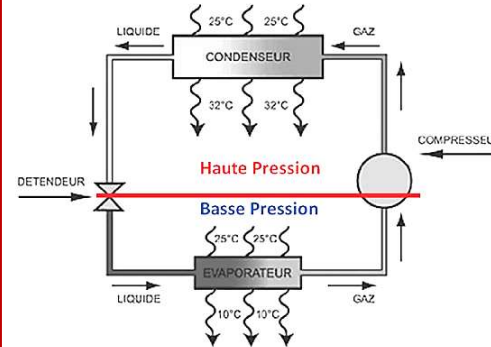


# Technologie des Machines à Fluides

## Dossier 3 – Compresseurs en génie thermique

Ce document est une synthèse du cours présenté

### Les compresseurs en climatisation



Les machines frigorifiques à compression dominent largement dans les applications de production de froid, climatisation, confort thermique (froid ou chaud) et conservation des denrées, avec, parmi elles, les systèmes frigorifiques à un étage de compression mécanique très présents.

Pour qu'un fluide se déplace, il faut le soumettre à un écart de pression. Au refoulement d'un compresseur, la pression du fluide frigorigène est augmentée pour que l'écoulement du fluide vers les zones basse pression soit possible. Ces zones basses pressions seront générées par l'aspiration du compresseur.

Le rôle principal d'un compresseur frigorifique est de mettre en circulation le fluide frigorigène.

Il aspire en sortie de l'évaporateur les vapeurs «surchauffées», basse pression, et les comprime avant de les refouler à haute pression vers le condenseur.

Pour la grande majorité des compresseurs, la compression s'effectue par la diminution de l'espace occupé (le volume) par le fluide frigorigène.

Le compresseur dans une installation frigorifique est l'organe le plus compliqué et le plus délicat. Ses organes sont sans cesse en mouvement et ont pour rôle, d'augmenter la pression et de faire circuler le fluide, dans une installation frigorifique.

### Les compresseurs dans les centrales thermiques

Les compresseurs sont également utilisés dans certaines centrales thermiques pour la compression d'air dans des turbines à gaz ou dans des centrales à cycle combiné. Ici, ils permettent d'augmenter l'efficacité du cycle en comprimant l'air avant qu'il n'entre dans la chambre de combustion. C'est particulièrement le cas dans les centrales utilisant des turbines à gaz, où l'air comprimé est mélangé avec le combustible avant d'être brûlé pour produire de l'énergie.

### Les compresseurs dans les systèmes industriels

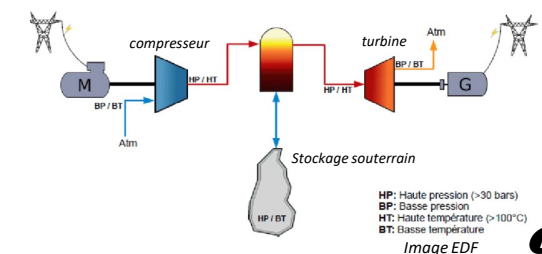
Dans des applications industrielles, l'air comprimé est utilisé dans de nombreux processus, notamment :

- nettoyage et soufflage (ex. pour le nettoyage des machines, des composants électroniques, etc.),
- outils pneumatiques (outillage industriel, visseuses, perceuses, etc.),
- transport de matières (vérins pneumatiques...),
- systèmes d'alimentation en air pour des installations de production ou de transformation thermique.

### Les compresseurs dans la production d'énergie

Les compresseurs sont aussi utilisés dans des systèmes de stockage d'énergie thermique, par exemple, dans des systèmes à air comprimé.

Ici, l'air est comprimé à haute pression et stocké dans des réservoirs ou des cavernes souterraines, puis utilisé pour générer de l'électricité lorsque la demande est élevée. Ce processus est souvent utilisé pour stocker de l'énergie dans des systèmes solaires ou éoliens...



## Familles des compresseurs en génie thermique

Selon la technologie employée on distingue deux types de compresseurs, les dynamiques qui mettent en mouvement le fluide et les volumétriques qui opèrent par variation de volume.

On distingue aussi 3 catégories.

### Compresseur volumétrique (ou à débit constant)

- À pistons
- A palettes
- À vis
- A spirales

### Compresseur dynamique ou turbo compresseur (ou à pression constante)

- Centrifuge
- Axial

#### 1/ Les compresseurs hermétiques (< 30 kW)

Les compresseurs hermétiques sont des compresseurs dont la partie moteur et la partie compression sont confinées dans une cloche étanche, non démontable. Si l'une des parties vient à céder, le compresseur est hors service et non réparable. Le refroidissement du moteur est assuré par le fluide frigorigène lui-même.



