

Chapitre 05 : Suralimentation des MCI par turbocompresseur

5.1 Introduction

Les deux principaux objectifs du concepteur de moteurs sont d'améliorer la puissance et de réduire les émissions polluantes dans les gaz d'échappement. La puissance d'un moteur atmosphérique dépend principalement des cinq facteurs suivants:

1. Quantité d'air admis dans le cylindre;
2. La vitesse du moteur;
3. Quantité de carburant admise et ses caractéristiques de combustion;
4. Rendement thermique du moteur.

Les deux derniers facteurs sont interdépendants et des ajustements majeurs peuvent être nécessaires pour obtenir une combustion complète. La puissance utile du moteur est donnée par :

$$P = \frac{p_{eff} * V_T * N}{60000 * n} \quad [kW]$$

P_{eff} : Pression effective moyenne ; [kPa]

n : Facteur ; pour moteur à quatre temps $n=2$ et moteur à deux temps $n=1$;

N : Régime du moteur; [tr/min]

V_T : Volume balayé ou la cylindrée du moteur.

La méthode la plus préférée pour augmenter la puissance de sortie consiste à augmenter la pression effective moyenne. Ceci peut être réalisé en fournissant de l'air ou un mélange air-carburant à une pression supérieure à la pression atmosphérique. Cela augmentera la densité, donc la masse d'air ou de mélange air-carburant induit pour la même cylindrée. Cela augmentera à son tour la puissance de sortie du moteur.

Cette méthode consiste à fournir de l'air ou un mélange air-carburant à une pression plus élevée que la pression à laquelle le moteur aspire naturellement, au moyen d'un dispositif de suralimentation.

5.2 Suralimentations

L'objectif principal des constructeurs automobiles est d'augmenter la puissance de sortie, pas d'améliorer le rendement, bien que le rendement puisse en bénéficier. Ils utilisent de plus en plus de **turbocompresseurs** et de **compresseurs** pour produire plus de puissance avec moins de carburant.

La principale différence entre un **turbocompresseur** et un **compresseur** est son mode d'entraînement. Dans un **compresseur**, il est entraîné mécaniquement à partir de l'arbre moteur (vilebrequin) accouplé par courroie. Le **turbocompresseur est entraîné par les gaz d'échappement**. L'échappement passe par une turbine, qui à son tour fait tourner le compresseur.

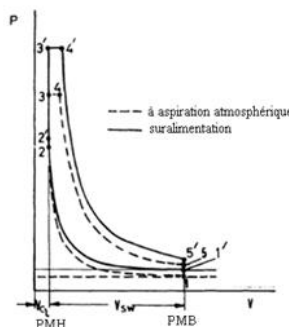
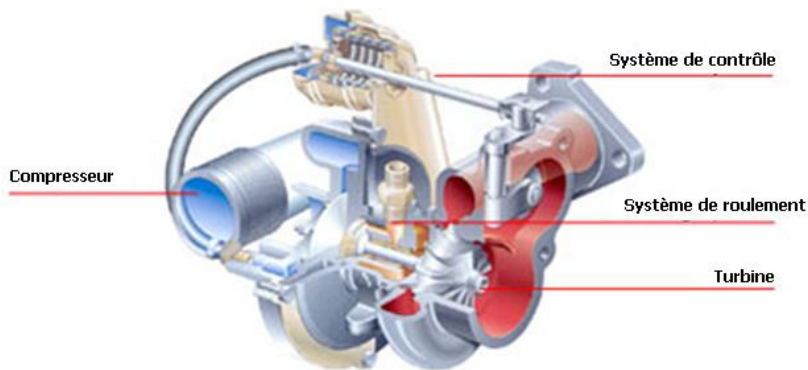
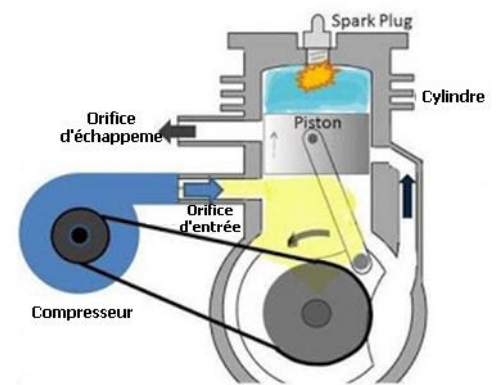


Fig. 1 : comparaison des moteurs suralimenté et à aspiration naturelle



Suralimentation par turbocompresseur

1. Utilise les gaz brûlés d'échappement pour son énergie, qui traverse une turbine qui fait tourner le compresseur ;
2. Il n'est pas directement connecté au moteur ;
3. Possède des équipements altérant le smog qui réduisent les émissions de carbone



Suralimentation par Compresseur

1. Utilise le vilebrequin pour son énergie ;
2. Il est directement relié au moteur par une courroie ;
3. Il ne possède pas d'équipement anti pollution. Par conséquent, le smog est émis par un compresseur.

