

Compresseurs d'air comprimé

Les principaux facteurs permettant de sélectionner et d'utiliser les compresseurs d'air comprimé

Les six principaux points d'optimisation du système

- Contrôle de l'application d'air comprimé, éventuellement remplacement par des systèmes plus efficaces
- Contrôle du besoin en air comprimé : se limiter au niveau de pression requis. Une pression de réseau réduite de 1 bar permet de réaliser une économie d'électricité de 10%
- Utilisation de meilleurs appareils utilisant l'air comprimé
- Réduction au minimum de la disponibilité selon les horaires, coupure de portions de réseau la nuit et le week-end
- Réduction systématique des fuites au niveau des conduites, de la robinetterie, des vannes, des raccords et des consommateurs, contrôle régulier
- Utilisation d'entraînements efficaces régulés en fonction des besoins et de compresseurs appropriés. Utilisation d'une commande commune en amont

Objectif et public cible

La fiche technique Topmotors n° 26 traite du thème des installations d'air comprimé efficaces. Il fournit également aux intéressés, c'est-à-dire aux utilisateurs, planificateurs, installateurs, conseillers en énergie etc., des informations visant à promouvoir une production et une utilisation efficaces d'air comprimé dans le cadre de la planification de nouvelles installations, ainsi que des conseils et du savoir-faire pour l'optimisation d'installations existantes.

Consommation d'énergie de systèmes d'air comprimé

Les compresseurs consomment en Suisse environ 1,1 milliard de kWh par an d'énergie électrique, ce qui correspond à 2% de la consommation totale (source: étude OFEN 2004 «Consommation d'électricité des installations d'air comprimé en Suisse»). Ces installations font partie, avec les pompes et les ventilateurs, et conjointement avec les installations frigorifiques fonctionnant avec des compresseurs, des plus gros consommateurs industriels (voir l'illustration 1). À un tarif de 3 à 10 cts par m³, l'air comprimé est une énergie coûteuse.

Dans les installations ayant peu d'heures de service, les coûts de l'électricité ne représentent qu'environ 20% des coûts d'exploitation, mais cette proportion peut monter à 80% dans les installations fonctionnant 24 heures sur 24. Les installations d'air comprimé, correctement dimensionnées et régulées en fonction de l'application, remplissent

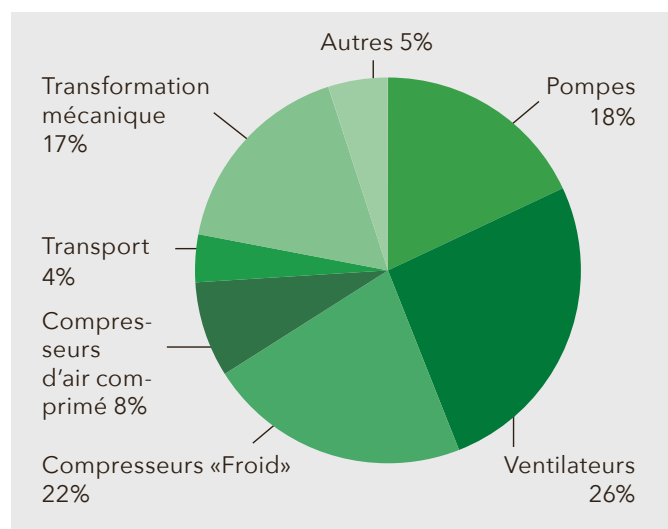


Illustration 1: Parts des besoins en électricité des moteurs électriques selon leur utilisation. (Source: Easy, 2012)

toutes les exigences de l'exploitation quotidienne pour une consommation d'énergie électrique minimale, et garantissent ainsi une utilisation la plus économique possible de l'installation.

Dans le cas de durées de service relativement longues, les optimisations énergétiques ont des répercussions considérables. Toutes les économies s'additionnent, de sorte que même des transformations relativement complexes ou des analyses détaillées sont réalisables avec des temps de retour sur investissement courts ou avantageux.

Rôles des protagonistes

Le dimensionnement d'une alimentation optimale en air comprimé requiert la coopération de plusieurs spécialistes. Tout d'abord, il convient de définir le plus précisément possible le volume nécessaire, la pression de réseau requise ainsi que la qualité souhaitée de l'air comprimé. Ensuite, le bureau de planification ou le fournisseur du compresseur élabore un concept répondant au mieux et de la manière la plus économique possible à ces exigences. Après la mise en service, il est impératif de s'assurer de disposer de collaborateurs internes qui comprennent l'installation et sont capables, au besoin, d'effectuer des réglages en continu. Cela permettra, par exemple, d'activer le mode week-end un jour férié pour économiser de l'énergie sans effort.

L'installation doit être précisément dimensionnée en fonction de toutes les exigences futures, et les états de fonctionnement doivent être simulés en amont. Il convient notamment d'éviter tout surdimensionnement, afin de garantir un point de fonctionnement optimal.

Bases

Où et comment est-il pertinent d'utiliser des systèmes d'air comprimé?

On différencie les ventilateurs (jusqu'à 0,1 bar de surpression), les soufflantes (jusqu'à 3 bars de surpression) et les compresseurs (à partir de 3 bars de surpression).

Pour l'air comprimé, de l'air est mis en pression via un compresseur puis utilisé de différentes manières selon l'application. La dépense énergétique pour le processus de compression est considérable, car la compression de l'air et le frottement dans les compresseurs génèrent inévitablement de grandes quantités d'énergie thermique, souvent inutilisées. En plus de l'électricité, l'air comprimé est lui aussi un agent énergétique secondaire important dans l'industrie et dans les industries de transformation. L'air comprimé permet de faire fonctionner de nombreux appareils, machines et installations, par exemple des cylindres pneumatiques pour le transport et le pressage, des vannes à air comprimé dans les conduites, des moteurs à air comprimé (protection contre l'explosion), des outils à air comprimé, de l'air de nettoyage pour la protection contre l'encrassement, des buses soufflantes pour le nettoyage, le séchage et le refroidissement, des injecteurs pour le transport de matériaux, pour la mise sous vide et pour le gonflage.

Dans un système d'air comprimé idéal, le compresseur fournit précisément la pression requise et la quantité d'air nécessaire pour une application donnée, et est

désactivé en l'absence de besoin. Dans un système d'air comprimé réel, plusieurs utilisateurs sont raccordés à un même réseau de distribution et le compresseur est réglé à la pression requise par l'application demandant la plus haute pression. De plus, sur de nombreuses machines, l'air comprimé s'échappe au niveau de points de fuite, même si elles ne sont pas en exploitation, puisque le compresseur tourne durant les heures de travail ou même souvent en continu.

L'illustration 2 montre la forme la plus simple d'un système d'air comprimé à l'aide d'un démonstrateur. Elle montre un piston actionné à la main en tant que compresseur et un cylindre pneumatique en tant qu'application. Lorsque l'air est comprimé via le piston, le cylindre sort.



Illustration 2: A gauche, la pompe à air comprimé (compresseur), à droite, le cylindre à air comprimé (utilisation). (Photo: Rolf Gloor)

Définitions

Une installation d'air comprimé (illustration 3) se compose des éléments suivants:

- un moteur électrique en tant qu'entraînement
- un compresseur qui aspire et compresse l'air extérieur
- un accumulateur
- un réseau de distribution
- des équipements qui utilisent l'air comprimé à des fins énergétiques puis le relâche sans pression dans l'atmosphère.

Un compresseur est donc une combinaison d'un moteur, d'un condenseur et d'un refroidisseur.

Une installation d'air comprimé comprime l'air pour lui faire prendre un volume plus petit et génère ainsi une pression. L'unité de mesure de la surpression est le «bar». Un compresseur de 7 bars possède ainsi une pression d'admission supérieure de 7 bars à la pression atmosphérique (environ 1 bar en pression absolue, selon les conditions météorologiques et l'altitude). Par rapport au vide, la pression est ainsi d'environ 8 bars (absolue) ou 800 kPa (kilopascals).

La quantité fournie dépend du volume d'air admis par le compresseur. On utilise les grandeurs l/s (litre par seconde), l/min (litre par minute) et m³/min (mètre-cube

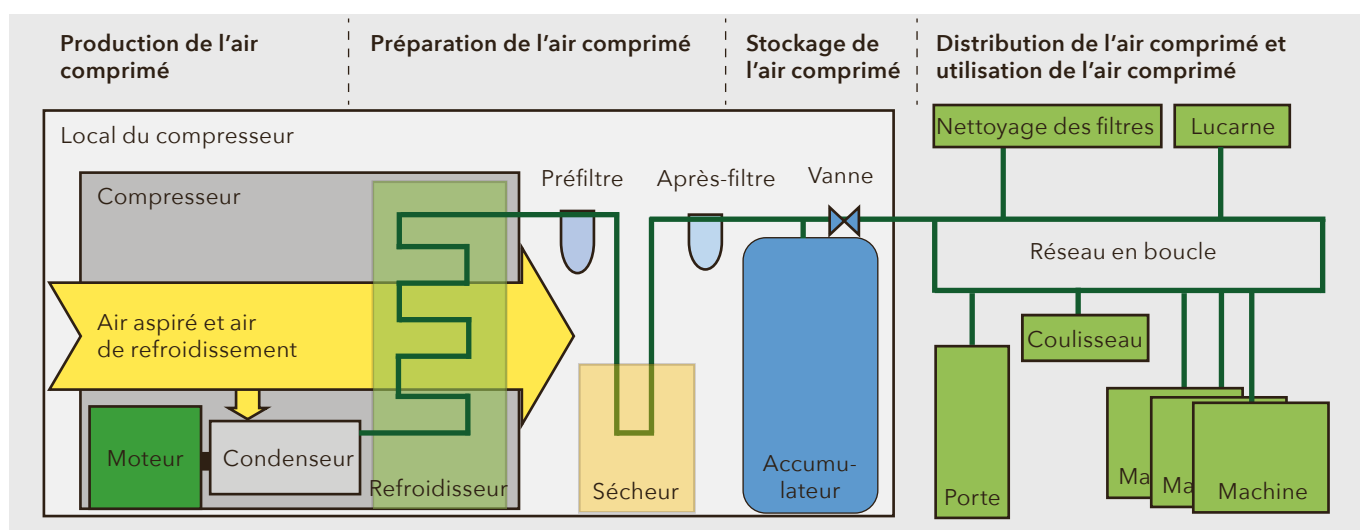


Illustration 3: Composants d'une installation d'air comprimé. (Source: Rolf Gloor)