#### 2/ Les compresseurs ouverts (30 kW → 1000 kW)

Les compresseurs ouverts sont ainsi nommés parce que la partie moteur électrique est séparée de la partie compresseur du réfrigérant. On trouve deux types de liaison entre les deux parties :

- entraînement par courroie.
- entraînement par accouplement.



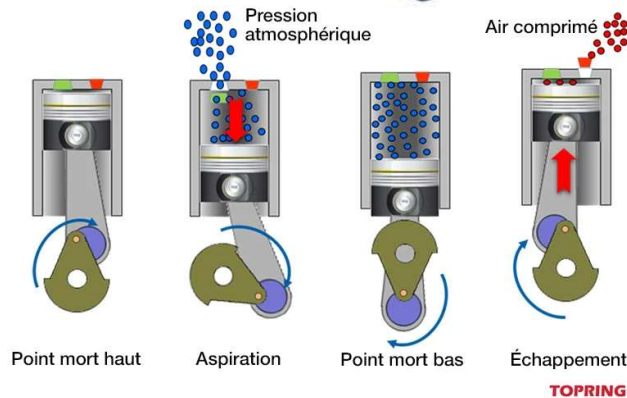
#### 3/ Les compresseurs semi-hermétiques (30 kW → 300 kW)

Les compresseurs semi-hermétiques sont un compromis entre les compresseurs ouverts et hermétiques. Comme dans un compresseur hermétique, le moteur et l'étage de compression sont réunis dans une enveloppe hermétique, mais cette enveloppe n'est pas soudée et tous les éléments sont accessibles pour réparation.

### Compresseur à piston radial (< 30 kW)

La technologie de compression la plus courante est celle des pistons radiaux dont le mouvement est perpendiculaire à l'axe de rotation. Il s'agit d'un classique système bielle-manivelle que l'on retrouve également dans la plupart des moteurs à combustion internes (dossier 1 et 2).

Ce système utilisé dans les réfrigérateurs est très robuste mais le COP frigorifique est de l'ordre de 2,0 en moyenne annuelle.



### Compresseur spiro-orbital, dit "scroll" (< 50 kW par étage)

Le compresseur SCROLL est composé de deux rouleaux identiques en forme de spirale. Le premier est fixe, le second décrit un mouvement circulaire continu excentrique (sans tourner sur lui-même).

Les spirales sont déphasées de 180°.

Le mouvement orbital entraîne le déplacement vers le centre des poches de gaz, ce déplacement est accompagné d'une réduction progressive de leur volume jusqu'à disparition totale. C'est ainsi que s'accomplit le cycle de compression du fluide frigorigène.

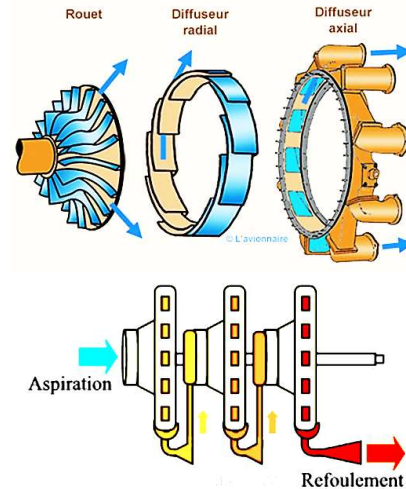
### Le compresseur centrifuge radial (→ 50 MW)

Son fonctionnement est analogue à celui des pompes centrifuges.

C'est une roue (ou rouet) entraînée par un moteur tournant à très grande vitesse (des vitesses de 15 000 à 100 000 tr/min sont courantes → l'arbre du compresseur est supporté par des paliers lisses à film) munie d'aubes ou d'ailettes inclinées qui transforment l'énergie mécanique partiellement en pression et en énergie cinétique, un diffuseur placé au refoulement retransforme une grande partie de cette énergie cinétique en pression.

Comme ce type de compresseurs a un taux de compression assez faible, on associe généralement plusieurs roues en série reliées entre elles par des diaphragmes ce qui permet de faire communiquer le rejet de la première roue à l'aspiration de la seconde et ainsi de suite...

Les compresseurs centrifuges peuvent être de type semi-hermétique ou ouvert.



