

GUIDE PRATIQUE DE L'AIR COMPRIMÉ

Ce document est une version dite simplifiée à l'usage des utilisateurs qui ne sont pas familiarisés avec le sujet de l'air comprimé. Il a pour but de présenter les principaux éléments qui impactent l'efficacité énergétique d'une installation de compression d'air. Pour les utilisateurs plus aguerris, ATEE tient à leur disposition gratuitement sur son site Internet un guide plus approfondi, [version dite experte](#).

Dernière mise à jour : 19 octobre 2020

Concepteur : Jean-Marc PIATEK Chef du Département Maîtrise de l'Energie à l'ATEE



UTILISATION DU GUIDE (en mode diaporama)

1. **Rechercher sur le synoptique** schématisant une installation d'air comprimé d'une entreprise (slide n°8), soit la zone, soit les équipements qui vous intéressent.
2. **Cliquer sur le commentaire** dans la zone ou les équipements recherchés pour avoir plus de détails; zone production d'air comprimé, zone réseau et utilisation.
3. **Retourner sur le synoptique** pour poursuivre vers les autres équipements ; ou bien utiliser le bouton retour direct vers le synoptique.



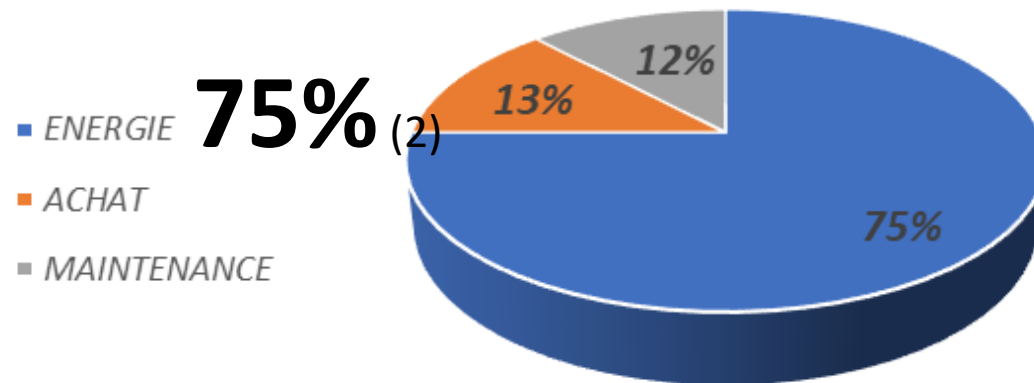
4 messages clés au sujet de l'air comprimé

1/4 : L'air comprimé n'est pas gratuit

$$< 150 \text{ kWh/Nm}^3 \quad (1)$$

(1) C'est la valeur caractéristique de la consommation spécifique (ou Indicateur de Performance Energétique) dans le cas d'une installation optimisée, production et distribution sur le réseau d'air comprimé incluses, au niveau d'un poste utilisateur alimenté avec une pression de 6,5 bars effectifs (à l'entrée du poste), exprimé en kilowattheure électrique consommé par normo mètre cube d'air comprimé produit : **une installation optimisée devrait se positionner en dessous de cette valeur.**

2/4 : Répartition usuelle des coûts d'une installation d'air comprimé



(2) A défaut d'informations précises, sur la durée de fonctionnement d'un compresseur, 75% est une répartition usuelle des coûts énergétiques d'une installation d'air comprimé. La répartition des coûts est variable d'une installation à l'autre, et dépend des coûts d'achat des équipements, des frais d'installation des équipements et du réseau de distribution, des coûts de maintenance ... sans oublier le coût de la consommation d'électricité.




3/4 : Faire la chasse aux fuites

< 10 % (3)

Avant de débuter des adaptations sur l'installation d'air comprimé, travaux de tuyauterie et achats de compresseurs, il est hautement conseillé de rechercher les fuites d'air comprimé. Une fuite d'air comprimé est une perte d'énergie qui peut être résolue, bien souvent, à faible coût et sans compétence spécifique.

(3) C'est le taux de fuite usuellement accepté pour une installation optimisée sur un réseau fonctionnant entre 7 et 6 bars effectifs. **Idéalement, le taux de fuite d'un réseau d'air comprimé entretenu se situe en dessous de cette valeur.**



4/4 : Suivre une démarche structurée

Plan-Do-Check-Act ⁽⁴⁾

(4) **Planifier** (*Plan*) votre démarche d'efficacité énergétique en commençant par les actions qui ne nécessitent pas d'investissement et consolident l'état de l'installation : fuite, perte de charge, régulation, pression utile des machines... procéder si besoin à un diagnostic de l'installation air comprimé avec un BE spécialisé – **Réaliser** (*Do*) les actions d'amélioration – **Contrôler** (*Check*) les résultats à l'aide de la mesure et des indicateurs de performance énergétique – **Réagir** (*Act*) pour améliorer continuellement les actions d'efficacité énergétique déjà entreprises.

AIR COMPRIMÉ : OPTIMISEZ VOS CONSOMMATIONS D'ÉNERGIE

Production



Réseau



Utilisation



Contrôle



Maintenance



MACHINES

- Choisir des composants pneumatiques, comme les raccords ou vérins, de moindre consommation.
- Bien déterminer et calculer les vérins.
- Ajuster la pression d'utilisation au besoin réel de l'application.

SÉCHEUR

- 10% Installer des sècheurs plus performants. Par exemple : sècheur à adsorption avec régénération par récupération de la chaleur perdue des compresseurs.

RÉCUPÉRATION DE CHALEUR

- 70% Récupérer la chaleur rejetée par le compresseur pour le chauffage de locaux ou la production d'eau chaude. Environ 80 % de la puissance électrique du compresseur est transformée en chaleur.

ALIMENTATION ÉLECTRIQUE

- Installer des instruments de mesure des consommations d'électricité.

RÉGULATION

- Éviter les régulations par étranglement de l'aspiration.
- Éviter les marches à vide du compresseur d'air.
- 15% Installer une variation électronique de vitesse pour adapter la production au besoin réel d'air comprimé.
- Installer un système de gestion et régulation des compresseurs en cascade selon le besoin d'air comprimé.

ASPIRATION D'AIR

- Assurer une aspiration d'air le plus frais possible. 1 % de gain tous les 3 degrés.
- Nettoyer ou changer les filtres d'entrée d'air sur les compresseurs. Une réduction de la perte de charge d'aspiration de 0,05 bar permet un gain de 1 % sur la consommation électrique de la centrale de production.

COMPRESSEURS

- Remplacer les compresseurs par de nouvelle(s) et meilleure(s) machine(s) ayant une consommation d'énergie spécifique plus faible, mieux adaptée(s) aux besoins du système.
- Arrêter les compresseurs en période d'inactivité.
- Lorsque le besoin est réduit (la nuit ou le week-end par exemple), utiliser un compresseur plus petit pour alimenter le réseau.
- Respecter les périodicités et les consignes de maintenance.

SÉCHEUR

- Vérifier régulièrement les pertes de charge des sècheurs.
- Respecter les périodicités de maintenance.
- Le cas échéant, faire appel à un frigoriste qualifié pour la maintenance du circuit de froid.

CONDENSATS

- Utiliser des purgeurs de condensats sans perte d'air comprimé. Un réseau performant autorise une perte de charge maximum de 0,5 bar de bout en bout.
- Vérifier le bon fonctionnement des purgeurs automatiques de condensats.

OUTIL PNEUMATIQUE

- Remplacer si possible les outils pneumatiques par des outils électriques. Le prix du kWh pneumatique est 20 fois plus élevé que le prix du kWh électrique.

RÉSEAU D'AIR COMPRIMÉ

- Diviser le réseau en zones avec des contrôles de pression ou des vannes d'isolement appropriées. Fermer les zones du réseau non utilisées (bras mort).

VANNES

- Ne pas alimenter les machines en air comprimé lorsqu'elles ne fonctionnent pas. Cela peut se faire par l'installation de vannes manuelles actionnées par le personnel ou par des vannes automatiques couplées à des horloges.

SURPRESSEUR

- Mettre en place un système avec plusieurs pressions (systèmes ou réseaux multi-pressions), séparés ou liés (avec utilisation de surpresseurs locaux) au lieu d'élever la pression de tout le réseau. Passer de 7 bar à 6 bar permet un gain de 8 % d'énergie en moyenne.

STOCKAGE

- Installer des capacités de stockages proche des machines à forte variation de demande d'air.

RÉSEAU D'AIR COMPRIMÉ

- Boucler le réseau pour limiter les écarts de pression en bout de réseau.

PERSONNEL

- Sensibiliser le personnel sur le coût important de l'air comprimé et à signaler les fuites à rechercher et à signaler les fuites.
- Mettre en place des procédures d'arrêt des équipements qui intègrent la coupure des vannes d'arrivée d'air.

PERTES DE CHARGE

- Optimiser le diamètre des canalisations.
- Optimiser la longueur du réseau.
- Limiter les coudes, les changements de direction ou de section.

FUITES

- Remplacer les matériels générateurs de fuites (flexibles par exemple).

STOCKAGE

- Bien dimensionner les capacités de stockage pour permettre le fonctionnement à un rendement plus optimal des compresseurs et éviter des démarrages-arrêts intempestifs.

INSTRUMENTS DE MESURE

- Installer des instruments de contrôle et de mesure : débitmètre, manomètres... pour vérifier le bon fonctionnement des équipements.

SÉCHEUR ET FILTRES

- 5% Sécher et filtrer l'air au juste besoin. Trop sécher ou filtrer trop fin surconsomme inutilement.
- Nettoyer ou changer les filtres régulièrement.

CONTRAT D'EXPLOITATION

- Intégrer une clause de performance énergétique aux contrats d'exploitation. Un engagement sur la production en kWh/Nm³ à une pression donnée peut être contractualisé.

Partie production air comprimée

Partie réseau et utilisation



Fuites

Les fuites d'air comprimé représentent de l'énergie perdue.

En pratique, on considère qu'un [taux de fuite](#) inférieur à 10% constitue un réseau d'air comprimé avec un taux de fuite contenu, c'est-à-dire acceptable, mais bien entendu, on cherchera à obtenir un taux de fuite le plus faible possible.

Dans les entreprises, il n'est pas rare d'avoir des taux de fuite plus importants de l'ordre de 20 à 30%, avec parfois dans les cas de réseaux mal entretenus des taux qui atteignent les 50%.

La réduction des consommations d'énergie commence donc par la détection et la limitation des fuites d'air comprimé sur l'ensemble d'un site.

Les fuites peuvent apparaître n'importe où dans le réseau. Toutefois, la majorité des fuites se localisent au niveau des raccords, flexibles, régulateurs de pression, vannes, les bras morts du réseau....



Fuites

Méthodes de détection et d'évaluation

- Ecouter l'atelier au repos, en fin de journée de travail lors d'une ronde, lorsque l'ambiance sonore est plus calme pour localiser les chuintements,
- Badigeonner les surfaces suspectes avec de l'eau savonneuse, ou un aérosol détecteur, détection par la formation de bulles
- Utiliser un détecteur acoustique à ultrasons pendant la marche d'un atelier afin de localiser les fuites les plus importantes, la détection s'opère à proximité de la fuite,
- Utiliser une caméra acoustique ultrasonore lorsque la détection s'effectue dans des ambiances bruyantes et à distance de la fuite,

(slide suivant, comment évaluer un taux de fuite...)

Fuites

Evaluer un taux de fuite Q_f/Q (%)

- Mesurer le débit Q d'un (des) compresseur(s),
- Monter en pression le réseau à une pression P' supérieure à la pression de service P ,
- Isoler les compresseurs, et chronométrer le temps t_1 pour que la pression dans le réseau chute de P' à P (emplacement préférentiel du manomètre en bout de réseau),
- Ouvrir la vanne d'isolement des compresseurs, chronométrer le temps t_2 pour que la pression augmente de P à P' à l'aide du ou des compresseurs débitant Q (Nm^3/h).

L'évaluation du taux de fuite se calcule à l'aide de la formule:

$$Q_f / Q \text{ (\%)} = t_2 / (t_1 + t_2) \times 100$$

[Retour
Synoptique](#)



Perte de charge

Les pertes de charge (pression) dans un réseau sont dues aux frottements de l'air au cours de son trajet dans les canalisations (pertes de charge linéique) et au travers des accessoires de robinetterie et raccords (perte de charge singulière).

Les pertes de charge évoluent en fonction de la rugosité des parois, de la masse volumique de l'air, du débit d'air, du diamètre de la canalisation ou de la section de passage et donc de la vitesse ([formule simplifiée](#)).