Surpression d'un surpresseur à vis		Surpression	Description, remarques
Pa	bar	bar	
0	0	-1.00	Vide parfait
2000	0.02	-0.98	Dépression des pompes à vide
15 000	0.15	-0.85	Dépression des éjecteurs d'air comprimé
50 000	0.50	-0.50	Dépression d'un ventilateur-extracteur
75 000	0.75	-0.25	Dépression d'un aspirateur
89 120	0.89	0	Pression atmosphérique à une altitude de 1000 m
100 000	1.00	0	Pression atmosphérique à une altitude de 100 m
101 325	1.01	0	Pression atmosphérique au niveau de la mer (1 atm)
101 000	1.01	0.01	Surpression d'un ventilateur
Traité dans la fiche	150 000	1.5	0.5 Surpression d'un surpresseur
	200 000	2	1 Surpression d'un surpresseur à piston rotatif (surpresseur Roots)
	250 000	2.5	1.5 Surpression d'un surpresseur à vis
	500 000	5	4 Limite entre basse pression et pression normale
	730 000	7.3	6.3 Pression normalisée pour outils à air comprimé (à pleine charge)
	1 700 000	17	16 Pression maximale admissible habituelle pour les composants
	3 700 000	37	36 Pression de surpresseur pour la fabrication de bouteilles en PET
30 100 000	301	300	Bouteilles d'air respirable, bouteilles de plongée
200 100 000	2001	2000	Applications haute pression dans la technique des processus

Tableau 1: Aperçu des différents domaines de pression (dépression, pression atmosphérique, basse pression, pression normale et haute pression). (Valeurs de surpression rapportées à la pression absolue de 1 bar, exceptés les exemples avec air comprimé)

par minute) ainsi que m³/h (mètre-cube par heure). Dans le domaine de l'air comprimé, ces 4 grandeurs sont utilisées, aucune désignation unique n'existe. Pour les données de puissance des compresseurs d'air comprimé, les conditions de la norme ISO 1217 s'appliquent: une pression ambiante de 1 bar, une température (air et eau froide) de 20°C et une humidité relative de l'air de 0%.

L'indication de puissance du compresseur se rapporte à la puissance électrique nominale du moteur d'entraînement. La capacité de l'air comprimé se rapporte à une compression isothermique idéale:

$$P = \dot{V}_1 p_1 \ln(p_2/p_1)$$

Exemple: pour une quantité fournie $\dot{V}_1 = 0,1 \text{ m}^3/\text{s}$, une pression ambiante $p_1 = 100 \text{ kPa}$ (1 bar) et une pression de sortie $p_2 = 900 \text{ kPa}$ (9 bars, 8 bars de surpression), l'air comprimé possède une puissance pneumatique de $P = 22 \text{ kW}$. Si le moteur d'entraînement du compresseur consomme pour cela 37 kW de puissance électrique, le rendement du compresseur est de 59% ($22 \text{ kW}/37 \text{ kW} = 0.59$).

Quantité d'air aspiré V_n				Puissance du compresseur kW
l/s	l/min	m ³ /min	m ³ /h	
1	60	0.06	3.6	0.4
2	120	0.12	7.2	0.7
5	300	0.3	18	1.7
10	600	0.6	36	3.5
20	1200	1.2	72	7
50	3000	3	180	17
100	6000	6	360	35
200	12000	12	720	70
500	30000	30	1800	175
1000	60000	60	3600	350

Tableau 2: Quantité d'air dans les 4 unités usuelles, puissance du compresseur pour une surpression de 7 bars et un rendement de 60% (rapporté à une compression isotherme)

Systèmes alternatifs: hydraulique, servomoteur direct, moteur linéaire

Les moteurs à air comprimé et les cylindres à air comprimé sont nettement moins chers, à l'achat, que les alternatives plus efficaces. Ils sont souvent plus légers, plus robustes (saleté, humidité), plus sûrs (choc électrique, fuite d'huile, protection contre l'explosion) et sont refroidis par l'air comprimé qui se dilate. Cependant, pour les entraînements pneumatiques, présentant de nombreuses heures de service, les entraînements électriques constituent, en raison de leur rendement nettement meilleur sur toute leur durée de vie, une alternative nettement plus avantageuse (tableau 3).

Application	Rendements maximal*		
	Air comprimé	Hydraulique	Électrique**
Mandrin à haute vitesse de rotation (env. 20 000 t/min)	40%	-	80%
Outils manuel (env. 2000 t/min)	15%	40%	80%
Mélangeur (env. 200 t/min)	10%	50%	80%
Cylindre de levage à action simple	40%	-	80%
Cylindre de levage à action double	30%	50%	80%
Vibreux	20%	40%	70%
Préparation du vide	5%	-	40%
*) Rendement global (puissance mécanique fournie, rapportée à la puissance électrique d'entrée)			
**) Servomoteur ou moteur linéaire			

Tableau 3: Rendement maximal possible des applications

Où surviennent les pertes dans le compresseur ?

Lors de la compression, l'air se réchauffe. Des pertes thermiques supplémentaires surviennent dans le compresseur via le moteur d'entraînement et par frottement dans le compresseur. Une grande partie de cette chaleur est disponible sous forme de chaleur rejetée utilisable jusqu'à 80 °C (utilisation de la chaleur rejetée). Une autre partie de l'énergie utilisée est perdue en raison de fuites internes, qui augmentent proportionnellement à l'augmentation de pression. Un bon compresseur d'air comprimé possède un rendement de 60%.

Dans un compresseur d'air comprimé, l'air admis est comprimé à l'aide du travail mécanique fourni par le moteur. La compression entraîne le réchauffement de l'air et la teneur énergétique (enthalpie) augmente. L'air chaud est à nouveau refroidi dans le compresseur jusqu'à la température ambiante, de sorte que la teneur énergétique de l'air (produit du volume et de la pression) redevient la même qu'à l'entrée. La chaleur rejetée produite dans le compresseur correspond ainsi à la puissance électrique consommée ; environ 70 à 80% de ces rejets sont utilisables, avec un niveau de température entre 60 et 80 °C.

La capacité de l'air comprimé, c'est-à-dire l'énergie de l'air comprimé, est exprimée à l'aide de la notion physique d'exergie. L'exergie correspond à la capacité de compression lors de la compression isotherme. Lors de la dilatation, l'air se refroidit.

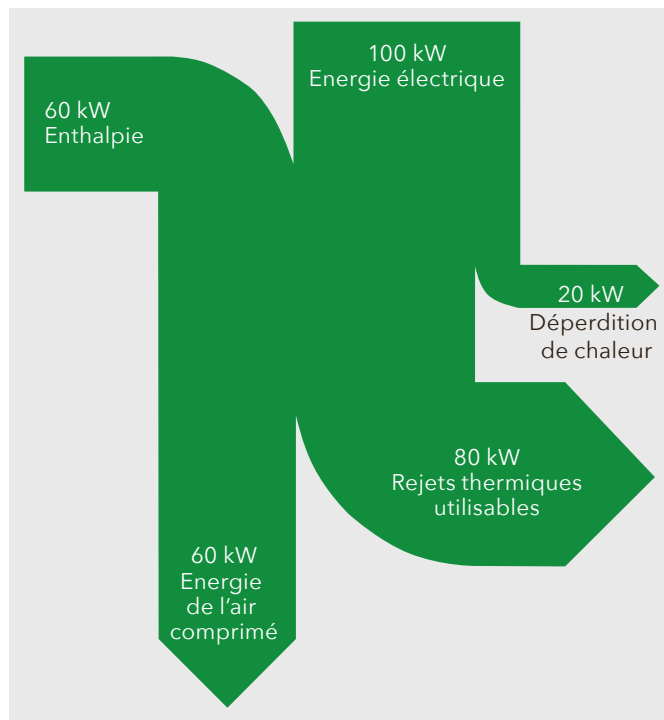


Illustration 4: Flux énergétique du compresseur à air comprimé. (Source: Rolf Gloor)

Où surviennent les pertes dans le système d'air comprimé ?

Selon l'installation, la répartition des pertes sur les différents composants du système d'air comprimé peut varier. L'illustration 5 montre une répartition typique.

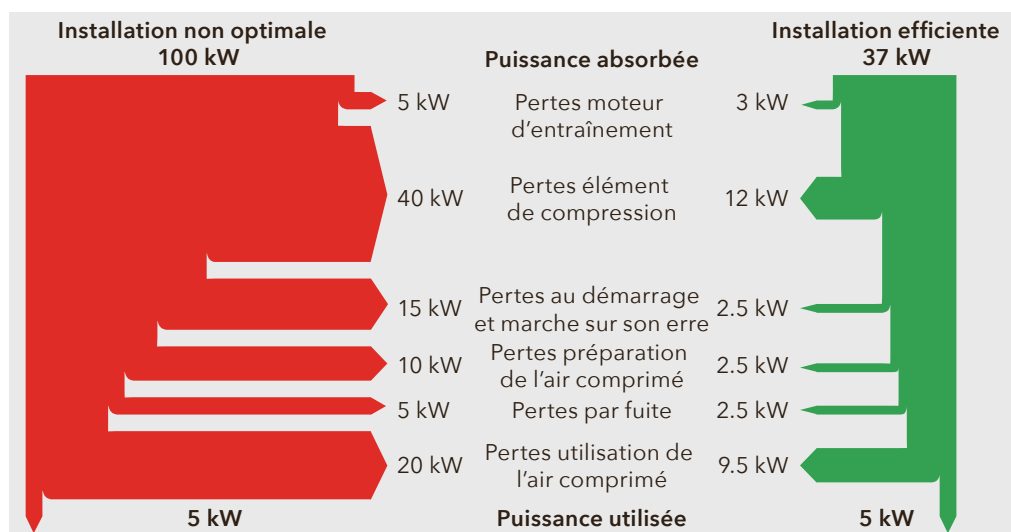


Illustration 5: Partant d'une puissance demandée de 5 kW provenant d'une installation à air comprimé, les deux exemples du tableau sont comparés: installation non optimale (rouge, à gauche) et installation efficiente (vert, à droite). (Source: Rolf Gloor)

Tableau 4: Explications relatives à l'illustration 5.