5.2.1 Suralimentation par Compresseur

5.2.1 Différents type des compresseurs

Il existe principalement deux types de compresseur. Le premier est connu sous le nom de compresseur à déplacement positif et l'autre est connu sous le nom de compresseur dynamique. La différence fondamentale entre les deux est que le compresseur à déplacement positif maintient un niveau de pression constant à tous les régimes du moteur, tandis que le compresseur dynamique fournit une pression croissante avec une vitesse croissante. Ces compresseurs sont subdivisés comme indiqué ci-dessous.

5.2.1.1 Compresseur à déplacement positif

a) Compresseur Root

Cette conception comporte deux rotors qui tournent dans le sens opposé (l'un dans le sens des aiguilles d'une montre et l'autre dans le sens inverse) pour comprimer l'air. Selon la conception du rotor, ce compresseur est en outre subdivisé en plusieurs types : rotor à deux lobes, rotor à trois lobes, rotor à quatre lobes, etc.



Avantage :

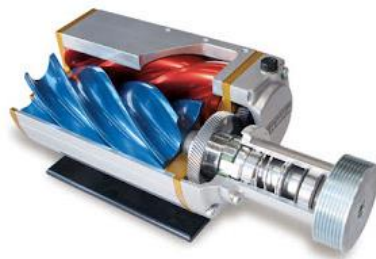
- Conception simple
- Idéal pour les moteurs à haute vitesse

Inconvénient:

- Flux d'air pulsé à basse vitesse.
- Moins d'efficacité (rendement).
- Poids lourd.
- Chaleur excessive en raison du frottement.
- Fournir la même quantité d'air à bas et haut régime.

b) Compresseur à double vis :

Comme son nom l'indique, ce type de compresseur a deux vis qui tournent en directions différentes. L'une des vis tourne dans le sens horaire et l'autre dans le sens anti-horaire. Le fonctionnement de ce compresseur est le même que celui du type Root. Il aspire également l'air d'un côté et l'a livré à l'orifice de sortie. Cet appareil fournit un flux d'air plus doux comparativement au style racine.



Avantage :

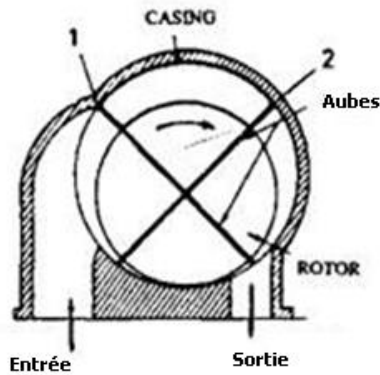
- Aucun problème de fuite arrière.
- Fournit un flux d'air plus doux.

Inconvénient:

- Génération de chaleur élevée due au frottement.
- Bruyant en fonctionnement.

c) Compresseur à aubes

Le compresseur à aubes, dans sa forme la plus simple, se compose d'un carter cylindrique. Un rotor cylindrique portant des aubes saillantes est monté excentriquement dans le carter de sorte que l'espace entre le rotor et le carter a été divisé en un certain nombre de compartiments. Le volume de ces compartiments varie à mesure que le rotor tourne.



- **Inconvénient**

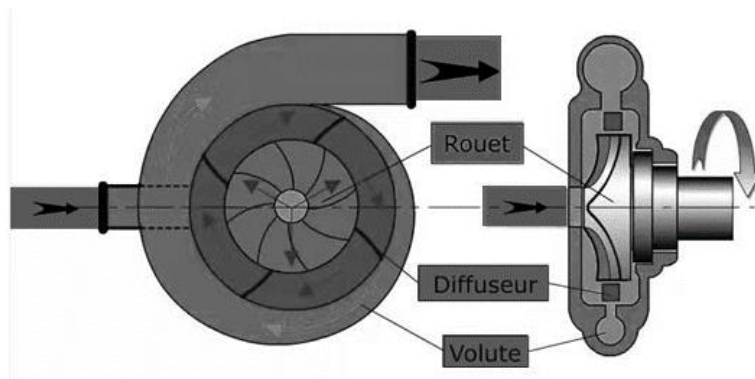
Nécessite une lubrification en raison de l'action de glissement des aubes dans le rotor.