La vitesse de l'air comprimé est un paramètre qui permet de trouver le compromis économique dans la conception du réseau. En augmentant le diamètre des tuyauteries, la vitesse diminue ainsi que les pertes de charge, le coût des tuyauteries augmente mais les compresseurs sont moins sollicités. A l'inverse, en réduisant le diamètre des tuyauteries, la vitesse augmente ainsi que les pertes de charge, le coût des tuyauteries est plus faible mais il faut compenser les pertes de charge par un fonctionnement plus important des compresseurs.

En pratique, dans les canalisations principales et secondaires, la vitesse de l'air comprimé est comprise entre 2 à 10 m/s, pour des canalisations longues (plus de 1 km) entre 2 et 5 m/s.

Perte de charge

Formule simplifiée pour le calcul des pertes de charge linéiques.

Cette formule est utile pour faire le lien avec les conseils, présentés à la slide suivante, pour réduire les pertes de charge.

$$\Delta P = \frac{\lambda * \rho * L * V^2}{D * 2}$$

ΔP : perte de charge en Pascal (Pa ou N.m⁻²)

ρ : masse volumique de l'air (kg.m⁻³)

V : vitesse moyenne de l'air (m.s⁻¹)

D : diamètre intérieur (m)

L : longueur parcouru (m)

λ : coefficient de perte de charge (sans dimension)

Perte de charge

Conseils pour réduire les pertes de charge:

- Il est recommandé de dimensionner largement les tuyauteries d'une nouvelle installation, en les choisissant d'une à deux tailles supérieures à ce qu'indiquent les calculs (les OPEX ou dépenses d'exploitation dont les coûts d'électricité sont supérieurs au CAPEX ou dépenses d'investissement dont l'achat des tuyauteries).

Dit autrement (voir formule slide précédent), si le diamètre D est plus grand, alors la vitesse de l'air est plus petite, les pertes de charge deviennent plus faibles et donc la puissance appelée des compresseurs diminuent réduisant ainsi la consommation d'électricité),

- Question matériau pour les tuyauteries, il vaut mieux éviter l'acier noir et l'acier galvanisé pour minimiser les pertes de charge (diminution du coefficient λ),

(suite, slide suivant...)

Perte de charge

(suite, conseils pour réduire les pertes de charge)

- Compte tenu des prix élevés de l'électricité, le remplacement des canalisations afin de diminuer les pertes de charge peut devenir rentable grâce aux économies d'énergie induites, quelques ratio à garder en tête:
 - La division par 2 du diamètre d'une canalisation, en gardant le même débit d'air, augmente la vitesse de l'air et donc les frottements à tel point que la perte de charge est multipliée par 39,
 - Le doublement à l'identique d'une canalisation divise le débit de l'air par 2, donc la perte de charge par 4,
 - Le remplacement de deux canalisations de diamètre 120 mm par une seule canalisation de diamètre 170 mm (donne les mêmes sections de passage) maintient le débit et la vitesse de l'air aux mêmes niveaux, mais divise les pertes de charge par 3,2.


(suite, slide suivant...)

Perte de charge

(suite, conseils pour réduire les pertes de charge)

- Créer un **réseau bouclé**. Le bouclage permet une alimentation en air supplémentaire par raccordement à un consommateur proche,
- Réduire les longueurs du réseau,
- Préférer les **vannes à passage intégral** et les raccords sans changement brusque de section (perte de charge singulière),
- Limiter au maximum les longueurs de flexibles et de tuyaux en spirale (diamètre de taille inférieure),
- Contrôler l'encrassement des filtres régulièrement (repère avec l'indication de perte de pression sur les manomètres).

[Retour
Synoptique](#)



Machines - Pression


La pression nécessaire à l'outil ou à la machine n'est pas forcément la pression du réseau.

Un outil ou une machine est dimensionné pour fonctionner à une pression de service ou sur une étendue de pression. Cette information peut se trouver sur la plaque signalétique de la machine ou sur la notice du constructeur.

Cette pression de service peut dans la pratique être inférieure à la pression délivrée sur le réseau. En effet, le réseau alimente de nombreux outils fonctionnant à des pressions différentes et donc il nécessite une pression supérieure.

Dans ce cas, l'emploi d'un détendeur en amont de l'outil ou de la machine, dont la pression de service est inférieure, est conseillé pour réduire la pression et aussi permettre de réaliser un gain énergétique.

Devant un outil ou une machine, un bon réflexe consiste à se poser la question : est-ce que cet outil ou machine est alimenté avec la bonne pression?



Machines - Pression


... Faut-il détendre l'air comprimé ou le produire à basse pression?

Deux possibilités s'offrent lorsqu'on a besoin d'air à basse pression:

- Détendre de l'air produit à haute pression,
- Produire de l'air à basse pression.

Nous allons prendre un exemple avec un même vérin pneumatique (volume 1 litre) qui sera alimenté soit directement à 7 bars, soit à 7 bars puis avec une détente en amont à 3,5 bars, soit directement à 3,5 bars.

La poursuite de la réflexion consiste à se poser la question s'il faut utiliser un petit vérin à forte pression (e.g. 0,5 litre à 7 bars) ou un gros vérin à faible pression (e.g. 1 litre à 3,5 bars).



Machines - Pression

En conclusion:

Il est préférable, **lorsque cela est possible**, de produire directement l'air à basse pression au lieu d'utiliser de l'air détendu ; jusqu'à 40 % de réduction d'énergie consommée dans l'exemple proposé précédemment. Bien entendu, le réseau et les équipements constituant l'installation à basse pression sont dimensionnés dans les règles de l'art de la profession, maîtrisant ainsi les pertes de charge.

Après calculs, la hiérarchie classée par ordre du meilleur rendement (énergie utile/énergie consommée pour la compression) au moins bon rendement est donnée ci-dessous:

1. **Produire de l'air à 3,5 bars et utiliser un vérin adapté,**
2. **Produire de l'air à 7 bars et utiliser un vérin de section deux fois plus faible qu'en 1,**
3. **Utiliser de l'air 7 bars détendu à 3,5 bars,**
4. **Utiliser de l'air 7 bars dans un vérin prévu pour 3,5 bars, solution la plus mauvaise.**

Remarque: la solution 2 ne donne aucune marge de sécurité pour le cas où l'énergie à fournir par le piston devrait être légèrement augmentée dans le futur.

Machines - Pression

Pour rappel, l'air comprimé est un vecteur énergétique cher, en raison de son faible [rendement global](#). Il est donc important de limiter son utilisation aux applications pour lesquels il est compétitif, telle que par exemple la commande d'équipements dans un milieu explosif.

Chaque application doit être pensée, et cela dès l'origine, en fonction non seulement de son coût de mise en œuvre, mais encore de son coût d'exploitation.

Quelques usages inappropriés :

Usage	Description	Alternative
Soufflage libre	Soufflage via un tube, un flexible et sans régulation de débit, à des fins de refroidissement, de séchage ou de nettoyage	Utiliser: <ul style="list-style-type: none">• une soufflante,• un mélangeur,• une buse ou ajutage,• une brosse
Equipement non régulé	Fonctionnement à pleine pression	Installer un régulateur de pression
Production de vide	Utilisation de l'air comprimé comme fluide moteur dans un venturi pour créer une dépression	Utiliser une pompe à vide
Pulvérisation	Utilisation de l'air pour pulvériser un liquide et le transformer en aérosol	Utiliser une soufflante

Machines - Pression

Usage des soufflettes

On constate encore dans certaines entreprises le mauvais usage de l'air comprimé pour balayer le sol, nettoyer les établis ou bien servir de brosse pour le nettoyage des habits de travail à l'aide de soufflettes.

Hormis, le fait que ces opérations sont dangereuses pour l'opérateur et davantage pour les personnes à proximité (projection de copeaux ou poussières), ces opérations ne nettoient pas, mais déplacent la saleté d'un endroit à un autre, et elles sont bien plus onéreuses qu'un coup de balai.

Rappelons qu'une soufflette d'atelier (raccord $\frac{1}{4}$ ") fonctionnant à la pression de 6 bar g consomme suivant les modèles entre 12 et 27 Nm³/h.



OUI

≠



Certaines soufflettes sont volontairement bloquées à 2 bars

Retour
Synoptique

Comportement des utilisateurs - Personnel

La consommation intensive d'air comprimé dans les ateliers ne provient pas que de mauvais réglages, mais elle est souvent le fait des comportements, par habitudes, manque de temps, manque d'intérêt concernant l'état du parc des machines pneumatiques et l'utilisation de l'air.

Solutions d'amélioration :

- Informations,
- Formations du personnel utilisateur,
- Sensibilisation au gaspillage (dont le signalement des fuites) et à l'entretien,.

Ces solutions peuvent être apportées par des organismes extérieurs compétents dans le domaine de l'air comprimé.

ATEE est porteur du programme national de formation [PROREFEI](#) dédié aux référents énergie dans les entreprises qui sont en charge de gérer les projets d'amélioration de l'efficacité énergétique. Outre l'acquisition de bonnes pratiques pour mieux appréhender les missions d'efficacité énergétique, cette formation permet aux référents énergie de trouver des arguments pour sensibiliser le personnel de leur entreprise à l'efficacité énergétique.

[Retour
Synoptique](#)



Stockage

Le nombre, la localisation et le volume de stockage des réservoirs d'air comprimé sont des facteurs impactant sur l'efficacité énergétique globale ainsi que sur la réduction des coûts de maintenance.

Il existe trois types de stockage:

- Le stockage principal placé à proximité des compresseurs,
- Les stockages locaux répartis sur le réseau au voisinage des utilisateurs, et plus spécifiquement proche des machines à forte variation de demande d'air (voire d'installer localement un compresseur),
- Sans oublier, le réseau qui constitue à lui seul un réservoir (une conduite de 0,5 km de 150 mm de diamètre représente un volume de 9 m³).

Stockage

Le rôle d'un réservoir :

- Eviter les chutes brutales de pression lors des pointes de consommation (chutes de pression limitées à 1 bar) et ainsi stabiliser la pression du réseau,
- Limiter le nombre de cycles de remises en compression ou de démarrages du moteur électrique (régulation) pour un écart de pression (pression maxi - pression mini) donné,
- Répondre aux demandes de pointe en air comprimé,
- Pour les compresseurs alternatifs (à piston), amortir les pulsations de refoulement.

Le dimensionnement d'un réservoir pour déterminer le volume de réserve en air comprimé est donc essentiel. Les réservoirs de stockage sont rarement surdimensionnés mais il arrive qu'ils soient trop petits.

Stockage

Il existe différentes méthodes pour le calcul de la taille requise des réservoirs de stockage (V_{ar}). Nous en proposons ici trois, en fonction des données disponibles :

$$(1) \quad V_{ar} = 0,1 \text{ à } 0,14 \text{ dm}^3 * Q_{compr}$$

où Q_{compr} est le débit fourni par le compresseur, en dm^3/s

$$(2) \quad V_{ar} = Q_{compr}/(8\Delta p)$$

où Q_{compr} est le débit du plus gros compresseur, en dm^3/min
et Δp est la différence entre les niveaux de pression maximale et minimale autorisées

Le volume d'un réservoir de stockage local est calculé comme suit :

$$(3) \quad V_{ar} = Q * t / \Delta p$$

où Q est la demande en air d'un consommateur particulier, en m^3/min ,
 t temps de consommation d'air, min, et
 Δp écart de pression permis, en bar

[Retour
Synoptique](#)

Outils pneumatiques

Dans le cas des installations existantes, au niveau des outillages pneumatiques, il est pertinent de dresser un comparatif avec les outillages électriques dans l'entreprise (exemples, tableau ci-dessous).

	Avantages	Inconvénients
Pneumatique	<ul style="list-style-type: none">• Fiabilité• Rapport poids puissance	<ul style="list-style-type: none">• Consommation électrique (rendement \approx 10 à 20 %)• Facteur de pollution potentielle, émission de brouillards d'huile, transport de bactéries.
Electrique	<ul style="list-style-type: none">• Consommation électrique (rendement \approx 50 à 80 %)	<ul style="list-style-type: none">• Coût de maintenance• Coût d'investissement

Dans le cas de nouvelles installations, une bonne solution consiste à **définir le nombre de kWh consommés** pour l'air comprimé et celui consommé pour un outil électrique assurant une fonction similaire, afin d'optimiser l'efficacité énergétique globale d'un site.