Puissance utilisée	<ul style="list-style-type: none"> ■ Puissance mécanique sur l'arbre pour mélangeurs, outils etc. ■ Levage de cylindres pneumatiques pour automates et vannes ■ Soufflage pour nettoyage de filtres, éléments et installations 	
Élément d'installation	Installation non optimale	Installation efficiente
Application à air comprimé (ici sans la possibilité de substitution par des composants électriques)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Moteurs à air comprimé avec rendement de 20% ■ Cylindres à air comprimé à double action (réinitialisation également avec air comprimé) ■ Longues impulsions de soufflage ■ Intervalle fixe réglé pour impulsions de soufflage ■ Buse de soufflage avec grande ouverture 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Moteurs à air comprimé avec rendement de 33% ■ Cylindres à air comprimé à action simple (réinitialisation avec tension du ressort) ■ Courtes impulsions de soufflage ■ Impulsions de soufflage après dépassement de la différence de pression ■ Buses d'injection
Pertes par fuite	<ul style="list-style-type: none"> ■ Visseries et accouplements non étanches ■ Vannes manuelles non utilisées sur les machines ■ Vannes d'évacuation du condensat à intervalle fixe ou flotteurs collés 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Visseries et accouplements étanches (contrôle régulier avec appareil de détection des fuites) ■ Vannes principales automatiques sur les machines ■ Vannes d'évacuation du condensat électroniques avec mesure du niveau
Préparation de l'air comprimé	<ul style="list-style-type: none"> ■ Trop de filtres trop petits, maintenance insuffisante (remplacement après des problèmes sur le réseau) ■ Sécheur par adsorption avec intervalle fixe pour la régénération (perte d'air 20 - 30%) 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Nombre et dimension suffisants des filtres pour la qualité requise de l'air comprimé, maintenance régulière ■ Sécheur frigorifique et petit sécheur à adsorption pour le laboratoire, avec régulation de l'humidité
Pertes au démarrage et en aval	<ul style="list-style-type: none"> ■ Exploitation de deux compresseurs 70 kW et accumulateur de 300 litres (brefs temps de fonctionnement) ■ Bande de pression 7 à 8 bars 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Exploitation avec deux compresseurs 25 kW (l'un avec variateur de fréquence) et accumulateur de 6000 litres ■ Bande de pression 6.5 à 7 bars ■ Commande amont
Compresseur à air comprimé	<ul style="list-style-type: none"> ■ Compresseurs inefficients avec rendement de 50% (isotherme) ■ Pas de maintenance (filtre d'aspiration etc.), local des compresseurs chaud et poussiéreux ■ Chaleur rejetée insuffisamment évacuée (accumulation de chaleur) 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Compresseurs inefficients avec rendement de 60% (isotherme) ■ Maintenance annuelle ■ Local des compresseurs frais et propre ■ Exploitation de la chaleur rejetée pour la production d'eau chaude sanitaire
Moteur d'entraînement	Moteurs inefficients avec entraînement par courroie	Entraînement direct IE3 ou IE4, éventuellement avec convertisseur de fréquence

Efficienc

Un système d'air comprimé efficient affiche une basse pression de réseau (5 bars de surpression). Les applications qui nécessitent beaucoup d'air comprimé durant quelques centaines d'heures dans l'année seulement, doivent si possible être remplacées par des alternatives efficientes (servomoteurs électriques, moteurs linéaires, installations hydrauliques etc.). Les machines ou chaînes présentant des points de fuite difficilement évitables doivent être séparées du réseau à l'aide d'une vanne automatique. Dans l'idéal, l'installation de compression fonctionnera la plupart du temps dans sa plage de fonctionnement optimale et la consommation d'énergie est surveillée en continu.

Systèmes de compression efficient

Il n'existe pas de compresseur efficient. Il convient de considérer l'ensemble du système d'air comprimé, y compris le traitement de l'air comprimé ainsi qu'une éventuelle utilisation de la chaleur rejetée. Afin de s'imposer sur le marché, les fabricants de compresseurs travaillent continuellement à améliorer l'efficacité de leurs produits. Un compresseur plus efficient ne signifie cependant pas un système d'air comprimé efficient. À cela s'ajoute le fait que la consommation d'air comprimé varie sur la semaine. Des simulations d'un profil de consommation approprié peuvent contribuer à définir une variante efficient.

Les fabricants de compresseurs proposent des brochures, contenant des informations de base dans le domaine de la technologie de l'air comprimé, dans lesquelles figurent les différents types de compresseurs et de traitement de l'air. Cette fiche technique ne traite que brièvement de la base des différents composants. Elle s'oriente davantage sur l'optimisation du système.

Principes de compression

Un compresseur volumétrique (p.ex. compresseur à piston) renferme un certain volume et fait monter la pression en réduisant ce volume. Les compresseurs à compression volumétrique sont les plus fréquents dans l'industrie.

Dans le cas d'un compresseur dynamique (p.ex. turbocompresseur), une turbine induit une forte accélération de l'air. L'énergie cinétique de l'air est ensuite convertie en énergie de compression, en freinant et en comprimant l'air. Jusqu'à présent, les compresseurs dynamiques n'étaient construits que pour de grandes quantités d'air comprimé avec des puissances moteur supérieures à 400 kW. Certains fabricants tentent aujourd'hui de mettre sur le marché des compresseurs plus petits d'une puissance inférieure à 100 kW. Par rapport aux compresseurs volumétriques, les frais de maintenance sont plus bas. Néanmoins ce sont les conditions de l'admission d'air dans la centrale d'air comprimé qui impactent le plus fortement l'efficacité globale.

Compresseur à piston

Le compresseur à piston est le type de compresseur le plus ancien et le plus utilisé, notamment dans les petites applications (entreprises artisanales). De conception simple ou double, il est lubrifié à l'huile ou fonctionne sans huile. Il est disponible avec un nombre varié de cylindres dans différentes dispositions (voir l'illustration 6). À l'exception de très petits compresseurs dotés de cylindres verticaux, l'agencement en V est le type de construction le plus courant dans les compresseurs à piston.

Les compresseurs à piston sont également disponibles pour les applications industrielles. En outre, ils sont appropriés notamment pour la production de pressions élevées > 20 bars et dans le cas des gaz spéciaux.

Type de condenseur	Domaine de pression [bar]	Puissance absorbée [kW]	Rendement [isotherme]	Remarques
Compresseur à piston à 2 étages	4-500	0.1-30	60%	Pas de fonctionnement en continu
Compresseur à vis sans huile	4-16	5-500	50%	
Compresseur à vis	4-16	5-500	60%	
Turbocompresseur	3-8	30-1000	80%	
Compresseur Scroll	4-8	1-5	50%	
Surpresseur à vis	0.3-1.5	10-1000	70%	
Compresseur rotatif (Roots)	0.1-1	0.1-1000	60%	
Surpresseur	0.1-0.2	0.1-1000	80%	

Tableau 5: Comparaison des condenseurs.

Compresseur à vis

Le principe d'un compresseur à déplacement rotatif doté d'un « piston » en forme de vis existe depuis déjà trente ans. À l'époque, on avait besoin de compresseurs ayant un débit volumique élevé et le plus constant possible pour des états de fonctionnement très variés. Les principaux composants de la partie « vis » sont le rotor principal et le rotor secondaire. Ceux-ci enferment, avec le carter, un volume, le réduisent par la rotation, compressent ainsi l'air qu'il contient et expulsent ensuite cet air. Chaque partie « vis » possède un rapport de pression défini par sa construction, qui dépend de sa longueur, de la pente de la vis et de la position et de la forme de l'ouverture de sortie. Pour obtenir un très bon rendement, le compresseur doit

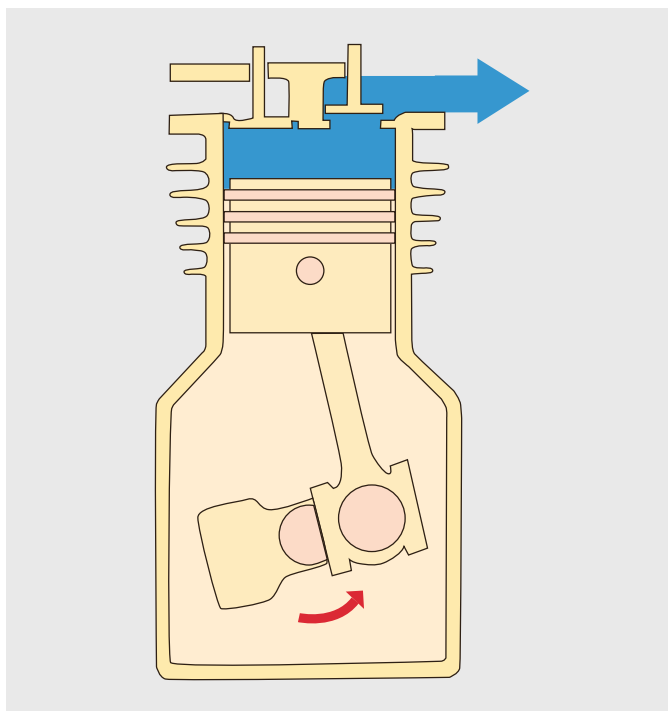


Illustration 6: Compresseur à piston simple. (Source: Atlas Copco)

être utilisé selon le rapport de pression à la surpression de service prescrit par le fabricant du compresseur. Un compresseur à vis ne possède aucune vanne et ne présente aucune force d'inertie déséquilibrée.

Compresseurs à vis à refroidissement liquide

Un compresseur à vis à refroidissement liquide est refroidi par le liquide injecté dans l'espace de compression et sur les paliers. Il est simultanément lubrifié (voir l'illustration 7). Outre l'effet de refroidissement et de lubrification, les pertes par reflux dans la partie « vis » sont également réduites grâce au liquide. Outre les huiles de lubrification, des essais ont été réalisés avec d'autres liquides, par exemple de l'eau. Les compresseurs à vis à refroidissement liquide sont développés pour de hautes pressions. C'est également pour cela qu'un unique étage de compression suffit pour générer des pressions jusqu'à 15 bars. Les pertes par reflux relativement faibles permettent de garantir que même les petits compresseurs à vis fonctionnent de manière économique.

Compresseurs à vis avec marche à sec

Dans le cas des compresseurs à vis avec marche à sec (souvent appelés compresseurs à vis sans lubrifiant), un engrenage synchrone est toujours requis pour l'entraînement du rotor secondaire (illustration 8). Étant donné que les rotors ne sont ni en contact entre eux ni avec le carter, aucun lubrifiant n'est nécessaire dans la chambre de compression. C'est pourquoi l'air comprimé est également totalement exempt d'huile. Les rotors et le carter sont fabriqués avec une précision extrême, afin d'éviter au maximum les fuites tant à l'admission qu'au refoulement. Le rapport de pression est limité par la différence de température générée entre le côté entrée et le côté sortie. C'est pourquoi les compresseurs à vis sans huile présentent la plupart du temps plusieurs étages de compression.

