréter les variations des paramètres de fonctionnement (débit, pression, couple, rendement, ...) pour :

1. un fonctionnement à vitesse de rotation constante et pression de refoulement variable,
2. un fonctionnement à vitesse de rotation variable et pression de refoulement constante.

Pour chaque régime, on dressera un bilan énergétique complet de l'installation.

2.1.2 Conditions ambiantes

On rappelle dans cette section différentes relations utiles pour déterminer les conditions ambiantes qui influencent l'étude

Air

L'air atmosphérique est toujours un mélange d'air sec et de vapeur d'eau. La loi de Dalton lie la pression (p) à la pression partielle d'air sec (p_a) et la pression partielle de vapeur qui y est contenue (p_v):

$$p = p_a + p_v \quad (2.1)$$

Humidité absolue

Une première manière de caractériser la teneur en eau de l'air humide est d'utiliser l'humidité absolue que nous désignons par χ et qui s'obtient par le rapport entre la masse de vapeur (m_v) et la masse d'air sec (m_a) contenue dans un volume donné :

$$\chi = \frac{m_v}{m_a} \quad (2.2)$$

Humidité relative

En pratique, la composition de l'air humide est caractérisée par son humidité relative ou degré hygrométrique qui est plus facilement mesurable. L'humidité relative, désignée par ϕ_r , se définit comme le rapport, à volume donné, entre la masse d'eau contenue et la masse d'eau d'air saturé à la même température et même pression :

$$\phi_r = \left(\frac{m_v}{m_v, SAT} \right)_{p,T} \quad (2.3)$$

L'humidité relative doit nécessairement être complétée par les valeurs de pression et température pour caractériser complètement la quantité d'eau contenue dans l'air ambiant.

Si nous assimilons l'air humide à un mélange de gaz parfaits,

$$\frac{p_v}{p_a} = \frac{\left(\frac{m_v}{MM_v} \right)}{\left(\frac{m_a}{MM_a} \right)} = \chi \frac{MM_a}{MM_v} = \frac{\chi}{0,622} \quad (2.4)$$

où MM_v est la masse molaire de la vapeur d'eau (18,046 kg/Mol) et MM_a est la masse molaire de l'air sec (28,965 kg/Mol). Or, en employant la loi de Dalton, on obtient :

$$\frac{p_v}{p_a} = p_v p - p_v = \frac{\phi_r p_{SAT}}{p - \phi_r p_{SAT}} \quad (2.5)$$

La combinaison de ces deux relations donne la formule suivante liant l'humidité absolue à l'humidité relative :

$$\chi = \frac{0,622 \phi_r p_{SAT}}{p - \phi_r p_{SAT}} \quad (2.6)$$

Ces relations nous permettent maintenant de déterminer les propriétés de l'air ambiant en fonction des conditions d'humidité. Seules la constante massique et la chaleur massique isobare nous sont utiles pour le reste de la manipulation.

Constante massique de l'air humide

Si r_a et r_v sont les constantes massiques de l'air sec et de la vapeur d'eau, la constante massique de l'air humide compte tenu des lois de mélanges de gaz parfaits vaudra :

$$r = \frac{r_a + \chi r_v}{1 + \chi} \quad (2.7)$$

Compte tenu de la masse molaire de l'air sec et de la vapeur d'eau donné précédemment, on a

$$r_a = 0.28704 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \quad (2.8)$$

$$r_v = 0.46150 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \quad (2.9)$$

Comme l'humidité est souvent mesurée par un hygromètre, on peut exprimer (2.7) en terme d'humidité relative :

$$r = \frac{0.28704}{1 - \frac{0.378 \phi_r p_{SAT}}{p}} \quad (2.10)$$

Chaleur massique isobare

La chaleur massique de l'air se calcule comme tout mélange au départ de la chaleur massique de ses constituants :

$$c_p = \frac{c_{pa} + \chi c_{pv}}{1 + \chi} \quad (2.11)$$

La variation des chaleurs massiques avec la température sont données par les formules empiriques suivantes :

$$c_{pa} = 1,077 - 0.618 \left(\frac{T}{1000} \right) + 1.619 \left(\frac{T}{1000} \right)^2 + 0,551 \left(\frac{T}{1000} \right)^4 - 0.882 \left(\frac{T}{1000} \right)^5 \quad (2.12)$$

$$c_{pv} = 1,852 - 0.301 \left(\frac{T}{1000} \right) + 1.354 \left(\frac{T}{1000} \right)^2 - 0,757 \left(\frac{T}{1000} \right)^4 + 0.143 \left(\frac{T}{1000} \right)^5 \quad (2.13)$$

