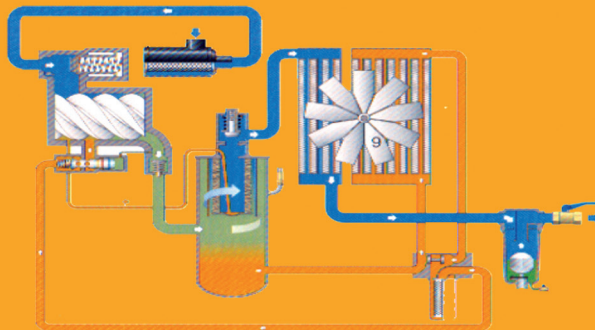


Guide Technique Installations de Production d'Air Comprimé



GUIDE TECHNIQUE L'AIR COMPRI

TABLE DES MATIÈRES

1 PRINCIPES TECHNOLOGIQUES ET ECONOMIQUES	5
1.1 Importance et les rôles de l'air comprimé dans le contexte de l'entreprise	5
1.1.1 Applications	5
1.1.2 Conduite des installations	6
1.1.3 Répartition budgétaire	7
1.2 Notions clefs de l'air comprimé	8
1.3 Installations d'air comprimé	9
1.4 les différents types de compresseurs	10
1.4.1 Technologies de compression	11
1.4.2 Régulations des compresseurs	15
1.5 le séchage de l'air comprimé	21
1.5.1 Sécheurs par réfrigération	21
1.5.2 Sécheurs par absorption	21
1.5.3 sécheurs par adsorption	21
1.5.4 Sécheurs par perméation	21
1.5.5 par air comprimé perdu, sans chaleur	22
1.6 Filtration d'air comprimé	23
1.6.1 Humidité	23
1.6.2 Poussières	23
1.6.3 Hydrocarbures	23
1.6.4 Gaz nocifs	23
1.6.5 Filtration après compression	23
1.6.6 Ambiance de travail	24
1.6.7 Aérosols d'huile	24
1.6.8 Stérilisation	25
1.6.9 Inconvénients	25
1.6.10 Classes et degrés de filtration	25
1.7 Traitement des condensats	26
1.7.1 Réglementations environnementales	26
1.7.2 Équipements	26
1.8 Réseaux d'air comprimé	27
1.8.1 Tuyauteries	27
1.8.2 Vannes et raccords	28
1.8.3 Débitmètres	28
1.8.4 Filtres, Régulateurs, Lubrificateurs	28
1.9 Pertes de charge	29
1.10 Fuites	30
1.10.1 Gestion des fuites	31
1.10.2 Évaluation des fuites	31
1.10.3 Exemple du coût d'une fuite	31
1.11 Vingt recommandations pour des configurations souhaitables de réseaux	31
1.12 Principales utilisations d'air comprimé	33
1.12.1 Soufflettes et buses	33
1.12.2 Automatismes	34
1.12.3 Raccords et colliers	34

1.12.4 Outillages.....	35
1.13 Applications pratiques.....	36
2 ETUDE DE CAS.....	37
2.1 Préliminaire.....	37
2.2 Inventaire.....	37
2.2.1 compression.....	37
2.2.2 Traitement d'air comprimé.....	37
2.2.3 Distribution d'air comprimé.....	38
2.2.4 Utilisations d'air comprimé.....	38
2.3 Bilan énergétique.....	39
2.3.1 Profils de consommation.....	39
2.3.2 Déperditions.....	40
2.4 Éléments financiers et de gestion.....	40
2.4.1 Consommations énergétiques supplémentaires.....	41
2.5 sècheurs.....	41
2.6 Refroidissement des compresseurs.....	41
2.6.1 Énergie volumique de production.....	41
2.6.2 Énergie volumique à l'utilisation.....	41
2.6.3 Coût de l'air comprimé.....	41
3 Sur quelles voies d'amélioration travailler en priorité ?.....	42
3.1 Fuites.....	42
3.2 Utilisations.....	42
3.3 Distribution.....	42
3.4 Production.....	43
3.4.1 Compression d'air.....	43
3.4.2 Traitement d'air comprimé.....	43
4 Réduction des consommations d'énergie.....	44
4.1 Réduction des débits.....	44
4.2 Réduction des pertes de charge.....	44
4.3 Ajustement des moyens de production.....	44
4.4 Ajustement de la régulation des compresseurs.....	44
5 Améliorations possibles de la qualité de fourniture aux utilisations.....	45
5.1 huiles et poussières.....	45
5.2 Humidité.....	45
5.3 Régularité de pression.....	45
6 Évaluation des futures performances.....	46
6.1.1 Énergie volumique de production.....	46
6.1.2 Énergie volumique à l'utilisation.....	46
6.1.3 Coût de l'air comprimé.....	46
7 Économies d'énergie.....	46
8 Économie globale.....	46
9 Investissements nécessaires.....	47
9.1 Évaluation des investissements.....	47
9.2 Délai financier des retours sur investissement.....	47
10 mise en œuvre des améliorations.....	47
11 suivi de l'évolution des consommations.....	48

INTRODUCTION

Ce guide technique veut apporter les informations sur les principes technologiques de l'air comprimé et de ses applications pratiques en entreprise, pour une meilleure efficacité énergétique.

Dans cette optique, ces informations sont propres à rendre tangible les relations entre la théorie de l'efficacité énergétique et les pratiques industrielles.

Il s'adresse à tous, agents de l'ANME, bureaux d'études et industriels, ainsi qu'à leurs clients et stagiaires afin qu'ils puissent utiliser ces informations dans leurs activités professionnelles.

Comme tout travail de formation, il consiste à amener les stagiaires à se poser les bonnes questions et non pas à leur apporter des solutions toutes faites.

Le but est d'apporter les informations permettant une réflexion approfondie sur les techniques d'air comprimé et de leur efficacité énergétique ainsi que sur les mises en actions concrètes de celles-ci pour aboutir à un changement des comportements usuels, ceci en faveur d'une meilleure gestion énergétique des installations.

L'objectif est ici la création d'outils pédagogiques pouvant être utilisés à la fois par les agents de l'ANME, les bureaux d'études et les industriels.

Les stagiaires à l'issue de leur formation pourront ainsi mettre en œuvre dans l'entreprise une démarche prospective.

Celle-ci sera en mesure d'intégrer pleinement l'efficacité énergétique des installations en partant des besoins réels d'air comprimé en terme de fluide, de force et d'énergie.

Cette démarche se déroulera au travers des installations de production et des réseaux de distribution d'air comprimé.

1 PRINCIPES TECHNOLOGIQUES ET ECONOMIQUES

1.1 Importance et les rôles de l'air comprimé dans le contexte de l'entreprise

1.1.1 Applications

L'air comprimé est une énergie potentielle très utilisée dans toutes les entreprises, il représente en moyenne **10% à 15% de la facture d'électricité**. Il faut retenir aussi qu'un arrêt d'air comprimé équivaut presque systématiquement à un **arrêt de production**. Ce qui révèle le rôle important mais souvent méconnu qu'il tient au sein des entreprises.

Les principaux avantages en sont néanmoins :

- **Une bonne sécurité** d'utilisation car les outils et accessoires peuvent être utilisés dans des ambiances explosives ou humides
- **Une bonne fiabilité** des appareils car ils sont généralement robustes, simples de conception et d'entretien.
- **Une bonne maniabilité** des outils en poids et en dimensions ainsi qu'une grande rapidité de travail, de plus ces équipements ne craignent pas la surcharge.

Cette énergie est stockable, dans certains cas toutefois assez limités dans le temps, elle ne nécessite pas de circuits de retour

Les compresseurs peuvent faire l'objet de récupération d'énergie, ce qui est une excellente source d'efficacité énergétique quand cela est réalisable d'un point de vue pratique.

On la trouve dans pratiquement tous les secteurs d'activité :

- **Automobile** : chaînes de fabrication, outillages et chaînes de peintures mais aussi dans les garages, tôleries et stations service, perceuses, outils de serrage, gonflage, traitements de surfaces divers. freinage pour poids lourds, ouverture des portes d'autocar, etc.
- **Aéronautique**: démarrage des réacteurs et en fabrication pour les perceuses, les riveuses, les cabines de peinture...
- **Arsenaux** : renflouement de navires, maintenance de treuils, etc.

- **Lutte contre la pollution** : barrières à bulles, oxygénation de bassin.
 - **Plastique - caoutchouc** : commande de moules, soufflage, formage des pièces
 - **Bois** : étaux, outillage, pulvérisation, sciage, etc.
 - **Agriculture** : pompage, pulvérisation de produits pressoirs pneumatiques ou bien encore pour l'outillage d'entretien du matériel
 - **Alimentation** : vérins de manutention en conditionnement, pulvérisation, déchargement.
 - **Laiteries et fromageries** : conditionnement.
 - **Travaux publics et mines** : perforateurs, boulochage, clés à chocs, pompage, manutention, treuils, aération, maintien de voûtes, lutte contre les infiltrations.
 - **Charpente métallique**: sablage, peinture, soudure.
 - **Stations de ski** : canons à neige
 - **Bureaux et hôtels** : portes d'ascenseurs, acheminement pneumatique du courrier, circuit de régulation de l'air conditionné
 - **Blanchisseries et laveries** : agitations de liquide, manutention...
 - **Médical** : outillage chirurgical, assistance respiratoire, roulettes de dentiste.
- Et beaucoup d'autres également:**
- mécanique générale, fonderies, forges
 - cimenteries, verreries
 - raffineries, produits chimiques
 - produits pharmaceutiques
 - tanneries, teintureries
 - filatures, confection
 - papeteries, imprimeries
 - supermarchés
 - silos à grain
 - chemin de fer
 - chantiers navals, marine
 - distribution d'eau, stations d'épuration
 - usine de traitement des ordures ménagères services municipaux, casernes de pompiers, etc....



1.1.2 Conduite des installations

L'arrêt de fourniture d'air comprimé a donc les mêmes conséquences pour l'entreprise que l'arrêt de fourniture d'énergie électrique, c'est à dire l'arrêt de production avec des conséquences financières extrêmement importantes.

Il faut donc assurer un **secours permanent** par des capacités de production d'air supplémentaires, assu-rer aussi la fiabilité mécanique des appareils et maintenir un poste entretien conséquent.

Par souci de **sécurité**, tout ceci conduit assez sou-vent l'industriel à faire le choix coûteux d'équipements de compression surdimensionnés ou aux puissances engagées mal réparties.

Cette opération est réalisée généralement **sans considération de l'efficacité énergétique** et éga-lement en économisant quelque peu sur les dépen-ses de maintenance.

Or l'**énergie représente l'essentiel** du poste de dé-pense représenté par l'air comprimé.

Une autre contrainte peut tenir au un **niveau de pression élevé** semblant nécessaire à maintenir. Ici aussi il s'agit d'une sécurité relative assez souvent surévaluée, par souci de conserver une « réserve » d'air et de pression ou par habitude d'utilisation non remise en cause ou encore pour combattre des pertes de charge excessives d'un réseau.

Pour une pression normale d'utilisation d'air à 6 b, il n'est pas rare de rencontrer des niveaux de pres-sions appliquées aux compresseurs de 8, 10 b et plus. Or pour ces pressions, **1 b supplémentaire représente 6 à 7 % d'énergie absorbée** par les compresseurs et de 12 à 14 % de quantité d'air comprimé supplémentaire dissipés dans les fuites existantes (de l'ordre de 25 à 30% de fuite en moyenne). L'impact moyen peut donc être évalué à $6,5\% + (13\% \times 27,5\%) \approx 10\%$ pour 1 b de plus.

La régularité de pression est assez souvent évo-quée aussi comme contrainte importante, mais en dehors de quelques procédés spécifiques, de sim-ples détendeurs/régulateurs placés à l'utilisation permettent de résoudre ce problème généré par les variations de la régulation.

Par contre **la qualité de l'air comprimé** est une contrainte réelle de plus en plus importante, car une prise de conscience s'est faite dans l'industrie.

L'air comprimé pollué, saturé d'humidité, chargé d'huile et de particules est de moins en moins ac-cepté par les entreprises. Les corrosions des réseaux de distribution et des appareils à l'utilisation provo-quant des coûts de réparations non négligeables, ainsi que l'obligation de traitement des condensats des compresseurs lubrifiés, ont conduit les indus-triels à exiger un air de meilleure qualité.

Enfin les contraintes de températures ambiantes pour des compresseurs installés dans des locaux **assez souvent inadaptés** (chaufferie par exemple), obligent de réaliser des dispositifs de ventilation ou de refroidissement par eau.

Ceux-ci permettent d'**évacuer les calories** qui se-ront parfois dans les meilleurs des cas récupérés pour le chauffage de locaux adjacents ou pour des procédés demandant de l'eau chaude à basse tempé-rature aux alentours de 70°C. Il est à noter que lors de la compression de l'air, près de 50 à 80 % de l'énergie selon le taux de fonctionnement, est ici **récupérable** sous forme de chaleur.

La plupart des contraintes précédemment évoquées, au-delà du faible prix relativement actuel de l'énergie, n'ont pourtant pas incité les industriels dans leur grande majorité à s'intéresser de près à **l'efficacité énergétique** des installations d'air comprimé.

Pourtant une approche différente depuis quelques années, suscitée par des **contraintes de gestion et de réduction des coûts** plus que par un véritable souci d'économie d'énergie incite des industriels à étudier la possibilité de **déléguer à des entreprises sous-traitantes**, la conduite, et parfois la propriété d'installations de production d'air comprimé.

Cette opération leur permet de se concentrer exclu-sivement sur leurs moyens de production. Cette ap-proche à l'avantage d'isoler ce poste de dépense et de l'exprimer dans une seule unité qui est le Nm³ d'air comprimé acheté. A notre avis **un double avantage** se présente pour la maîtrise de l'énergie. D'une part, le prestataire achetant ou étant engagé par l'énergie électrique et fournissant l'énergie pneumatique aura tout intérêt à **améliorer la per-formance énergétique** des installations de produc-tion d'air comprimé exprimée le plus souvent en Wh/Nm³ et à **la maintenir**.

D'autre part, l'industriel payant désormais des factures d'air comprimé et ayant ainsi clairement identifié ce poste de dépense, on peut espérer qu'il aura sans aucun doute le souci d'en réduire les montants et de **limiter la consommation** d'air comprimé au strict nécessaire.

Par contre les inconvénients en sont un sentiment de **perte de contrôle et de savoir-faire pour l'industriel**, il accroît ainsi sa dépendance envers son fournisseur. De plus si la délégation s'arrête aux compteurs d'air comprimé après production sur site, on assiste fréquemment à des dérives de consommations d'air comprimé car une certaine **déresponsabilisation** qui prendra forme chez les utilisateurs, le maillon intermédiaire de gestion des réseaux n'existant quasiment plus.

1.1.3 Répartition budgétaire

La répartition du budget de l'air comprimé pour un compresseur est généralement comprise entre **75 % pour le poste énergie** et 25 % qui se répartissent à peu près équitablement entre investissement et maintenance, ceci pour 6000 H de fonctionnement annuel, pendant 5 ans, période d'amortissement comptable habituel des machines. Si nous prenons par exemple un compresseur à vis lubrifiées d'une puissance absorbée en charge de 100 kW, avec un taux de charge moyen de 75 % en puissance, ceci nous donne une consommation annuelle d'énergie de $100 \text{ kW} \times 0,75 \times 6000 \text{ h/an} = 450000 \text{ kWh} \times 0,12 \text{ DT HT /kWh} = 54 000 \text{ DT HT}$. La dépense énergétique sur 5 ans à prix constant sera donc de $54 000 \text{ DT HT} \times 5 = 270 000 \text{ DT H.T.}$ La valeur neuve d'une telle machine est d'environ 47 000 DT H.T.

Ce qui permet de dire qu'un compresseur consomme en énergie ici chaque année un peu plus que l'équivalent de son prix d'achat.

Si l'on ajoute 10 % pour frais financiers et taxes professionnelles, le budget investissement devient alors de 51 700 DT H.T.

Le budget de maintenance totale quant à lui, comprenant l'échange standard du bloc-vis du compresseur au bout de 30000 h et 5 ans, est lui de l'ordre de 9600 DT H.T. par an, ce qui donne un budget sur 5 ans de 4800 DT H.T.

Au global le budget dans ce cas est sur 5 ans de :

- 270 000 DT H.T. d'énergie (73 %)
- 51 700 DT H.T. d'investissement (14%)
- 48 000 DT H.T. de maintenance (13%)

pour un total de 369 700 DT H.T.

Toutefois l'exemple du cas moyen utilisé ici, ne tiens compte pour la démonstration que d'un seul compresseur, alors qu'une centrale contient généralement plusieurs machines.

Il faut encore ajouter les coûts d'exploitation des périphériques (sècheurs, filtres et circuits de refroidissement)

Ce qui aura tendance à faire augmenter la part investissement/entretien et à minimiser le poste consommation énergétique,

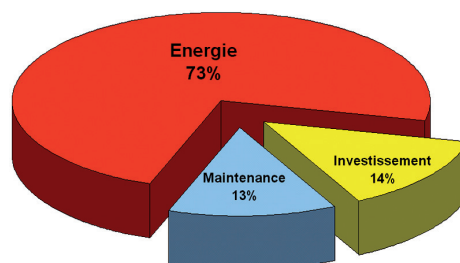
Les consommations d'énergie de ces périphériques ne sont généralement que de 5% à 7% de celle des compresseurs.