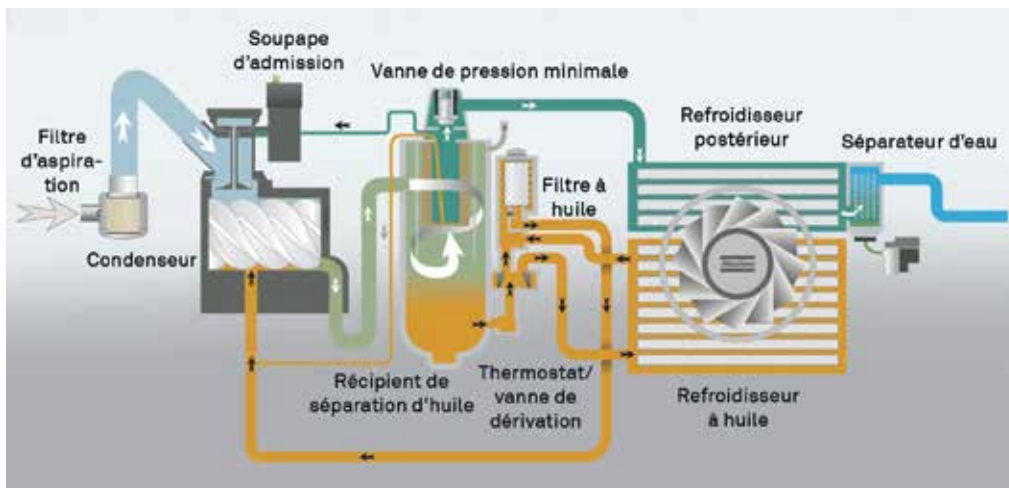


Illustration 7: Compresseur à vis à refroidissement liquide. (Source: Atlas Copco)

Outre les formes de construction citées, on trouve également des compresseurs Scroll, des compresseurs à régime réglé et des turbocompresseurs.

On ne traitera pas ici de ces types de compresseurs, car on en trouve un nombre très limité en service dans l'industrie.

Traitement de l'air (refroidissement, filtration, séchage etc.)

Sans traitement, il est impossible d'obtenir une qualité définie de l'air comprimé, le compresseur agissant comme un gros aspirateur. Les impuretés de l'air ambiant sont aspirées par le compresseur et restituées sous forme concentrée dans le réseau d'air comprimé, indépendamment du type de compresseur.

Il est très rare que l'on puisse utiliser l'air comprimé sans traitement, directement en aval du compresseur. Dans les quantités où elles sont produites, les particules, l'humidité et l'huile sont en général trop importantes pour les consommateurs. Dès lors, la défaillance d'un composant de traitement influe toujours négativement sur la fonctionnalité et la durée de vie des consommateurs. La propreté requise de l'air comprimé est déterminée en premier lieu

par le consommateur. Il peut arriver que dans de grands systèmes d'air comprimé, certains consommateurs nécessitent une qualité de l'air comprimé plus élevée que le reste du système. Par exemple, des installations avec des consommateurs (vannes, cylindres) qui se trouvent à l'air libre et peuvent geler en hiver peuvent temporairement nécessiter de l'air comprimé avec peu d'humidité. Souvent, dans de tels cas, il est intéressant de traiter l'air comprimé de manière décentralisée pour lui conférer la qualité requise. Cela dépend toutefois individuellement de la proportion et de la position de ces consommateurs dans le système d'air comprimé.

Séchage de l'air comprimé

L'air atmosphérique contient généralement plus de vapeur d'eau lors de températures élevées et moins à températures basses. Lorsque cet air est comprimé, la concentration en vapeur d'eau augmente. Un compresseur (voir l'illustration 10) avec un débit volumique de 200 l/s aspire en 8 heures non seulement de l'air mais aussi 80 litres de vapeur d'eau au total, qu'il rejette dans le réseau d'air comprimé (conditions d'admission: 20°C, 80% d'humidité rela-

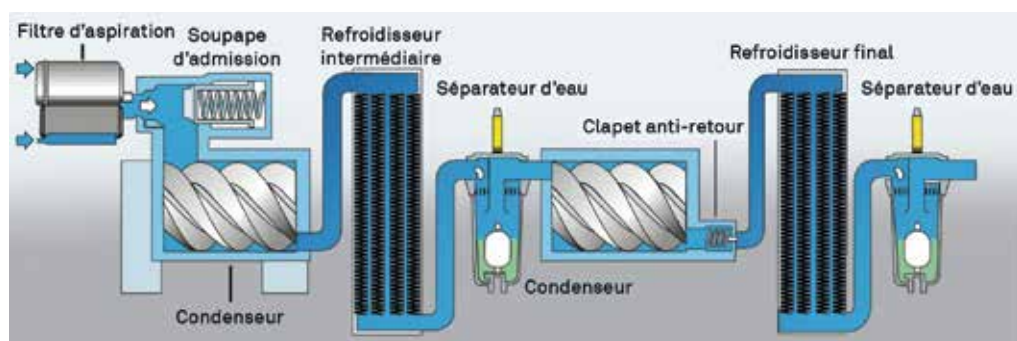


Illustration 8: Compresseur à vis avec marche à sec. (Source: Atlas Copco)

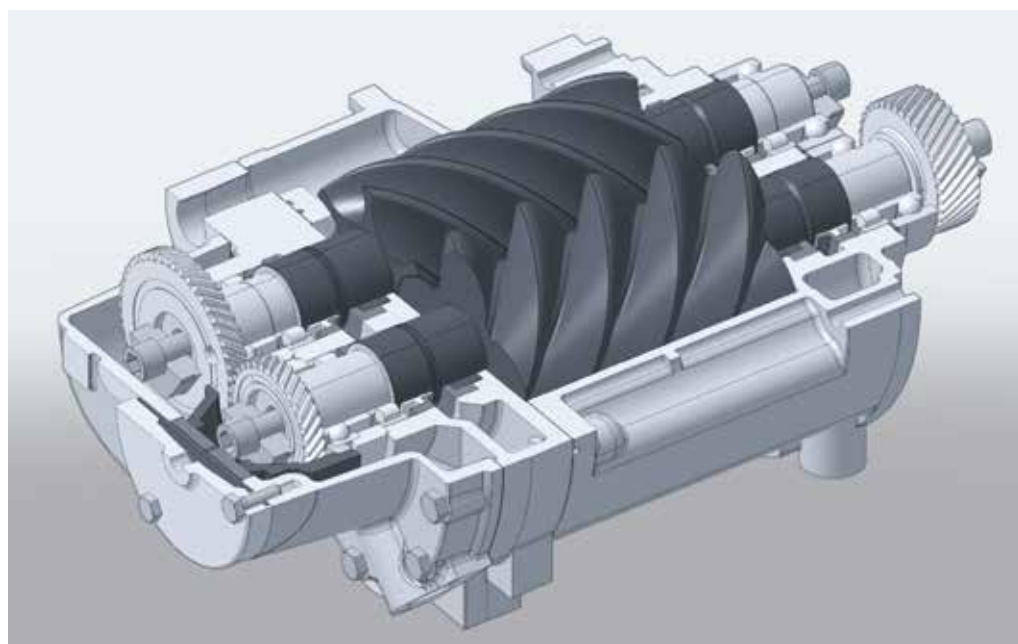


Illustration 9: Compresseur à vis sans huile avec entraînement synchrone. (Source: Atlas Copco)

tive). Les filtres ne permettent pas d'éliminer l'humidité, car la vapeur d'eau est contenue dans l'air sous forme de gaz et les filtres ne peuvent retenir que des corps solides ou des gouttes. Le choix du dessiccateur d'air comprimé dépend du point de rosée requis. En principe, plus le point de rosée requis est bas, plus les coûts d'acquisition et d'exploitation du dessiccateur sont élevés. Il existe principalement quatre méthodes pour éliminer l'humidité de l'air comprimé: le refroidissement, la surcompression, l'adsorption et l'absorption.

Dans environ 80% de tous les cas d'application, des dessiccateurs frigorifiques suffisent pour le traitement de l'air comprimé. Leur utilisation est en principe recommandée, car ils permettent d'économiser des frais d'entretien coûteux au niveau du réseau de conduites et des consommateurs d'air comprimé. Lors de la génération d'un point de rosée entre 3 et 7°C, les dessiccateurs frigorifiques dotés de régulations d'économie d'énergie ou d'accumulateurs frigorifiques permettent d'économiser 50 à 70% d'énergie par rapport à ceux dotés d'un système de dérivation des gaz chauds. Même si des points de rosée relativement bas sont requis, l'achat d'appareils relativement coûteux permet de sécher l'air comprimé de façon efficiente jusqu'à -70°C. Exemple: la combinaison de dessiccateurs frigorifiques et à adsorption, réduit le besoin en énergie de deux tiers par rapport à des dessiccateurs à adsorption traditionnels.

Filtration de l'air comprimé

Les filtres à particules, les filtres grossiers et les filtres fins séparent les solides, la poussière et les aérosols de l'air comprimé. Si les particules sont plus grosses que les ouvertures pratiquées dans le support filtrant, elles sont retenues par le tamis. En général, cela ne concerne que les particules d'une taille supérieure à 100 µm. Le rendement de filtration peut être augmenté par un support filtrant plus fin et plus dense. Les particules entre 10 et 100 µm sont éliminées par leur inertie. Lorsque le flux d'air tourne autour des fibres, les particules entrent en contact avec les fibres

et adhèrent à leur surface. Plus le gaz s'écoule rapidement, meilleur est cet effet. Les très petites particules (< 0.1 µm) se déplacent plus ou moins aléatoirement en fonction des collisions avec des molécules d'air. Tôt ou tard, elles entrent en contact avec une fibre et y adhèrent. Ce processus est soutenu par une faible vitesse d'écoulement et un grand nombre de fibres. L'effet de filtration est une composition des effets des processus mentionnés. En principe, chaque filtre représente un compromis car aucun filtre ne peut atteindre le même rendement pour toutes les tailles de particules. L'influence variable de la vitesse d'écoulement, notamment, ne permet pas d'obtenir un rendement identique pour toutes les tailles de particules. Dans la pratique, on observe que les particules d'un diamètre de 0.3 µm sont celles qui sont les plus difficiles à éliminer. Le rendement d'un filtre est toujours indiqué pour une taille de particules donnée. Souvent, on obtient des rendements de filtre supérieurs à 95%. Cela signifie toutefois que 5% des particules passent à travers le filtre. En outre, un filtre qui présente un rendement élevé de 95% pour une taille de particule de 10 µm peut laisser passer des particules d'un diamètre de 30 à 100 µm. Les gouttes d'huile et d'eau se comportent comme des particules solides et sont retenues par les filtres. Ces gouttes se lient dans le support filtrant, coulent vers le bas et gouttent sur le fond du boîtier de filtre. Si de l'eau et de l'huile se retrouvent sous forme de vapeur dans l'air, ces vapeurs passent à travers le filtre. Pour séparer les vapeurs d'huile, des matériaux filtrants particuliers, par exemple les charbons actifs, sont nécessaires.