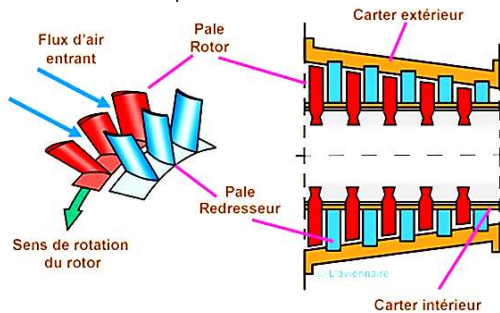
### Le compresseur axial (→ 100 MW !)

Un compresseur axial a un débit axial, grâce auquel l'air ou le gaz passe le long de l'arbre du compresseur à travers des rangées de pales alternativement rotatives et stationnaires.

L'étage rotorique accélère l'écoulement du fluide grâce à l'énergie transmise par l'arbre de transmission.

L'étage statorique redresseur transforme l'énergie cinétique en pression en fonction de la forme du stator.

La section entre le rotor et le carter du compresseur diminue pour maintenir un flux de fluide constant au fur et à mesure de la compression.



Les compresseurs axiaux sont utilisés pour des débits d'air constants et élevés à une pression relativement modérée, par exemple dans les systèmes de ventilation.



Compresseur Turbine Gaz

Compte tenu de leur vitesse de rotation élevée, ils sont aussi idéalement couplés à des turbines à gaz pour la production d'électricité et la propulsion des avions...

### Lubrification

Les compresseurs doivent impérativement être lubrifiés pour éviter le grippage (frottements et chaleur) des liaisons.

L'huile participe également à l'étanchéité lors du processus de compression.

La lubrification peut être réalisée par barbotage. C'est le système de lubrification le plus simple, les pièces en mouvement plongent dans l'huile contenue dans le carter et projettent l'huile de façon désordonnée dans le carter et sur les liaisons où elle ruisselle.

La lubrification peut aussi nécessiter une pompe à huile (voir dossier 2) et alimenter des paliers hydrodynamiques par exemple.

L'huile peut être éliminée de l'air comprimé en aval grâce à des filtres séparateurs. Ainsi, toute contamination de l'air, qui peut être nettoyé jusqu'à 0,01 micron, est évitée...

### Déshuilage

L'huile peut encrasser ou dégrader les vannes, vérins, capteurs, outils pneumatiques...

Dans l'agroalimentaire, la pharmacie, la peinture ou l'électronique, même une trace d'huile est inacceptable.

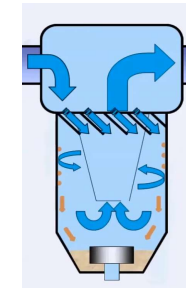
L'huile peut réagir avec certains matériaux ou produits traités à l'air comprimé.

Dans certaines applications (ex. : air comprimé à haute température), la présence d'huile est dangereuse.

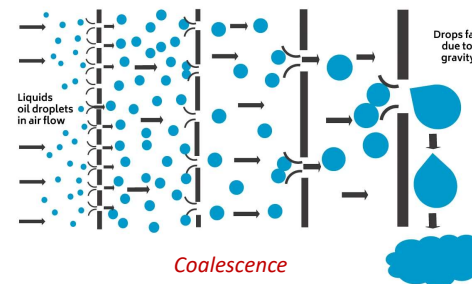
Pour toutes ces raisons on procède au déshuilage de l'air comprimé, en procédant généralement en plusieurs étapes selon le degré de pureté voulu.

#### Etape 1 : séparateur huile/eau

Il sépare la majorité de l'huile contenue dans l'air (jusqu'à 95-98 %) en utilisant le plus souvent la force centrifuge (via rotation cyclonique) pour piéger les gouttelettes d'huile



Centrifugation



Coalescence

#### Etape 2 : filtres à coalescence (agglomération de fines particules en grosses gouttes)

Ils sont situés en aval du compresseur, parfois en plusieurs étages et capturent les fines gouttelettes d'huile en suspension dans l'air.

Etape 3 : adsorbeur (pas absorbeur) à charbon actif qui fixe les particules d'huile dans ses pores et permet d'éliminer les vapeurs d'huile résiduelles dans les industries sensibles (alimentaire, pharmaceutique, électronique...).

Etape 4 : gestion de l'hygrométrie...