On peut arriver suivant le taux de charge de la centrale à une part énergétique qui représente alors en moyenne « seulement » 65 à 70 % du budget global d'une centrale neuve.

A l'inverse pour une centrale ancienne le poste investissement disparaît presque totalement et le poste énergie peut grimper alors à 80-85% du budget.

Bien entendu plus le nombre d'heures de fonctionnement et plus le taux charge en régulation seront élevés, plus le poste énergie sera élevée. par rapport à un poste investissement identique et un poste de maintenance en légère progression

Nous retrouverons alors **pour 8000 h par an par exemple un part à 80-85% d'énergie**, pour un budget global de l'air comprimé, investissement compris cette fois-ci.



1.2 Notions clés de l'air comprimé



Pression effective ou relative (bar eff. ou bar r) : Prosaïquement c'est la pression qui est lue sur un manomètre.

Pression absolue (bar abs):

Elle correspond à la pression effective augmentée de la pression atmosphérique (1,01325 bar ou 760 mm de mercure (Hg) c'est cette valeur qui sera utilisée dans les calculs (en bar)

Température :

Exprimée en degré Celsius (°C) dans le langage courant c'est bien entendu les Kelvin (0°C = 273,15 K) qui serviront aux calculs, la température tient une place importante dans la compression d'air.



Débit « réel » (m³) :

C'est le débit ramené aux conditions d'aspiration du compresseur à la température et à la pression de l'ambiance. Or compte tenu des fuites internes des compresseurs, il faudrait exprimer le débit réel comme étant le débit délivré en sortie du compresseur et non pas aspiré comme habituellement.

Normaux mètres cubes (Nm³ ou m³(n))

Le volume d'une certaine quantité de gaz, exprimé en m³, dépend de la température, de la pression absolue et de la teneur en humidité de ce gaz. Dans le cas d'un mètre cube normal (m³ (n)), on considère que le gaz se trouve sous une pression de 1,01325 bar, à une température de 0° C et à l'état sec (HR 0%).

Nm³/h

Puissance nominale ou puissance plaquée (kW)

C'est l'indication de la puissance utile, nominale et caractéristique, indiquée notamment sur la plaque signalétique du moteur.

Puissance absorbée sur l'arbre (kW) :

C'est celle qui est nécessaire à l'entraînement de l'élément compresseur. C'est une puissance mécanique, elle est indiquée en charge totale ou partielle et à vide. (Il est encore parfois fait état



de cheval vapeur, il faut 736 W (0,736 kW) pour faire 1 ch.)

Puissance absorbée aux bornes (kW) :

C'est la puissance électrique demandée au réseau d'alimentation électrique. Cette puissance prend en considération le rendement du moteur électrique. C'est la valeur qui doit être retenue pour exprimer les performances du compresseur.

Énergie spécifique (Wh/m³ et Wh/Nm³) :

C'est l'énergie nécessaire pour fournir le débit réel. Elle doit être exprimée par rapport à la puissance effectivement absorbée aux bornes et le débit réellement délivré après la bride de sortie d'air du compresseur suivant la norme ISO1217.

Wh/Nm³

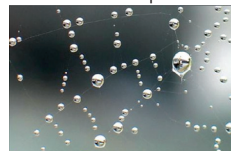
Norme ISO 1217 : Elle sert de référence pour indiquer les performances d'un compresseur, pour les débits aux conditions d'aspiration et les énergies spécifiques. Elle indique une méthodologie de mesure mais pas précisément les endroits du compresseur où cette mesure doit être effectuée. Les performances annoncées seraient donc sujettes à caution, si elles n'étaient pas expressément exprimées pour le groupe compresseur complet. Elle s'appuie sur l'énergie réellement absorbée aux bornes du compresseur en y incluant tous les périphériques et sur le débit délivré après la vanne de sortie d'air comprimé, ramené aux conditions d'aspiration. Ce débit doit être garanti avec une tolérance maximale de ± 5 % pour les puissances inférieures à 75 kW et ± 4 % pour les puissances supérieures.

Norme ISO2151 pour le bruit :

Elle spécifie des méthodes pour la détermination et la déclaration de l'émission sonore des compresseurs mobiles et fixes et des pompes à vide.

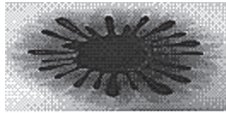


Point de rosée : C'est la température à laquelle un volume donné est saturé de vapeur d'eau. Si la température descend sous cette valeur, la condensation se crée. Celui-ci est indiqué sous pression ou en air détendu.



P.P.M. : (Parties Par Million)

Elle est souvent utilisée pour définir la teneur en huile contenue dans l'air comprimé. 1 ppm. Correspond sensiblement à 1 mg d'huile par m³.



Perte de charge (bar):

C'est la pression perdue au passage d'un appareil ou dans les canalisations, par le frottement qu'il provoque avec l'air comprimé, son évolution est proportionnelle au carré du débit passant.

Taux de charge du compresseur :

Egal à la consommation d'air comprimé divisée par le débit nominal du compresseur, il est conseillé qu'il soit limité à 0,5 pour les compresseurs à pistons secs et à 0,7 pour ceux à pistons lubrifiés. Pour les compresseurs rotatifs, à vis ou à turbines la charge peut être de 100 %, cela est même conseillée pour une bonne performance énergétique.

1.3 Installations d'air comprimé

Pour pouvoir utiliser les machines et les outils à air comprimé, on doit disposer d'équipements de production et de distribution d'air comprimé.

Les équipements de production d'air comprimé sont essentiellement constitués, dans l'ordre :

- **D'accessoires d'aspiration** : qui sont des gaines de ventilations, du traitement d'air, des filtres et des refroidisseurs d'air aspiré éventuellement. Car il y a nécessité de conditionner l'air, sa pression, sa température et sa qualité avant son entrée dans le compresseur si l'on veut travailler efficacement.

- **D'un ou plusieurs compresseur** qui peuvent être conçus de différentes façons : Ils peuvent être rotatifs ou alternatifs, lubrifiés ou non, etc.

En industrie, le compresseur est le plus souvent entraîné par un moteur électrique à accouplement élastique par plots ou par courroie ou encore par liaison directe par engrenages.

L'air produit par le compresseur est parfois utilisé directement à température élevée ou bien alors passe au travers d'un réducteur de température appelé réfrigérant final.

- **De filtres** car avant d'être distribué, l'air doit être partiellement ou totalement traité, déshuilé souvent, dépoussiéré.

- **D'un sécheur ou plusieurs sécheurs**, car l'air doit être séché pour éviter les inconvénients dus à la corrosion. Le sécheur est le plus souvent de type frigorifique ou encore à adsorption.

- **D'un réservoir**, car cet air sera stocké fréquemment dans une cuve faisant office de tampon de régulation. Il sert aussi d'amortisseur de pulsations aux compresseurs à pistons et accessoirement réduit la température d'air comprimé. Cet équipement comprend au minimum un manomètre qui indique la pression, une soupape de sécurité qui évite toute surpression accidentelle. Il possède aussi éventuellement un dispositif de régulation piloté par la pression d'air comprimé qui met à vide ou à l'arrêt le compresseur lorsque la demande diminue ou est interrompue.

- **De purges et d'unités de traitement des condensats**, car il faut évacuer les condensats issus de la compression, du refroidissement ou du séchage de l'air comprimé.

Il faut aussi séparer l'eau et l'huile présentes dans les condensats et traiter ces condensats avant de les relâcher vers les points bas d'évacuations des eaux usées.

La distribution d'air comprimé, est effectuée ensuite en réseau au travers de canalisation rigide en acier noir, en acier galvanisé, en acier inoxydable sertis ou non, en cuivre, en PVC, en encore en résines synthétiques.

Ces matériaux sont choisis suivant les contraintes techniques ou économiques rencontrées ou bien encore par habitudes

Ces habitudes d'achat ne sont pas toujours pleinement justifiées, de plus à des pressions et dans différentes sections de tuyauteries par toujours adaptées.

Sur les réseaux, que ce soit en ligne ou aux extrémités avant utilisations, on trouve en grand nombre d'accessoires :

- raccords, vannes et clapets,
- régulateurs et détenteurs,
- manomètres et débitmètres,
- filtres, graisseurs, purges de ligne
- Tuyaux flexibles..

- Les utilisations d'air comprimé sont excessivement variées, elles peuvent être classées en grandes catégories que sont

- Les débits d'air libre
- Les outillages
- Les automatismes pneumatiques
- Les autres usages de transfert.
- Les autres usages de souffle.
- Autres utilisations diverses



1.4 les différents types de compresseurs

Les compresseurs dynamiques

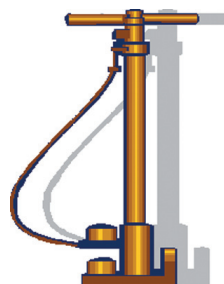
la compression de l'air est obtenue par augmentation de la vitesse de l'air dans l'impulseur puis par la transformation de l'énergie cinétique en énergie potentielle de pression lors de l'introduction de l'air dans le diffuseur.



Les compresseurs volumétriques

la compression est obtenue par réduction de volume d'une quantité d'air aspiré donné. Si cette opération est effectuée très lentement, il n'y a pas d'augmentation notable de la température et l'énergie mécanique nécessaire est relativement faible.

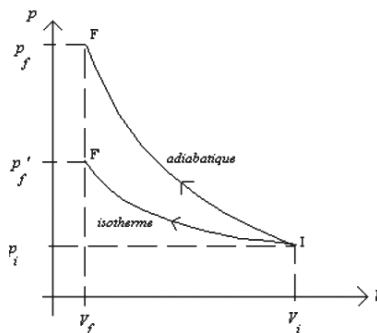
Cette compression idéale, rarement possible, est dite **Isothermique**.



En fait les machines ont une vitesse élevée, ce qui entraîne une augmentation considérable de la température et l'énergie mécanique nécessaire est nettement plus importante. Si nous admettons qu'il n'y a pas eu de déperdition de température, nous dirons que cette compression est **adiabatique**.

Dans la réalité l'augmentation de température est réduite par le dispositif de refroidissement. Mais la compression est plus adiabatique qu'isothermique et elle est dite **polytropique**.

Pour se rapprocher, le plus possible, de la compression idéale, on la réalise par étape avec refroidissement à chacune d'elle, nous avons affaire à un **com-pressEUR** à plusieurs étages.

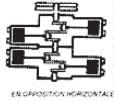


Compression mono-étagée : La compression est obtenue en un seul étage.

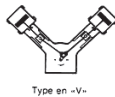
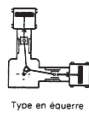
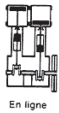


Compression bi-étagée : Le premier étage (basse pression) refoule l'air dans le deuxième étage (haute pression); Entre les 2 étages l'air est refroidi; Ce procédé permet un gain sur le rendement de l'ordre de 15 % mais complique la machine et renchérit son prix.

Compression multi-étagée : En 3 ou 4 étages (même davantage) ces machines sont réservées, le plus souvent, aux très hautes pressions ou à des machines dynamiques de grosses capacités.



Compression à double effet: (le plus souvent sur compresseurs à pistons mais existent sur des compresseurs à vis) Avec un compresseur à double effet, on double pratiquement le débit avec une machine à peine plus grande.



1.4.1 Technologies de compression

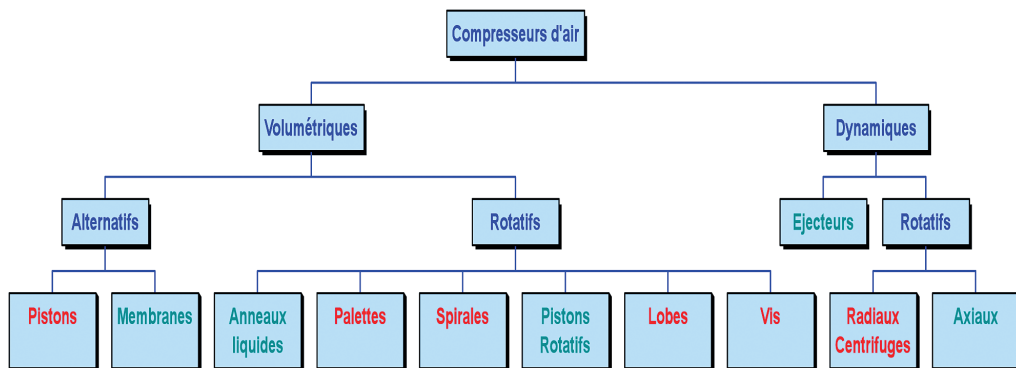
La compression de l'air peut être mono ou multi-étages dans toutes les technologies. Les technologies utilisées pour la production d'air comprimé comme utilité industrielle sont :

Volumétriques

Ils sont soit **alternatifs** : les pistons lubrifiés ou non ; soit **rotatifs** : les palettes lubrifiées, les vis lubrifiées ou non, les lobes non lubrifiés, les spirales non lubrifiées

Dynamiques les turbines (non lubrifiées).

Dans les compresseurs volumétriques, l'obtention d'augmentation de pression se fait par la réduction du volume d'air contenu dans une chambre. Dans les compresseurs dynamiques, l'augmentation de pression est obtenue par la transformation de l'énergie cinétique. Leurs performances sont très dépendantes des conditions d'aspiration



1.4.1.1 Compresseurs à Pistons

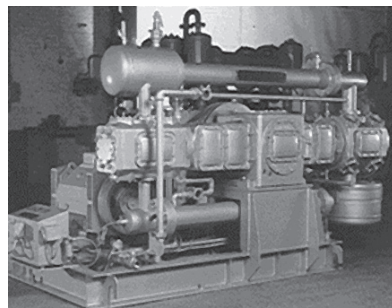
La plus ancienne technologie utilisée est de conception simple. C'est le mouvement alternatif dans un cylindre qui crée la compression et ce sont des clapets qui assurent l'étanchéité entre l'aspiration et le refoulement.

Ils possèdent les meilleures énergies spécifiques (100 Wh/Nm³ à 7 b) à l'état neuf et en pleine charge soit 5% de moins environ par rapport aux compresseurs rotatifs pour des raisons d'étanchéité interne.

Mais les rendements se dégradent rapidement (0.5% à 1% environ de perte par an) en fonction de l'usure de la segmentation et de la clapetterie qui sont des pièces mécaniques de contact en mouvement.

La segmentation Téflon pour les compresseurs exempts de lubrification de l'air accroît d'autant le phénomène d'usure.

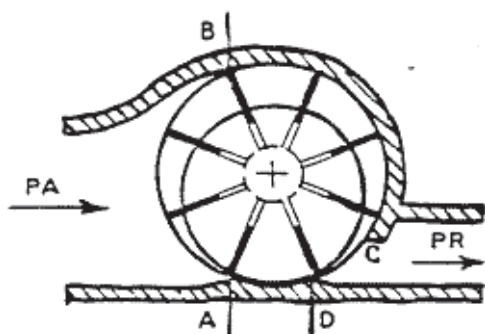
Les compresseurs à pistons nécessitent par conséquent un entretien régulier important. Ils sont néanmoins la seule alternative pour les très hautes pressions.



1.4.1.2 Compresseurs à Palettes

Un arbre tangent au stator cylindrique y tourne au-tour d'un axe excentré. Des palettes radiales dis-posées dans l'arbre coulis-sent librement dans l'arbre contre la paroi du cylindre sous l'effet de la force centrifuge. La compression est obtenue par la réduction des chambres formées entre les palettes et le cylindre lors de la rotation.

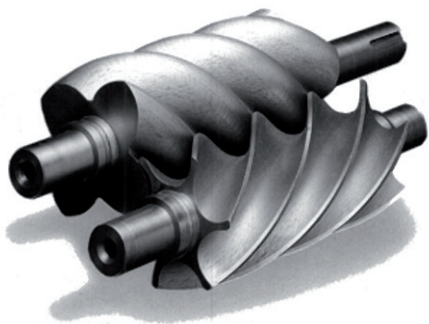
L'étanchéité entre aspiration et refoulement est as-surée par le film d'huile formé au contact des palet-tes avec le cylindre. Ces palettes sont des pièces d'usure, et de leurs états dépendent les perfor-man-ces du compresseur.



1.4.1.3 Compresseurs à vis

Les plus utilisés, ils sont constitués d'une vis mâle et d'une vis femelle qui s'engrènent et tournent en sens inverse l'une de l'autre, placées dans un bloc carter comportant orifices d'admission et de refou-lement.

La compression est obtenue en continu lors de la rotation au moyen d'abord de l'aspiration d'air par l'augmentation du volume entre filets et cannelures puis par la réduction du volume entre ces éléments jusqu'au refoulement.