Tout filtre génère une perte de pression. Cette perte de pression est une déperdition d'énergie supplémentaire dans l'air comprimé. Des filtres très fins avec un support filtrant dense provoquent une perte de pression relativement élevée et se remplissent plus rapidement de particules. Cela engendre des arrêts plus fréquents et des frais de fonctionnement plus élevés.

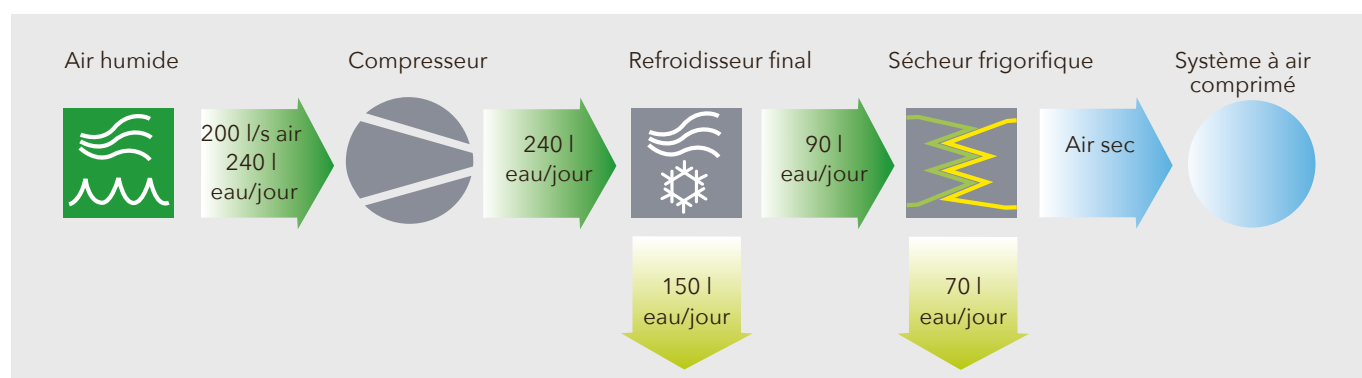


Illustration 10: Eau dans l'air comprimé. (Source: Atlas Copco)

Un traitement efficace de l'air comprimé ne doit pas dépasser ce que nécessite réellement le processus. En effet, chaque composant du traitement provoque une chute de pression et contribue ainsi à péjorer le bilan énergétique. En outre, les frais d'investissement et d'entretien augmentent.

Il convient de veiller à ce que le filtre soit dimensionné suffisamment grand pour assurer un temps de fonctionnement entre deux entretiens, mais ne soit pas non plus surdimensionné sous peine de voir fortement baisser la capacité de filtration en dessous d'une charge de 20%. Généralement, un manomètre à pression différentielle est monté sur le boîtier de filtration afin de détecter une maintenance nécessaire.

Le filtre à charbons actifs avec charbons actifs fixes ou l'adsorbent à charbons actifs avec filtres à charbons actifs en vrac permettent de réduire la part de vapeur d'huile dans l'air comprimé pour des exigences de qualité élevées.

Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (Association allemande des constructeurs de machines et d'équipements)

Les fiches 15390-1, -2 et -3 de la VDMA donnent un aperçu rapide des qualités typiques de l'air comprimé pour certaines applications ainsi que d'autres informations.

Partie 1: applications industrielles, 2014; Partie 2: Industrie agroalimentaire et pharmaceutique, 2018; Partie 3, 2020: Installations de laquage.

Dimensionnement du système d'air comprimé (nouvelles installations)

Remarque générale: Lorsque l'on considère le système d'air comprimé dans son ensemble et en fonction de l'application, on parvient à une augmentation durable de l'efficacité de l'air comprimé.

Évaluation correcte des besoins

Il n'y a pas de concept universel pour un «bon» approvisionnement en air comprimé, chaque installation d'air comprimé doit être optimisée en tenant compte des exigences individuelles et des conditions réelles. C'est pourquoi il convient au préalable d'éclairer les points suivants pour créer une base de dimensionnement d'une nouvelle installation d'air comprimé.

Pression de réseau

Si l'on souhaite exploiter l'installation avec une pression la plus faible possible, la pression requise de tous les consommateurs doit être contrôlée. Si, par exemple, une pression plus élevée est requise uniquement pour une petite partie du besoin global en air comprimé, il convient de rechercher des alternatives pour conserver une pression de réseau la plus basse possible.

Volume requis

Dans l'idéal, un mesurage est réalisé pendant au moins une semaine, y compris le week-end. Elle permet de disposer d'un profil de besoin typique en air comprimé. À l'aide de cette mesure, le besoin peut être évalué pendant le travail, la nuit et le week-end. Si les conditions pour faire des mesurages ne sont pas donnés, ou une installation déjà existante a des données inconnues, il convient de répertorier les consommateurs et de les ajouter en prenant en compte le taux d'utilisation et la simultanéité.

Définition de la qualité de l'air comprimé

Le principe est le suivant: pas plus que nécessaire, car le traitement de l'air comprimé est coûteux! L'air comprimé peut être utilisé dans des situations très diverses. Des produits peuvent entrer en contact direct avec de l'air comprimé. La qualité de l'air comprimé dépend donc de l'application dans laquelle l'air comprimé est utilisé. Un outil à air comprimé au niveau d'un établi ne nécessite pas une qualité élevée de l'air aussi élevée que, par exemple, un processus d'emballage dans l'industrie agroalimentaire. Selon la demande, il convient de définir la qualité de l'air comprimé pour les solides, l'eau et l'huile selon ISO

Particules solides / poussières			
Classe	Nombre maxi de particules de taille d en µm, par m ³ *		
	0,1 ≤ d ≤ 0,5	0,5 ≤ d ≤ 1,0	1,0 ≤ d ≤ 5,0
0	Consulter le fournisseur pour des spécifications personnalisées		
1	≤ 20 000	≤ 400	≤ 10
2	≤ 400 000	≤ 6 000	≤ 100
3	non défini	≤ 90 000	≤ 1 000
4	non défini	non défini	≤ 10 000
5	non défini	non défini	≤ 100 000
Classe	Concentration de particules C _p en mg/m ³ *		
6	0 < C _p ≤ 5		
7	5 < C _p ≤ 10		
X	C _p > 10		

Eau	
Classe	Point de rosée en °C
0	Consulter le fournisseur pour des spécifications personnalisées
1	≤ -70 °C
2	≤ -40 °C
3	≤ -20 °C
4	≤ +3 °C
5	≤ +7 °C
6	≤ +10 °C
Classe	Teneur en eau liquide C _w en g/m ³ *
7	C _w ≤ 0,5
8	0,5 < C _w ≤ 5
9	5 < C _w ≤ 10
X	C _w > 10

Huile	
Classe	Concentration totale en huile (liquide, aérosol + gazeuse), en mg/m ³ *
0	Consulter le fournisseur pour des spécifications personnalisées
1	≤ 0,01
2	≤ 0,1
3	≤ 1,0
4	≤ 5,0
X	> 5,0

*) dans les conditions de référence 20 °C, 1 bar (abs.), hygrométrie 0 %.

Illustration 11: Classes de qualité de l'air comprimé selon ISO 8573-1 (2010)

8573-1 (2010) (illustration 11). Le traitement de l'air peut s'effectuer de manière décentralisée, centralisée ou de manière combinée. Avec un traitement centralisé et, en aval, des canalisations d'air comprimé vieilles et encrassées, il est impossible de garantir une qualité élevée de l'air comprimé. Dans ce cas, une séparation centralisée de l'eau et une filtration décentralisée sont nécessaires.

Compresseurs lubrifiés à l'huile et à marche à sec

Le choix du type de compresseur dépend de la pression de réseau requise et du volume nécessaire. À l'inverse, la décision de choisir un compresseur refroidi à l'huile ou à marche à sec est une décision de management, car les deux types de compresseurs permettent d'obtenir la même qualité de l'air comprimé. Dans les industries ayant des exigences de qualité et de sécurité élevées (produits alimentaires etc.) notamment, il s'agit souvent d'une décision de principe de n'utiliser aucune huile dans toute la chaîne de processus.

Redondance

Dans la plupart des applications d'air comprimé, une panne de l'alimentation entraîne des coûts élevés, c'est pourquoi la production d'air comprimé est souvent conçue de manière redondante. Cela s'applique également au traitement de l'air comprimé, dont la qualité doit être garantie de manière ininterrompue en cas de défaillance ou d'intervention de service.

Futur

Dimensionner précisément une installation en fonction du besoin actuel n'est, dans une perspective à long terme, pas correct. Une installation doit être flexible pour pouvoir s'adapter à des conditions changeantes. C'est pourquoi il convient de réfléchir à la manière dont se dessinent les tendances futures, afin de prendre cela en compte dans la planification d'une nouvelle installation. Cela peut être non seulement un besoin supplémentaire, mais aussi une minimisation future de l'installation.

Encombrement

On sait par expérience que l'espace est coûteux et pas disponible de façon illimitée, c'est pourquoi il convient d'envisager et de définir différentes variantes possibles. Il s'agit notamment de prendre en compte le positionnement dans le système global (perte de pression), les possibilités d'amenée et d'évacuation d'air, le refroidissement à l'air ou à l'eau et la possibilité d'utilisation de la chaleur rejetée.

Système de refroidissement

Les installations refroidies à l'air sont les moins chères. Néanmoins, pour des installations placées dans une cave dans laquelle de grands dispositifs d'amenée et d'évacuation d'air sont impossibles et où la place disponible ou la taille de la machine ne permettent aucun refroidissement à l'air, le refroidissement à l'eau a ses avantages.

Récupération de chaleur

Étant donné que presque toute l'énergie électrique consommée peut être récupérée sous forme de chaleur, une utilisation de la chaleur rejetée doit toujours être envisagée. L'investissement peut rapidement s'avérer intéressant, surtout pour les installations avec une charge élevée.

Production d'air comprimé

Pour la production d'air comprimé, à refroidissement liquide ou à marche à sec, on installe généralement des compresseurs à vis produisant un volume d'air donné (couplage étoile/ triangle) ou un volume variable (régulée en fréquence). Pour faire son choix, il convient de prendre en compte toutes les conditions mentionnées ci-dessus. Selon le cas, un, deux ou plusieurs compresseurs peuvent être la solution. Pour garantir un approvisionnement efficace en air comprimé, il convient de veiller aux points suivants:

Quantité fournie

La quantité fournie est la quantité d'air acheminée par un compresseur dans le réseau d'air comprimé raccordé. Elle se rapporte à l'état d'admission du compresseur. La mesure en vue de comparer les différents fabricants est documentée dans la norme ISO 1217, annexe C.