Production d'air décentralisée - Surpresseur

Production d'air décentralisée :

Dans le cas où les réseaux sont très longs ou bien lorsque des consommations locales sont importantes, on peut réaliser une production décentralisée. Un ou des compresseurs sont alors situés dans des ateliers éloignés de la centrale principale d'air comprimé.

Avantages

- Eviter l'investissement d'un nouveau réseau ou d'augmenter le diamètre du réseau existant,
- Eviter d'augmenter la pression si augmentation de consommation.

Inconvénients

- Nécessite une main-d'œuvre plus importante pour la surveillance ou une GTC, le système de commande/régulation est plus complexe à installer,
- Difficultés pour optimiser la marche des compresseurs (puissance en marche minimale pour un débit total donné).

Production d'air décentralisée - Surpresseur

Surpresseur :

Dans quelques cas (plutôt rares), un poste de compression intermédiaire peut être utile pour surélever la pression. C'est le cas notamment pour des machines qui nécessitent des pressions relativement élevées pour leur fonctionnement (≥ 7 bar g) et situées à une autre extrémité de l'usine par rapport au local des compresseurs.

Pour bien faire, une étude préalable est nécessaire pour déterminer si la surpression éventuelle imposée au départ principal de l'air comprimé n'engendrerait pas une surconsommation électrique supérieure à la consommation seule du poste intermédiaire de surpression.

Le temps de fonctionnement de ces machines (avec pression air comprimé élevée) impactera grandement les décisions.

[Retour
Synoptique](#)

Séchage de l'air

L'air extérieur utilisé pour la production d'air comprimé contient de l'eau sous forme de vapeur. Cette quantité de vapeur peut selon les conditions de **pression et température** se condenser dans le réseau d'air comprimé: c'est la notion de point de rosée.

Le **point de rosée** ou température de rosée est la température sous laquelle de la rosée se dépose naturellement. Plus techniquement, en dessous de cette température qui dépend de la **pression et de l'humidité** ambiantes, la vapeur d'eau contenue dans l'air se condense sur les surfaces froides, par effet de saturation.

De plus, la qualité de l'air comprimé (selon des normes et des critères imposés sur le site) est fonction, notamment mais pas uniquement, de la teneur en eau contenue dans l'air; la qualité de l'air comprimé est régentée par la **norme ISO 8573-1** à laquelle on doit se référer pour déterminer les performances du séchage nécessaire.

Le séchage de l'air est indispensable pour éviter la corrosion quand les tuyauteries sont en acier noir ou galvanisé, ou dans le cas où le réseau est équipé d'une instrumentation qui réclame de l'air comprimé sec.

Il existe trois grandes familles de sècheurs : les sècheurs frigorifiques (par refroidissement), pour des points de rosée proche de +3°C sous pression, les sècheurs par adsorption (par contact) pour des points de rosée inférieurs, de -20°C à -70°C sous pression et les sècheurs à perméation par membranes.



Séchage de l'air

A. Sécheurs frigorifiques:

Le principe consiste à refroidir le mélange d'air comprimé et vapeur d'eau, ce qui entraîne la condensation de la vapeur. Ils utilisent des fluides frigorigènes dont il est important de vérifier la conformité à la réglementation en vigueur et à ses évolutions. Ces équipements au fonctionnement délicat nécessitent l'intervention de frigoristes agréés. Ces sécheurs consomment couramment 2 % à 3 % de l'énergie nécessaire pour une compression d'air à 7 bars.

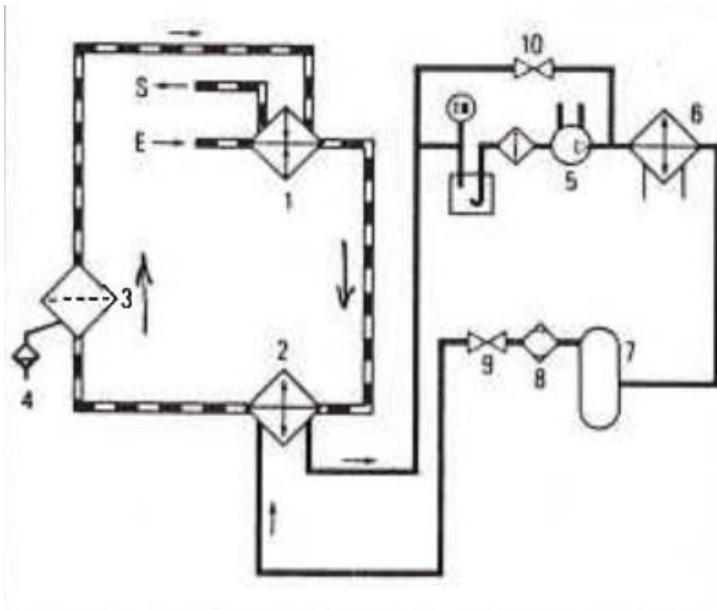
Ces sécheurs ne sont pas des machines très puissantes, puisque 2 à 3 kW suffisent pour traiter un mélange d'air de 1 000 m³/h à 7 bars. L'enjeu est plus qualitatif qu'énergétique.

Il existe plusieurs systèmes de sécheurs frigorifiques:

Séchage de l'air

• A.1 Sécheurs frigorifiques à détente directe

L'air comprimé est d'abord pré-refroidi dans un échangeur entrée d'air comprimé chaud/sortie d'air comprimé frais. Dans un deuxième temps, l'air est refroidi jusqu'à la température de rosée dans un évaporateur air/fluide frigorigène. L'eau condensée est retenue avec ses impuretés (huiles, poussières) par un séparateur qui est purgé automatiquement. Le traitement des condensats séparés nécessite une surveillance particulière pour des raisons de protection de l'environnement (présence d'hydrocarbures).



E entrée d'air à sécher

S Sortie air sec

1 Echangeur économiseur air/air

2 Evaporateur air/fluide frigorigène

3 Séparateur

4 Purge

5 Compresseur

6 Condenseur par air ou par eau

7 Réservoir de liquide

8 Filtre deshydrateur

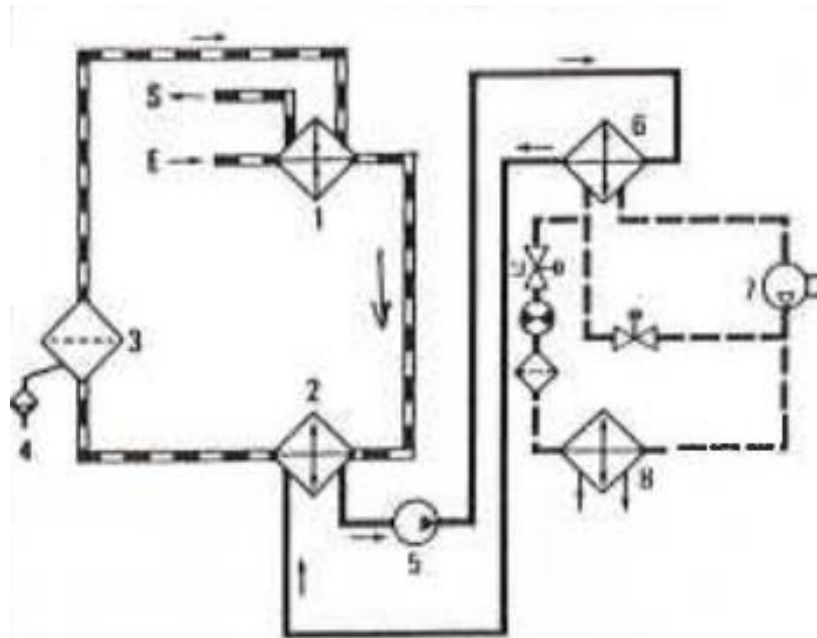
9 Vanne de détente

10 Vanne de by-pass

Séchage de l'air

• A.2 Sécheurs frigorifiques à liquide frigoporteur intermédiaire

Pour les sécheurs plus gros, un circuit intermédiaire d'eau glycolée est ajouté. L'eau glycolée circule à contre-courant de l'air comprimé dans un échangeur air/eau pour refroidir l'air jusqu'à la température choisie. Au cours de cette opération, l'eau s'échauffe d'abord de quelques degrés, puis durant la phase suivante elle est refroidie dans l'évaporateur jusqu'à sa température initiale. Ce dispositif permet de traiter efficacement de gros débits d'air comprimé et d'envoyer vers des aéroréfrigérants secs ou humides.



Boucle air comprimé

E Entrée d'air à sécher

S Sortie d'air sec

1 Echangeur économiseur air/air

2 Echangeur air/eau glycolée

3 Séparateur

4 Purge

Boucle d'eau glycolée

5 Pompe de circulation

6 Evaporateur

Boucle fluide frigorigène

7 Compresseur frigorifique

8 Condenseur eau ou air

9 Vanne de détente

Séchage de l'air

- **A.3 Sécheurs frigorifiques à masse thermique (stockage d'une pellicule de glace)**

Le principe de fonctionnement est proche de celui des sécheurs frigorifiques à détente directe; la différence réside d'une part dans la plus grande inertie des montées et descentes en température, et d'autre part dans les fluctuations du point de rosée due à l'adjonction d'une masse thermique intermédiaire (solide ou liquide) autour des échangeurs de l'appareil.

La constitution d'une réserve de glace entre l'évaporation du groupe frigorifique et l'air comprimé permet un fonctionnement de ce dernier par tout ou rien, ce qui améliore la consommation par rapport à une utilisation frigorifique proportionnelle à la demande quand le débit d'air à refroidir varie.

L'échangeur regroupe trois fluides: l'air comprimé, l'eau glacée et le fluide frigorigène.

(suite, slide suivant)

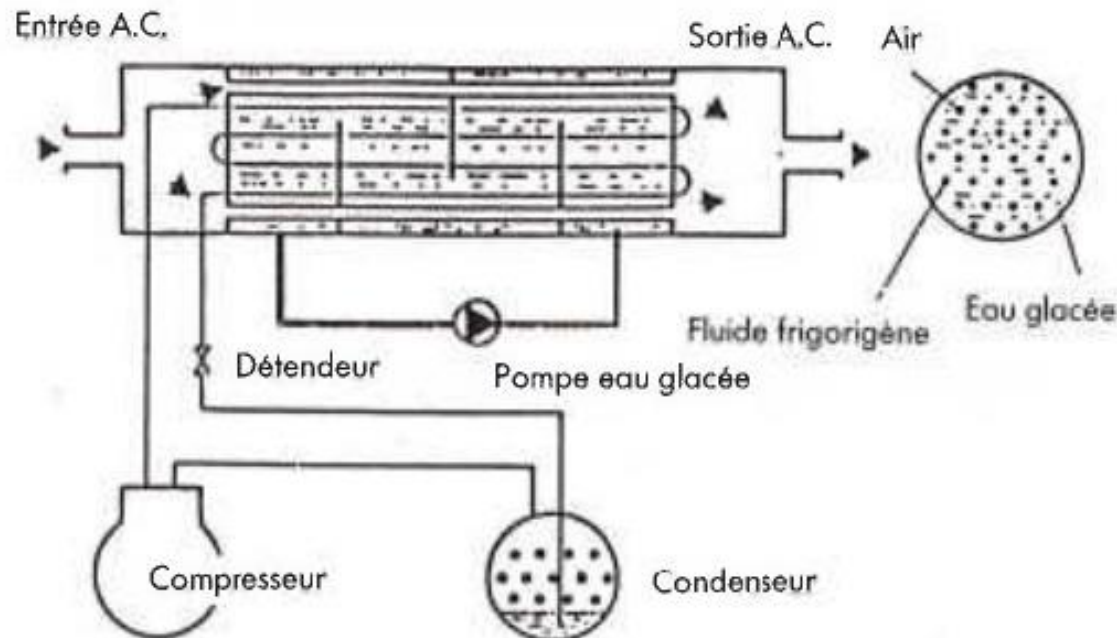
Séchage de l'air

L'eau glacée joue un double rôle : assurer le transfert thermique entre l'air comprimé et le fluide frigorigène, et constituer une capacité frigorifique suffisante pour garantir une bonne stabilité du point de rosée et un fonctionnement régulier de la production frigorifique.

La capacité frigorifique est obtenue par la constitution d'une fine pellicule de glace autour des tubes de l'évaporateur avant l'arrêt des compresseurs.

Il en résulte deux avantages:

- Un fonctionnement simple du circuit frigorifique,
- Une consommation d'électricité proportionnelle au débit d'air comprimé.