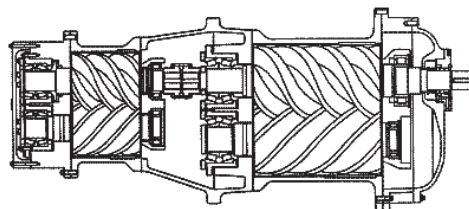
1.4.1.4 Compresseurs à vis lubrifiées

Le mouvement de rotation est transmis à la vis mâle qui entraîne la vis femelle.

C'est le film d'huile injecté sous pression qui assure la lubrification des vis et des paliers, le refroidisse-ment de l'air comprimé ainsi que l'étanchéité entre aspiration et refoulement. Comme pour tout com-pressur lubrifié, il y a nécessité de séparer en sortie d'éléments, l'huile de l'air comprimé.

Ces compresseurs offrent une bonne énergie spéci-fique à pleine charge (105 à 110 Wh/Nm³ à 7 b) entre environ 10 et 250 kW de puissance moteur installée, au-delà les importantes quantités d'huile brassées font augmenter les risques d'encrassement et de pertes de charge du séparateur d'huile et ren-dent pénibles les interventions d'entretien.

Les compresseurs à vis lubrifiées sont généralement mono-étagé dans la plupart des cas mais peuvent être aussi bi-étagé. Avec un compresseur mono-étagé, on obtient une pression maximale de 13 b. Avec un compresseur à vis lubrifiée bi-étagé, on obtient une pression maximale de 20 b.



Les compresseurs bi-étagés peuvent également être conçus pour des pressions inférieures. Dans ce cas, le gain de performance peut être compris entre 10 et 15 % par rapport à des systèmes mono-étagés.

Ce gain est obtenu par la réduction des taux de compression respectifs des étages. Ceci permet de se rapprocher d'une compression isothermique qui serait idéale. Ces compresseurs peuvent ou non dis-posés d'un réfrigérant intermédiaire entre les deux étages étant donné le refroidissement déjà effectué par la lubrification.

Ils sont peu répandus, mais un souci accru de maî-trise de l'énergie pourrait relancer leur commercia-lisation. Toutefois des problèmes de coût de fabri-cation et de tenue mécanique ont

conduit par le pas-sé les constructeurs à ralentir leur développement.

1.4.1.5 Compresseurs à vis non lubrifiées

L'absence de lubrification interdit tout contact entre les vis. Le mouvement de rotation est transmis à la vis mâle qui, pour éviter tout risque, le transmet à son tour à la vis femelle par l'intermédiaire d'engrenages de synchronisation. L'étanchéité entre vis et carter est obtenue par l'ajustement de l'usinage. Cette étanchéité imparfaite qui entraîne une augmentation des fuites internes est partiellement compensée par une augmentation des vitesses de rotation.

Ces compresseurs sont mono-étagés par des pressions allant jusque 3,5 b effectifs et sont bi-étagés pour des pressions allant jusque 10,5 b effectifs. Cette seconde disposition nécessite un refroidissement intermédiaire entre les 2 étages.

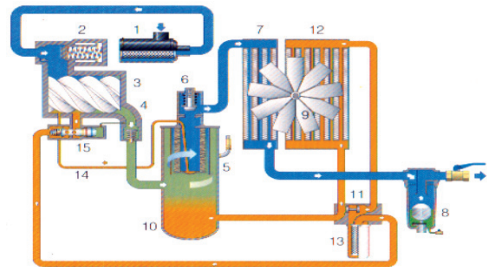
Leur énergie spécifique est intéressante entre environ 100 et 1500 kW de puissance installée, d'autant plus qu'il n'y a pas de séparateur d'huile et qu'il n'a pas nécessité d'avoir de filtration d'huile et de traitement des condensats, équipements coûteux en énergie et en entretien. Pour rappel, aux alentours de 7 b de pression d'utilisation, une élévation de 1 b représente 6 à 7% d'énergie supplémentaire appliquée au moteur du compresseur.

1.4.1.6 Compresseurs à injection d'eau

Leur introduction sur le marché est plutôt récente à ce jour. Leur technologie se base sur l'utilisation de vis parfois en céramique, l'eau venant tenir le rôle habituel de l'huile mais à des température bien plus basses. Ceci au point qu'un réfrigérant final n'est plus indispensable, et avec les mêmes avantages que la compression sans lubrification concernant l'absence de traitement des condensats huileux. Ces compresseurs mono-étagés offrent dans la gamme de petites puissances jusqu'à 55 kW en standard des performances proches des compresseurs à vis lubrifié (110 à 130 Wh/Nm³).

Développés pour les applications dans la production pharmaceutique, l'industrie alimentaire et l'électro-nique sensible, ils suppriment les risques de contamination par l'huile et les surcoûts potentiels associés.

Ils ont très bonne capacité de refroidissement de l'eau et évacuent de façon très efficace la chaleur à la source, ce qui permet une amélioration sensible du rendement de compression.

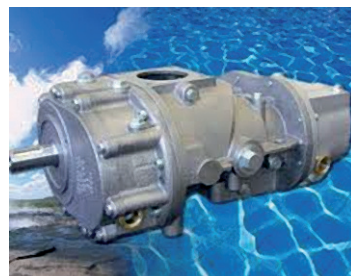


Circuit d'air

1. Filtre d'admission d'air
2. Vanne d'admission d'air
3. Élément compresseur
4. Clapet anti-retour
5. Séparateur air/huile
6. Vanne de pression minimum
7. Réfrigérant final
8. Séparateur d'eau
9. Ventilateur

Circuit d'huile

10. Réservoir d'huile
11. Vanne thermostatique de bypass
12. Réfrigérant d'huile
13. Filtre à huile
14. Tuyauterie de récupération d'huile



1.4.1.7 Compresseurs à lobes

Le principe de base et les applications sont les mêmes que pour les vis non lubrifiées. La seule différence réside dans la technologie de compression, les blocs sont constitués de 2 rotors plats ayant la forme de crocs.



Leur commercialisation résulte de la nécessité d'utiliser une technologie ayant des caractéristiques voisines des vis exemptes de lubrification.



En effet, en deçà de 75 kW environ, la réalisation de compresseurs à vis non lubrifiées nécessite d'augmenter considérablement la vitesse de rotation des vis pour conserver une énergie spécifique encore intéressante (130 Wh/Nm^3 à 7 b).



Ce type de compresseur à lobes possède une pulsation de débit par cycle de compression, comme les



compresseurs alternatifs (Pistons). Les puissances actuelles vont de 18 à 90 kW. Ils sont mono-étagés jusqu'à 2,5 b et bi-étagés jusqu'à 8 b.

1.4.1.8 Les Compresseurs à spirales

Ces compresseurs sont exempts de lubrification de l'air comprimé. Le principe de compression résulte du mouvement rotatif orbital de 2 spirales, l'une est fixe (stator) et l'autre mobile (rotor).

Le mouvement s'effectue de façon continue et sans pulsations. Il n'existe pas de contact métallique entre les éléments. La spirale mobile réduit progressivement l'air aspiré à la périphérie et le refoule par un orifice central.

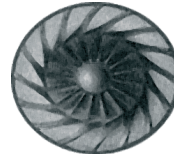
Cette technologie d'application relativement récente dans l'air comprimé est limitée à des puissances de quelques kW (jusqu'à 22 kW en montage multi-effet).

Les caractéristiques annoncées à pleine charge de $22 \text{ Nm}^3/\text{h}$ à 7 b pour 3,7 kW installés soit 165 Wh/m^3 dans le meilleur des cas contre 110 Wh/Nm^3 pour les technologies à vis, ne laissent pas



envisager de bonnes performances à l'avenir pour des applications à des puissances supérieures.

1.4.1.9 Les compresseurs centrifuges radiaux

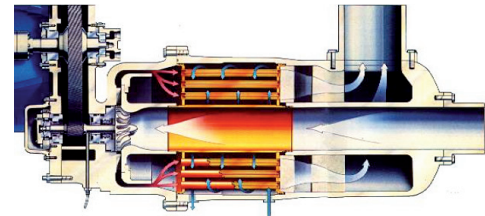


Ils sont exempts de lubrification de l'air comprimé et sont plutôt réservés aux consommations importantes.

Ils sont radicalement différents des compresseurs volumétriques par leur conception. Les compresseurs centrifuges sont plutôt des générateurs de pression alors que les compresseurs volumétriques sont plutôt des générateurs de débit.

On peut dire qu'un compresseur centrifuge est une machine à pression constante et débit variable suivant les conditions de fonctionnement.

Inversement un compresseur volumétrique est une machine à débit constant et à pression variable et ceci dans les deux cas pour des entraînements par



moteur à vitesse de rotation constante.

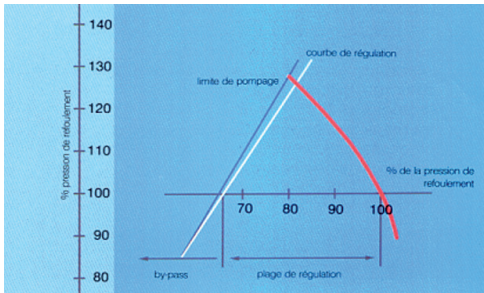
C'est la vitesse de l'air très élevée qui crée la compression et l'accélération de l'air se fait par une roue appelée « impulsor ».

L'énergie cinétique se transforme alors en énergie potentielle de pression lorsque l'air est ralenti par son entrée dans le diffuseur.

Sur les compresseurs centrifuges, il existe une relation très étroite entre la variation de la vitesse de l'air et donc de la rotation de la turbine et la variation de la pression et du débit.

Le compresseur fonctionne entre 2 limites appelées « zone de pompage » et « point de choke ».

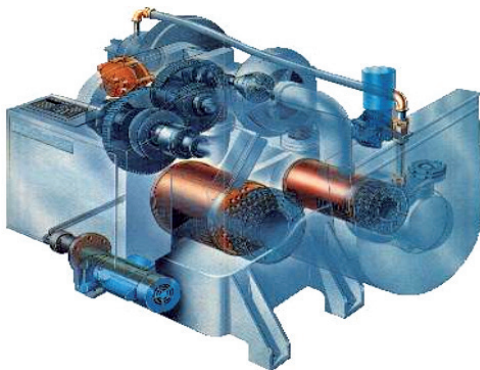
Le pompage peut être défini comme une zone de débit minimal provoquant des oscillations de débit et de pression, pouvant entraîner des inversions du sens d'écoulement du fluide.



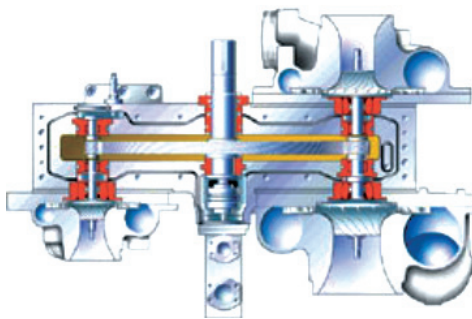
Ce mode de fonctionnement peut causer des détériorations importantes notamment des ailettes de l'impulser et des paliers.

Il est évité en mettant à l'atmosphère l'air déjà comprimé et donc l'énergie produite en excédent.

Le point de choke peut être défini comme la zone de débit maximum et de pression minimum au-delà de laquelle le fonctionnement devient instable, mais qui ne cause pas de détérioration importante du compresseur.



compresseur centrifuge à 7b bi-étagé



compresseur centrifuge à 7b tri-étagé

L'énergie consommée est alors dissipée essentiellement sous forme de pertes.

Pour obtenir une pression de 7 b avec un rendement satisfaisant, il faut utiliser 2 à 3 étages avec un compresseur radial.

Les élévations de températures alors occasionnées nécessitent des réfrigérants intermédiaires entre les étages.

La gamme des compresseurs centrifuges radiaux fournissant un air comprimé à 7 b débute aujourd'hui à partir d'un débit nominal proche de 600 Nm³/h.

compresseur centrifuge à 7b bi-étagé

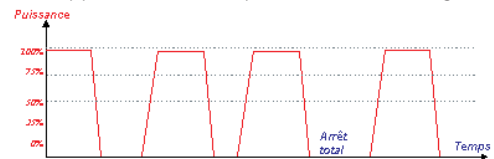
compresseur centrifuge à 7b tri-étagé

1.4.2 Régulations des compresseurs

1.4.2.1 Marche-Arrêt

Initialement ce mode de régulation était réservé aux petits compresseurs de moins de 10 kW (pistons, spirales) dont les pointes d'intensité au démarrage sont supportables par le réseau.

Ce type de régulation trouve une nouvelle application avec les compresseurs équipés de V.E.V. (variation électronique de vitesse) par le fait de pouvoir démarrer progressivement le moteur électrique sans appel d'intensité importante au démarrage.



Inconvénients

Ce mode de régulation pose plusieurs problèmes : La pointe d'intensité de démarrage est supérieure de 5 à 6 fois à l'intensité nominale (In).

Si le compresseur ne dispose pas de démarrage étoile-triangle, l'échauffement considérable des enroulements moteurs qui s'en suit, limite par conséquent considérablement le nombre des démarrages possibles dans l'heure.

Hormis le démarrage statorique qui n'est plus utilisé sur les compresseurs d'air, le démarrage étoile-triangle pallie partiellement à ces inconvénients.

La pointe d'intensité est alors limitée à environ 2 fois l'intensité nominale pour des puissances installées supérieures à 7,5 kW (10 ch.) généralement; en deçà l'alimentation se fait en 220 V monophasé.

Toutefois le nombre de démarrage sera limité à une dizaine dans l'heure mais les « à coups » mécaniques sur les organes de régulation et d'entraînement des compresseurs (courroies et accouplements) pénalisent la fiabilité et la longévité de ces machines.

Avantages

La conception des organes de régulation est excessivement simple. Il n'y a pas de temps de marche à vide consommant 25 à 30 % de la puissance nominale.

Pour les compresseurs équipés de V.E.V, le démarrage progressif fait disparaître la pointe d'intensité et permet d'installer un accouplement direct, étant donné l'absence d'à-coups mécaniques.

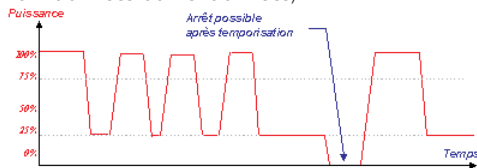
1.4.2.2 « Tout-Ou-Rien »

Sans doute, le mode de régulation le plus utilisé et le plus économe en énergie, si l'écart de pression nécessaire (0,5 à 1 b de Δp) est admis par le réseau d'air et si la charge en débit est supérieure à 75 %.

Dès que la pression atteint une indexation basse, la compression s'effectue, puis dès que la pression atteint l'indexation haute, le compresseur passe en marche à vide en attente d'un nouveau besoin.

Une temporisation peut être réglée de façon à ce que le moteur électrique s'arrête après 6 à 10 mn de marche à vide selon la taille des moteurs, si le compresseur n'a pas été sollicité.

La limite est fixée par le nombre de redémarrage possible dans l'heure par type de moteur électrique. L'énergie consommée à vide s'élève entre 15 % et 35 % suivant la technologie employée (pistons, vis non lubrifiées ou vis lubrifiées)



Inconvénient

Les temps de marche à vide consomment 25 à 30 % de puissance pour les compresseurs à vis lubrifiées, 15 à 20 % pour les compresseurs à pistons et les compresseurs à vis exemptes de lubrification.

Si une temporisation d'arrêt n'est pas programmée, cette consommation sera permanente jusqu'au

prochain besoin d'air comprimé. A l'extrême si aucun besoin n'est sollicité, lors d'un week-end par exemple, le compresseur continuera de consommer de l'énergie en tournant à vide constamment.

Autre inconvénient, plus limité, la pression, réglée entre 0,5 et 1 b de Δp généralement, n'est pas régulière et fluctue entre indexation basse et haute. Toutefois, l'effet est annulé si des détendeurs-régulateurs sont installés aux points d'utilisation, il faut alors se référer à la pression moyenne pour évaluer l'énergie consommée. Des à-coups mécaniques peuvent endommager les organes de liaisons si ceux-ci n'ont pas été prévus à cet effet, (courroies et entraînements directs par engrenage).

Avantages

Il n'y a aucun étranglement de l'aspiration, et par conséquent pas de montée excessive du taux de compression et de l'énergie correspondante pour un débit donné. La performance énergétique est optimum à pleine charge ou consomme à vide 25 à 30 % de la puissance.

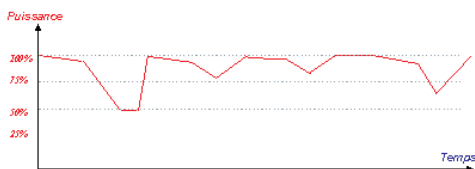
1.4.2.3 Progressive par étranglement de l'aspiration

Ce mode de régulation est nécessaire si l'écart de pression fourni doit être très faible. Le principe en est de laminer l'aspiration d'air afin de limiter le débit refoulé à une pression relativement constante.

Ceci est possible de 0 à 100 % du débit sur les compresseurs à vis lubrifiées, mais à 0 % de débit, la consommation énergétique reste supérieure de 50 % de la pleine puissance.

Des régulations mixtes progressives / tout ou rien sont le plus souvent installées de façon à réguler entre 70 et 100 % du débit, puis de passer en marche à vide en deçà.