Pression de saturation

La pression de saturation peut se trouver dans des abaques spéciales reportant en fonction de la température et de la pression la valeur correspondante de la pression de saturation. Toutefois, dans le cadre de cette manipulation, on préférera la corrélation expérimentale suivante :

$$p_{SAT} = (1,3327 - 0.02424T)L \quad (2.14)$$

où p_{SAT} est exprimé en P_a , T en degré Celsius ($15 < T < 25$) et L représente la hauteur de Mercure lue au baromètre de Fortin.

2.2 Essai d'un compresseur biétagé à faible débit

Dans le cadre de cette manipulation, nous scinderons l'étude en deux parties:

1. Etude à vitesse de rotation constante et pression de refoulement variable où nous établirons les lois de variation du débit-masse, de la pression intermédiaire, du couple externe et du rendement isothermique global.
2. Etude à pression de refoulement constante et vitesse de rotation variable où nous établirons les lois de variation du débit-masse, du coefficient de remplissage, de la vitesse moyenne du piston, du couple externe et du rendement isothermique global.
3. Etude à régime de fonctionnement donné au cours de laquelle nous observerons le fonctionnement des deux étages, notamment du point de vue de leurs coefficient de remplissage respectifs et dresserons le bilan énergétique de l'installation.

2.2.1 Coefficient de remplissage

Le coefficient de remplissage est égal, par définition, au rapport du débit-masse réel, q_m au débit-masse théorique $q_{m,th}$, ce dernier étant calculé d'après la cylindrée V de la machine comme si celle-ci était, à chaque cycle, pleine de fluide de masse volumique identique à celle du fluide entrant dans la machine.

2.2.2 Vitesse moyenne du piston

Lorsque la machine est en rotation, le piston exécute un mouvement de va et vient qui s'effectue à une vitesse moyenne fonction de la course du piston et de la vitesse de rotation de la machine.

2.2.3 Rendement isothermique global

Comme tous les rendements, il compare la puissance réelle consommée par la machine à une puissance idéale qui, dans ce cas-ci, correspond à la puissance consommée si le fluide était comprimé de manière isotherme. Comme cette puissance "idéale" est toujours inférieure dans le cas des machines réceptrices, le rendement se définit comme :

$$\eta_{\text{isoth}} = \frac{P_{\text{isoth}}}{P_e} \quad (2.15)$$

2.2.4 Débit

L'équation de conservation du débit impose que le débit de fluide circulant dans chaque étage est le même. Ce débit est évidemment fonction de la capacité de chacune des chambre de compression des étages et de la vitesse de rotation de l'arbre de la machine. La pression d'aspiration de chaque étage joue également un rôle puisqu'elle influence la masse volumique du fluide à l'entrée de chacun de ces étages. Comme il doit y avoir adaptation entre étage au niveau du débit, la totalité du volume de la chambre de compression ne peut être remplie et on a coutume de définir des coefficients de remplissage, notés σ_{BP} pour l'étage basse pression et σ_{HP} pour le niveau haute pression :

$$\frac{60q_m}{N} = \sigma_{\text{BP}}\rho_{\text{BP}}V_{\text{BP}} = \sigma_{\text{HP}}\rho_{\text{HP}}V_{\text{HP}} \quad (2.16)$$

2.2.5 Bilan mécanique

La puissance mécanique fournie par le moteur d'entraînement est en partie utilisée pour comprimer le fluide (puissance indiquée) et en partie perdue par frottement dans les roulements. Une technique couramment employée consiste à considérer que ces pertes sont une fonction linéaire de la vitesse.

2.2.6 Bilan thermique

Comme dans toutes les machines réelles, la compression n'est pas isotherme.

Il convient dès lors de répartir la puissance thermique disponible, appelée aussi puissance indiquée, entre le flux de chaleur dégagé par la compression et qui est transmis à l'extérieur par la chemise du piston (soupapes fermées) ϕ_c et la chaleur comprise dans l'air évacué en fin de compression.