Séchage de l'air

B. Sécheurs à adsorption

Ces sécheurs requièrent un air déshuilé. Si l'usine est équipée de compresseurs avec lubrification, les sécheurs sont nécessairement précédés en amont de filtres dépoussiéreurs et dévésiculateurs (eau + huile). Le principe de fonctionnement est basé sur l'affinité physique de rétention de la vapeur d'eau de certains produits comme le sulfate d'alumine.

Les points de fonctionnement sont généralement inférieurs ou égaux à -20°C .

L'unité de séchage se compose de deux réservoirs installés en parallèle et contenant un produit siccatif. L'adsorption se déroule dans le premier, tandis que la régénération se fait dans le second réservoir. La régénération peut se faire à chaud ou à froid.

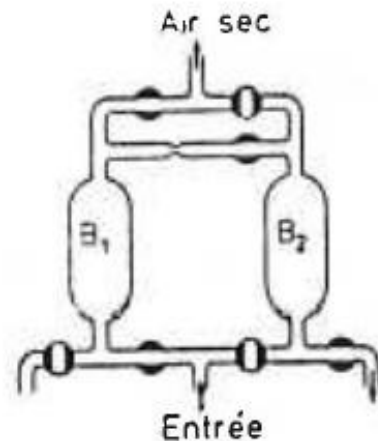
Ce type de sécheur de part son mode de fonctionnement consomme davantage d'énergie électrique et aussi d'air comprimé en comparaison par rapport à un mode de séchage frigorifique.

Il existe quatre modes principaux de régénération par adsorption:

Séchage de l'air

- **B.1 Sans apport de chaleur**

Cette solution est la plus consommatrice du point de vue énergétique, car de l'air séché est prélevé dans le réservoir en service pour être injecté dans l'autre réservoir afin de régénérer la matière adsorbante. A des pressions proches de 6 à 7 bars, ces sécheurs prélèvent 15 à 20 % du débit d'air comprimé séché. Pour limiter la consommation d'air séché de régénération, les cycles de ces sécheurs peuvent être pilotés en fonction du point de rosée.



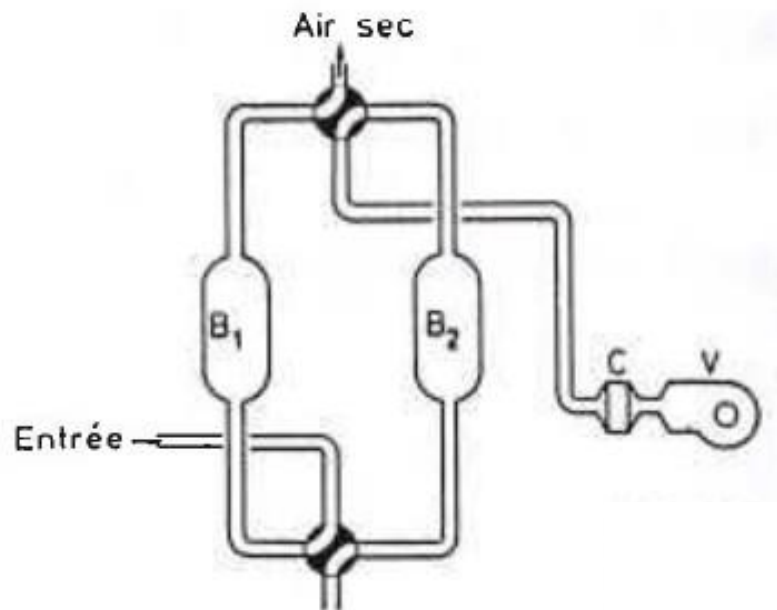
B₁ ballon en service
B₂ ballon en régénération

Séchage de l'air

- **B.2 Avec apport de chaleur externe**

L'air ambiant circule avant compression dans un des réservoirs chauffés généralement par des résistances électriques extérieures, ou parfois par de la vapeur ou de l'eau surchauffée. Le flux d'air est généré soit par ventilation, soit par dépression au moyen d'une pompe à vide.

A des pressions d'air de 6 à 7 bars, ces sécheurs consomment 10 à 13 % de l'énergie nécessaire à la compression.

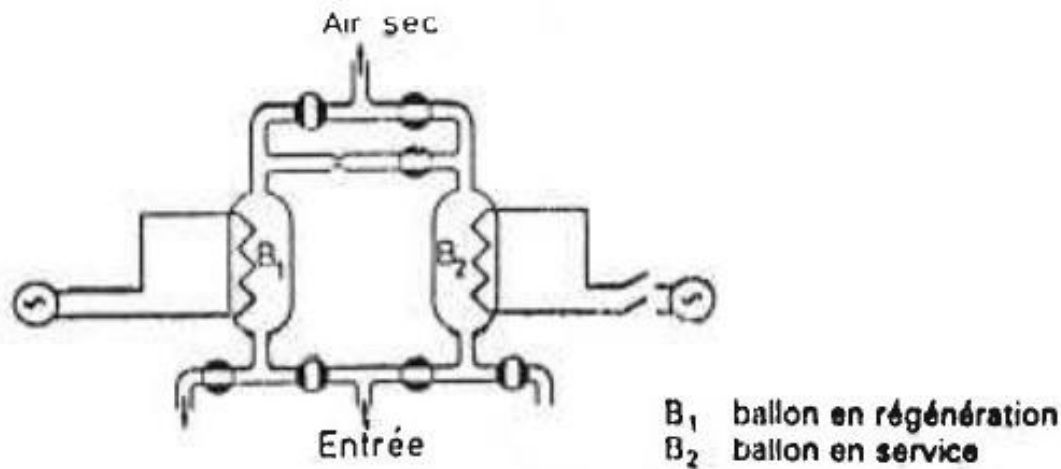


B1 Ballon en service
B2 Ballon en régénération
C Chauffage
V Ventilateur

Séchage de l'air

- **B.3 Avec apport de chaleur interne**

Même principe que précédemment, mais les résistances électriques sont placées à l'intérieur des réservoirs adsorbants. Une attention particulière doit être apportée au risque de surchauffe des particules adsorbantes, selon le débit, la pression et la température de l'air comprimé. Par ailleurs, si les résistances électriques internes sont directement en contact avec les particules, il faut éviter que celles-ci se déposent sur les résistances, car cela diminuerait la performance calorifique des résistances.

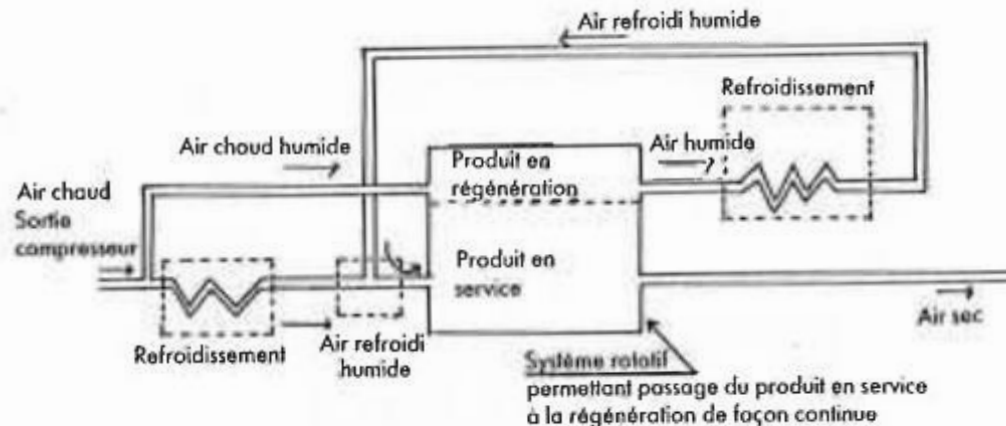


Séchage de l'air

- **B.4 Avec apport d'air comprimé chaud et recycle**

Ces sécheurs se présentent soit sous la forme de sécheurs à deux réservoirs, soit sous la forme de sécheurs à tambours (échangeur à roue). Ils utilisent dans les deux cas une partie de l'air très chaud, exempt d'huile, envoyé par un compresseur dédié pour régénérer les particules adsorbantes. L'air chaud régénérateur est ensuite refroidi et réinjecté en amont du sécheur pour être traité à son tour. Ce mode est le plus économique en termes d'énergie, mais il nécessite un air exempt d'huile et son utilisation est limitée à certains types de compresseurs. Chaque sécheur est accouplé à un compresseur.

La consommation énergétique des sécheurs à tambour est très faible, car limitée à celle du moteur qui entraîne à petite vitesse la rotation du tambour qui contient les particules adsorbantes. Ceci quel que soit le débit et avec une perte de charge de l'ordre de 0,25 bar, soit 2 % de l'énergie consommée par le compresseur à 7 bars.



Séchage de l'air

Comparaison des performances des systèmes de séchage frigorifique et par adsorption.

Régénération	Sans apport de chaleur	Avec apport de chaleur externe	Avec apport de chaleur interne	Avec apport d'air comprimé chaud et recyclé	Combinaison frigorifique + adsorption
Point de rosée	-20°C à -40°C	-20°C à -40°C	-20°C à -40°C	-20°C à -40°C	-60°C à -80°C
Consommation (kWh/h) pour 1000 Nm ³ /h d'air comprimé à 7 bars	15	8,5	8,5	≤ 2,5	4,1

Séchage de l'air

C. Séchage par perméation à membrane

L'air comprimé traverse une membrane constituée de fibres creuses et poreuses qui bloquent les molécules d'eau. L'air ainsi asséché est dirigé vers le réseau. Des filtres dépoussiéreurs et dévésiculateurs (eau et huile) doivent être installés en amont des unités de séchage. Ces équipements sont habituellement compacts.

Ce mode de séchage est réservé aux traitements de petits débits allant jusqu'à 150 m³/h, pour des points de rosée variables entre 10°C et -40°C. Généralement décentralisé, il permet d'assurer une protection des équipements sensibles quelque soit la qualité de l'air délivré par la centrale de compression.

La consommation d'air comprimé détendu permet la purge du condensat vers l'extérieur, prévoir environ 10 % de la production d'air comprimé pour cette opération.

Il existe différents types de membranes perméables et aussi semi-perméables à l'air: le principe de fonctionnement énoncé précédemment peut donc varier sensiblement.

[Retour
Synoptique](#)



Condensat

Aspect environnemental

Lorsque la compression est lubrifiée, les condensats issus du séchage de l'air comprimé sont chargés d'hydrocarbures (huile de lubrification pour limiter les frottements entre les parties mobiles et statiques dans le volume de compression).

Ces rejets sont particulièrement nuisibles à l'environnement, car ils sont difficilement biodégradables, ils entravent l'apport d'oxygène, DCO (Demande Chimique en Oxygène – ces produits consomment l'oxygène présente dans l'eau pour leur dégradation par oxydation) et donc perturbent l'efficacité du processus d'épuration des boues par décomposition.

La législation relative aux rejets d'hydrocarbures rend obligatoire le traitement de ces effluents polluants: Décret n°77-1133 du 21 septembre 1977, Loi du 13 juillet 1992, Décret du 20 décembre 1993, Arrêté du 2 février 1998. Les valeurs de rejets sont notifiées par la réglementation nationale et les arrêtés préfectoraux d'autorisations des installations classées.

Pour plus de détails, il *convient* de consulter son arrêté d'exploitation ou son organisme qui gère la station d'épuration des eaux.



Condensat

Purgeurs d'eau condensée

Tous les éléments d'une station d'air comprimé : les compresseurs, les sécheurs frigorifiques, les filtres, les réservoirs de stockage nécessitent l'utilisation de purgeurs automatiques de condensats. Dans le cas d'un système de traitement spécifique des condensats, il convient de prévoir l'utilisation de purges capacitives (sonde de détection de niveau et parfois de polluants) adaptées à son bon fonctionnement.

Il existe trois principaux types de purgeurs d'eau condensée automatiques pour réseau d'air comprimé, caractérisés par des niveaux de performances différents.