Ce mode de fonctionnement permet de garder une pression linéaire dans la plage considérée. Cette régulation consomme encore 85 à 90 % de la puissance à 70 % de débit, et représente donc une sur-consommation par rapport à une simple régulation tout-ou-rien.



Pour les autres technologies de compresseurs (vis exemptes de lubrification et centrifuge) et selon les constructeurs, la possibilité d'une telle régulation existe entre 60, 70, 85 et 100 % et appelle les mêmes remarques concernant les consommations.

Inconvénients

L'étranglement génère une montée du taux de compression et de l'énergie correspondante pour un débit donné, dans la plage de régulation qui est généralement comprise entre 70 et 100 % pour les régulations mixtes.

Par exemple à 70 % de débit, la consommation énergétique est encore de 85 à 95 %. Certains fabricants proposent encore des régulations par étranglement, fonctionnant jusqu'à près de 0 % du débit.

Dans ce cas, la consommation énergétique reste supérieure à 50 %. Ce fonctionnement est encore appelé régulation en marche forcée ou marche continue.

Avantages

La pression est plus régulière, les à-coups mécaniques sur les organes de transmissions sont moindres, et des éléments moins robustes peuvent équiper ces compresseurs.

1.4.2.4 Progressive par valve spirale



Ce mode de régulation est installé sur des compresseurs mono et bi-étagés. Le principe est que cette valve d'aspiration coulisse en rotation dans un cylindre.

La pression constante est assurée par la rotation de la valve, pendant la variation du débit. Le débit non consommé est renvoyé à l'aspiration par des lumières de by-pass dessinées dans le carter du bloc-vis; celles-ci sont ouvertes ou fermées en fonction de la position en rotation et en translation de la valve.

Ce système permet de faire varier le volume d'air comprimé dans le bloc-vis. En plus de cette valve spirale, une vanne papillon est installée en son amont et lamine l'arrivée d'air. La combinaison de ces deux organes permet une plage de régulation comprise entre 40 et 100 % du débit. En deçà, la machine est mise à vide et la consommation de puissance est réduite à environ 25 %.

Inconvénients

La régulation reste basée sur l'étranglement de l'aspiration par une vanne papillon.

Avantages

L'inconvénient précédent est compensé par l'utilisation de la valve spirale qui permet de réguler entre 40 et 100 % du débit. A technologie égale pour des compresseurs mono ou bi-étagé, les performances énergétiques sont proches de la régulation « tout ou rien » en apportant une meilleure régularité de la pression.

L'économie d'énergie par rapport à une régulation progressive par simple étranglement d'aspiration est comprise entre 10 et 15 %.

Par contre, par rapport à un compresseur bi-étagé équipé d'une régulation « tout ou rien », il ne semble pas apporter d'avantages énergétiques significatifs, à l'exception du fait que pour une consommation énergétique assez proche, la pression est plus linéaire.

Maintenant quand ce mode de régulation est appliqué à des compresseurs bi-étagés, cela permet de cumuler les 2 avantages, et d'annoncer une économie globale de 25 à 30 % par rapport à des compresseurs mono-étagés équipés de régulation progressive par étranglement de l'aspiration.

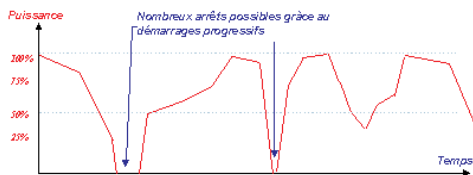
1.4.2.5 Progressive par variation de vitesse de rotation

C'est la solution la plus souvent retenue pour les compresseurs mobiles de chantier. En effet, cette régulation est à la base de la très grande majorité de ces compresseurs.

Leur entraînement est fait le plus souvent par moteur thermique. Le mode de régulation est de type hydropneumatique.

L'autre solution pour la variation de vitesse, est la variation de vitesse électronique (V.E.V.) du moteur électrique des compresseurs fixes.

Elle est de plus en plus installée sur les compresseurs à vis lubrifiées. Néanmoins elle s'applique aussi aux compresseurs à vis exemptes de lubrification. Nous n'évoquerons ici que la variation électronique de vitesse équipant en standard des compresseurs.



Avantages

La performance énergétique reste proche de l'optimum quel que soit le débit sollicité par le réseau et les organes de régulation sont simplifiés.

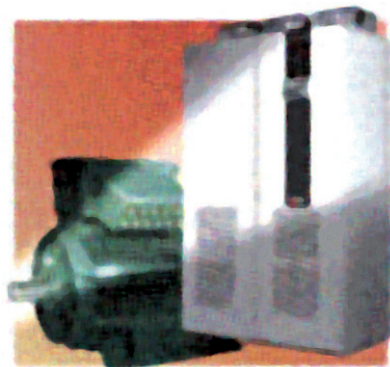
L'accouplement est direct, la régulation est de type Marche-Arrêt, il n'est plus nécessaire de prévoir une marche à vide, le séparateur air/huile n'est plus dépressurisé, le démarrage direct en charge est permis sans surintensité. La pression est constante et régulière, la mécanique du compresseur est moins sollicitée.

Inconvénients

A pleine charge, la performance énergétique est moins bonne que sur un compresseur avec régulation « tout ou rien » à cause des déperditions de l'onduleur (+ 10 % environ). Par contre, si le taux de marche du compresseur est inférieur à 75 % environ, le système devient très intéressant.

L'investissement est conséquent par rapport à un compresseur traditionnel (+ 50 %) Car il y a nécessité d'équiper le compresseur d'un moteur spécifique, avec roulements spéciaux et rotor mieux équilibré, auquel il faut adapter un refroidissement in-dépendant approprié.

Il faut prévenir également les échauffements à basse fréquence par des sondes dans le bobinage. Il faut aussi une armoire de commande plus complexe avec protection contre les perturbations électromagnétiques et les harmoniques.



1.4.2.6 Régulation par mise à l'atmosphère

Sans doute la plus gourmande en énergie puisqu'elle consiste à relâcher à l'atmosphère, l'excédent d'air déjà comprimé et par conséquent l'énergie correspondante.

Cette technique est généralement appliquée aux compresseurs centrifuges. Toutefois ici aussi la régulation modulée par étranglement de l'aspiration est utilisée. Son principe réside en un contrôle de pression indexée.

Le contrôleur de pression transmet les ordres à la vanne papillon d'aspiration et à la vanne de mise à l'atmosphère afin de maintenir l'indexation de pression de 0 % à 100 % du débit.

Ce mode de régulation maintient la pression de refoulement de manière quasi-constante. La plage de régulation par étranglement est possible entre 75 / 80 % et 100 % du débit jusqu'à la limite de pompage. En deçà, le débit excédentaire est relâché à l'atmosphère.

Sur certain compresseur, une régulation mixte pro-gressive / « tout ou rien » est possible sous certaines conditions. Le compresseur fonctionne comme dans la régulation modulée, tant que la demande en air reste dans la plage d'étranglement de la vanne d'aspiration.

Lorsque la demande d'air diminue encore, le compresseur est mis en marche à vide en fermant la vanne d'aspiration et en ouvrant la vanne de mise à l'atmosphère. La consommation énergétique est alors de 20 à 40 %.

Toutefois, cette opération n'est ici possible qu'une dizaine de fois par heure et ne peut pas être véritablement assimilée à la régulation tout-ou-rien d'un compresseur volumétrique, qui peut effectuer cette opération 1 à 2 fois par minute sans problème.

Avantages

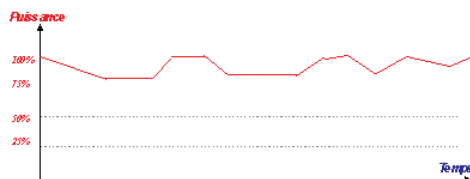
Elle permet une très grande régularité de pression, et une variation de charge mécanique minimum du compresseur.

Inconvénients

La phase de mise à l'atmosphère est extrêmement énergivore et consiste à comprimer en pure perte l'excédent d'air comprimé non consommé afin de fournir au compresseur, les conditions optimales de fonctionnement mécanique.

Ceci se comprend puisque ce mode de régulation équipe les compresseurs centrifuges aux vitesses

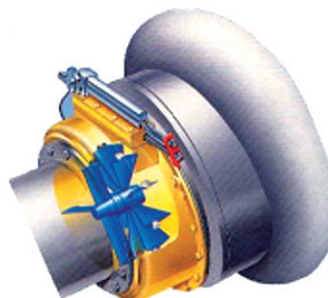
de rotation extrêmement rapide et par conséquent très sensibles aux vibrations.



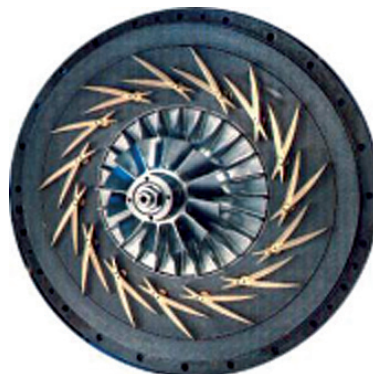
1.4.2.7 Autres modes de régulation pour les compresseurs centrifuges.

Pour les compresseurs les plus importants, et compte tenu des coûts de réalisation, d'autres modes complémentaires de régulation sont possibles mais sur des plages bien plus limitées.

Ce sont les aubages réglables à l'aspiration, les aubages réglables au diffuseur, et également la variation de vitesse, mais dans une moindre mesure car la réduction de la vitesse va agir à la fois sur la réduction de débit mais également sur la pression d'air qui doit rester constante.



Dans le cas des aubages réglables au diffuseur, des dispositifs sophistiqués permettent une plage de régulation entre 40 et 100 % du débit des compresseurs mono-étagés pour des applications à basse pression inférieures à 3 b.



Enfin il est possible également d'utiliser la variation de vitesse sur les compresseurs centrifuges, on le fera généralement sur les compresseurs mono-étagés et à basse pression (moins de 2 b).

1.4.2.8 Comparatif des différentes Plages de régulation

En résumé voici classées de la plus petite à la plus grande quelques possibilités de plage de régulation

- 75 / 80 % à 100 % pour la régulation modulée sur un compresseur centrifuge
- 70 à 100 % pour la régulation progressive par étranglement d'aspiration sur compresseurs à vis lubrifiées

- 60 à 100 % pour la régulation par étranglement d'aspiration sur compresseurs exempts de lubrification.

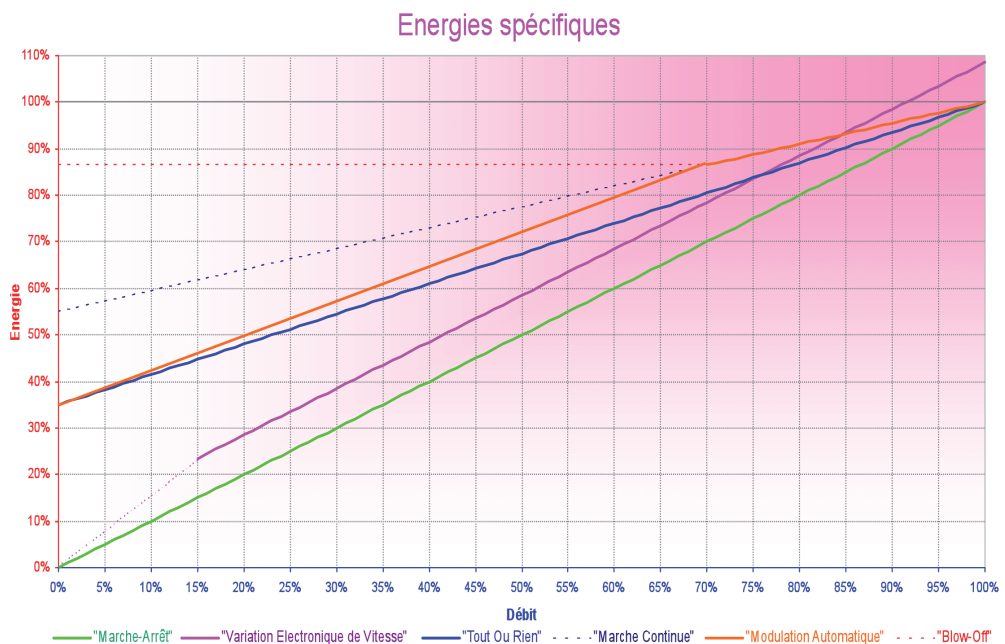
- 50 à 100 % pour la régulation progressive par valve spirale

- 40 à 100 % pour la régulation par variation de vitesse sur compresseurs à vis exempts de lubrification,

- 20 à 100 % pour la régulation par variation de vitesse sur compresseur à vis lubrifiées.

- 0 ou 100 % du débit et régulation de ΔP de pression sur les compresseurs « tout ou rien » et Marche-Arrêt.

Graphique des modes de régulation des compresseurs d'air rotatifs et de leurs énergies spécifiques



1.5 le séchage de l'air comprimé

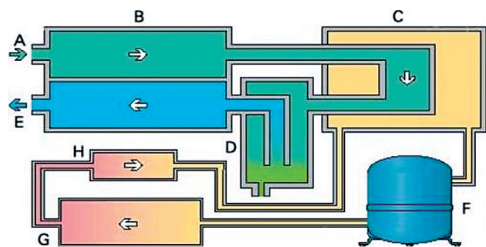
1.5.1 Sécheurs par réfrigération

Les sécheurs de ce type doivent fournir un air comprimé avec un point de rosée de 2 à 3°C soit 5,5 à 6 g d'eau par m³ d'air comprimé.

Anciennement, ils utilisaient comme fluide frigorigène du Fréon R12 (CFC) ou bien encore du R22 (HCFC).

L'utilisation de ces fluides pose problème par rapport à la réglementation concernant les CFC et HCFC. Pour palier partiellement au problème les plus récents utilisent par exemple du R 134a.

Les consommations électriques de ces sécheurs sont faibles, 3 à 3,5 kW pour 1000 m³/h. Soit 2,5% à 3% environ de la puissance absorbée du compresseur d'air correspondant.



1.5.2 Sécheurs par absorption

Les moins utilisés car bien que ne consommant pas directement d'énergie, ils sont de grands consommateurs de matières absorbantes.

Ces matières absorbantes (sels généralement) sont à changer régulièrement en fonction de la charge d'humidité à évacuer, généralement la totalité du contenu de la cuve doit l'être tous les 6 mois.

Ils ne maintiennent qu'un écart de point de rosée (20°C) entre leur entrée et leur sortie d'air.

D'autre part, ils sont sensibles à la température ambiante et la température d'air comprimé, il est donc recommandé de les installer à l'extérieur des bâtiments.



1.5.3 Sécheurs par adsorption

Requis pour des points de rosée inférieurs (à partir de -20°C ou 0,88g/m³), ils sont plus gourmands en énergies électriques ou pneumatiques que les modes de séchage précédents.

Quatre modes de régénération existent :

- par air comprimé perdu et sans chaleur
- par chaleur externe (ventilation + résistances électriques)
- par chaleur interne (résistances électriques)
- par air comprimé recyclé

sécheur par adsorption



sécheur par adsorption

1.5.4 Sécheurs par perméation

Sécheurs à membrane qui reposent sur le principe de la perméation. L'air comprimé traverse des fibres creuses et poreuses qui ne laissent échapper que les molécules d'eau. Ce traitement décentralisé permet d'assurer une protection des équipements sensibles quelque soit la qualité d'air délivré par la centrale de production.

Ces unités compactes sont prévues pour le traitement de débits jusqu'à 150 m³/h pour des points de rosée variables entre 10°C et -40°C. Son fonctionnement nécessite une consommation d'air comprimé d'environ 10%



1.5.5 par air comprimé perdu, sans chaleur

Ils consomment 15 à 20 % du débit nominal. Ils s'avèrent être la solution la plus onéreuse d'un point de vue énergétique.

Traiter 1000 m³/h à un point de rosée de -20°C peut nécessiter de consommer environ 16% du débit nominal du sécheur, soit 160m³/h ou 16 kW au mieux si le sécheur est utilisé à pleine capacité, ce qui est rarement le cas et la consommation par rapport au débit à traiter sera supérieure.

Il faut au mieux environ 100 kW pour produire 1000 m³/h à 7 b, mais compte tenu des énergies spécifiques dues aux régulations des compresseurs, pour produire 1000 m³/h la consommation est plutôt de 150 kW en moyenne, soit un équivalent de 24 kW consommés par le sécheur à pleine capacité.

1.5.5.1 par chaleur externe (ventilation + résistances électriques)

Cette solution est meilleure et la consommation est ici essentiellement électrique, il faut 11 kWh environ pour 1000 m³/h jusqu'à -40°C de point de rosée [0,117 g/m³]. Les contraintes de maintenance ne sont pas ici supérieures à celles du type précédent, puisque la régénération se fait également par ventilation d'air chaud, mais extérieur.