Pour déterminer ϕ_c , il faut définir le chemin thermodynamique suivi lors de la compression. Pour ce faire, on utilise une loi polytropique :

$$pv^n = \text{Const} \quad (2.17)$$

qui revient à déterminer la valeur de l'exposant n . Cet exposant peut-être déterminé dans le cas des gaz parfaits par le rapport entre les températures de refoulement et d'aspiration.

2.3 Description de l'installation

2.3.1 Compresseur

Le compresseur comporte deux étages constitués par deux cylindres verticaux, l'un pour l'étage basse-pression, l'autre pour l'étage haute pression.

L'aspiration et le refoulement sont commandés par des clapets automatiques, c'est à dire que leur ouverture est commandée par une différence de pression entre la chambre et la pression règnant dans la conduite d'aspiration/refoulement.

Pour essayer que la compression se rapproche le plus possible de la compression isotherme, un refroidissement de la chemise du piston ainsi que de la conduite intermédiaire est assuré par

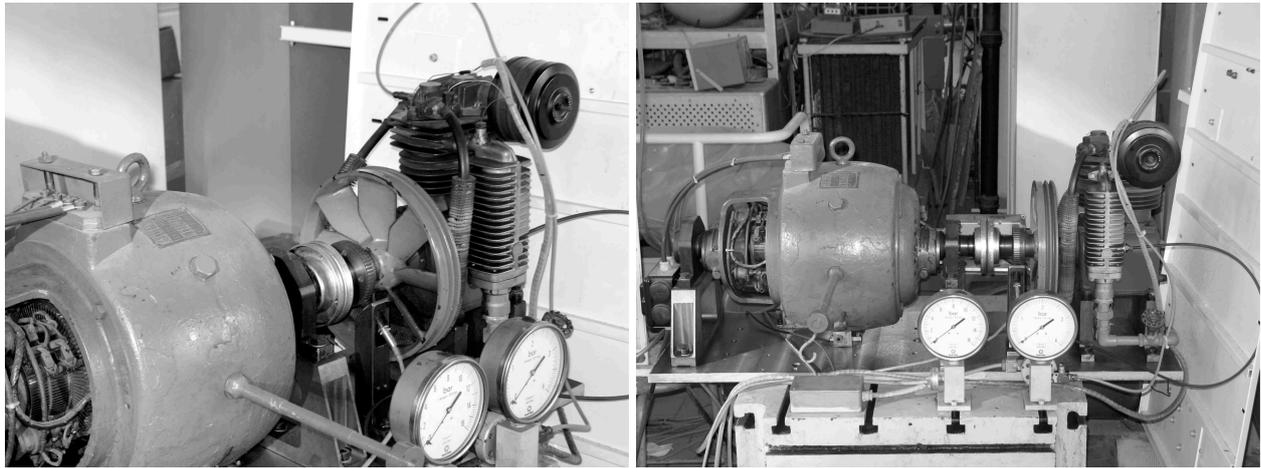


FIGURE 2.2. Installation expérimentale d'étude du compresseur.