(voir tableau, slide suivant)

Condensat

Purgeur	Fonctionnement	Performance
avec sonde de niveau	Lorsque le niveau de condensat atteint un certain niveau dans le réservoir, cela l'ouverture d'une vanne pour son évacuation. Lorsque le niveau bas est détecté, la vanne se referme.	<ul style="list-style-type: none">• La perte d'air comprimé est nulle, à condition que les niveaux soient correctement réglés.• Les sondes capacitives de niveaux sont fiables et dérivent rarement au cours du temps, toutefois prévoir une maintenance régulière surtout en cas de condensat chargés de polluant.
avec minuterie	L'évacuation est réalisée par une ouverture commandée par une minuterie	<ul style="list-style-type: none">• Ce mode de fonctionnement ne s'adapte pas aux variations de quantité de condensat liées aux conditions atmosphériques et taux de charge des compresseurs.• Propice à des fuites d'air comprimé
à flotteur fermé	Le purgeur à flotteur fermé est un dispositif autonome (sans apport d'énergie) dans lequel le condensat est collecté dans sa partie inférieure réceptacle où un flotteur mobile monte et descend en fonction du niveau, et permet l'ouverture ou la fermeture de l'orifice d'évacuation.	<ul style="list-style-type: none">• Equipement de fonctionnement simple, robuste et fiable qui ne génère pas de fuite d'air comprimé dans sa marche normale.• Contrôle périodique du bon fonctionnement à prévoir (encrassement du siège de clapet) .

[Retour
Synoptique](#)



Filtration

La filtration sert à éliminer la vapeur d'huile provenant des compresseurs lubrifiés ou à injection d'huile et les particules solides contenus dans l'air aspiré.

Plus la filtration est fine et plus les pertes de charge générées par le dispositif de filtration est élevée; il importe de choisir le dispositif en fonction des exigences nécessaires pour le site (équipements dans les ateliers).

Dans le cas où un besoin de filtration spécifique d'air concerne une partie restreinte d'un site, la filtration spécifique pourra être localisée juste en amont des équipements concernés.

Les filtres à air (en amont des compresseurs)

A l'aspiration des compresseurs, ils retiennent les poussières de l'air qui peuvent détériorer les organes du compresseur et des accessoires. Un entretien des filtres est à prévoir avec des changement ou des nettoyages périodiques.

Pour vérifier l'encrassement de ces filtres, on placera un manomètre pour indiquer la perte de pression (perte de charge) due à l'encrassement. Par exemple, en marche nominale, un filtre indique une perte de pression de 5 mbar lorsqu'il est propre et une perte de pression de 35 mbar lorsqu'il est encrassé.

On pourra coller des gommettes de couleur sur le manomètre pour montrer la plage optimale de fonctionnement lorsque le filtre n'est pas encrassée.



Filtration

Les filtres de ligne (à poussières et huiles)

Ils retiennent les particules liquides (huiles, eau) et solides (poussières) qui circulent dans le réseau. Les cartouches des filtres génèrent des pertes de charge, estimées en moyenne pendant leur durée de vie à 0,3 bar dans un réseau à 6 bars.

Il est important d'assurer leur remplacement avec une périodicité suffisante (très variable, en fonction de leur taux d'encrassement).

Leur utilité doit être vérifiée de temps en temps, car à l'instar d'un certain nombre d'accessoires installés sur le réseau depuis de nombreuses années, il arrive parfois que l'on découvre des filtres qui ne servent plus. Par exemple, parce qu'une nouvelle filtration a été installée dans la salle des compresseurs, ou parce que les cartouches de filtration ne sont plus changées et sont totalement colmatées, ou parce qu'il n'y a plus de cartouche dans les corps des filtres...

Il est important que les filtres disposent d'un indicateur d'encrassement (manomètre ou jauge) pour assurer un bon entretien de ces équipements. Les pertes de charge sont usuellement comprises entre 0,3 et 0,5 bar.

Les cartouches filtrantes sont des consommables à changer périodiquement.

On parle aussi de séparateur d'eau ou séparateur d'huile pour désigner un filtre.

[Retour
Synoptique](#)

Instruments de mesure

On ne maîtrise que ce que l'on mesure : un adage pour agir sur l'efficacité énergétique d'un réseau d'air comprimé.

Apprécier l'enjeu : un autodiagnostic

Il existe quelques dispositifs déjà existants ou simples à mettre en place pour votre installation d'air comprimé qui permettent d'apprécier sa performance énergétique.

- **Les compteurs horaires**

Au niveau des compresseurs, ils permettent d'obtenir: le temps de marche, le temps de marche à pleine charge et le temps de [marche à vide](#).

- **Les compteurs électriques**

Au niveau des compresseurs, ils permettent d'obtenir: la puissance électrique consommée à pleine charge, la puissance électrique consommée à vide, la consommation électrique mensuelle (ou sur tout autre durée). Ces données permettent d'apprécier la consommation, suivre son évolution ou les dérives au cours du temps.

Instruments de mesure

Exemple:

Cas d'une installation de 3 compresseurs de même puissance et de débit unitaire 1600 m³/h.
Fonctionnement de l'usine : 4160 heures/an.

Temps (heures)	Pleine charge	A vide	Total	Pleine charge/total
Compresseur n°1	2 980	1 100	4 080	73 %
Compresseur n°2	1 375	2 055	3 430	40 %
Compresseur n°3	1 630	2 340	3 970	41 %
Total	5 985	5 495	11 480	52 %

L'action d'amélioration consiste à améliorer la régulation des 3 compresseurs pour réduire le temps de marche à vide. Un bilan annuel des consommations électriques confirmerait que 1,44 compresseur fonctionnant à plein charge satisferait théoriquement au besoin de l'usine.

Instruments de mesure

Les débitmètres

Parmi les mesures à effectuer sur l'air comprimé, comme pour la plupart des fluides industriels, la plus délicate concerne la mesure de débit. Il existe un certain nombre de principes de mesures assortis d'un plus grand nombre de types de capteurs et de fournisseurs.

Tout d'abord, pour être correct, le calcul de débit d'air comprimé doit être corrigé de sa pression relative, de sa température, et de son humidité relative.

Il faut ensuite être vigilant sur les indications de débit, soit des compresseurs, soit des équipements utilisateurs, car les débits volumiques ne sont toujours ramenés aux mêmes conditions de références.

La norme NF ISO 1217 des compressoristes prend en compte une température d'air à 20°C,
Les gaziers utilisent les m³ dits « standards » à 15°C,
Les fabricants de compresseurs centrifuges raisonnent avec des m³ à 35°C.

Cette diversité de référentiels peut conduire à une mauvaise interprétation des caractéristiques et des [engagements contractuels](#), notamment en terme de performances, car plus la température prise en compte est élevée, meilleur est le rendement indiqué.



Instruments de mesure

Le plus sûr est de prendre comme unités les Normaux mètre cube (Nm³), ramenés à 0°C et à l'état sec (humidité relative HR = 0 %) et bien entendu à 1,013 bar absolu.

A retenir: Pour les constructeurs de compresseurs, le débit d'air comprimé à la sortie d'un compresseur est ramené aux conditions d'aspiration du compresseur, en prenant pour conditions de référence une température ambiante (20°C), une pression ambiante (1 bar absolu) et une humidité relative (0 %). Ce débit d'air, appelé débit FAD (Free Air Delivery) ou débit d'air libre, est exprimé en l/s (litre par seconde).

Dans ce même ordre de considération, il convient de vérifier que les données affichées sur une armoire d'un compresseur (notamment des ratios) sont des données issues d'une mesure de débit réel (débitmètre installé).



Instruments de mesure

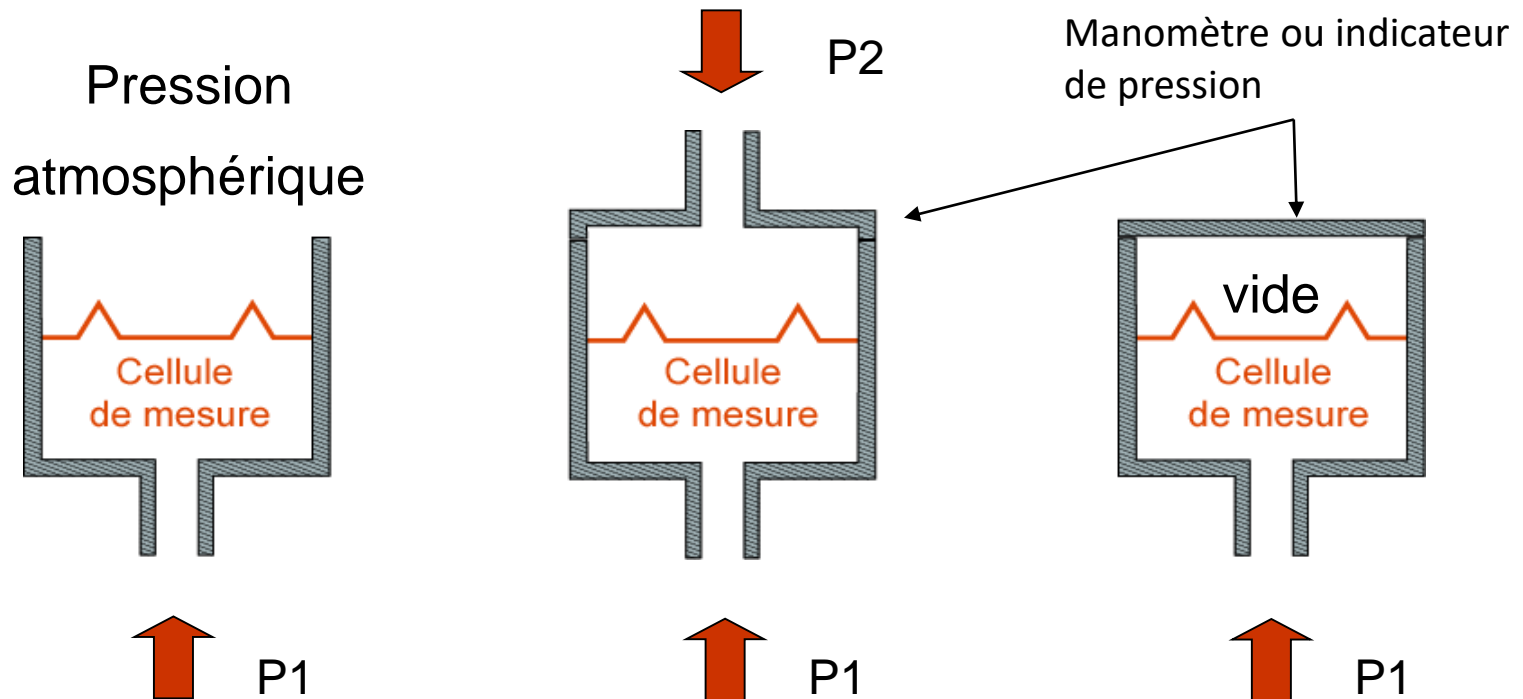
Les manomètres

Les manomètres sont des instruments de mesure de la pression ; ils ont plusieurs rôles. Ils indiquent la pression en différents endroits de l'installation, à la sortie des compresseurs, sur le réseau et aux postes utilisateurs. Lorsqu'ils sont équipés d'un transmetteur de signal, la valeur de la grandeur mesurée sert à la boucle de régulation et/ou d'alarme, par exemple pour la marche des compresseurs. Les manomètres renseignent sur l'état de l'installation d'air comprimé, notamment l'observation d'une diminution inhabituelle de la pression sur une portion du réseau pourrait signaler une perte de charge importante liée à un encrassement.

Ils existent plusieurs unités et terminologies pour définir les pressions, chacune ayant ses propres utilités. Le schéma, ci-après, rappelle les différences entre la pression effective (la plus utilisée pour l'air comprimé), la pression absolue et la pression différentielle.

Instrumentes de mesure

DIFFERENTES APPELATIONS DE PRESSION



Pression effective
ou
Pression relative
(par rapport à la pression atmosphérique)

Pression différentielle

Pression absolue

Retour Synoptique

Comptage

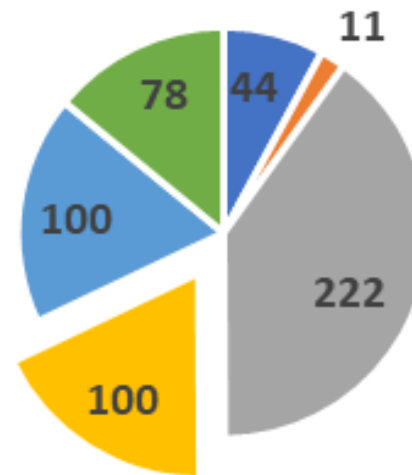
L'air comprimé est un fluide énergétique véhiculé au sein de tuyauteries sous pression. Sa production et distribution, depuis le local des compresseurs jusqu'au poste utilisateur final, ne se fait pas sans de nombreuses pertes qu'il est utile de comptabiliser ou à défaut d'évaluer.

Le tableau ci-dessous donne une répartition moyenne des différentes pertes énergétiques pour une énergie utile donnée (base 100 kWh, au poste utilisateur final) dans le cas d'une installation de production et distribution d'air comprimé considérée comme optimisée.