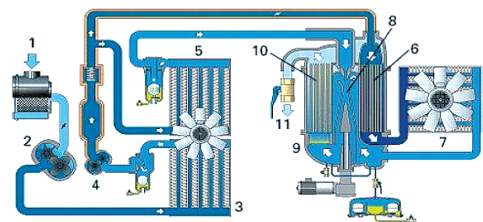
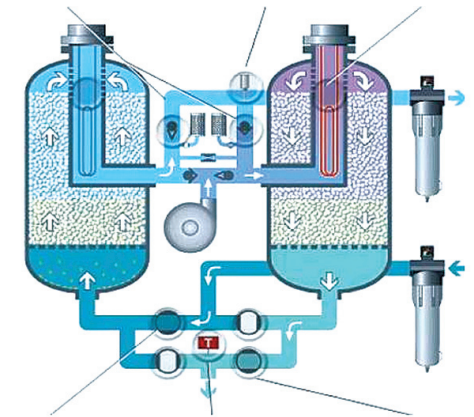
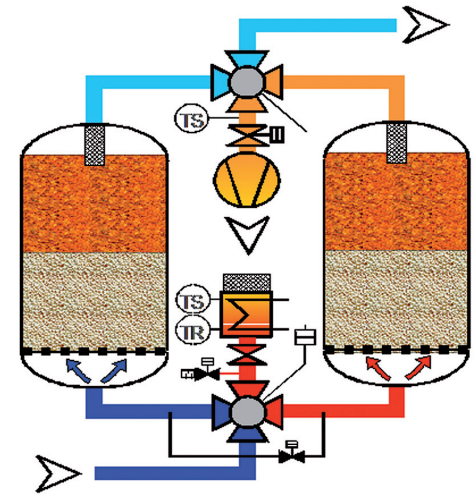
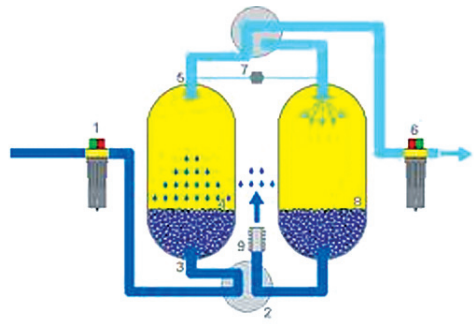
1.5.5.2 par chaleur interne (résistances électriques)

La consommation électrique est comparable au type précédent, mais permet d'obtenir un point de rosée de -30°C [0,33 g/m³] sous pression. Les contraintes d'utilisation par contre sont plus sévères et les variations des paramètres de débit, de pression et de température, entraînent une surchauffe intempestive des particules adsorbantes dommageable pour le matériel.

1.5.5.3 par air comprimé recyclé

La consommation énergétique est limitée par exemple au moteur de rotation d'un tambour qui contient le tamis moléculaire, soit 0,7 kW maximum quel que soit le débit, et à la perte de charge qui est proche de 0,3 b (2% d'énergie à 7 b).

La régénération du sécheur est faite par une partie de l'air chaud provenant du compresseur, qui est ensuite refroidi et réinjecté en amont du sécheur pour être traité à son tour. C'est le type le plus économique, mais il nécessite un air exempt d'huile et son utilisation est limitée à quelques fabricants de compresseurs.



1.6 Filtration d'air comprimé

L'aspiration d'air des compresseurs contient toute la pollution atmosphérique ambiante aux machines. On y trouve des poussières, des hydrocarbures, des pollens, des bactéries, des germes. On y trouve aussi des gaz toxiques, des produits chimiques et bien sûr l'humidité ambiante.



1.6.1 Humidité

L'humidité relative de l'air est de 70 % en moyenne, ce qui représente à une température de 20°C, un poids d'eau de 12,5 g/m³ d'air aspiré. Dans le cycle de compression, la température s'élève et l'air est ensuite refroidi pour permettre son utilisation. La température en sortie du compresseur est souvent proche de 35°C et une teneur en eau de 39,28 g/m³. Seuls les sècheurs sont réellement efficaces pour la réduction du poids d'eau par un abaissement du point de rosée, les filtres ne séchent pas l'air. L'eau étant un élément vital pour les microorganismes, plus l'air sera sec, moins le développement des microorganismes sera possible.



1.6.2 Poussières

Les proportions des polluants varieront en fonction des conditions locales et du degré de filtration placée à l'aspiration du compresseur qui se résume généralement à une filtration des poussières. Les compresseurs aspirent couramment 190 millions de particules par m³ d'air. Ces particules ont une taille se situant entre 10 ppm et 0,01 ppm et sont de



taille nettement inférieure aux filtres d'aspiration des compresseurs (50 à 3 ppm). Ces particules peuvent transporter les microorganismes et elles sont surtout une nuisance pour les procédés.

1.6.3 Hydrocarbures

Présents dans notre atmosphère avec une teneur minimum de 0,01 mg/m³, ils se présentent sous forme moléculaire et ne peuvent être retenus que par une adsorption sur charbons actifs. Ces hydrocarbures dégagent des goûts et des odeurs qui seront captés et retenus par ceux-ci qui permettront notamment de traiter les influences sur la saveur des produits de l'agroalimentaire.



1.6.4 Gaz nocifs

Présents dans l'atmosphère à cause des rejets industriels et du trafic routier, ils sont très agressifs en milieu humide et provoquent une corrosion rapide des pièces métalliques.



Il faut abaisser le taux d'humidité relative, car sans présence de vapeur d'eau, ces gaz perdent de leur pouvoir de corrosion. Le taux d'humidité relative doit se situer sous 50 %, plus l'air sera sec, meilleure sera l'état du réseau d'air.

1.6.5 Filtration après compression

La qualité d'air comprimé délivré à une grande importance car, nous venons de le voir, elle peut être la source d'une contamination (virus et bactéries) et de pollutions par hydrocarbures (vapeurs, aérosols et liquides), gaz divers et parfois toxique (CO, CO₂, H₂S, NO_x), poussières avec une forte agressivité (pH compris entre 3 et 4).



L'air industriel de la plupart des entreprises étant lubrifié lors de la compression, des quantités résiduelles d'huiles s'échappent des compresseurs. Malgré les dispositifs courants de filtration, il est très fréquent de recueillir de l'huile dégradée et mélangée aux poussières et à l'humidité, formant ainsi une sorte de «mayonnaise» abrasive aux sorties des réseaux de distribution.

A cet air pollué qui sera comprimé, viendront donc s'ajouter avant utilisation d'autres polluants (huile dans le cas de compresseurs lubrifiés, particules métalliques, particules de rouille, calamine, etc.) en provenance des compresseurs ou des réseaux et de l'humidité résiduelle après le séchage généralement installé en centrale.

Si l'air comprimé n'est pas suffisamment traité, ce-la conduira à des dysfonctionnements causés par une usure prématurée des joints et des organes des vérins et distributeurs, des outillages pneumatiques, et des appareillages pneumatiques en général.

Ceux-ci pourront être également provoqués par l'encrassement des filtres finaux, des organes de commandes, des distributeurs pneumatiques, des silencieux d'échappement. Ceci entraîne la dégradation des organes pneumatiques, augmentent les coûts d'entretien et les fuites des appareillages.

De plus, la plupart des outils et appareillages pneumatiques nécessitent une lubrification en leur amont. La disposition de ces postes de lubrification par brouillard d'huile n'est d'ailleurs pas toujours correcte. Des outillages et automatismes sans lubrification existent pourtant sur le marché.

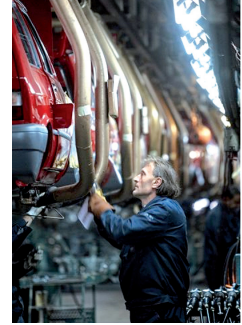


1.6.6 Ambiance de travail

Ceci fait que des particules d'huile en suspension sont présentes autour des postes de travail utilisant l'énergie pneumatique. Il faudra donc y attacher une attention particulière notamment dans les zones sensibles (salles blanches en électronique, locaux sanitaires, locaux médicaux et locaux

de l'agroalimentaires, masques respiratoires). Mais cela a aussi un impact dans les ambiances générales des locaux de production (mécanique, chimie, etc.) afin d'assurer une protection suffisante de la santé des travailleurs.

C'est une source de pollution très importante, autant pour les outils de production, avec les dommages qu'elle provoque sur les composants pneumatiques, que pour les effets néfastes sur la productivité



avec des arrêts de production. Sur le plan de l'hygiène, les bactéries se trouvent dans un milieu humide (saturation en eau 100%) et chaud, elles se trouvent donc dans un milieu extrêmement favorable pour leur développement. Nous retrouvons ces filtres aux points d'application comme filtres à particules et filtres de sécurité en décentralisé.

1.6.7 Aérosols d'huile

D'une taille comprise entre 0,3 ppm et 0,01 ppm, ils sont facilement captés par les filtres coalesceurs. Ces filtres se situent généralement au niveau de la centrale, car l'huile est impropre à toutes les autres applications industrielles, l'huile perd son pouvoir de lubrification pendant la compression et se charge aussi ensuite de particules dans les tuyauteries.

Les filtres industriels ont une efficacité permettant la



retenue des particules jusqu'à 0,01 ppm et ont des seuils de filtration de 0,01 pm. Ils se situent en centrale, mais également en décentralisé, proches des points d'utilisation pour capter les poussières des réseaux d'air comprimé.

1.6.8 Stérilisation

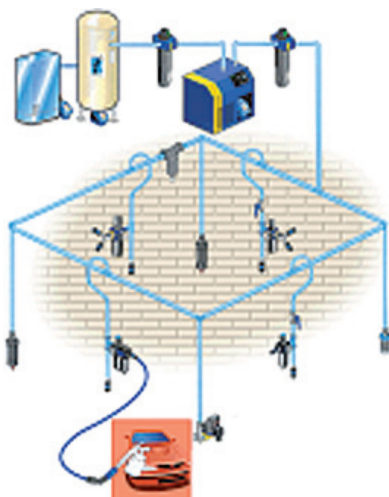
Dans certains cas d'utilisation, il peut y avoir aussi nécessité de stériliser l'air comprimé qui doit être exempt de microorganismes. Le filtre stérile doit alors être installé au plus près du point d'utilisation et servir de filtre de sécurité dont la fonction sera la retenue des microorganismes pouvant migrer du traitement primaire de l'air comprimé industriel.



Ces microorganismes sont retenus avec une efficacité proche de 99,99999 % à 0,01 µm et seront détruits par un cycle de stérilisation afin de stopper les risques de développement et de migration vers les procédés. Cette stérilisation peut se faire soit en autoclave mais avec des risques de contamination pendant les phases de manipulation soit se faire en ligne par de la vapeur.

1.6.9 Inconvénients

La multiplication de filtres installés en ligne augmente les pertes de charge enregistrées par la régulation des compresseurs : (0,3 à 0,4 bars en moyenne par filtre) Ils créent ainsi une surconsommation énergétique (+1 bar = +6 à 7 %).



Il convient donc de limiter le nombre de filtres et leur degré de filtration au strict nécessaire à moins que l'option de produire de l'air totalement exempt de lubrification soit retenue. Dans ce cas toutes les filtrations pour déshuilage sont évitées.

Dans le cas d'utilisation intensive ou/et d'air de qualité une production d'air exempt de lubrification est souvent envisageable plutôt que l'utilisation d'air lubrifié filtré.

Comme à la production d'air et aux utilisations, il existe des filtres qui peuvent être placés historiquement à différents endroits du réseau.

Hélas ces filtres sont devenus assez souvent inutiles soit parce qu'une nouvelle filtration a été installée dans la salle des compresseurs et que la qualité d'air de ce fait s'est améliorée soit parce que les cartouches ne sont plus changées et sont totalement colmatées ou bien parce qu'il n'y a plus de cartouche dans les corps de filtres.

Dans tous les cas, ces filtres génèrent des pertes de charges (0,3 à 0,4 bars en moyenne) et leur utilité devrait être réétudiée comme pour un certain nombre d'autres "verrous" sur le réseau.

1.6.10 Classes et degrés de filtration

Les niveaux de qualité d'air étant variés suivant les impératifs des utilisations, il existe une norme internationale **ISO 8573-1** pour les classer.

Ces différentes classes de qualité peuvent être ajustées selon les besoins et rien n'oblige à avoir la même classe dans toutes les catégories. Il est par exemple très courant d'avoir un besoin en qualité de type **ISO 8573-1 classe 2-4-2** (fréquent) pour la plupart des automatismes pneumatiques ou plus poussé de type **ISO 8573-1 de classe 1-3-1** (pour l'instrumentation fine) mais bien d'autres combinaisons sont possibles.

Classe	Particules solides par m ³			Humidité	Huile
	0.1 - 0.5 microns	0.5 - 1 microns	1 - 5 microns	Point de rosée °C	Résiduel d'huile en mg/m ³
1	100	1	0	-70	0,01
2	100 000	1000	10	-40	0,1
3	-	10 000	50	-20	1
4	-	-	1000	+3	5
5	-	-	2000	+7	25
6	-	-	-	+10	-

Il est à noter que la norme ISO 8573-1 Ed. 2 (2001) a été révisée en 2010 pour modifier la teneur en particules et donner naissance à la nouvelle norme, **ISO-8573-1 Ed. 3 (2010)** qui fait état d'une classe 0 pour les teneurs en huile, où aucune trace d'hydrocarbure n'est susceptible d'être détectée. D'une manière générale la **Classe 0** que ce soit pour les particules, l'humidité ou l'huile, n'indique pas de valeurs précises mais des caractéristiques susceptibles d'être meilleures que la classe 1, tel que spécifié par le client ou le constructeur.

L'ISO 8573-1: 2010 spécifie les classes de pureté de l'air comprimé concernant la présence de particules, d'eau et d'huile, quel que soit leur emplacement dans le système d'air comprimé pour lequel l'air est spécifié ou mesuré.

L'ISO 8573-1: 2010 fournit des informations générales sur les polluants présents dans les systèmes d'air comprimé ainsi que des liens vers d'autres parties de la série de l'ISO 8573 en matière de mesurage de la pureté de l'air comprimé ou de la spécification des exigences de pureté de l'air comprimé.

Au-delà des polluants de particules, d'eau et d'huile, mentionnés ci-dessus, **l'ISO 8573-1:2010** identifie également des polluants gazeux et microbiologiques.

1.7 Traitement des condensats

1.7.1 Réglementations environnementales

Par exemple en France, la production d'air comprimé entre dans la nomenclature des installations classées pour l'environnement, La législation rela-

tive aux rejets d'hydrocarbure oblige au traitement de ces effluents polluants.

Les condensats provenant de compresseurs lubrifiés, fortement chargés d'hydrocarbures, avec des teneurs pouvant atteindre 11 grammes par litre, sont des rejets nuisibles à notre environnement.

Elles sont pour les installations classées de 10 mg/l si le rejet dépasse 100 grammes de condensats par jour. Elles sont pour les installations non classées de 20 mg/l. Ces valeurs peuvent varier suivant les régions et être modifiées par les autorités locales.

Les condensats contiennent généralement 99 % d'eau pour seulement 1% d'huile mais des concentrats d'huile jusqu'à 10 g/l sont fréquents. Quelles qu'elles soient, les huiles des compresseurs, contenues dans les condensats sont difficilement biodégradables et entravent l'apport d'oxygène et la décomposition des boues dans les stations d'épuration. L'efficacité de tout le processus d'épuration s'en trouve perturbé.

Il faut un système de séparation huile-eau adapté pour les condensats dispersés. Ce système devra répondre à la réglementation en vigueur localement, l'eau traitée pourra ensuite être rejetée à l'égout mais les condensats contenant plus de 20 mg/l d'huile ne peuvent en aucun cas être rejetés.

Il convient donc de s'assurer dans chaque pays de la réglementation en vigueur et en l'absence éventuelle de réglementation, d'installer les équipements standardisés distribués sur place dans un souci de bon sens et de préservation de l'environnement de chacun.



unité standard de séparation des condensats

1.7.2 Équipements

1.7.2.1 Purges capacitives

Tous les éléments d'une station d'air comprimé, les compresseurs, les sécheurs frigorifiques, les filtres, les cuves nécessitent l'utilisation de purgeurs automatiques de condensats. Dans le cas d'un système de traitement spécifique des condensats, il faut prévoir l'utilisation de purges capacitives adaptées au bon fonctionnement de l'unité.

1.7.2.2 Séparation des condensats

Unités de base (pour 20 mg/l)

Les condensats arrivent sous pression dans la chambre de détente. Les impuretés solides transportées par le condensat s'accumulent dans un collecteur. Dans le réservoir séparateur, l'huile remonte à la surface par gravitation puis est évacuée vers un collecteur d'huile. Le condensat, prétraité, traverse un pré-filtre coalesceur, puis un filtre à adsorption par charbon actif. Le pré-filtre absorbe les gouttelettes d'huile résiduelles et le filtre retient les dernières particules d'huile.

Unités complexes (pour 5 à 10 mg/l)

Par membrane : Une chambre de décompression permet de séparer les condensats de l'air détendu qui passent ensuite dans une chambre de sédimentation. L'huile qui surnage dans cette phase est évacuée vers un réservoir de récupération. Deux filtres coalesceurs avec un effet de séparation complémentaire réduisent le concentrat d'huile dans les condensats avant

d'alimenter un procédé d'ultrafiltration après stockage intermédiaire dans une cuve tampon. Puis les molécules d'eau et d'huile sont filtrées : l'eau passe à travers la membrane, l'huile est retenue. L'eau épurée peut être évacuée vers l'égout.