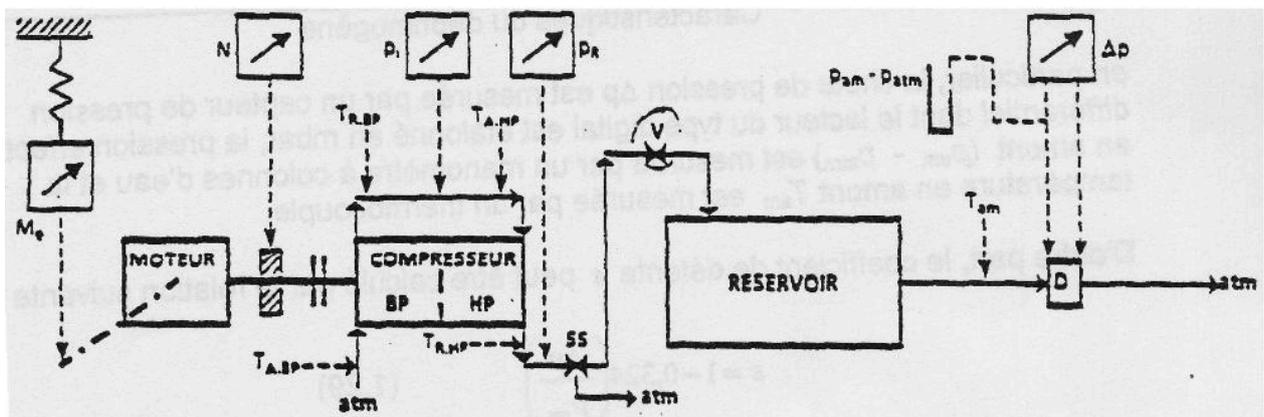


FIGURE 2.3. Schéma de l'installation.

des ailettes de refroidissement. Le volant de la machine dont la fonction principale est régulariser la vitesse de rotation assure aussi un brassage de l'air (comme un ventilateur) participant aussi à ce refroidissement. A l'aspiration le compresseur est équipé d'un filtre de protection contre les poussières. L'entraînement de la machine est assuré par un moteur à courant continu dont la vitesse de rotation est réglée par la tension d'alimentation.

Caractéristique	Distance
Course	60,0 mm
Alésage de l'étage Basse pression	85,2 mm
Alésage de l'étage Haute pression	43,2 mm

TABLE 2.1. Caractéristiques des Chambres.

Les principales caractéristiques des chambres de compression sont reprises au tableau 2.1.

2.3.2 Equipements de mesures

Le système est destiné à fournir de l'air sous pression à un réservoir. Ce réservoir, ainsi que les canalisations sont soumis aux contraintes générées par la pression. La pression est donc limitée pour des questions de résistance mécanique des matériaux qui composent l'installation. Il faut donc installer des soupapes qui assurent un refoulement de l'air à l'atmosphère dans le cas de

dépassement d'une pression seuil que l'on règle en-dessous de la pression limite de l'installation. Dans l'installation du laboratoire, la soupape de sécurité (S.S.) se trouve à la sortie de l'étage haute pression ($p_{\text{limite}} = 12 \text{ bar}$).

Remarquez qu'aucune vanne ne peut se trouver en amont de la soupape qui assure la sécurité de l'ensemble.

Pour faire varier la pression de refoulement de l'installation, on a placé une vanne V. Plus la vanne est fermée, plus la chute de pression à ses bornes est importante, ce qui implique une augmentation de la pression de refoulement (la pression aval étant fixée par la pression atmosphérique). Le circuit se termine par un débitmètre chargé de mesurer le débit d'air circulant dans l'installation. Cet appareil est de type déprimogène, c'est à dire qu'il mesure la différence de pression entre l'amont et le diaphragme. La pression est indiquée en mbar sur un cadran digital. La mesure du débit-masse nécessiterait aussi la connaissance de la densité de l'air en amont du débitmètre, et donc de la température en amont. Cette température renseignée par T_{am} sur le schéma de l'installation est proche de la température ambiante, si bien que la densité est proche de la densité de l'air aux conditions atmosphériques. En notant Δp la différence de pression, on a

$$q_m = \alpha \epsilon S \sqrt{2 \Delta p \rho_{am}} \quad (2.18)$$

avec:

- Coefficient de débit : $\alpha = 0,61$
- Section au col : $S = 2,94 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$
- Coefficient de détente : $\epsilon = 1 - 0,324 \left(\frac{\Delta p}{p_{am}} \right)$

La mesure de la vitesse de rotation est effectuée au niveau de l'arbre sortant du moteur. Cet arbre est équipé d'une roue dentée comportant 60 dents. Un capteur électromagnétique compte le passage des dents dans un certain intervalle de temps. Ces données peuvent être ainsi traduites en terme de vitesse de rotation.

La mesure des puissance nécessite aussi la mesure du couple exercé sur cet arbre puisque

$$p_{\text{mec}} = \omega C \quad (2.19)$$

Un capteur dynamométrique digital indique la valeur du couple en $[\text{kg} \cdot \text{m}]$ (attention à la conversion d'unités).

Une double mesure de pression est effectuée au niveau de la canalisation intermédiaire reliant les deux étages et au niveau du refoulement. Ces pressions sont mesurées par des capteurs et transmises à des appareils digitaux où on indique la pression en bar. Des manomètres de type Bourdon (précision) permettent une vérification.