5.2.1.2 Compresseur dynamique :

Ce type de compresseur augmente la pression d'air à mesure que le régime du moteur augmente. L'effet de suralimentation dans ce type dépend fortement du régime moteur.

a) Compresseur centrifuge

Comme son nom l'indique, ce type utilise la force centrifuge pour comprimer l'air. L'action centrifuge agit sur cet air qui augmente son énergie cinétique et la délivre à un diffuseur. L'air entrant dans le diffuseur a une vitesse élevée à basse pression. Le diffuseur convertit cet air basse pression haute vitesse en air haute pression basse vitesse. Cet air haute pression est ensuite envoyé vers le moteur.



Avantage :

- Il est de petite taille.
- Haute efficacité (rendement).

Inconvénient :

- La quantité d'air n'est pas fixe.

5.2.2 Suralimentation par turbocompresseur

5.2.2.1 Adaptation moteur - turbocompresseur

Un turbocompresseur se compose d'une roue de compresseur et d'une roue de turbine à gaz couplées ensemble par un arbre plein et qui est utilisée pour augmenter la pression d'air d'admission d'un moteur à combustion interne. La turbine à gaz extrait l'énergie des gaz d'échappement et l'utilise pour entraîner le compresseur et surmonter les frottements (figure2).

Les composants du turbocompresseur sont :

- Le carter central ou support, comprenant les paliers, le rotor complet équilibré, le système de graissage et de refroidissement.
- L'étage turbine où les gaz de combustion en provenance des cylindres du moteur sont canalisés vers une roue axiale. Ces gaz se détendent et mettent en rotation la roue de la turbine, avant d'être rejetés vers la conduite d'échappement. Cette partie du turbocompresseur est soumise à des températures élevées ($> 650^{\circ}\text{C}$), ce qui nécessite l'emploi de matériaux spéciaux (fonte GS pour le carter et acier allié au nickel ou maintenant céramique pour la turbine) et d'un refroidissement efficace par circulation d'huile et quelque fois d'eau.
- L'étage compresseur : l'air pénètre axialement dans le compresseur, est mis en vitesse par la roue de compresseur, puis dévié de 90° vers le diffuseur qui transforme l'énergie cinétique acquise en pression d'air, dirigée vers le collecteur d'admission.
- Ensemble tournant : l'ensemble turbine-arbre est dénommé "rotor". L'ensemble rotor roue de compresseur constitue "l'ensemble tournant" et demande un équilibrage parfait. Cet ensemble tourne sur film d'huile sans frottement, les coussinets lisses montés flottants dans le carter central servent de guidage.

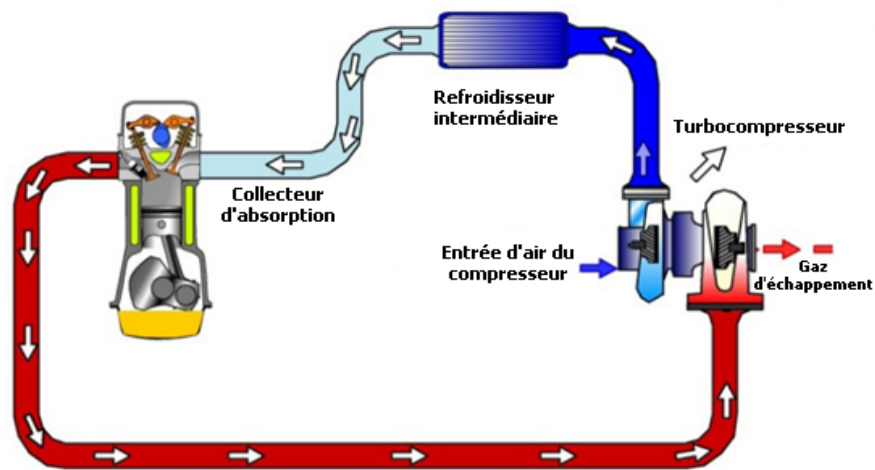
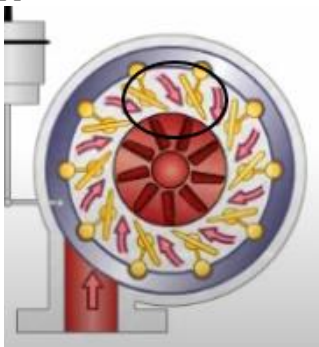