Puissance spécifique

Le rapport entre la puissance électrique absorbée et la quantité d'air restituée, pour une pression de service donnée, est appelée puissance spécifique (illustration 12).

$$P_{\text{spéc}} = \frac{\text{Puissance électrique absorbée}}{\text{Quantité d'air fournie}}$$

Choix de moteurs efficaces

Selon le régime requis du compresseur, des moteurs asynchrones ayant des nombres de pôles variables peuvent être utilisés.

Régime synchrone nominal (tours par minute):

- 2 pôles avec 3 000 t/min
- 4 pôles avec 1 500 t/min
- 6 pôles avec 1 000 t/min
- 8 pôles avec 750 t/min

Les classes d'efficacité des moteurs de 0.12 à 1000 kW sont définies dans la norme CEI 60034-30-1 (illustration 13). Pour les faibles puissances jusqu'à 10 kW, les gains d'efficacité entre IE4 et IE1 sont très élevés. Pour les grandes puissances de 100 à 1000 kW, les améliorations sont certes proportionnellement plus faibles, mais la diminution des pertes en kW est toutefois très importante. A partir de juillet 2021, les moteurs doivent relever au moins des classes IE2 (jusqu'à 0.75 kW) ou IE3 (à partir de 0.75 kW), à partir de juillet 2023, il s'agira de la classe IE4 (75-200 kW). Les exigences minimales imposées aux moteurs et CF sont décrites de manière détaillée dans la rubrique Normes et prescriptions du site Internet de Topmotors. Les rendements les plus élevés peuvent être obtenus avec des moteurs à aimants permanents ou à relucance, à commutation électronique.

Attention: Les moteurs ayant une classe d'efficacité plus élevée (IE4) présentent un glissement beaucoup plus faible que les anciens moteurs peu efficaces (IE1). Il en résulte une vitesse de rotation nominale 1 à 5% plus élevée. On obtient donc une puissance à l'arbre du compresseur 3 à 15% supérieure (la puissance électrique absorbée augmente proportionnellement au cube des variations de régime!). Si cela n'est pas pris en compte lors du remplacement du moteur, le gain d'efficacité souhaité, dans les systèmes fermés, peut être réduit à néant par l'augmentation de puissance inutile résultant du débit accru. En raison de la puissance à l'arbre accrue, la consommation électrique du moteur plus efficace peut augmenter. Dans certains cas, cela nécessite de vérifier le dimensionnement de l'installation électrique.



Illustration 12: Structure d'un compresseur à vis - détermination de la puissance spécifique. (Source: Kaeser Kompressoren)

Convertisseur de fréquence

L'utilisation de convertisseurs de fréquence (CF) fait aujourd'hui office de solution universelle pour des installations efficaces. Si l'on prend en compte les pertes du CF et leur effet sur le rendement des moteurs (3 à 5% de la puissance absorbée), cela ne se vérifie pas dans tous les cas. L'utilisation d'un compresseur à CF est intéressante dans les situations suivantes:

- fortes variations de consommation
- faible volume de réseau
- par rapport à un compresseur à régime fixe, les temps de marche à vide peuvent être économisés

Souvent, des machines fixes sont utilisées pour la charge de base, et des installations CF, avec leur plage de régulation en dessous de laquelle il ne faut pas descendre, sont utilisées pour la charge de pointe.

Commande de compresseur

Outre la régulation et la commande du compresseur, le système de commande détecte également les défaillances et peut les afficher, tout comme les informations de maintenance. Une commande moderne possède différents modes de régulation au choix, qui peuvent être sélectionnés selon le besoin en fonction de l'utilisation du compresseur. La connexion à un système de gestion supérieur ou à un système de contrôle est également une option. Les petites installations n'ont, pour des raisons de prix, que des possibilités de connexion limitées.

Évacuation des condensats

Aujourd'hui, les condensats sont évacués du système sous pression par des purges avec contrôle du niveau. À l'inverse des anciennes purges mécaniques, dotées de plongeurs, les défaillances actuelles en raison d'un encrassement ou d'une usure mécanique sont exclues. En outre, les temps d'ouverture des vannes, précisément calculés et adaptés, réduisent les pertes de pression. La surveillance automatique et la transmission possible des signaux à un système de commande central sont autant d'autres avantages des solutions actuelles.

Réseau de distribution et accumulateur de pression

- Dimensionnement correct du réseau (diamètre)
- Pose de conduites à économie d'énergie
- Utilisation d'un matériau de conduite approprié
- Utilisation d'une technique de connexion appropriée (soudure, bride etc.)
- Dimensionnement de l'accumulateur d'air comprimé en fonction du réseau, du compresseur et du besoin. **Règle empirique:** $\frac{1}{3}$ de la charge de pointe du compresseur (sans CF), exemple: compresseur $6 \text{ m}^3/\text{h} \geq 2 \text{ m}^3$ réservoir d'air comprimé
- Utilisation éventuelle d'accumulateurs d'air comprimé supplémentaires pour de gros consommateurs, afin de pallier aux besoins de pointe.

Commande prioritaire

La coordination de l'exploitation de compresseurs est une tâche complexe. C'est pourquoi les commandes communes à plusieurs machines doivent être en mesure non seulement d'utiliser des compresseurs de différents types

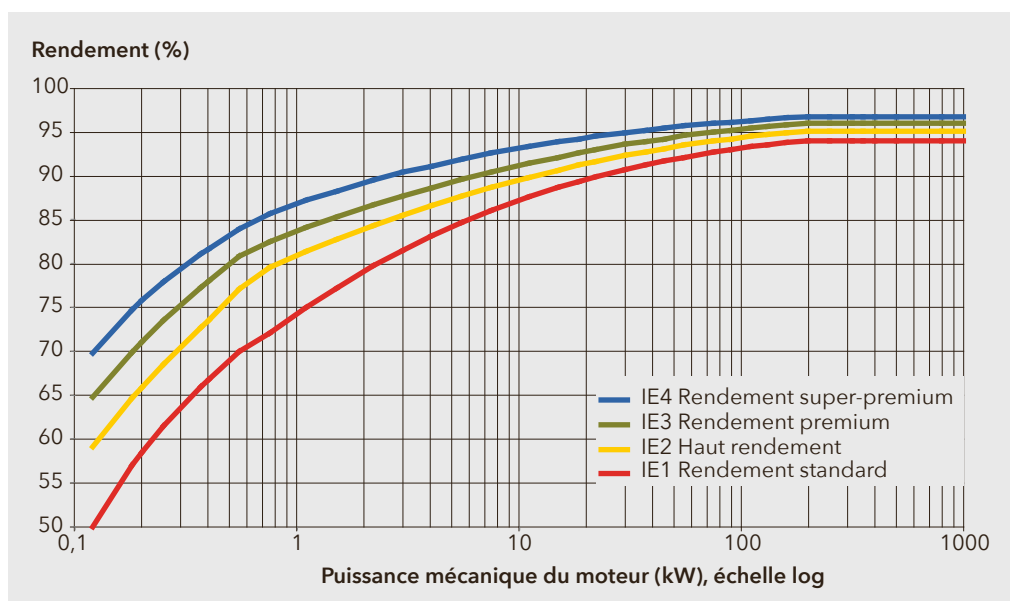


Illustration 13: Rendement en fonction de la puissance de moteurs électriques 4 pôles appartenant aux classes de rendement telles que définies selon CEI 60034-30-1.

et de différentes tailles au bon moment, mais aussi de surveiller les installations en termes de maintenance, d'équilibrer les temps de service des compresseurs et de détecter les dysfonctionnements pour faire baisser les coûts d'entretien d'une station d'air comprimé et augmenter la sécurité de fonctionnement (illustration 14).

- Exploitation efficace d'une alimentation d'air comprimé avec plus d'un compresseur
- Commande et régulation de la station de compresseur
- Surveillance (défaillance)
- Efficacité globale de la production d'air comprimé (surveillance permanente)
- Mémoire de données (enregistrement des besoins)
- Connexion au système de commande
- Management de l'énergie ISO 50001
- Élément central pour l'Industrie 4.0

L'illustration 14 montre 4 méthodes de régulation différentes. Plusieurs compresseurs sont pilotés par la commande prioritaire, de telle sorte que la (plage de) pression requise est toujours disponible. À cet effet, selon la consommation actuelle, un ou plusieurs compresseurs sont activés, qui remplissent au mieux le besoin respectif. La «régulation en fonction de la pression requise» est une solution idéale actuellement sur le plan de la technique de régulation. Dans cette variante, aucune limite de pression minimale et maximale n'est plus prédéterminée, mais uniquement la pression de service la plus basse possible sous laquelle il ne faut pas descendre. Une régulation prioritaire peut, en prenant en compte toutes les pertes possibles (causées par l'augmentation de pression, les temps de démarrage, de réaction et de marche à vide), déterminer l'optimum possible pour la mise en circuit et

le choix des compresseurs. En connaissant les différents temps de réaction, la commande est en mesure d'empêcher toute baisse en dessous de la pression requise minimale possible et de minimiser les variations de pression dans le réseau. De plus, la commande permet de régler facilement la pression de réseau souhaitée. Ainsi (si possible), la pression de réseau peut être réduite aisément et la consommation d'énergie peut éventuellement être encore abaissée.

Utilisation de la chaleur rejetée

Chauffage des locaux

Le type de récupération de chaleur le plus économique est l'exploitation de la chaleur du compresseur pour le chauffage des locaux. Cela nécessite un compresseur refroidi à l'air à travers lequel l'air de refroidissement est acheminé de manière ciblée. Ce type de récupération de chaleur est économique car toute la chaleur, même la chaleur rayonnée dans le compresseur, est utilisée. L'air de refroidissement réchauffé doit être acheminé via un système des conduites. À ce sujet, les chemins doivent être les plus courts possibles. En effet, de longs chemins occasionnent des pertes de pression dans les conduites, qui doivent à nouveau être compensées par un ventilateur supplémentaire. De plus, des pertes de chaleur surviennent en cas de temps de séjour prolongés de l'air de refroidissement dans le canal.

Il convient de veiller à ce que, pour le temps d'amortissement de la récupération de chaleur pour le chauffage de locaux, seuls les mois d'hiver puissent être comptabilisés. En été, la chaleur rejetée est acheminée vers l'extérieur.