Enfin quatre thermocouples prennent la température du fluide au cours du cycle aux endroits suivants :

- T_{ABP} , la température d'aspiration de l'étage basse-pression
- T_{RBP} , la température de refoulement de l'étage basse-pression
- T_{AHP} , la température d'aspiration de l'étage haute-pression
- T_{RHP} , la température de refoulement de l'étage haute-pression

2.4 Mode opératoire

2.4.1 Fonctionnement à vitesse de rotation constante

Pour étudier le fonctionnement du compresseur à vitesse de rotation constante, on réglerà la vitesse de rotation du moteur à une vitesse proche de 1100 tr/min. L'essai débutera avec la vanne de réglage V pleinement ouverte (pression de refoulement minimale).

En fermant progressivement cette vanne, on augmente ainsi la pression de refoulement du compresseur. A chaque point de mesure, la vitesse de rotation du moteur sera ajustée sur 1100 tr/min. On veillera à ne pas dépasser une pression de refoulement de 10 bar et à avoir suffisamment de points de mesure pour établir les lois de variations recherchées (échelon de 0,5 bar entre chaque points).

Pour chaque point de mesure, on relevera :

- le couple C
- la pression intermédiaire
- la pression de refoulement
- chute de pression dans le débitmètre

Avant l'arrêt de l'installation, toujours ouvrir la vanne de réglage au maximum de façon à avoir une pression de refoulement la plus faible possible.

2.4.2 Fonctionnement à pression de refoulement constante

Après démarrage de l'installation, on réglerà la vanne V de façon à stabiliser la pression de refoulement à 9 bar. On fera varier la vitesse de rotation de 800 à 1250 tr/min par échelon de 50 tr/min. Comme l'augmentation de la vitesse de rotation a également des effets sur la pression de refoulement, il est conseillé de :

1. réaliser le point de refoulement de consigne choisie à la plus basse vitesse de rotation, et ce en agissant à la fois sur le potentiomètre de réglage de la vitesse de rotation et sur la vanne.
2. une fois le premier point de mesure réalisé, augmenter la vitesse de 25 à 30 tr/min et rétablir la pression de consigne par action sur la vanne.

Pour chaque point de mesure, on reprendra les mesures suivantes dans un tableau:

- vitesse de rotation N en tr/min
- le couple C
- la chute de pression dans le débitmètre

Avant l'arrêt de l'installation, toujours ouvrir la vanne de réglage au maximum de façon à avoir une pression de refoulement la plus faible possible.

2.5 Préparations, mesures, résultats

1. Prédeterminations et résultats théoriques : Dériver la formule du rendement isotherme en fonction des différents éléments mesurés. Il est permis de voir le compresseur comme un "black box", système ouvert.
2. Valeurs à mesurer :

- (a) Température et pression atmosphérique
 - (b) Le couple, la pression intermédiaire, la pression de sortie, la perte de charge dans le diaphragme, la température et la pression en amont du compresseur, pour la mesure à vitesse de rotation constante.
 - (c) Le couple, la pression intermédiaire, la vitesse de rotation, la perte de charge dans le diaphragme, la température et la pression en amont du compresseur, pour la mesure à pression de refoulement constante.
3. Résultats expérimentaux :
- (a) Pour les mesures à vitesse de rotation constante :
 - i. Portez en graphique le débit massique en fonction de la pression de refoulement
 - ii. Portez en graphique la pression intermédiaire en fonction de la pression de refoulement
 - iii. Portez en graphique le couple en fonction de la pression de refoulement
 - iv. Portez en graphique le rendement isotherme en fonction de la pression de refoulement
 - v. Analysez les courbes et expliquez-en l'allure
 - (b) Pour les mesures à pression de refoulement constante :
 - i. Portez en graphique le coefficient de remplissage σ_{BP} en fonction de la vitesse de rotation
 - ii. Portez en graphique le couple en fonction de la vitesse de rotation
 - iii. Portez en graphique le rendement isotherme en fonction de la vitesse de rotation
 - iv. Analysez les courbes et expliquez-en l'allure
 - (c) Pour un point de fonctionnement, calculez les exposants polytropiques des transformations basse-pression et haute-pression