Fig. 2 : Principe de fonctionnement du turbocompresseur

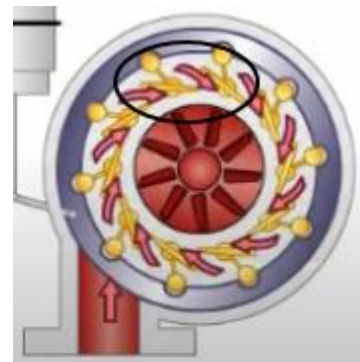
5.2.2.2 Les différents types de turbocompresseur

a) Turbocompresseur à géométrie variable

Le principal avantage d'un turbocompresseur de ce type est qu'il permet de conserver les performances du turbocompresseur à haut régime. On trouve ce type de suralimentation dans de nombreux moteurs turbo Diesel et dans quelques rares applications essence.



A bas régimes, les ailettes sont fermées, les gaz d'échappement alors en faible quantité sont accélérés dans



A haut régimes, les ailettes sont ouvertes, les gaz d'échappement vont alors directement sur la turbine.

b) Turbocompresseur à tiroir coulissant

Ce type de turbocompresseur est composé principalement d'un tiroir, d'une commande pneumatique, d'une turbine et d'ailettes fixes. La régulation de la vitesse de sortie des gaz d'échappement est obtenue en modifiant la position du tiroir coulissant.

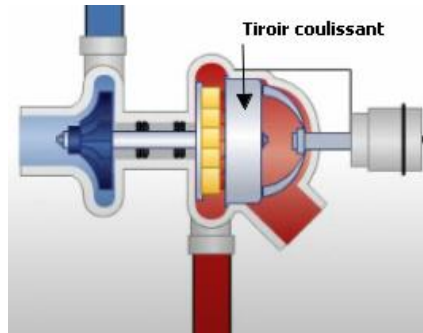


Fig.3 : Turbocompresseur à tiroir coulissant

5.2.2.3 Performances des turbocompresseurs

5.2.2.3.1 Rendement du compresseur et de la turbine

a) Rendement du compresseur

Le processus de compression dans le compresseur est un processus polytropique avec une entropie croissante due au frottement et aux pertes dans le compresseur. La figure 4 montre le processus de compression de l'air d'admission de l'état 1 à l'entrée du compresseur (p_1, T_1) à l'état 2 à la sortie du compresseur (p_2, T_2).

$$\eta_c = \frac{(P_c)_{isen}}{(P_c)_{réel}} = \frac{\dot{m}_a(h_{2s} - h_1)}{\dot{m}_a(h_{2A} - h_1)} = \frac{T_{2s} - T_1}{T_{2A} - T_1}$$

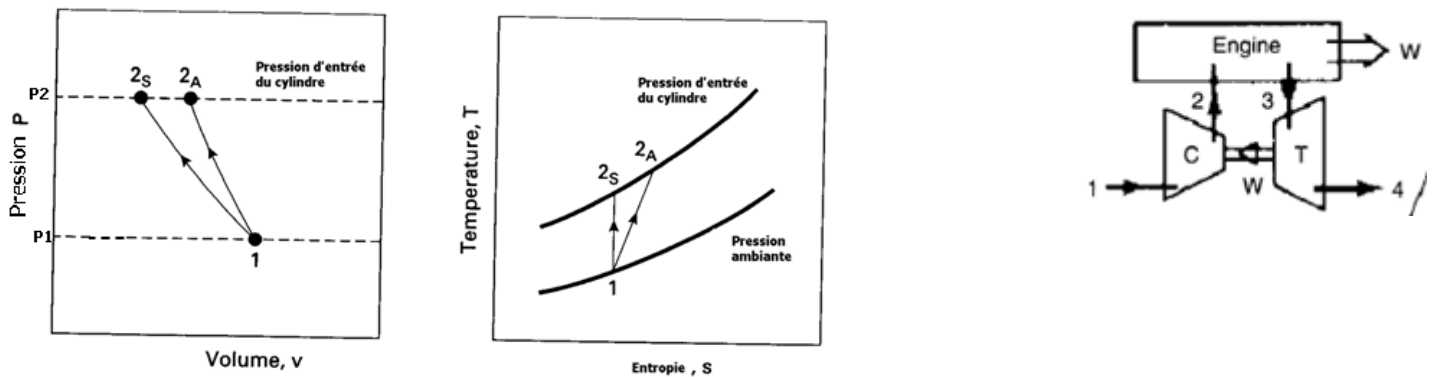


Fig. 4 : Transformation adiabatique réversible (isentropique) (1-2s) et transformation irréversible (réel) (1-2A)

b) Rendement de la turbine

Comme pour le compresseur, le rendement de la turbine résulte du processus de détente polytropique des gaz d'échappement de l'état 3 à l'entrée de la turbine (p_3, T_3) à l'état 4 à la sortie de la turbine (p_4, T_4), voir Fig. 5. Physiquement, la turbine délivre moins d'énergie de sortie en raison du frottement et des pertes dans le processus de détente polytropique que l'énergie éventuellement maximale donnée dans le processus isentropique.