Répartition de l'énergie (kWh)Pertes	Cas courant	Cas optimisé
Pertes moteur (électrique)	125	44
Perte transmission (mécanique)	50	11
Pertes compression (thermique)	593	222
Energie utile (base 100)	100	100
Pertes outils et postes utilisateurs	213	100
Pertes réseau (pertes de charge et fuites)	169	78
Total	1 250	555
Rendement global	8 %	18 %

Comptage

Cas optimisé de production et distribution d'air comprimé (pour une base de 100 kWh d'énergie utile)

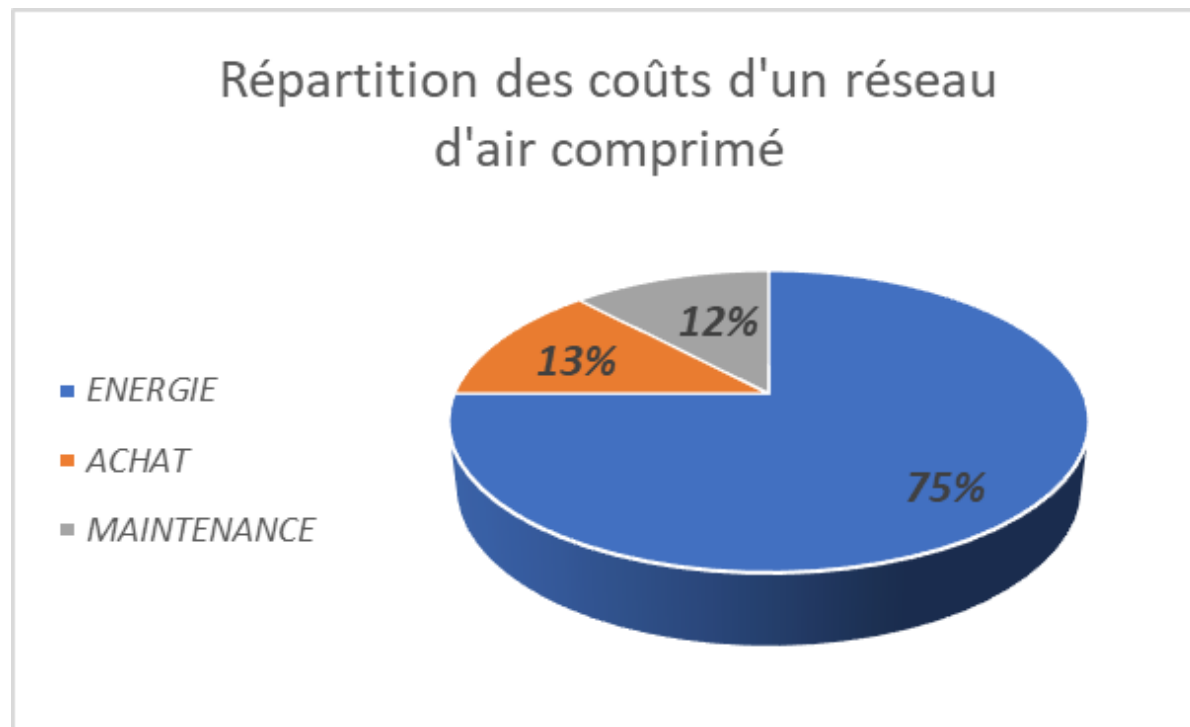


- Pertes moteur (électrique)
- Perte transmission (mécanique)
- Pertes compression (thermique)
- Energie utile
- Pertes outils et postes utilisateurs
- Pertes réseau (perte de charge et fuites)

Comptage

L'air comprimé est un fluide énergétique coûteux. Son prix de revient est très variable d'une installation à l'autre. Il dépend du coût d'achat des compresseurs, des frais d'installation des équipements et du réseau de distribution, des coûts de maintenance... sans oublier le coût de la consommation d'électricité.

A défaut d'informations précises, sur la durée conventionnelle de fonctionnement d'un compresseur, la répartition usuelle peut se décomposer suivant le graphique ci-dessous.



Comptage

Quelques Indicateurs de Performance Energétique et ordres de grandeurs de valeurs pour des paramètres de suivi de l'efficacité énergétique d'un réseau d'air comprimé sont communiqués ci-après.

Indicateur à la Centrale de production d'air comprimé à 7 bar eff Consommation spécifique en sortie de centrale (Wh/Nm³)

Centrale production dégradée	> 180
Centrale production courante	≈ 160
Centrale production optimisée	< 130

Taux de fuite d'air comprimé à 7 bar eff sur le réseau et installation (%)

Installation dégradée	> 40
Installation courante	≈ 20 à 30
Installation optimisée	< 10

Comptage

Perte de charge installation+réseau d'air comprimé à 7 bar eff Perte de charge (bar)

Perte de charge dégradée	> 1,5
Perte de charge courante	≈ 1
Perte de charge optimisée	< 0,5

Indicateur au Poste consommateur final d'air comprimé Consommation spécifique (Wh/Nm³)

Indicateur production et distribution dégradées	> 200 à 7 bar eff
Indicateur production et distribution courantes	≈ 200 à 6 bar eff
Indicateur production et distribution optimisées	< 150 à 6,5 bar eff

[Retour
Synoptique](#)



Régulation

Ce chapitre présente brièvement quelques notions de régulation qui régissent le fonctionnement des compresseurs; le but est de poser des bases pour mieux comprendre l'intérêt d'une gestion et régulation centralisées des compresseurs.

Marche/Arrêt

C'est le principe du tout ou rien, soit le compresseur fonctionne, soit il est à l'arrêt. Le compresseur est commandé par un pressostat et démarre quand la pression est minimale et s'arrête à la pression maximale de consigne. Ce mode de fonctionnement binaire concerne quasi exclusivement des petites installations aux usages très intermittents ($< 35 \text{ Nm}^3/\text{h}$) des compresseurs à piston, à palettes et à vis.

Pour fonctionner de façon optimale:

- le nombre de cycle d'enclenchement doit être réduit pour réduire l'usure du moteur (démarrage).
- Le [dimensionnement du réservoir](#) de stockage sera alors déterminant pour la pérennité du moteur (volume suffisamment grand pour limiter le nombre de démarrages du moteur).
- Un appel de courant de charge, à chaque démarrage, peut être pénalisant par rapport au contrat de fourniture d'électricité.

Régulation

Marche en charge/à vide

Le clapet d'aspiration du compresseur se ferme quand la pression maximale de l'air comprimé est atteinte et s'ouvre à la pression minimale. Quand le clapet est fermé, le compresseur est délesté, une soupape s'ouvre et réduit la pression interne de la machine qui tourne alors « à vide ». Cette marche à vide concerne les compresseurs à piston, à palettes et à vis.

- Le moteur du compresseur fonctionne en permanence,
- A chaque décompression de la machine, il y a moussage de l'huile (mise à l'atmosphère),
- Le dimensionnement du réservoir de stockage sera alors déterminant pour limiter le nombre de mises à vide,
- La marche à vide consomme de l'électricité inutilement. La puissance appelée à vide est comprise entre 15 et 35 % de la puissance appelée en charge pour les compresseurs à vis, et de l'ordre de 20 % pour les compresseurs à piston.

Variante: Pour limiter la consommation d'énergie, le compresseur est arrêté après un certain temps de marche à vide. Ce temps (minutes) est généralement égal à 60 min/nombre de démarrages autorisés par heure (limite du moteur), par exemple un moteur de 30 kW peut démarrer 10 fois par heure, le compresseur sera réglé pour s'arrêter après 6 min de marche à vide.

Le compresseur ne tourne donc plus nécessairement en permanence.

Régulation

Marche proportionnelle

Le clapet d'aspiration en amont du compresseur s'ouvre et se ferme proportionnellement à la demande d'air comprimé. Le clapet est piloté pneumatiquement ou hydrauliquement par la pression, toute baisse de pression entraîne son ouverture plus ou moins grande.

Ce mode de fonctionnement est un intermédiaire entre la marche en charge/à vide et la Variation Electronique de Vitesse (VEV). Il offre l'avantage de limiter les cycles de démarrage du moteur mais ne permet de travailler au meilleur de son rendement. La pression d'air comprimé reste quant à elle relativement constante.

Variation Electronique de Vitesse

La Variation Electronique de Vitesse (VEV) permet d'adapter la vitesse de rotation du moteur du compresseur en fonction de la fluctuation de la demande en air comprimé. Ce dispositif est courant dans les centrales des fluides fonctionnant avec plusieurs compresseurs où l'un (ou plusieurs) d'entre eux peuvent convenir aux fluctuations des besoins en air comprimé.

- Le compresseur tourne en permanence et il n'y a plus (ou presque plus) de marche à vide
- La vitesse de rotation varie en fonction du débit demandé en air comprimé,
- La puissance appelée électrique est quasi proportionnelle à la demande.

[La VEV augmente les performances énergétique de l'installation d'air comprimé.](#)



Régulation

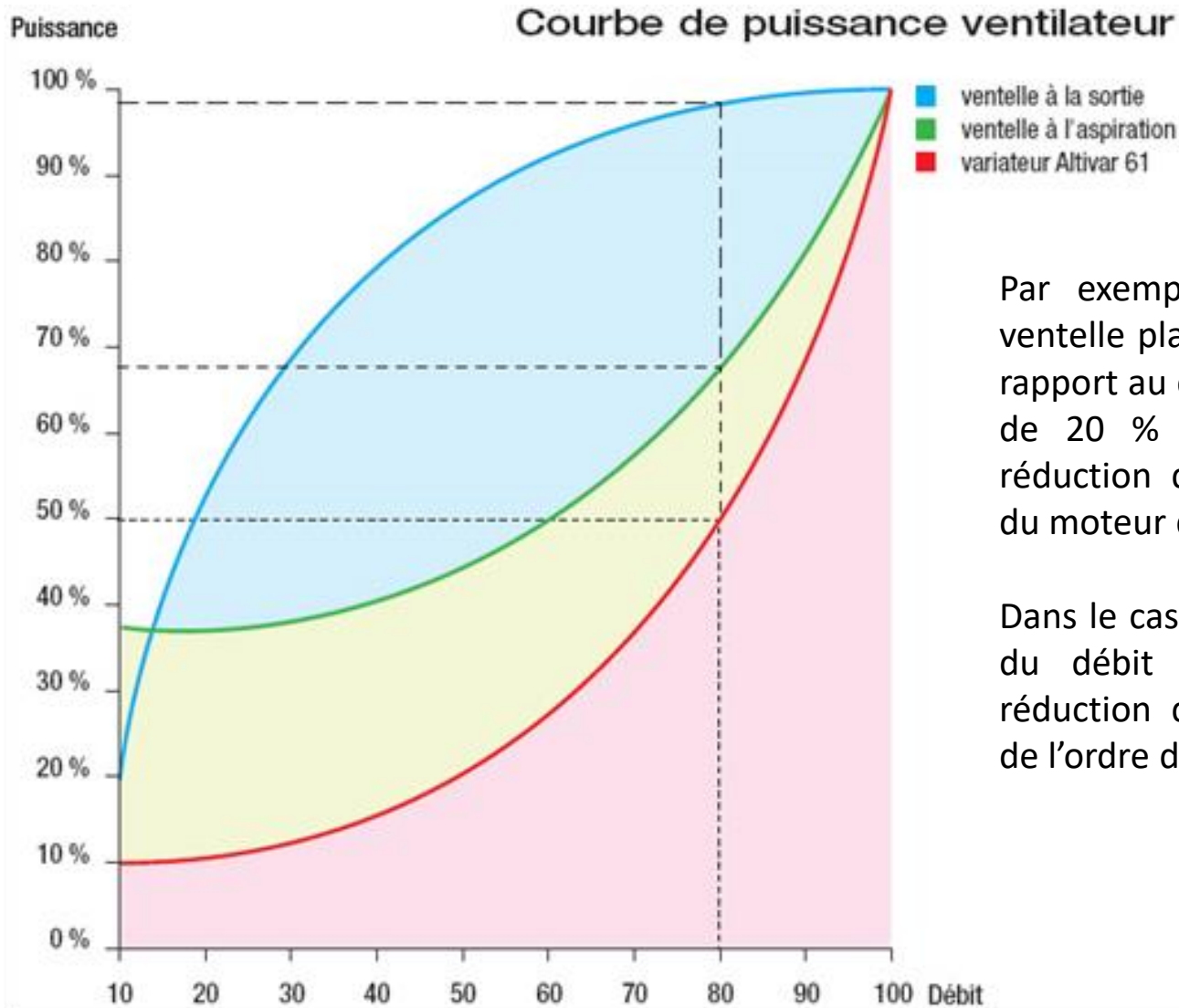
Rôles d'un variateur de vitesse :

- Obtenir des vitesses de rotation du moteur différentes de sa vitesse nominale,
- Satisfaire à la demande du couple nominal entre la vitesse nulle et la vitesse nominale du moteur,
- Permettre la mise en vitesse progressive du moteur en charge,
- Permettre de contrôler le freinage du moteur.