Par floculation : Les émulsions de condensats sont amenées via une chambre de détente dans une capacité au sein de laquelle s'effectue une épuration préliminaire des effluents. L'évacuation de l'huile s'effectue à ce niveau. La séparation gravimétrique permet alors de séparer les fractions d'huile libres. Une pompe aspire l'effluent à épurer dans la cuve de traitement de l'unité de fractionnement, le traitement de l'effluent y est réalisé par l'ajout d'un flocculant. Puis s'effectue en une seule opération le fractionnement et la séparation de l'émulsion. Les particules d'huiles et d'impuretés sont enrobées par le flocculant et forment des flocons plus facilement filtrables qui sont acheminés dans des sacs et y sont filtrés. L'eau épurée peut être rejetée à l'égout.

1.8 Réseaux d'air comprimé

C'est l'ensemble des éléments d'une installation d'air comprimé compris entre les équipements de production d'air comprimé et les utilisations.

Ces éléments transportent, dirigent, répartissent, isolent, traitent, comptent, régulent, filtrent et lubrifient les flux d'air comprimé.

Ils se composent de tuyauteries, vannes, raccords, débitmètres, filtres, régulateurs, lubrificateurs, Purges.

1.8.1 Tuyauteries

Les qualités requises sont :

- une bonne étanchéité pour limiter les fuites,
- une faible rugosité pour limiter les pertes de charges, une bonne résistance à la pression,
- une bonne résistance aux contraintes mécaniques,
- une bonne résistance à la corrosion,
- une bonne flexibilité des liaisons avec les utilisations mobiles.

Les matériaux utilisés sont fréquemment en *acier noir ou peint* parce qu'ils sont traditionnels et bon marché, mais ils sont sensibles à la corrosion.

Pour palier à ce défaut ils peuvent être également en *acier galvanisé* qui est plus durable mais qui voit l'apparition de corrosion aux soudures.

On a donc de plus en plus souvent recours aux *aciers inoxydables*, solution plus chers mais beaucoup moins sensible à la corrosion, généralement utilisée pour les applications chimiques et alimentaires.

Parmi ces solutions existent les tuyauteries en *acier inoxydable serti*, plus récents d'application, ces aciers inoxydables fins et sertis aux jonctions, permettent des gains de temps de pose et une bonne étanchéité.

Concurrentiellement existent les canalisations en *aluminium peint* ou non, elles proposent des installations pesant un tiers du poids de l'acier et sont relativement plus esthétiques. Elles sont réservées plutôt aux réseaux secondaires et présentent une très bonne facilité de montage et de démontage.

Les canalisations peuvent être parfois en *cuivre* (plus rarement en Europe qu'en Amérique) pour des raisons d'habitude et de standardisation de montage dans le domaine des gaz et les fluides médicaux, mais c'est une solution qui est chère et plutôt réservée aux petites tuyauteries.

Enfin des réseaux en *résine synthétique*, proposent une économie de mise en œuvre, des revêtements lisses qui limite les pertes de charges et une qualité d'air conservée. Mais elles ont une plus faible résistance mécanique et une plus grande sensibilité à l'agression des huiles synthétiques.

Pour terminer, des tuyaux en *plastiques souples* et en *caoutchouc* viennent compléter le panel des matériaux utilisés pour les canalisations d'air comprimé, ils sont installés pour des utilisations mobiles, mais aussi parfois hélas pour réseaux fixes avec pertes de charge et fuites conséquentes.

1.8.2 Vannes et raccords

1.8.2.1 Vannes

Généralement ce sont des vannes "quart de tour" à boules ou des vannes papillon. Elles sont choisies en fonction de leur encombrement ou de leur prix ou bien encore en fonction du standard de l'entreprise, plus rarement en fonction de leurs adaptations à l'usage de l'air comprimé. Selon leur

type, on rencontrera des problèmes d'étanchéité ou de perte de charge.

1.8.2.2 Raccords

Ils assurent le raccordement des utilisations au réseau de distribution. Ils en existent de plusieurs types : raccords «pompiers» ou encore appelé «*tête de chat*», des *raccord rapides*, etc..

Ils sont sans doute la source principale de fuites d'une installation d'air comprimé, notamment en ce qui concerne les *colliers à visser* qui maintiennent les flexibles sur leurs cannelures et qui se desserrent rapidement au fur et à mesure des manipulations. Leur étanchéité est à donc à vérifier assez fréquemment.

1.8.3 Débitmètres

Les débitmètres installés pour la gestion des flux d'air comprimé occasionnent également selon leur technologie des pertes de charge plus ou moins importantes de 0,1 à 0,3 bars. Ils sont de type :

- Débitmètre à pistons rotatifs
- Débitmètre à diaphragme ou à orifice à plaque
- Débitmètre venturi ou à tuyères
- Débitmètre à tube de pitot moyenné
- Débitmètre à turbine en ligne ou à insertion
- Débitmètre à vortex en ligne ou à insertion
- Débitmètre massique thermique

1.8.4 Filtres, Régulateurs, Lubrificateurs

1.8.4.1 Filtres



Comme à la production d'air et aux utilisations, il existe des filtres qui peuvent être placés historiquement à différents endroits du réseau. Hélas ces filtres sont devenus souvent inutiles:

- soit parce qu'une nouvelle filtration a été installée dans la salle des compresseurs et que la qualité d'air de ce fait s'est améliorée

- soit parce que les cartouches ne sont plus changées et sont totalement colmatées ou bien

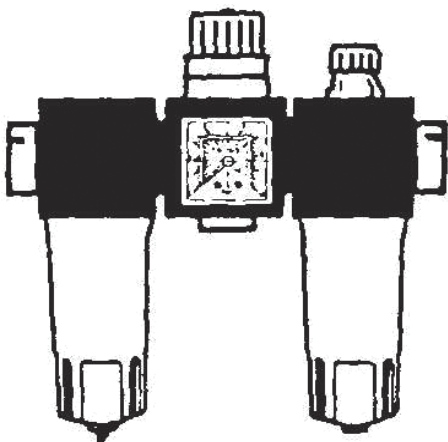
parce qu'il n'y a plus de cartouche dans les corps de filtres.

Dans tous les cas, ces filtres génèrent des pertes de charges (0,3 bars en moyenne) et leur utilité devrait être réétudiée comme pour un certain nombre d'autres "verrues" et accessoires sur le réseau.

1.8.4.2 Régulateurs

Leur rôle est de réduire et de régularisé la pression du réseau au niveau de celles requises par les utilisations.

Ceci malgré les variations existant en leur amont sur le réseau et en leur aval aux utilisations. Ils économisent l'énergie en limitant le niveau de pression utilisé.



1.8.4.3 Lubrificateurs

Ils ont pour vocation de lubrifier les outils pneumatiques et sont attelés généralement à un filtre et à un régulateur pour former un "FRL".

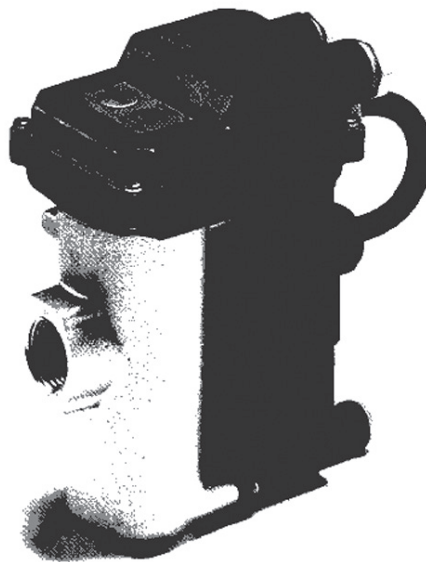
Leur remplissage n'est pas toujours correctement assuré et leur éloignement des utilisations ne garan-tît pas une bonne lubrification.

1.8.4.4 Purges

Comme sur les appareils de compression et de traitement d'air de la centrale, il existe assez souvent des purges à différents endroits du réseau de distribution.

Elles ont pour vocation d'évacuer l'eau condensée par le refroidissement de l'air dans les canalisations. Elles peuvent être :

- A commande manuelle
- Automatique à flotteur mécanique
- Cyclique par temporisation d'électrovanne
- Capacitive à auto-déclenchement par niveau



1.9 Pertes de charge

Pour l'ensemble d'un réseau, elles peuvent être définies comme la perte de pression comprise entre la sortie de la centrale de production d'air et le point d'utilisation le plus défavorable.

Les causes en sont les frottements de l'air dans les tuyauteries, leur rugosité a une influence d'un facteur 1 à 1,66 suivant l'état et de la nature de la tuyauterie, et les turbulences par changement de direction et celles provoquées par obstacles.

Elles sont proportionnelles au carré du débit passant. Les vitesses de passage d'air devraient être proches de 5 m/s pour un bon écoulement sans trop de pertes.

En réalité elles sont bien souvent proches de 10 m/s. Les pertes de charge s'accumulent au fur et à mesure des sections traversées et des obstacles.

1.9.1.1 Conséquences

La chute de pression à l'utilisation dégrade les performances des équipements pneumatiques. Celles d'un outil, par exemple, sont données pour une pression de 6 bars et chaque baisse de pression de 1 bar occasionne une perte de rendement de 25%.

Pour y remédier, on peut envisager d'augmenter la pression de production d'air, mais celle-ci se traduit par une augmentation de la puissance absorbée par les compresseurs (6 à 7% d'énergie par bar supplémentaire pour les pressions voisines de 7 bars).

L'augmentation de pression fait aussi augmenter proportionnellement les fuites (une fuite à 7 b est 16,7% plus importante qu'à 6 b).

Ainsi si l'on suppose un taux de fuite proche de 20%, l'impact sur la consommation énergétique d'une augmentation de 1 b de pression sera globalement proche de 10% pour l'ensemble d'une installation. $[6,5 \% + (20\% \times 16,7 \% = 3,34\%)] = 10\%$

1.9.1.2 Calcul de pertes de charge

Les pertes de charges en ligne s'additionnent c'est le cas le plus défavorable qui va conditionner le ni-veau de pression minimum. La perte de charge dans une canalisation peut se calculer de la manière sui-vante : $\Delta P = F \times L \times D \frac{1.85}{d^5 \times P}$

ΔP = perte de charge en bar ;

D = débit en m³/s ;

d = diamètre intérieur du tube en mm ;

P = Pression nominale en bar absolu ;

F = Facteur d'écoulement (6 x 10⁸ pour l'acier)

1.9.1.3 Pertes en ligne

Il faut remarquer que les tuyauteries choisies à la suite des calculs théoriques lors de leur installation

ont toutes les chances de rester de taille identiques quelle que soit l'évolution des consommations de l'entreprise. Ceci aura pour conséquences de provoquer des pertes de charges importantes (de 1 à 3 b dans certains cas).

Pour une nouvelle installation, il est donc intéressant de dimensionner celles-ci largement en choisissant des tuyauteries de une à deux tailles supérieures à ce qu'ont indiqué les calculs d'origine pour les canalisations principales.

Mais calculer de la manière précédente l'ensemble des pertes de charge d'un réseau s'avère laborieux et imprécis, on préfère donc généralement utiliser des abaques.

1.9.1.4 Pertes par obstacles

Les vannes, les raccords, les filtres, les détendeurs, les lubrificateurs sont des obstacles à la progression de l'air et génèrent de nombreuses pertes de charge surtout s'ils sont faiblement dimensionnés. A titre indicatif voici ci-dessous quelques valeurs en longueur équivalente de tuyauterie à ajouter dans les calculs de perte de charge :

Diamètre intérieur en mm	25	40	50	80	100	125	150
Obstacles	Longueur moyenne de tuyauterie équivalente en mètre						
Vanne à soupape	5	7	11	17	22	35	42
Vanne à membrane	1,2	2	3	4,5	6	8	10
Vanne à opercule	0,3	0,5	0,7	1	1,5	2	2,5
Coude à angle droit	1,5	2,5	3,5	5	7	10	15
Coude à faible rayon	0,3	0,5	0,6	1	1,5	2	2,5
Coude à large rayon	0,15	0,25	0,3	0,5	0,8	1	1,5
Té	2	3	4	7	10	15	20
Réduction concentrique	0,5	0,7	1	2	2,5	3,5	4

1.10 Fuites

Le premier facteur de la multiplication des fuites est sans doute le manque d'importance qu'y accordent les utilisateurs d'air comprimé. Elles ne sont pas gênantes et les volumes et les coûts ne sont pas connus. La perception des utilisateurs d'air comprimé est celle de la gratuité et de la facilité de mise en œuvre.

Une information ou mieux encore une formation des utilisateurs devrait pouvoir les sensibiliser, notamment les personnes qui sont en charge de l'énergie.

Un suivi constant de la dérive des consommations et particulièrement des fuites par rapport à l'évolution de la production est indispensable. Dans la plupart des cas, un objectif de réduction de la proportion des fuites de 10% à 15% de la consommation moyenne est raisonnable.

1.10.1 Gestion des fuites

Les moyens pour y parvenir sont :

- Une vérification permanente des débits hors période de production par une mesure débitmétrique.
- Une détection auditive des fuites pendant les arrêts de production s'effectuant facilement en l'absence de bruit de fond.
- Une détection à l'aide d'appareils ultrasoniques permettant d'intervenir pendant les périodes de production.
- L'application d'eau savonneuse aux endroits suspects étant un procédé couramment utilisé par les plombiers et gaziers.
- Le traitement des fuites de distribution par le remplacement ou le resserrage des composants défectueux.

1.10.2 Évaluation des fuites

La mesure des fuites peut être effectuée par l'enregistrement du "bruit de fond" pendant les périodes d'arrêt de production de l'usine. Il faut pour cela disposer de débitmètres.

Une évaluation des fuites, en l'absence de débitmètre et si le volume physique V d'une installation est connu, on peut procéder à une évaluation du débit de fuites Qf de la manière suivante :

Pendant un arrêt de production, les compresseurs mis à l'arrêt, on chronomètre le temps T qu'il faut pour que la pression chute d'une valeur P1 à une valeur P2.

L'équation est : $Q_f = \frac{(P1-P2)V}{T}$

Une autre évaluation est possible, si le volume V est inconnu mais le débit Qc délivré par un compresseur est connu : Le réseau est à la pression maximum de régulation.

Fermer la vanne du compresseur, la pression du réseau diminue progressivement à cause des fuites.

Pour une chute de pression donnée (1 b par exemple) appelée ΔP1, on obtient un temps T1 de dé-pressurisation.

Ouvrir la vanne d'arrêt du compresseur, on obtient un débit Qr de remplissage du réseau, résultat de la différence entre le débit du compresseur Qc et le débit de fuite Qf (débits en l/s)

On obtient un temps de remplissage T2 pour la montée en pression ΔP2 = ΔP1.

L'équation est alors : $Q_f = Q_c \frac{T2}{(T1+T2)}$

1.10.3 Exemple du coût d'une fuite

Les fuites représentent une part importante du débit à fournir par les compresseurs et peuvent s'élever à une valeur de 20 à 30% et plus du débit total. Si nous prenons l'exemple suivant :

- Un orifice de 3 mm
- Une pression de 7 bars relatifs
- La perte de débit sera proche de 12,167 l/s ou 43,8 m³/h.
- Généralement en régulation, il faudra de l'ordre de 0,16 kW pour obtenir 1 m³/h à 7 b
- La puissance correspondante sera de 7 kW
- Avec un rythme moyen de 6000 heures / an avec un kWh à 0,12 DT H.T.
- La dépense sera de 42000 kWh et de 5040 DT H.T. par an.
- Dans ce cas une fuite de 3 mm ≈ 5000 DT H.T. perdus / an

1.11 Vingt recommandations pour des configurations souhaitables de réseaux

- 1 Éviter les tuyauteries souterraines qui peuvent être l'objet de fuites difficiles à détecter.
- 2 Choisir des canalisations soudées ou serties plutôt que vissées pour des raisons d'étanchéité.
- 3 Assurer une pente de 1% à 2% des canalisations dans le sens présumé du flux pour évacuer les condensats vers les points bas qui seront équipés de purges.
- 4 Réaliser les piquages des canalisations sur la partie supérieure (piquages en "col de cygne").
- 5 Réaliser des rayons de courbure suffisamment larges pour réduire les pertes de charge et les turbulences.
- 6 Installer des vannes d'isolement des différents secteurs de l'usine.
- 7 Choisir des vannes "quart de tour" à passage intégral pour limiter les pertes de charge.
- 8 Boucler les réseaux de distribution d'air comprimé ce qui peut permettre de diviser par quatre la perte de charge.

9 Dédoubler une amenée d'air qui permettra de diviser par 4 la perte de charge préexistante, cette dernière évoluant proportionnellement au carré du débit passant. Si la perte de pression est de 1 b pour une pression de 7 b, le gain sera d'environ 0,75 b soit 5% d'économie.