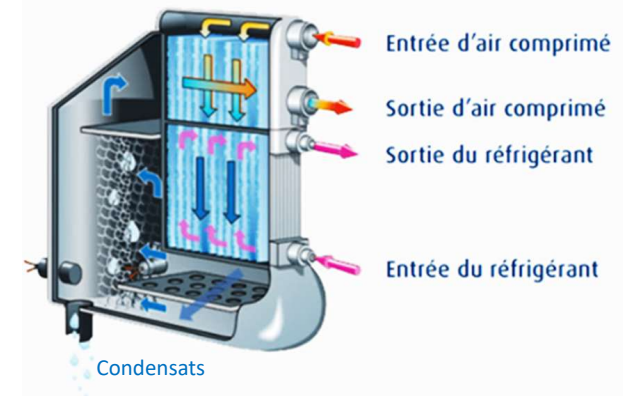
### Gestion de l'hygrométrie

Lorsque l'air est comprimé, l'humidité qu'il contient devient plus concentrée (→ point de rosée sous pression).

Une façon de lutter contre cette teneur en humidité est d'utiliser, après déshuilage, un refroidisseur final de compresseur (par eau ou par air) qui refroidit l'air comprimé chaud tout en éliminant les condensats. C'est le séchage de l'air.

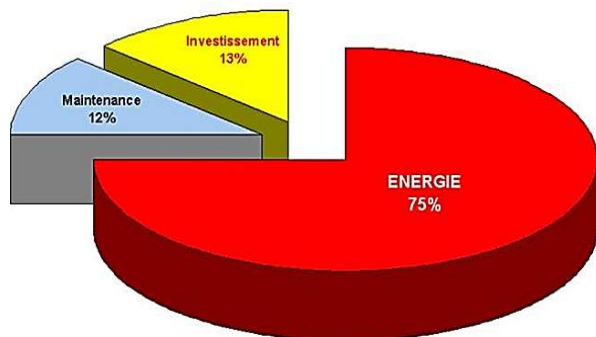
Cela empêche l'accumulation d'humidité dans le système de tuyauterie du compresseur et évite les soucis liés à :

- la corrosion
- le gel
- la croissance microbienne
- une lubrification dégradée
- la régulation



Sécheur d'air par réfrigération (le plus répandu)

## Considérations énergétiques



Répartition des coûts dans une installation d'air comprimé

C'est l'énergie électrique consommée qui représente la part la plus importante du coût sur toute la durée de vie de l'installation en air comprimé.

En moyenne, l'air comprimé représente 10 à 15% de la facture d'électricité en industrie. Le rendement énergétique d'une installation de base se limite à 10% !

*C'est l'un des fluides le plus coûteux à produire dans une usine.*

En conséquence une régulation fine du fonctionnement des compresseurs est crucialement requise...

## Gestion de la régulation

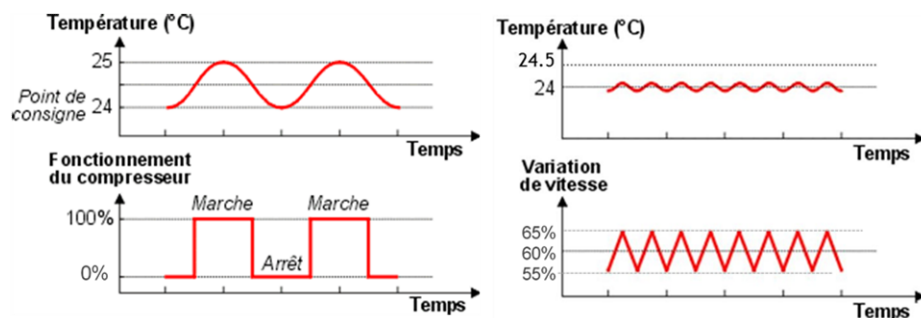
Une régulation fine permet d'ajuster **précisément le débit et la pression** à la demande réelle très fluctuante (machines robots...), évitant la surproduction inutile.

Une régulation adaptée réduit les démarrages/arrêts fréquents (qui usent le moteur), les montées en pression trop rapides (stress mécanique) et les surchauffes → moins d'usure, moins de maintenance, plus de fiabilité.

Plus la pression est élevée, plus les fuites d'air sont importantes. Une régulation fine permet de travailler à la pression optimale, réduisant ces pertes.