L'usage du variateur de vitesse permet de remplacer les vannes de régulation utilisées pour moduler le débit en obturant la conduite (augmentation de la perte de charge par un clapet sur un siège de vanne ou par un système de registre) lorsque le moteur tourne à vitesse fixe. Le schéma [ci-dessous](#) permet de prendre connaissance du gain énergétique qu'il y a avec un variateur de vitesse, et à l'inverse de constater le gaspillage d'énergie par les dispositifs conventionnels de registre ou vanne de régulation.

Les installations de pompage ou de ventilation ont classiquement une loi de régulation de type quadratique (évolution de la puissance en fonction du débit). Lorsque l'on cherche à moduler le débit, on obture le circuit. La pompe continue à fonctionner et pousse le fluide sur un orifice de fermeture, la puissance du moteur s'adapte mais elle ne varie que très peu car en accordance avec la loi de débit et de pression (ces deux paramètres évoluant en sens inverse l'un par rapport à l'autre).

Régulation



Par exemple avec un système de ventelle placée en sortie (en aval par rapport au circulateur), une réduction de 20 % du débit engendre une réduction de la puissance absorbée du moteur d'environ 3%.

Dans le cas d'une VEV, une réduction du débit de 20% engendre une réduction de la puissance absorbée de l'ordre de 50%.

Régulation

Gestion Technique Centralisée (GTC) et Automatismes

Ces dispositifs permettent non seulement de suivre les caractéristiques techniques en temps réel, de donner des alarmes, de gérer les périodes d'entretien... mais aussi d'adapter la combinaison de marche des compresseurs en fonction du débit d'air comprimé demandé sur le réseau. Ils utilisent notamment la Variation Electronique de Vitesse en plus des automatismes de contrôles.

Ces dispositifs se rencontrent dès que deux compresseurs sont en marche, l'un pour convenir au talon des besoins en air comprimé et l'autre pour convenir aux fluctuations et pointes en air comprimé, auxquels s'ajoutent le ou les compresseurs de secours.

Ces dispositifs viennent en remplacement des modes de fonctionnement en cascade classique, qui imposent un palier de pression par compresseur, ils permettent d'abaisser la pression maximale en sortie de centrale d'air comprimé, de réduire les marches à vide et ainsi d'apporter un gain énergétique supplémentaire.

[Retour
Synoptique](#)



Contrat d'exploitation

L'approche contractuelle de la gestion des installations d'air comprimé (production d'air comprimé et/ou réseau de distribution) peut passer par différents niveaux, du traditionnel contrat de maintenance des moyens de production et de distribution d'air comprimé assuré par le constructeur, l'installateur ou l'un de ses représentants, jusqu'à l'achat de mètres cubes d'air comprimé avec Contrat de Performance Energétique (CPE, [Guide des solutions de financement](#)).

Ces contrats peuvent concerner, ensemble ou séparément, les trois aspects des coûts d'exploitation : maintenance des installations en place, financement des investissements, et consommations énergétiques (essentiellement électriques). Ils peuvent être assortis de contrats de financement : crédit classique, crédit bail, location longue durée avec à terme une valeur résiduelle symbolique ou réelle, cession à terme de la propriété des équipements.

Pour la partie énergie, la plus importante des coûts d'exploitation, il peut être proposé : le simple engagement de performance énergétique sur contrôle ponctuel et périodique, l'engagement de performance énergétique dans la durée avec comptage permanent, la prise en charge de la consommation énergétique par la facture de mètres cubes délivrées, le paiement direct aux fournisseurs d'énergie (en cas de cession de propriété).

La mise en place d'indicateurs de performance énergétique et les précisions des conditions de fourniture de l'air comprimé sont requises pour analyser de tels contrats d'exploitation.

Contrat d'exploitation

Rappelons que plusieurs fiches d'opérations standardisées des CEE (Certificat Economie d'Énergie) sont applicables à des installations d'air comprimé, et apportent des avantages économiques sur les coûts des équipements dans le cadre ou pas d'un contrat d'exploitation.

On trouve notamment:

- ND-UT-102 : Système de variation électronique de vitesse sur un moteur asynchrone
- IND-UT-103 : Système de récupération de chaleur sur un compresseur d'air
- IND-UT-114 : Moto-variateur synchrone à aimants permanents ou à reluctance
- IND-UT-120 : Compresseur d'air basse pression à vis ou centrifuge
- IND-UT-122 : Sécheur d'air comprimé à adsorption utilisant un apport calorifique pour sa régénération
- IND-UT-124 : Séquenceur électronique pour le pilotage d'une centrale de production d'air comprimé
- IND-UT-127 : Système de transmission performant
- IND-UT-134 : Système de mesurage d'indicateurs de performance énergétique

[Retour
Synoptique](#)

Aspiration d'air

La température de l'air aspiré avant compression a un impact sur la performance énergétique des compresseurs. Plus l'air aspiré est frais, plus il est dense (pour une même masse d'air le volume occupé est moindre), et plus il sera possible pour un compresseur de fournir pour une même cylindrée une masse ou un débit d'air comprimé plus important.

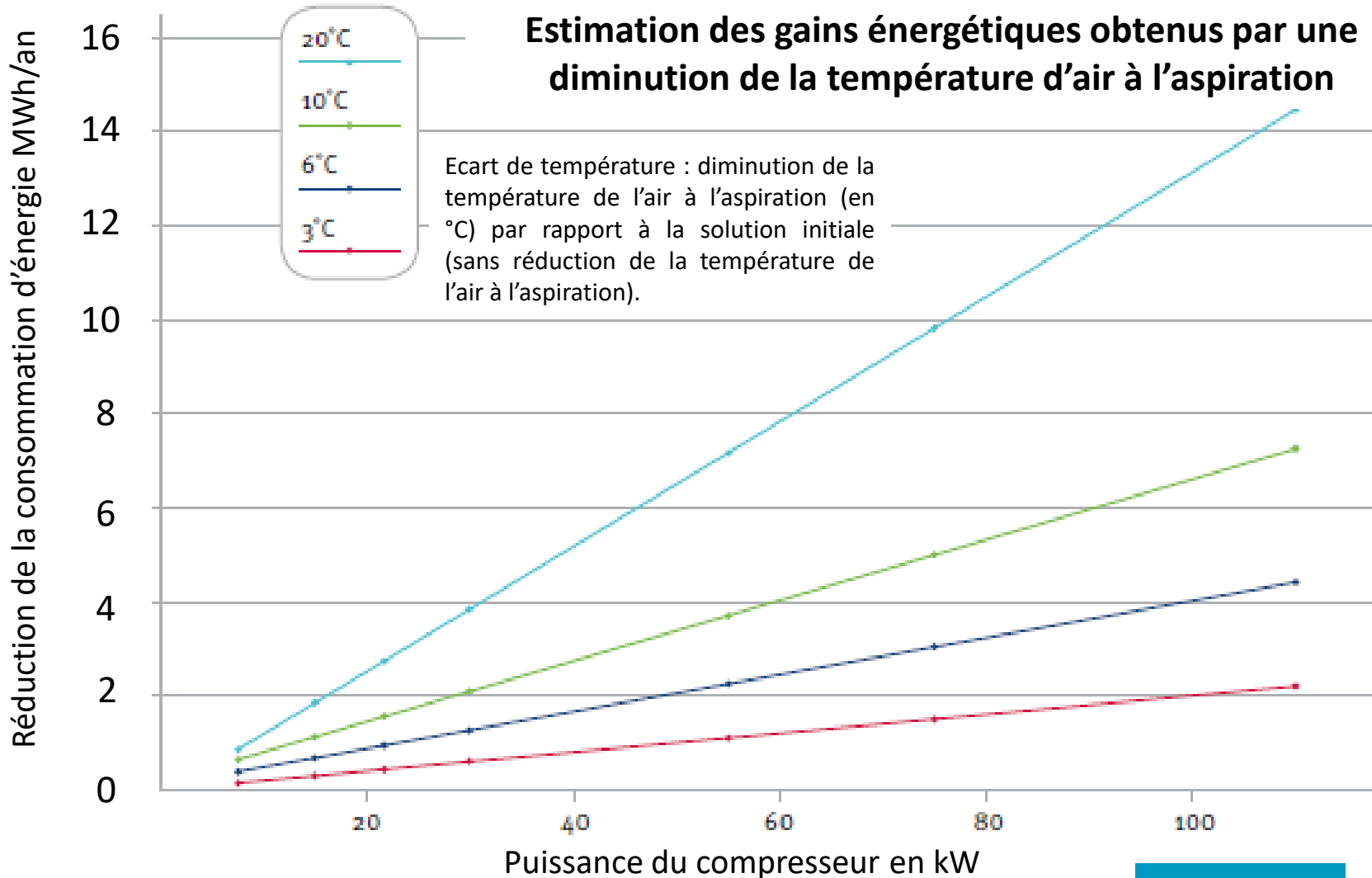
Une alimentation d'air à partir de l'air extérieur (plus frais que celui situé dans le local compresseur) ou éventuellement mélangé avec l'air du local compresseur grâce à un registre est conseillée.

Pour chaque réduction de 3°C de la température d'air aspiré, il y a 1 % de réduction de la consommation spécifique énergétique.

La graphique ci-après fournit une indication sur les gains énergétiques qui peuvent être obtenus par la diminution de la température d'entrée d'air avec des écarts compris entre 3°C et 20°C. Les hypothèses de calculs sont pour un compresseur fonctionnant à une pression de 7 bars effectifs pendant 2 000 heures par an. Les gains énergétiques (axe des ordonnées, en MWh/an) sont présentés pour des puissances de compresseurs évoluant entre 7,5 et 110 kW (axe des abscisses).

(voir graphe, slide suivant)

Aspiration d'air



Exemple: pour un compresseur de 60 kW et une diminution de 6°C de la température de l'air à l'aspiration, alors le gain estimé de la réduction de la consommation d'énergie est d'environ 2,5 MWh/an (hypothèses: 7 bar eff et 2 000 heures/an)

[Retour Synoptique](#)

Récupération de chaleur

Une compression réelle d'air de 0 à 7 bars effectifs s'accompagne d'une élévation de sa température de 15°C (température ambiante d'aspiration) à 250 °C.

Il est donc nécessaire de refroidir cet air pour améliorer l'efficacité énergétique (travail mécanique de compression), et convenir à sa distribution sur le réseau. Au final, on récupérera le contenu calorifique de l'air pour une autre utilisation.

- Sur les compresseurs d'air refroidis par air ambiant, la récupération de l'air chaud (air ambiant ayant servi au refroidissement) directement véhiculé dans les gaines de ventilation peut permettre de valoriser jusqu'à 95 % de la chaleur dégagée par le compresseur. Des exemples habituels d'utilisation sont le chauffage des ateliers et le séchage de pièces.
- Les compresseurs d'air refroidis par eau se prêtent bien à la récupération du contenu calorifique de l'eau. Dans ce cas l'installation d'un échangeur supplémentaire est nécessaire et offre plus de possibilités de valorisation de la chaleur, par exemple: chauffage des locaux, production d'eau chaude sanitaire, eau chaude pour les procédés, préchauffage de l'eau des chaudières....

De manière générale une récupération de chaleur n'est pas rentable si la puissance des compresseurs est inférieure à 15 kW.

Compresseurs

Il n'existe pas une technologie de compression meilleure par rapport à toutes les autres, de même il n'existe pas une installation d'air comprimé universelle et valable pour toutes les entreprises.

Chacune des technologies de compression possède ses avantages et ses inconvénients, chaque entreprise a ses propres besoins caractéristiques en air comprimé.

Le choix d'un compresseur s'effectue après avoir optimisé le fonctionnement (voire remise en état) des éléments qui constituent l'installation d'air comprimé.