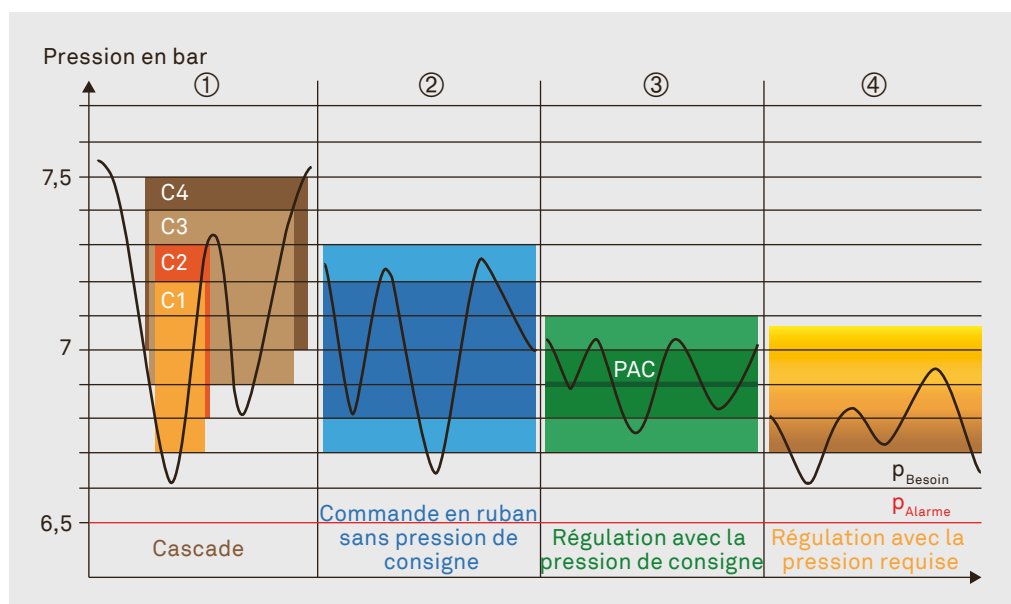


Illustration 14: Différentes variantes de régulations prioritaires de compresseurs. (Source: Kaeser Kompressoren)

Réchauffage de l'eau de chauffage

Dans le cas des compresseurs à vis avec injection d'huile, l'huile évacue env. 70 à 80% de l'énergie électrique amenée sous forme de chaleur. Cette énergie peut être récupérée. Peu importe que le compresseur à vis soit refroidi à l'air ou à l'eau. Pour la récupération de chaleur, l'huile est acheminée à travers un échangeur de chaleur capable de réchauffer l'eau de chauffage de 50 K jusqu'à 85 °C.

Il convient alors de veiller à ce que l'eau de chauffage soit réchauffée uniquement lorsque le compresseur fonctionne en mode de charge. Étant donné que le mode de charge n'est pas actif en permanence et que de l'eau chaude n'est donc pas toujours produite, le réchauffage de l'eau chaude par la récupération de chaleur sert uniquement à l'assistance du circuit de chauffage.

Appel d'offres

L'établissement d'un appel d'offres se base sur le résumé des conditions mentionnées au paragraphe «Évaluation correcte des besoins» en page 13 (pression de réseau, profil de la quantité fournie, qualité, redondance, système de refroidissement, encombrement et indication d'utilisation de la chaleur rejetée), résumées en quelques pages. Les exigences doivent être clairement formulées, notamment avec les limitations nécessaires, afin que les différentes offres soient comparables. Outre les conditions techniques, un bref rapport général est avantageux, décrivant le but du procédé et l'application pour laquelle l'air comprimé est requis. Avec les conditions générales de livraison, les documents peuvent ensuite être remis aux fournisseurs. Une description détaillée de l'appel d'offres incluant par exemple le nombre de compresseurs, la puissance nominale, le nombre de machines avec convertis-

seur de fréquence ou même un schéma fini de l'alimentation en air comprimé, n'est en général pas nécessaire. Au contraire, il restreindrait les entreprises qui pourraient proposer une installation efficiente considérée dans son ensemble. Il est d'autant plus important de définir des conditions de réception claires. Il peut par exemple s'agir d'une mesure de la puissance électrique du compresseur dans l'usine, d'une mesure de qualité sur place lors de la mise en service de l'installation ou même d'une surveillance continue du point de rosée avec alarme. Sans accord préalable, des mesures qualifiées ultérieures, conformes aux prescriptions, ne sont réalisables que de manière très complexe, c'est pourquoi elles doivent être envisagées avec le fabricant avant la commande.

L'illustration 15 montre la répartition des coûts d'un système optimisé avec une station d'air comprimé refroidie à l'air (durée de service : 5 ans, prix de l'électricité: 8 cts./kWh, taux d'intérêt: 6%, surpression de service: 7 bars, qualité de l'air comprimé selon ISO 8573-1: huile résiduelle classe 1, poussière résiduelle classe 1, eau résiduelle classe 4). L'exemple montre que, même dans des conditions optimales, la consommation d'énergie, représentée avec environ 70% de loin la plus grande part des coûts totaux de l'air comprimé. C'est pourquoi il est intéressant, du point de vue financier, d'investir dans des systèmes efficaces. Cela doit être pris en compte lors de l'évaluation des différentes offres, sous peine de courir le risque que le fabricant propose des solutions non optimales pour le besoin effectif.

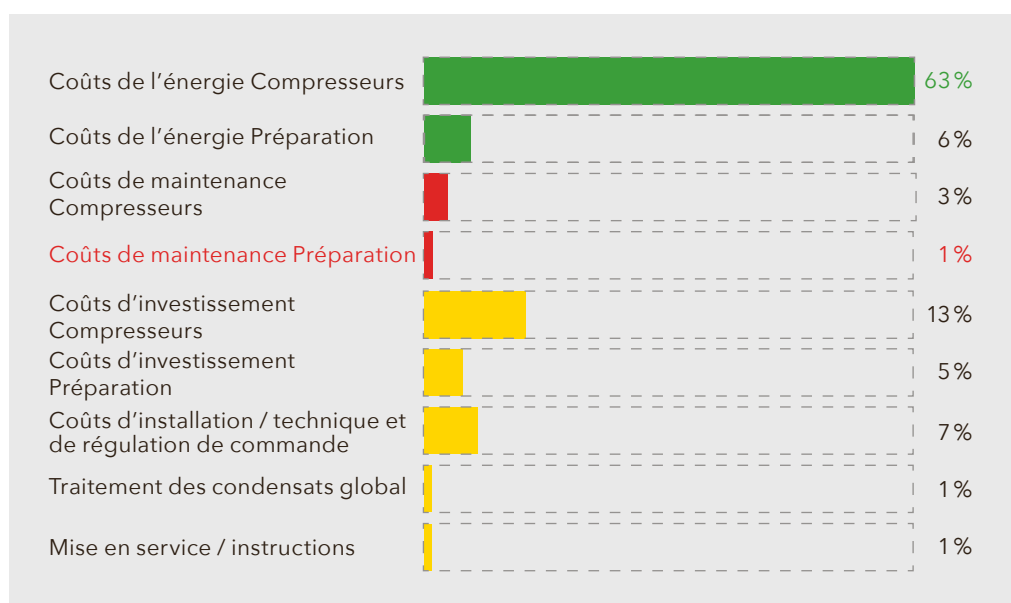


Illustration 15: Structure des coûts d'un système d'air comprimé optimisé. (Source: Kaeser Kompressoren)

Optimisation de systèmes d'air comprimé existants (anciennes installations)

Observations et mesures sur place

Les données suivantes doivent être mesurées pour une analyse pertinente :

■ **Fonctionnement en charge/à vide ou puissance absorbée des compresseurs.** Un profil de charge peut ainsi être établi, montrant la concomitance et le taux d'engagement des compresseurs. Il illustre le rapport entre charge et marche à vide et, dans le cas des compresseurs commandés en fréquence, la durée de service dans la plage de régulation optimale. Lorsque c'est réaliste sur le plan financier et si l'installation le permet, on peut également mesurer en aval du compresseur le débit volumique, ce qui permet d'obtenir des informations sur le rendement du compresseur.

■ **Pression de réseau en amont et en aval du traitement de l'air comprimé, ainsi qu'en un point critique du réseau d'air comprimé.** Cela permet de déterminer si le dimensionnement des composants est correct et si les réglages de pression sont adéquats.

■ Le débit volumique à la sortie de la centrale d'air comprimé montre la quantité d'air comprimé requise par le processus. Dans l'idéal, des sections partielles individuelles (p. ex. dans différentes halles) sont également mesurées, ce qui permet également de déterminer où l'air comprimé est consommé et dans quelles quantités, et où il est le plus simple de réaliser des économies dans l'optimisation.

■ Dans l'idéal, ces points de mesure sont installés comme des mesures dans la durée. L'effet des mesures d'optimisation peut ainsi être justifié aisément.

La centrale d'air comprimé forme en soi un système fermé qui doit fournir une quantité d'air comprimé donnée à une pression de service correspondante avec une qualité d'air définie. Il n'y a que peu d'interfaces lors de l'analyse et de l'optimisation ultérieure, et le fournisseur peut facilement se procurer les informations nécessaires.

Des analyses complètes nécessitent que l'exploitant, conjointement avec le spécialiste de l'exploitation, analyse l'ensemble du système d'air comprimé, y compris les processus, et envisage les mesures d'optimisation possibles. Outre l'exploitant, il convient également de faire appel, dans les grandes exploitations, à des responsables de la production.

ISO 50001 est une norme relative aux systèmes de management de l'énergie (EMS); ISO 11011 est quant à elle une nouvelle norme mondiale pour les audits énergétiques des installations d'air comprimé.

Avant ISO 11011, tout un chacun pouvait réaliser des analyses énergétiques, des contrôles de l'air et le procès-verbal des données relatives à la consommation d'air comprimé. Sans norme reconnue, les écarts entre les résultats étaient importants. Désormais, le processus d'audit énergétique est standardisé; avec des directives qui se concentrent non seulement sur l'évaluation des fuites d'air comprimé, mais qui intègrent également les compétences et méthodes du contrôleur.

Les objectifs de cette norme sont des mesures améliorées et la détermination des potentiels d'amélioration. Au cœur de la norme se trouve l'installation d'air comprimé dans son ensemble, y compris la fourniture, la distribution et le besoin.

Prévention des fuites

Aucun processus en Suisse ne consomme plus d'air comprimé que les fuites. Les fuites naissent, se multiplient et croissent dans les systèmes d'air comprimé au fil des ans. Même les nouvelles installations sont sujettes à des fuites, par exemple au niveau de raccords non étanches. La réparation des fuites nécessite une certaine ténacité. Le processus de réduction des fuites doit être fermement ancré dans l'exploitation. Il est souvent difficile de réduire les fuites, car une grande partie d'entre elles surviennent dans les machines consommant de l'air comprimé.