Le contrôle classique d'un compresseur en « tout ou rien » ne permet pas de répondre aux attentes. Au contraire faire juste varier la vitesse du compresseur permet d'adapter la puissance au plus près du besoin. Ce mode de régulation est appelé INVERTER (variateur de fréquence, en français). Cette technologie s'est généralisée depuis les années 2010.

Les compresseurs SCROLL proposent un bon rendement sur une large plage de vitesse et ils sont donc idéaux pour ce type de régulation.



Comparaison entre une régulation de vitesse « tout ou rien » et une régulation « inverter »

La réduction du nombre de pièces par rapport à un compresseur à pistons de même puissance est de l'ordre de 60 %. L'unique spirale mobile remplace pistons, bielles, manetons et clapets. Moins de pièces en mouvement, moins de masse en rotation et moins de frottements internes, cela se traduit par un rendement supérieur à celui des compresseurs à pistons.

Cela se traduit par un COP frigorifique de l'ordre de 4,0 en moyenne annuelle.

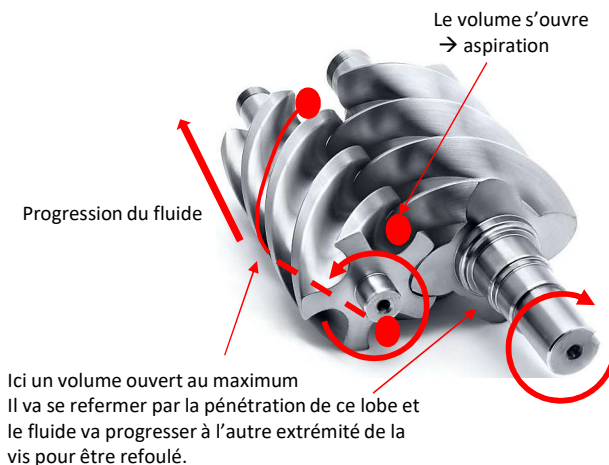
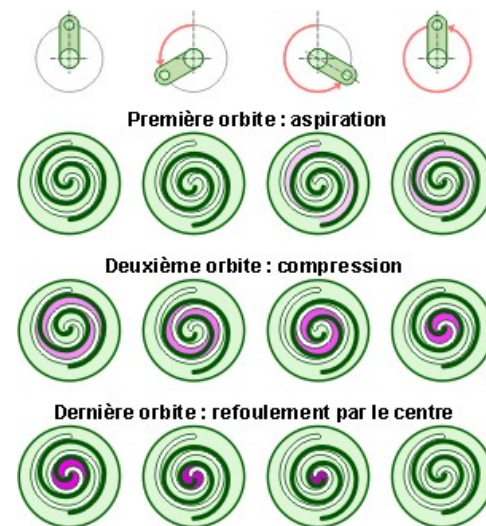
Les variations de couple ne représentent que 30 % de celles d'un compresseur à pistons. Il n'impose donc que de très faibles contraintes au moteur, facteur de fiabilité.

## Le compresseur à vis (< 500 kW)

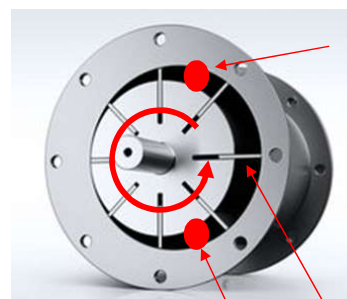
Le fluide frigorigène gazeux est comprimé par deux vis hélicoïdales aux profils complémentaires et tournant à grande vitesse. Le compresseur est entraîné par un moteur électrique.

Le rendement volumétrique d'un compresseur à vis est bon grâce à l'absence d'espaces morts, présents dans les compresseurs à pistons. Cette propriété permet d'assurer des taux de compression élevés avec un bon rendement volumétrique.

Les variations de puissance s'obtiennent dans les grosses machines par l'action d'un « tiroir » qui décide de l'utilisation d'une plus ou moins grande longueur de vis dans la compression des gaz, et donc induit un plus ou moins grand taux de compression.



## Le compresseur à palettes (< 250 kW)



Le volume se referme → refoulement

Dans un compresseur à palettes rotatives, la compression s'effectue lorsque la force centrifuge fait sortir des palettes de fentes pour former des cellules de compression individuelles. Lorsque les cellules se déplacent autour d'un stator excentré, l'air comprimé est expulsé de la zone de compression.

Ces compresseurs sont fiables et les coûts de maintenance sont réduits grâce à une construction.

Ils sont enfin très silencieux comparativement aux autres technologies rencontrées.