Un choix rationnel

Le choix d'un compresseur est un choix rationnel porté par l'analyse de critères :

- [Pression du réseau](#)
- [Débit à assurer](#)
 - Consommation maxi
 - Variabilité de la consommation (Si le débit d'air varie, il est généralement préférable de mettre en œuvre plusieurs compresseurs de débit faible ou moyen plutôt qu'un appareil de grande puissance)
- [Qualité de l'air comprimé](#) (huile, humidité)
- [Maintenance](#) des installations
- [Coût global](#) de l'air comprimé

Compresseurs

La question de la lubrification

Pour des compressions comprises entre 7 et 10 bars effectifs, la solution de lubrification permet d'avoir un compresseur avec un seul étage de compression, donc bien souvent moins coûteuse à l'achat par rapport à une solution de compression bi-étagée.

Sans la solution de lubrification, il faudrait des compresseurs non lubrifiés montés en deux étages de compression, avec refroidissement intermédiaire entre les étages, ce qui renchérit nettement l'investissement.

D'un autre côté, il convient de considérer que dans le cas d'une solution de compression avec lubrification, l'installation d'équipements supplémentaires pour la filtration de l'huile (brouillard d'huile dans l'air comprimé) et le traitement des condensats souillés à évacuer est nécessaire.

Finalement, le bilan technico-économique de la solution lubrification est à étudier de près par rapport à une solution non lubrifiée:

- La maintenance des machines lubrifiées est plus onéreuse,
- Des équipements supplémentaires doivent être achetés et installés (coûts de main d'œuvre et occupation de l'espace),

Compresseurs

- Les consommations électriques augmentent pour compenser les pertes de charge provoquées par les équipements supplémentaires ([filtre](#)),
- Des coûts d'exploitation, vidanges d'huile régulières, changement de cartouches de filtres, des opérations de désencrassement. **Ces coûts apparaissent en augmentation constante à mesure que la réglementation environnementale devient plus sévère, notamment pour les installations ICPE.**

Compression bi-étagée et mono-étagée

Les compresseurs bi-étagés de part leur cycle thermodynamique ont des rendements améliorés par rapport à une compression à un seul étage. Ils existent sur des plages de débits délimitées qui couvrent des plus petits débits (10 Nm³/h) aux plus grands débits (60 000 Nm³/h) .

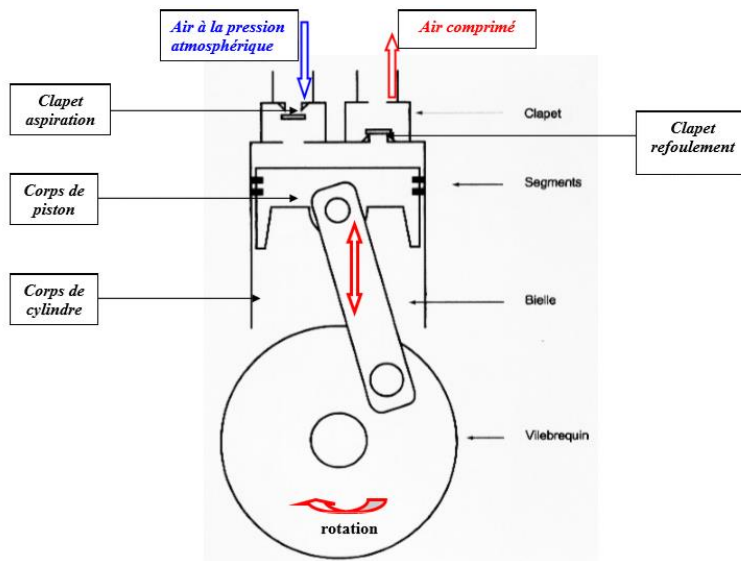
Les compresseurs mono-étagés sont moins onéreux du fait de leur conception, la gamme standard s'étend jusqu'à 1 500 Nm³/h, et sont intéressants pour une faible pression de refoulement de l'ordre de 3 à 4 bars effectifs.

Compresseurs

Compresseurs à piston

Ce sont des machines robustes, à simple effet le piston comprime dans un sens, à double effet le piston comprime dans deux sens. Un mode de régulation spécifique s'opère pour le double effet.

Ils permettent d'atteindre des pressions élevées (> 14 bars eff). Les compresseurs mono-étagés sont limités à une pression de 8 à 10 bars, mais aussi pour des pressions plus faibles, on a recours à un compresseur double effet ou bi-étagé (2 pistons) avec refroidissement extérieur. La consommation spécifique des machines lubrifiées est plus faible que celle des machines non lubrifiées, ces dernières doivent faire l'objet d'une maintenance élevée.



Les machines refroidies par eau sont plus efficaces énergétiquement que celles refroidies par air, tant à charge nominale qu'à charge partielle.

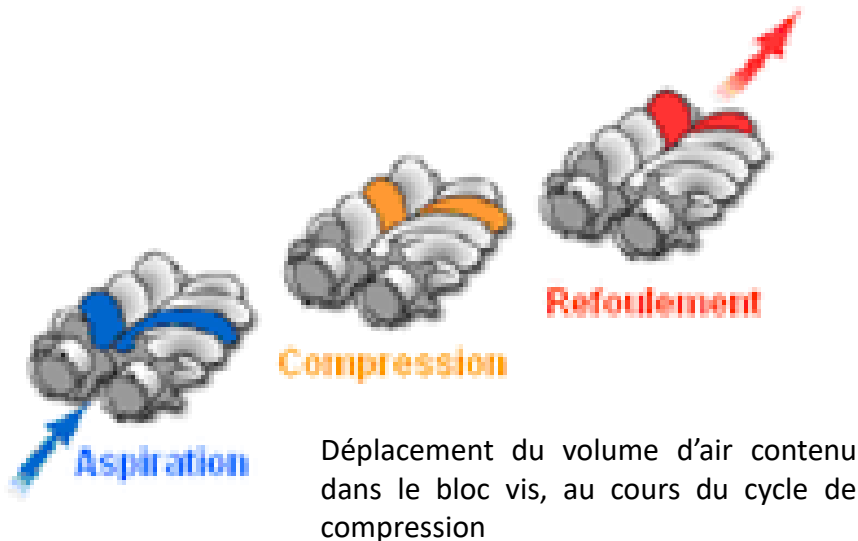
Les compresseurs à piston appartiennent à la famille des machines volumétriques ; la compression est obtenue par la réduction du volume contenu dans le segment entre les clapets en position fermée et le corps du piston.

Compresseurs

Compresseurs à vis

Les compresseurs à vis peuvent être mono-étagés ou bi-étagés (2 blocs vis). Ils ont usuellement deux modes de régulation: par fermeture et par mise à vide intermittente. Ils ne doivent pas être régulés par fermeture progressive de l'aspiration aux faibles débits, se limiter à un débit compris entre 70 et 100 %. Généralement, préférer les mises à vide avec baisse de pression de fonctionnement du bloc vis.

Les compresseurs à vis lubrifiés sont souvent moins efficaces que les machines non lubrifiées, principalement dû au fait que ces machines sont mono-étagées. Les compresseurs non lubrifiés sont souvent bi-étagés pour une plage de pression entre 5 et 10,5 bars.



Les machines refroidies par air sont disponibles jusque 3 500 Nm³/h et celles refroidies par eau jusqu'à 7 000 Nm³/h.

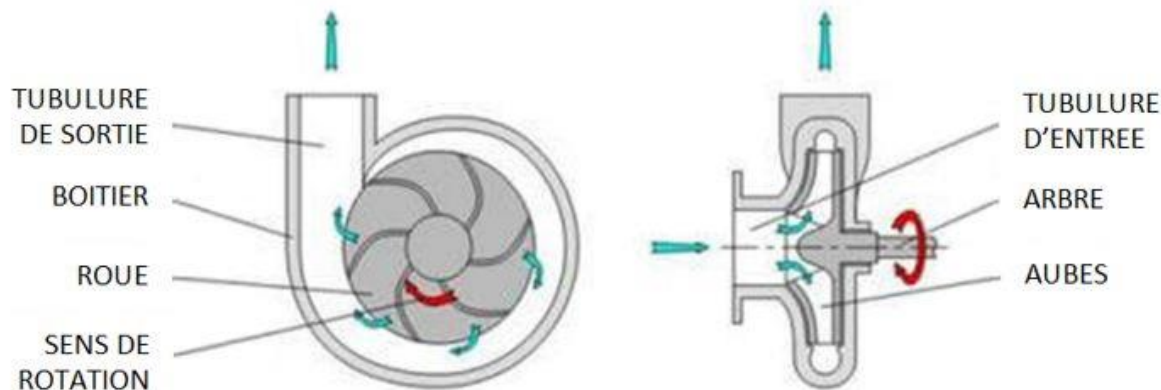
Les compresseurs à vis appartiennent à la famille des machines volumétriques ; la compression est obtenue par la réduction du volume contenu entre deux vis (vis sans fin ou d'Archimède) qui forment le bloc vis.

Compresseurs

Compresseurs centrifuges

On parle aussi de turbocompresseurs notamment si l'on veut souligner leurs débits importants. Ils ont usuellement deux modes de [régulation](#): par variation de la vitesse à l'entraînement (le débit dépend de la vitesse des roues aubées, et par modification de l'angle des aubes directrices à l'entrée de l'air.

Les compresseurs centrifuges sont utilisés lorsque la demande est relativement constante et élevée (entre 7 000 et 35 000 Nm³/h). Les compresseurs sont pour la plupart refroidis par eau et sont équipés de 2, 3 ou 4 étages de compression (plusieurs roues). La qualité de l'air comprimé délivrée par ces machines est un point fort, car elles sont non lubrifiées donc exemptes de trace d'huile dans l'air produite.



Les compresseurs centrifuges appartiennent à la famille des machines dynamiques ; la compression est obtenue par l'augmentation importante de la vitesse de l'air lors de son passage entre les roues (ou aubes) de la machine qui tournent à grande vitesse.

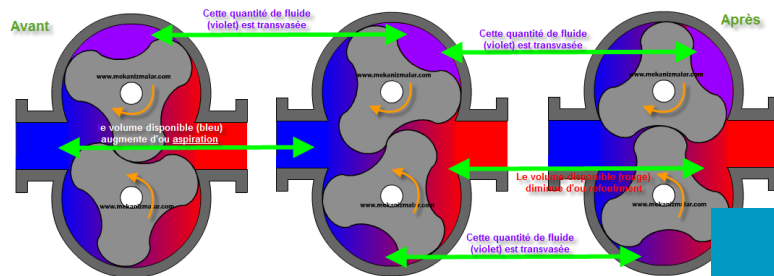
Compresseurs

Autres compresseurs

Compresseurs à lobes

Ils appartiennent à la famille des machines volumétriques. La compression est obtenue par la réduction du volume contenu entre les deux lobes qui en tournant enferment la quantité d'air et restreignent son volume.

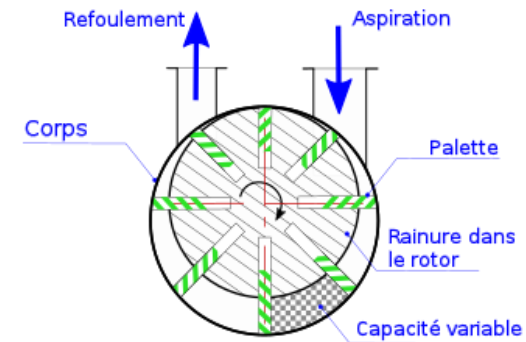
Ils ont usuellement deux modes de régulation: par fermeture de la vanne d'aspiration en « tout ou rien », et par fermeture progressive de la vanne papillon à l'aspiration de 0 à 100 % de la charge.



Retour
Synoptique

Compresseurs à palettes

Ils appartiennent à la famille des machines volumétriques. La compression est obtenue par la rotation d'un rotor excentré. Ce dernier est muni de rainures radiales dans lesquelles coulissent des palettes qui sont constamment plaquées contre la paroi du stator par la force centrifuge. Devant la tubulure d'aspiration, le volume croît (aspiration de l'air). La quantité d'air est ensuite emprisonnée entre deux palettes et transportée vers la tubulure de refoulement.





GUIDE PRATIQUE DE L'AIR COMPRIMÉ

Pour aller plus loin

- ATEE met gratuitement sur son site Internet un [guide plus détaillé](#) sur les installations d'air comprimé qui vient en complément de ce document.
- ATEE met à disposition des ressources documentaires pour le déploiement de la maîtrise de l'énergie, par exemple: [répertoire des bureaux d'études](#), [guide pour le financement des solutions d'amélioration de l'efficacité énergétique](#), [fiches de REX](#).