Puissance adaptée du compresseur/moteur

Quel est le bon dimensionnement des compresseurs? S'il s'agit d'un système d'air comprimé existant, la réponse est simple. Une simulation permet d'élaborer la variante la plus économique. En règle générale, les concepts avec 2 à 4 compresseurs en combinaison avec une commande prioritaire sont ceux qui ont fait leurs preuves. Comment procéder dans le cas d'une construction nouvelle? Voir: «Acquisition de nouvelles installations» de SuisseEnergie. Lorsque la consommation future d'air comprimé est difficile à estimer, une solution flexible avec des compresseurs plutôt petits a montré ses avantages. Souvent, la planification fait l'objet d'une prudence excessive. Le besoin prévu en air comprimé est alors supérieur à la consommation effective. Dans ce cas, les coûts d'investissement, de maintenance et d'énergie seront alors plus élevés que nécessaire.

Régulation selon le besoin: CF

En cas de fortes variations des besoins, l'utilisation d'un ou plusieurs compresseurs à régulation de la vitesse doit être envisagée. Les compresseurs équipés d'un convertisseur de fréquence avec moteurs asynchrones ou avec moteurs synchrones (aimants permanents, réductant) peuvent faire varier le régime du compresseur et ainsi la quantité d'air comprimé générée. Cela permet de produire une quantité d'air comprimé variable entre 15 et 100%. Un compresseur à régime variable est utilisé de manière efficiente lorsqu'il fonctionne majoritairement entre 30 et 80% de sa puissance nominale. Si le compresseur fonctionne majoritairement dans la plage de régime inférieure (p.ex. la nuit et le week-end), d'autres solutions sont plus efficaces. Si le compresseur est exploité en association avec d'autres compresseurs à régime fixe, il convient de veiller à ce que le compresseur à régime régulé soit plus grand que celui à régime fixe, afin d'éviter les défauts de régulation.

Composants efficaces: moteur et compresseur

Si des compresseurs relativement anciens sont encore en assez bon état pour ne pas être remplacés, il est intéressant, selon la puissance et la durée de service, d'investir dans un nouveau moteur électrique et un nouvel élément de compression. Cette mesure doit être mûrement réfléchie, car ces composants ne suffisent pas, malgré tout, pour constituer un nouveau compresseur. Par rapport aux nouveaux modèles, les anciens compresseurs présentent des résistances à l'écoulement internes plus importantes dans les filtres d'admission d'air, les volets d'admission, les séparateurs, les refroidisseurs et les séparateurs d'eau. En général, une telle mesure se vérifie lorsque les critères suivants sont remplis: selon la quantité fournie et le niveau de pression, le compresseur est encore adapté au profil actuel de consommation, il fonctionne plus de 4000 heures de service par an, possède une puissance moteur d'au moins 50 kW et a moins de 15 ans.

Exemples de la pratique

Trois plutôt que cinq compresseurs

On a réalisé une analyse de consommation dans une centrale d'air comprimé et le fournisseur a proposé à l'issue de celle-ci de nouveaux compresseurs avec une augmentation de l'efficacité. Le projet est mis en œuvre et l'augmentation d'efficacité promise est réalisée. L'inconvénient est qu'un vieux dessiccateur frigorifique, âgé de presque vingt ans, était installé en aval d'un des nouveaux compresseurs. Le remplacement par un nouvel appareil aurait pu être effectué en même temps que l'installation du nouveau compresseur, ce qui aurait réduit les frais d'installation ultérieurs. De plus, le responsable du service n'aurait pas eu à faire une nouvelle demande à la direction commerciale. Grâce à l'économie d'énergie du nouveau dessiccateur frigorifique, le délai de retour sur investissement était inférieur à 2 ans.

Pour le nettoyage des filtres, les 5 compresseurs fonctionnent de façon concomitante pendant un court laps de temps dans la centrale d'air comprimé. De plus, la pression de réseau dans ce laps de temps diminue d'environ 1.5 bar. Cela se répète trois fois par heure. Afin que tous les consommateurs puissent fonctionner sans problème même pendant le processus de nettoyage, la pression de réseau est 1.5 bar plus haute que nécessaire. Cela génère une consommation d'énergie environ 10% plus élevée à la compression de l'air comprimé et une consommation d'air comprimé environ 18% plus élevée avec les consommateurs non régulés.

Mesure d'optimisation: en amont du processus de nettoyage, on installe un gros réservoir de volume 24 m³. La conduite jusqu'aux réservoirs est de section transversale réduite, de sorte que seule une petite quantité d'air comprimé peut s'écouler. Celle-ci suffit toutefois à remplir le volume de réservoir à la pression de service pendant le laps de temps entre les processus de nettoyage. Optimisation: réduction de la quantité d'air comprimé totale consommée par une pression de réseau plus basse, réduction de l'énergie pour produire l'air comprimé, trois compresseurs au maximum plutôt que cinq sont finalement nécessaires.

Coordination au travers de l'exploitation

Sur une machine d'emballage, les emballages ne peuvent pas être correctement découpés en présence d'une basse pression de réseau. Selon le fabricant, une pression de réseau de 7.0 bars est nécessaire, la quantité d'air comprimé nécessaire pendant le processus de coupe n'a pas pu être chiffrée. L'ensemble du réseau d'air comprimé fonctionne toutefois à 8.5 bars, afin que les emballages puissent être coupés proprement. En amont de la machine d'emballage on a constaté qu'un réducteur de pression est installé et qu'il semblait sous-dimensionné (vissé jusqu'en butée). Il n'a pas été possible d'observer ici l'évolution avant-après: la recommandation d'éliminer le réducteur de pression et d'installer une section transversale de conduite plus grande n'ayant malheureusement pas été suivie. L'économie d'énergie avait été estimée à 30 000 kWh/an et la mesure d'optimisation aurait pu être amortie en moins d'un an.

Cet exemple montre que les optimisations d'un système d'air comprimé nécessitent la volonté de toutes les personnes concernées. C'est pourquoi il est conseillé que la coordination des projets d'optimisation, dans le domaine de l'air comprimé, soit confiée à une personne interne à l'entreprise, ayant la capacité de faire passer des recommandations dans les domaines concernés.

Informations complémentaires

Notions et unités

Grandeur	Unité	Désignation
P	W	Puissance mécanique
\dot{V}_1	m ³ /s	Débit volumique côté admission (index 1), quantité fournie
p ₁	Pa	Pression absolue côté admission (index 1), pression atmosphérique environ 100 000 Pa
p ₂	Pa	Pression absolue côté pression (index 1), 7 bars, surpression = 800 000 Pa
ln		Logarithme naturel

Normes, lois et sources

Normes

- ISO 1217:2009 / Amendement 1:2016 Compresseurs volumétriques – Essais de réception
- ISO 5389:2005, Turbocompresseurs – Code d’essais des performances
- ISO 5390:1977 / Amendement 1: 2017 Compresseurs – Classification
- ISO 7183:2007, Sécheurs à air comprimé – Spécifications et essais
- ISO 8573 – Partie 1 à 9, Air comprimé – Polluants et classes de pureté – Méthodes d’essai
- ISO 11011:2013 Air comprimé – Efficacité énergétique – Évaluation
 - fixe les exigences pour obtenir et rapporter les résultats de l’évaluation d’un système d’air comprimé tenant compte de tout le système, des entrées d’énergie jusqu’au travail effectué de ces entrées.
 - considère que les systèmes d’air comprimé sont constitués de 3 sous-systèmes fonctionnels: une alimentation y c. la conversion de la ressource d’énergie primaire en énergie d’air comprimé; une transmission y c. le mouvement de l’énergie de l’air comprimé de son lieu de production jusqu’à son lieu d’utilisation; une demande incluant tous les utilisateurs d’air comprimé, y c. les applications d’utilisation finale de production et les diverses formes de consommations perdues d’air comprimé.
 - fixe des exigences concernant l’analyse des données issues de l’évaluation, le rapport et la document. des résultats de l’évaluation, et l’identification d’une estimation d’économie d’énergie du processus d’évaluation.
 - identifie les rôles et les responsabilités des personnes impliquées dans l’activité d’évaluation.
- ISO 12500 – Partie 1 à 4, Filtres pour air comprimé – Méthodes d’essai
- ISO 50001:2011 – Systèmes de management de l’énergie

- IEC 60034-30-1:2014 Machines électriques tournantes – Partie 30-1: Classes de rendement pour les moteurs à courant alternatif alimentés par le réseau (code IE)
- VDMA 15390 Druckluftreinheit (pureté de l’air comprimé). Partie 1: applications industrielles, 2014 Partie 2: industrie agroalimentaire et pharmaceutique, 2018 Partie 3: Installations de laquage, 2020

Lois

- Europa Ecodesign, Lot 31, preparatory studies, voir www.eceee.org/ecodesign/products/compressors:
- On electric motor systems/compressors, Tasks 1–8, 2014, VHK
 - On low pressure & oil-free compressor packages, final report, 7 June 2017, VHK

Sources

- Manuel air comprimé Atlas Copco, 8e édition, 2014
- Kaeser Kompressoren-Handbuch, 2015
- Analyse conforme de l’air comprimé: moyennes et grandes installations, Certificat de performance pour le prestataire d’air comprimé, éditeur SuisseEnergie, 2015
- Anlagen-Neubeschaffung: Ihr Entscheidungswegweiser zur kosteneffizienten Druckluftanlage, SuisseEnergie, 2007
- Investissez astucieusement dans l’air comprimé Guide du planificateur en cas de nouvelle construction, éditeur SuisseEnergie 2015
- Votre entreprise voit-elle aussi des milliers de francs se volatiliser? Dossier d’optimisation pour l’exploitant, éditeur SuisseEnergie, 2015

Informations supplémentaires:

- SuisseEnergie: www.suisseenergie.ch/processus-technique-dinstallations/air-comprime
- Webinaire Topmotors n° 14: «Energieeffiziente Druckluftsysteme»

Note de l’éditeur

La fiche technique Air comprimé a été réalisée par Impact Energy dans le cadre du programme de mise en œuvre de systèmes d’entraînement efficaces Topmotors. Elle a été élaborée par Conrad U. Brunner (Impact Energy), Rolf Gloor (Gloor Engineering), Tai Moser (Atlas Copco/CS Instruments), Jakob Spillmann (KAESER Kompressoren AG) et Rolf Tieben (Impact Energy) et partiellement mise à jour en 2021 (Normes, lois et sources). Lectorat et mise en page: Faktor Journalisten AG. Topmotors est soutenu par SuisseEnergie.