$$\eta_T = \frac{(P_T)_{réel}}{(P_T)_{isen}} = \frac{\dot{m}_T(h_3 - h_{4A})}{\dot{m}_T(h_3 - h_{4S})} = \frac{T_3 - T_{4A}}{T_3 - T_{4S}}$$

$\dot{m}_{ex}$: Débit massique des gaz d'échappement à travers la turbine ;

$$\dot{m}_T = \dot{m}_a + \dot{m}_f$$

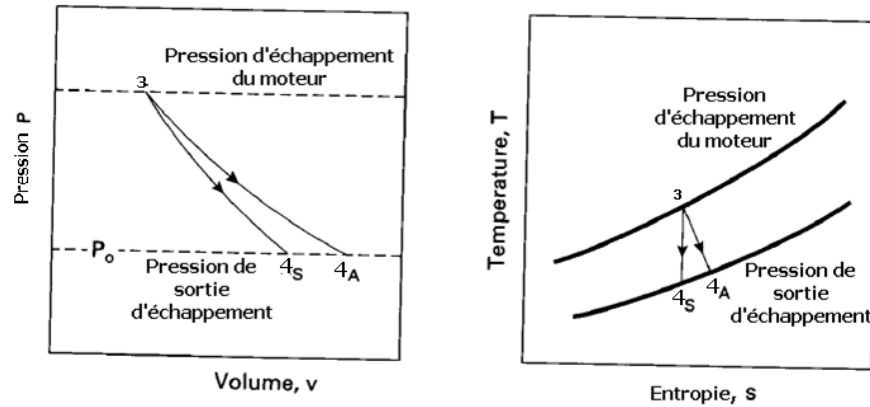


Fig. 5 : Processus isentropique (3-4s) et processus réel (3-4A)

c) Rendement volumétrique

L'un des processus les plus importants qui régit la puissance et les performances pouvant être obtenues d'un moteur consiste à obtenir le maximum d'air dans le cylindre au cours de chaque cycle. Le rendement volumétrique est défini comme suit :

$$\eta_v = \frac{n * \dot{m}_a}{\rho_a * V_T * N}$$

$\dot{m}_a$: Débit d'air dans le moteur ;

ρ_a : Densité d'air ;

V_T : Volume du cylindre (la cylindrée) ;

N : Régime du moteur ;

n : nombre de tours par cycle.

5.2.2.3.2 Puissances

En raison de la détente des gaz d'échappement du moteur dans la turbine, il génère la puissance de la turbine qui dépend du débit massique des gaz d'échappement à travers la turbine et de la chute d'enthalpie isentropique dans la turbine. La **puissance effective de la turbine** se traduit par :

$$P_T = \eta_T \dot{m}_T C_{p,g} (T_3 - T_{4S})$$

Transformation polytropique :

$$T_3 P_3^{\left(\frac{1-k}{k}\right)_g} = T_{4s} P_{4s}^{\left(\frac{1-k}{k}\right)_g}$$

$$P_T = \eta_T \dot{m}_T C_{p,g} T_3 \left[1 - \left(\frac{P_{4s}}{P_3} \right)^{\left(\frac{k-1}{k}\right)_g} \right]$$

En raison de la perte par frottement dans le système de paliers, la puissance requise du compresseur résulte de la puissance effective de la turbine et du rendement mécanique η_m .

$$P_C = \eta_m P_T = \eta_m \eta_T \dot{m}_T C_{p,g} T_3 \left[1 - \left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\left(\frac{k-1}{k}\right)_g} \right]$$

En utilisant les équations thermodynamiques pour un processus isentropique, la puissance requise du compresseur est calculée à partir du débit massique, de la température d'entrée et du rapport de pression du compresseur.

$$P_C = \frac{\dot{m}_C C_{p,a} T_1}{\eta_C} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\left(\frac{k-1}{k}\right)_a} - 1 \right]$$

Le rendement global du turbocompresseur η_{TC} s'écrit :

$$\eta_{TC} = \eta_m \eta_T \eta_C$$