10 Adapter les sections de tuyauteries aux débits passants, ne pas générer de perte de charge supérieure à 0,1 b par 100 m de tuyauteries

11 Limiter la vitesse d'écoulement de l'air comprimé à une vitesse proche de 5 m/s.

12 Choisir le niveau de pression en fonction des utilisations majoritaires

13 Conserver de larges sections de tuyauterie permettant de limiter l'augmentation des pertes de charge avec l'éloignement.

14 Isoler ou supprimer les tuyauteries devenues inutiles afin de ne pas maintenir sous pression des éléments susceptibles de fuir.

15 Privilégier les longueurs droites au détriment des T et coudes à faible rayon.

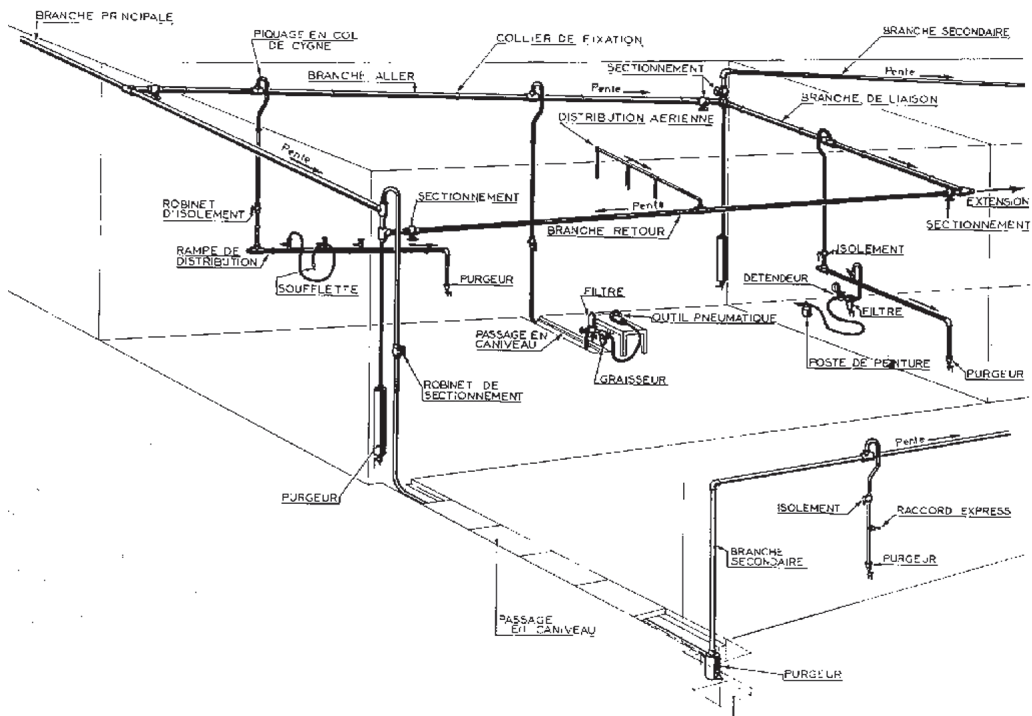
16 Éviter les restrictions de sections et la multiplication en ligne des éléments (vannes, filtres, etc..),

17 Placer les prises d'air comprimé tout comme les filtres régulateurs lubrificateurs (FRL) le plus près possible des utilisations

18 Éviter les longueurs de tuyaux flexibles générateurs de pertes de charges importantes.

19 Installer des électrovannes asservies à la mise sous tension des machines pour permettre de couper l'arrivée d'air comprimé lors des arrêts d'utilisation.

20 Installer des cuves tampons sur les lignes d'alimentation des consommateurs à fort débit instantané (presse, décolmatage, etc..) pour ne pas déstabiliser la pression des utilisations environnantes.



1.12 Principales utilisations d'air comprimé

Le choix d'appareils qui s'avéreront peu consommateurs en air comprimé est impératif, en considération du prix élevé de cette forme d'énergie:

1 Wh d'air comprimé appliqué équivaut approximativement à 10 kWh électriques

Près de 90 % de l'énergie sont dissipés, soit sous forme de calories lors de la compression, soit sous forme de fuites, ou encore de pertes de charge lors de la distribution.

D'autre part, il convient d'utiliser les pressions les plus basses possibles, et pour ce faire installer des postes de détente / régulation pour chaque utilisation. **1bar supplémentaire à fournir par les compresseurs représente 6 à 7 % d'énergie.**

Les utilisations d'air comprimé sont très variées nous retiendrons ici les plus représentatives :

1.12.1 Soufflettes et buses

Les soufflettes et les buses (sablage, pistolets de peinture, etc.) sont souvent la cause de fuites et de gaspillages importants, (voir tableau des consommations ci-dessous)

Pour les buses des sableuses, il faut préférer les bu-ses en carbure qui s'usent beaucoup moins vite. Une usure de 2 mm de l'orifice cause une sur-consommation d'air de 85%.

Des buses et soufflettes spécifiques existent sur le marché qui permettent d'améliorer le jet directionnel de ces appareils abaissant ainsi à la fois les consommations d'air comprimé et les niveaux sonores engendrés.

Il existe aussi des soufflettes qui utilisent l'effet Venturi en recyclant 80 % de l'air ambiant, ce qui représente une économie non négligeable, si les conditions de propreté ambiante le permettent (copeaux, huile, poussières grasses).

Dans la plupart des cas, une pression de 3 ou 4 b est suffisante pour obtenir le souffle requis, et des soufflettes à pression auto-limitée avec détendeur inté-gré satisfont à ce besoin.

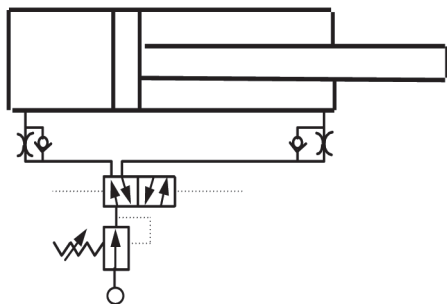
Les règles d'hygiène et de sécurité imposent de ne pas utiliser les soufflettes pour le nettoyage à des pressions supérieures à 4 bars. Recommandations CRAM de juin 1990)

Diamètre (mm)	Débit d'air libre au travers d'un orifice en litres/secondes				
Pression	2 b	3 b	4 b	5 b	6 b
0,1	0,0045	0,006	0,0075	0,0090	0,010
0,2	0,018	0,024	0,030	0,036	0,042
0,3	0,040	0,054	0,068	0,081	0,095
0,5	0,114	0,151	0,188	0,225	0,263
1	0,453	0,603	0,753	0,902	1,052
1,5	1,022	1,358	1,7	2,033	2,367
2	1,817	2,417	3,017	3,617	4,2
3	4,083	5,433	6,767	8,117	9,467
4	7,267	9,65	12,05	14,417	16,833
5	11,35	15,083	18,833	22,5	26,333
6	16,35	21,733	27,167	32,5	37,833
8	29,167	38,667	48,167	57,667	67,333
10	45,333	60,333	75,333	90,167	105,167
Pression abs	7 b	8 b	10 b	15 b	20 b
0,1	0,012	0,013	0,016	0,024	0,031
0,2	0,048	0,054	0,066	0,096	0,126
0,3	0,108	0,122	0,149	0,217	0,283
0,5	0,3	0,338	0,413	0,6	0,787
1	1,202	1,352	1,65	2,4	3,133
1,5	2,7	3,05	3,717	5,383	7,083
2	4,8	5,4	6,6	9,583	12,583
3	10,817	12,167	14,85	21,667	28,333
4	19,167	21,667	25,417	38,333	50,333
5	30	33,833	41,333	60	78,667
6	43,333	48,667	59,5	86,333	113,333
8	77	86,5	105,667	153,333	210,667
10	120,167	135,167	155	240	313,333

1.12.2 Automatismes

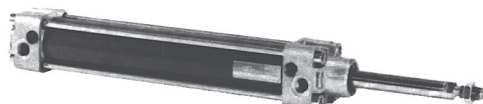
Ils sont composés le plus souvent de distributeurs et de vérins double-effet dont l'admission se fait alternativement de chaque côté du piston, pendant que de l'autre côté l'air est relâché.

Il est nécessaire de régler la pression au moyen d'un détendeur d'une part pour ajuster la force au besoin et éviter les fonctionnements brutaux, d'autre part pour limiter les consommations.



Il existe des «économiseurs d'énergie» constitués de petits détendeurs incorporés aux vérins avec un clapet d'étranglement soumis à la pression d'un ressort taré par une vis de réglage.

Lors de l'installation d'un automatisme, la redondance des marges de sécurité prises par les multiples intervenants, des concepteurs jusqu'aux utilisateurs conduit au surdimensionnement presque systématique des appareils.



Il n'est pas rare de voir fonctionner des vérins pos-sédant le double de la capacité nécessaire et consommant ainsi deux fois l'énergie requise.

Ce qui est important et ce qui actionne le piston c'est la différence entre les pressions amont et aval du piston, plus que l'élévation de la pression d'alimentation.

On doit donc pouvoir régler la pression au niveau le plus bas possible, dans la mesure où cet écart de pression est maintenu.

Il faut trouver un compromis entre besoin de forces motrices et amortissement pneumatique.

L'amortissement avec niveau élevé de pression ré-active de freinage conduit à surdimensionner

le vé-rin, une solution consiste à installer des amortisseurs pneumatiques extérieurs.

D'une manière générale, il est préférable d'utiliser des vérins prévus pour la basse pression.

Même si cela nécessite des tailles supérieures des distributeurs, vérins et tuyauteries de liaison afin d'en diminuer les pertes de charge.

Pour ce faire, il faut également installer les distributeurs le plus près possible des vérins en évitant ainsi les longues tuyauteries.

De plus celles-ci seront mises à la purge après chaque mouvement.

Il reste à évoquer les inévitables fuites d'air et les solutions qui permettent de les réduire. Il va de soi que favoriser l'étanchéité des différents composants est essentielle.

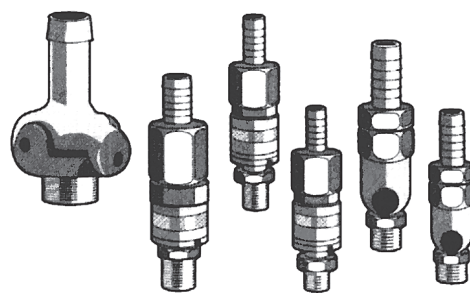
1.12.3 Raccords et colliers

A Ce sujet, il faut limiter le nombre de raccords, préférer les systèmes compacts et modulaires.

Il est préférable aussi d'installer des électrovannes d'arrêt pilotées par la machine,

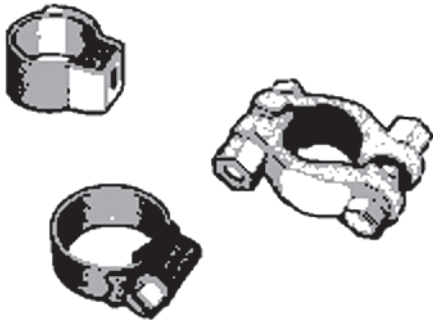
Il est nécessaire de vérifier souvent l'état des flexibles qui sont mobiles et exposés aux agressions mécaniques.

Naturellement, il faut vérifier fréquemment les étanchéités des raccords, puisque ce sont ici les principales causes de fuites.



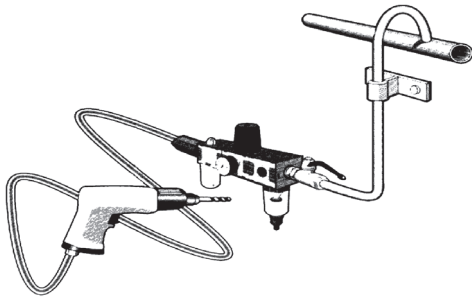
Il convient d'installer des raccords de qualité, coupleurs rapides, auto-obturants par exemple, d'une très bonne étanchéité.

Il faut également remplacer les colliers à vis qui se desserrent progressivement au fil des multiples manipulations de flexibles, par des colliers à oreille indesserrables, en outre moins cher à l'achat.



1.12.4 Outillages

Ils sont présents en nombre sur les lignes de fabrication des chaînes automatisées (automobiles, montage d'appareils électroménagers, meubles métalliques, etc.) mais aussi dans tous les ateliers de réparation et de maintenance des entreprises.



Pour ces appareils grands consommateurs de débit d'air instantané, il convient de respecter la pression nominale de chaque outil, à généralement 6 bars relatifs, afin de ne pas détériorer le rendement.

(5 b au lieu de 6 b c'est 25% de rendement en moins, 4 bars c'est 50% en moins)

A l'inverse un excès de pression n'apportera pas de couple supplémentaire à l'outil, il n'aura pour effet qu'une accélération de vitesse du moteur pneumatique et un gaspillage d'énergie.

L'installation de détendeurs-régulateurs en amont des outils permet d'éviter ces pertes.



Les machines portatives sont généralement entraînées par des moteurs pneumatiques à palettes.

Il est souhaitable, quand cela est possible de choisir un outil non réversible, car quand il dispose de cette fonction, 20 % d'air comprimé sont consommés en plus.

Il est préférable d'utiliser des outils de serrage à effet de choc pour leur bon rendement, des outils à arrêt de couple par coupure et des outils à 2 vitesses pour réduire les consommations.

La puissance est maximale quand la vitesse est égale à la moitié de la vitesse à vide.

Le couple est inversement proportionnel à la variation de la vitesse du moteur.

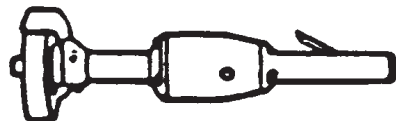


Il est nul à la vitesse maximale ou à la vitesse de marche à vide et il est maximal à vitesse nulle.

Il faut veiller à leur bonne lubrification, car dans le cas contraire cela fera augmenter le frottement entre les palettes et le cylindre d'une part et les palettes et le rotor du moteur pneumatique d'autre part.

Les conséquences en sont une perte de rendement et une usure prématurée qui dégrade l'étanchéité de l'appareil et fait augmenter les fuites internes.

Il est à noter également qu'il existe sur le marché des outils pneumatiques portatifs qui ne nécessitent pas de lubrification.



Concernant les meuleuses, les polisseuses et fraiseuses, la législation oblige les constructeurs à monter des régulateurs de vitesse sur les meuleuses de puissance supérieure à 700 W.

Mais il existe des outils de puissance inférieure équipés de régulateur de vitesse et aussi de dispositif de modulation du débit d'air en fonction de l'effort à exercer sur l'outil.

1.13 Applications pratiques

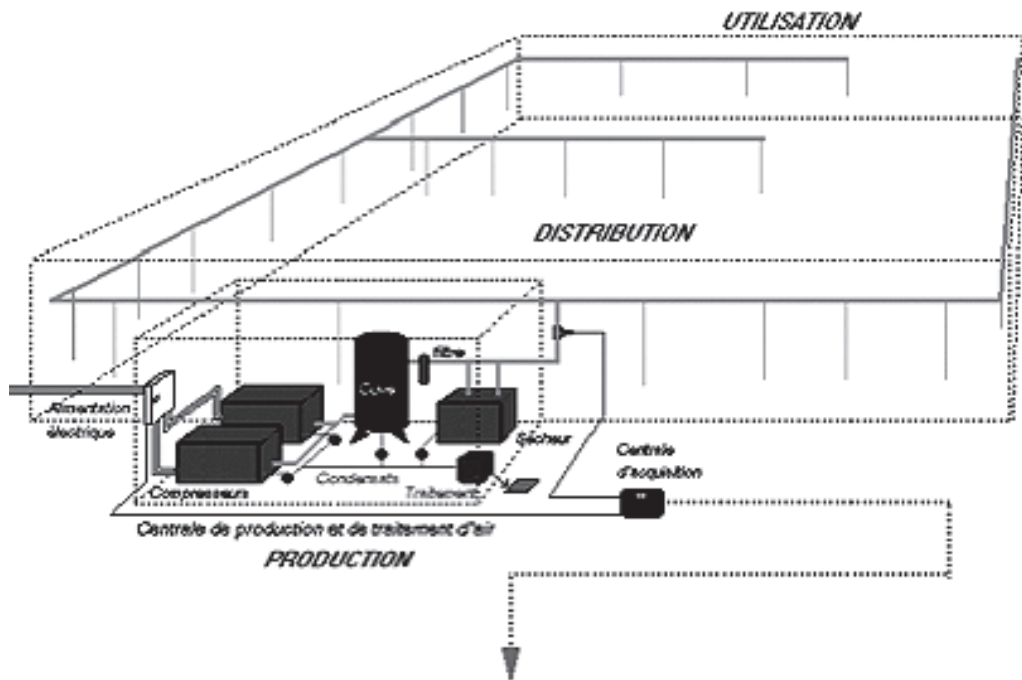
Maintenant que nous avons vu les principes de base de l'air comprimé nous allons voir, dans une étude de cas, ses applications pratiques dans une entreprise industrielle.

Pour ce faire nous adapterons la vision d'un nouvel embauché qui va découvrir pas à pas les installations dont il aura la responsabilité de sa gestion dans un futur proche.

En toute logique la première approche qu'il aura des installations commencera par la salle des machines pour la production d'air comprimé

Les premières questions qui se posent à cette étape seront de découvrir les types et les modes de fonctionnement des machines qu'il va rencontrer, c'est à dire :

- Des compresseurs et de leurs régulations
- Des sècheurs d'air comprimé
- Des filtres d'air comprimé
- Du traitement des condensats
- Du réseau interne de la centrale de production
- Du comptage existant ou non de l'énergie électrique absorbée et du fluide délivré
- Des rythmes de fonctionnement de l'installation et des profils de consommations
- De la maintenance à assurer et de la périodicité des entretiens à réaliser



Ensuite ayant cerné le fonctionnement de la production d'air, il poursuivra son analyse vers les réseaux de distribution découvrant les problèmes :

- De configuration
- De pertes de charges,
- D'encrassement
- De corrosion des tuyauteries
- Des fuites d'air comprimé.

Dernière étape de sa progression, après la distribution, il abordera enfin les utilisations d'air comprimé avec

- Leurs différentes catégories
- Leurs différents niveaux d'efficacité,
- Les problèmes de qualité rencontrés
- Les fuites et pertes de charges présentes ici
- Les substitutions possibles

2 ETUDE DE CAS

2.1 Préliminaire

La direction de l'entreprise industrielle STAX qui fabrique des pneus de véhicules souhaite améliorer l'efficacité énergétique de ses installations d'air comprimé. Pour ce faire elle demande à son futur responsable technique nouvellement arrivé M. Ayari d'effectuer l'analyse des installations. L'énergie qui alimente les compresseurs est, comme dans la grande majorité des sites industriels, l'électricité. Son prix moyen annuel est de 0,12 DT H.T. le kWh. Étant donné la permanence de la consommation d'air comprimé tout au long de la journée et de l'année il ne sera pas tenu compte des variations tarifaires horaires et saisonnières.

Cas peu fréquent dans l'industrie, l'usine dispose à la fois de comptage pour l'énergie absorbée et pour les débits d'air comprimé délivrés par la salle des compresseurs. M. Ayari pourra ainsi observer les courbes de consommations et les ratios de production du fluide pour jauger de son efficacité énergétique. Typiquement, il pourra observer les caractéristiques de fonctionnement de la centrale sur une à deux semaines qu'il pourra compléter par des mesures ponctuelles sur le réseau de distribution.

Questions:

- Quelles sont les technologies et caractéristiques des instruments de comptage mis en place ?
- Quelle sont leurs précisions, de quand datent leurs derniers étalonnages ?

2.2 Inventaire

M. Ayari commence par procéder à un inventaire des équipements techniques en débutant par la centrale.

2.2.1 compression

La centrale contient 4 compresseurs exempt de lubrification de l'air comprimé dont 1 en secours.

- Les compresseurs centrifuges n°1 et 2 de 430 kW et 4000 Nm³/h à 7 b, aspirent l'air en toiture.
- Le compresseur à vis non lubrifiées N°3 de 160 kW et 1490 Nm³/h à 7 b, aspire l'air dans la centrale

- Le compresseur à pistons non lubrifiés N°4 de 180 kW et 1510 Nm³/h est en secours.

Les compresseurs centrifuges sont refroidis par un circuit d'eau fermé. La circulation de l'eau est assurée par une pompe actionnée par un moteur de 20 kW. En cas de panne, cette pompe peut être secourue. La pression du circuit est maintenue à 3 b pour une température de 20°C. Le refroidissement est assuré par des tours réfrigérantes. Ces tours sont équipées de 2 pompes consommant chacune 11kW. Des ventilateurs assurent la bonne efficacité du refroidissement. Le compresseur à vis est refroidi par air.

Questions:

- Comment est positionnée la centrale de production par rapport à l'usine?
- Dans quelles conditions les compresseurs aspirent-ils l'air ambiant ?
- Quelle est la qualité de cet air aspiré puis refoulé?
- Quel est le mode de fonctionnement de ces compresseurs ?
- Quelles sont leurs interactions entre machines?
- Quel est l'efficacité du refroidissement de ces compresseurs ?
- Quelles est la performance en régulation de l'installation dans ces conditions ?
- Le système est-il fiable ? le secours est-il suffisant ? qu'en est-il des contraintes de maintenance ?

2.2.2 Traitement d'air comprimé

Les débits convergent ensuite vers deux sècheurs d'une capacité de 5000 m³/h chacun à 7 b, Ces sècheurs sont mis en parallèle et sont équipés de filtres en amont et en aval de capacités en débit identiques.

Les purgeurs installés sur les échangeurs et les séparateurs, sont à sonde capacitive. Ces purgeurs évacuent les condensats sans perte d'air comprimé. L'eau s'écoule ensuite dans un bac de séparation pour y être nettoyée.

Questions:

- Comment sont positionnés ces appareils dans la chaîne de production, de traitement et de distribution ?

- Quelle sont les technologies de ces sècheurs et filtres?
- Dans quelles conditions de températures fonctionnent ces sècheurs?
- Quelle est la qualité recherchée de l'air traité?
- Quel est le mode de fonctionnement de ces appareils ?
- Quelles en sont les interactions entre eux ?
- Comment sont refroidis les sècheurs ?
- Quelles sont leurs performances en régulation ?
- Le système est-il fiable, le secours est-il suffisant ?
- Quelles en sont les contraintes de maintenance à la fois des sècheurs et des filtres?
- Comment se fait l'évacuation des condensats ?

2.2.3 Distribution d'air comprimé

2.2.3.1 Réseau dans la centrale

A l'extérieur se trouvent un réservoir tampon de 10 m³ avant l'envoi de l'air comprimé vers le réseau de l'usine. Une lyre de distribution est installée après ce réservoir. Sur cette lyre, viennent se raccorder les départs pour des principaux réseaux de l'usine.

Questions :

- Quelles sont les caractéristiques, pressions de service et d'épreuve et dates d'épreuve de la cuve ?
- Quelles sont les tailles des orifices et des sections de tuyauteries raccordées ?
- La cuve dispose-t-elle d'un système de purges ?
- La soupape de sécurité est-elle conforme ?
- La cuve sert-elle de point de prise de pression pour la régulation des compresseurs ?

2.2.3.2 Réseau dans l'usine

Pour une superficie de 30 000 m² couverts, un des bâtiments de l'usine est alimenté via un rack extérieur par un DN150 directement relié à la lyre de distribution et équipé d'un débitmètre à diaphragme.

Pour le second bâtiment d'une superficie de 20 000 m² couverts, une canalisation principale toujours en DN150 le traverse et distribue l'air comprimé vers 4 lignes perpendiculaires en DN100. Des bouclages intermédiaires existent du côté des machines de type N°1 mais sont inexistantes entre les machines N°2 et le secteur N°3.

Dans ce secteur, une cuve de 3 m³ possédant des orifices et des longueurs de tuyauterie pour raccordement en DN65 est installée sur une ligne en DN 80, ce qui ne manque pas de créer une perte de charge notable.

Questions:

- Existe-t-il des plans des réseaux de distribution d'air comprimé ?
- Les sections de tuyauteries sont-elles suffisantes pour permettre un écoulement normal du fluide ?
- Quelles sont les pertes de charges générées dans les réseaux ?
- Il y a-t-il présence d'humidité, d'huile et de poussières dans ceux-ci ?
- Quelles est la nature des tuyauteries (acier noir, peint, inox, résine, etc.) ?
- Des vannes permettent-elles d'isoler des parties du réseau ?
- Quels sont le nombre et le type d'appareils de filtration et de traitement d'air qui jalonnent le réseau ?
- Ou se trouvent les fuites sur le réseau et quelle est leur quantité ?

2.2.4 Utilisations d'air comprimé

2.2.4.1 Automatismes pneumatiques

De nombreux automatismes faits de vérins et de commandes pneumatiques équipent toutes les machines de production. Les vérins utilisent des volumes d'air captifs finalement peu gourmands en énergie en comparaison des débits d'air libre, si leur étanchéité est correctement maintenue. Ils nécessitent une pression de 6 bar.

Les plus imposants sont 3 gros vérins qui représentent chacun un volume de 4,3 Nm³ d'air par cycle. Avec 20 cycles par heure, cela nous donne une moyenne de 86 Nm³/h, ce qui reste raisonnable. Néanmoins un vérin de cette envergure peut nécessiter jusqu'à 2 Nm³ en instantané.

Sur d'autres lignes des vérins assez importants sont également actionnés par air comprimé à raison de 12 volumes par minute pour articuler un ensemble de pièces ou pour couper les bandes qui passent sur un tapis. Ces mouvements amples sont très répétitifs.

Questions:

- Quelles sont les quantités d'air consommées par tous ces appareils pneumatiques ?
- Quelle est proportionnellement leur importance par rapport à la consommation totale ?
- Peut-t-on améliorer les fonctionnements et diminuer les consommations et les fuites ?

2.2.4.2 Débits d'air libre

Les débits d'air sont peu nombreux. Des buses sont par exemple utilisées pour le séchage des bandes qui défilent sous le jet après à la sortie d'un bain. Des buses multi-canaux sont utilisées pour cela. C'est buses débitent chacune 10 Nm³/h à une pression de 1 bar ou 40 Nm³/h à 6 bar. Des turbines indépendantes du réseau d'air comprimé et des ventilateurs pulsent de l'air ambiant sur les bandes, afin d'augmenter le séchage.

2.2.4.3 Filtres à manches

Le décolmatage de 6 filtres à manche est obtenu par un effet de choc, dû à l'échappement brutal de l'air comprimé.

Chacune d'elle possède 10 buses en ¾ de pouce qui sont actionnées 3 fois par minutes pendant une seconde sous une pression de 6 b. Le débit instantané d'une buse de ce type est de l'ordre de 480 l/s, on peut établir une consommation moyenne par buse qui est de 24 l/s (480 l/s x 3 / 60 s) Pour une machine elle est donc de (24 l/s x 10) = 240 l/s ou 864 m³/h et pour les 6 machines fonctionnant simultanément de : 5184 m³/h.

Ces buses doivent être contrôlées régulièrement afin d'éviter que l'une d'elles reste ouverte. Cela engendrerait une fuite de 480 litres par seconde (ou 1728 m³/h), ce qui représente 18% de la consommation totale de l'usine ou la moitié de ce que produit un des compresseurs centrifuges.

Questions:

- Quelles sont les quantités d'air consommées par tous ces appareils pneumatiques ?
- Quelle est proportionnellement leur importance par rapport à la consommation totale ?
- Peut-t-on améliorer les fonctionnements et diminuer les consommations et les fuites ?

2.2.4.4 Pompes de transfert :

Environ 15 pompes pneumatiques à piston sont utilisées à 6 bar en plusieurs endroits de l'usine

pour transférer des fluides chargés, visqueux, corrosifs ou inflammable. Ces pompes se trouvent principalement du côté du local anti-déflagration. Elles sont réglées à 6 bar avec un ajustement manuel du débit. Ces pompes fonctionnent en permanence pour alimenter les machines sur lesquelles elles sont branchées.

2.2.4.5 Gonflages :

Un grand nombre de machine utilise de l'air comprimé pour mettre en forme et assembler les différentes parties du pneu à des pressions qui vont de 0,5 à 2 bar. Cet air est détendu à partir du réseau d'air à 7 b.

2.2.4.6 Mâchoires de freins pneumatiques :

Des tambours sont mis en rotation sur un bon nombre de machines. Ceux-ci ne tournent que lorsque les freins sont mis sous pression. Pour cela ils sont connectés au réseau par l'intermédiaire de flexibles et colliers.

2.2.4.7 Moteurs et agitateurs :

Des moteurs pneumatiques sont utilisés sur les machines de type ASB, sur des chariots pour déplacer de fortes charges, ainsi que sur outils pneumatiques à mains. Sur d'autres machines dans le local extérieur, des agitateurs sont alimentés en air comprimé. L'avantage de ces appareils est qu'ils ont des propriétés antidéflagrantes.

Questions: idem que précédemment

- Quelles sont les quantités d'air consommées par tous ces appareils pneumatiques ?
- Quelle est proportionnellement leur importance par rapport à la consommation totale ?
- Peut-t-on améliorer les fonctionnements et diminuer les consommations et les fuites ?

2.3 Bilan énergétique

2.3.1 Profils de consommation

A l'issue d'une campagne de mesure effectuée sur les compresseurs qui a été réalisée sur une semaine complète de 168 h, il a été obtenu un certain nombre de profils de consommation et de valeurs qui ont fourni les informations suivantes :

- Le débit est en moyenne de 7527 Nm³/h avec un maximum de 8600 Nm³/h et un minimum de 6680 Nm³/h pendant les périodes de production de l'usine.

- La pression moyenne est de 6,8 b avec une valeur maximum instantanée de 7,38 bar et minimum de 6,25 b.
- La puissance consommée en moyenne par les compresseurs a été de 971 kW.
- Le ratio énergétique est donc de 129 Wh/ Nm³. (971 kW/ 7527 Nm³/h)

Questions:

- La régulation des installations de compression est-elle adaptée aux profils de consommation ?
- La capacité des installations est-elle suffisante pour couvrir l'ensemble des besoins ?
- Les installations travaillent-elles à un niveau suffisant ou bien alors excessif ?
- Le ratio énergétique est-il acceptable par rapport à ce qui est souhaitable ?

2.3.2 Déperditions

2.3.2.1 Fuites

Des enregistrements en continu effectué du 24 au 26 décembre ont fait apparaître un débit minimum en dehors de toute fabrication de l'usine d'environ 2537 Nm³/h.

Cela représente 33,7% des 7527 Nm³/h qui peut être assimilé à la quantité des fuites au moins dans la proportion de 80% de ce bruit de fond, les 20% restants pouvant être attribuée à des consommations utiles normalement en temps de production mais qui n'aurait pas été coupées pendant la période d'arrêt de fabrication.

A l'inverse des fuites existant sur des machines de fabrication qui ont été isolée pendant cette période de congé n'apparaissent pas dans ces enregistrements de «bruit de fond» mais elles sont au moins aussi importante que les 20% de consommations utiles aux procédés restées ouvertes.

Toutes ces fuites ont été recherchées et la majeure partie, une centaine, a été repérée localement par de petites étiquettes bien visibles. Le résultat de cette campagne de détection a été consigné dans un rapport détaillé faisant état de la liste des endroits sur lesquels intervenir.

Questions:

- Comme cela a été fait ici, on peut poser la question de l'importance des fuites, de leur localisation et du mode de gestion qu'il faudrait leur appliquer pour les maintenir à un niveau minimum

2.3.2.2 Pertes de charges

Un certain nombre de perte de pression en ligne encore appelée perte de charge a été constaté dans l'usine.

Tout d'abord au niveau de la centrale, les débitmètres installés, à diaphragme, en provoquent. Le diaphragme est un organe déprimogène assurant des mesures fiables lorsque ses caractéristiques et sa plage de mesure sont connues et respectées.

Ce type de matériel nécessite peu d'entretien mais il entraîne une perte de charge non négligeable. Or, ici cha-que départ vers les réseaux est équipé d'un diaphragme dimensionné pour créer une ΔP de 3500 mm CE (« 0,35 bar) au débit maximum.

Les mesures ont montré que ces diaphragmes entraînaient en permanence une perte de charge moyenne proche de 3000 mm CE (« 0,30 bar) sur l'air instrument, et de 4000 mm CE (« 0,40 bar) sur l'air « utilités » qui représente 78 % de la consommation totale de l'usine. Ces pertes de charge entraînent une surconsommation d'énergie d'environ 2 % sur l'ensemble de la centrale.

D'autre part les sècheurs par réfrigération en fonction crée une perte de charge de 0,25 bar suivant leurs caractéristiques nominales.

Enfin aux extrémités du réseau et aux points les plus défavorables, il a été constaté une perte de charge en moyenne de 0,4 b qui est tout à fait logique et acceptable pour une usine de cette taille 50 000 m² couverts.

Questions:

- Où se trouvent les pertes de charge de mon réseau ?
- Sont-elles excessives par rapport à ce qui est acceptable par mes installations ?
- Comment les éviter ou les réduire au minimum ?

2.4 Éléments financiers et de gestion

En complément de l'établissement du bilan énergétique, les informations suivante ont été fournies par le client :

- le budget de dépenses de conduite et de maintenance des installations pour un montant de 103 680 DT H.T. par an en moyenne pour les 3 dernières années

- Le budget financier des montants liés à l'investissement des machines et à leur amortissement comptable depuis 5 ans est quant à lui d'une valeur de **561 600 DT H.T.** (112 320 DT H.T./an)

2.4.1 Consommations énergétiques supplémentaires

2.5 sècheurs

Un premier sécheur est de type frigorifique à refroidissement par air. Sa capacité est de 5100 Nm³/h. La puissance électrique moyenne consommée par ce sécheur est de 12,7 kW. un second sécheur du même type possède une puissance électrique de 10 kW pour sécher les 4000 Nm³/h à 7 b.

Ces deux machines sont installées en parallèle, l'une par rapport à l'autre sur les piquages d'un ancien sécheur actuellement hors service. La puissance globale de séchage est de 22,7 kW

2.6 Refroidissement des compresseurs

Le refroidissement des compresseurs est assuré par un circuit d'eau sous une pression de 4 b et maintenu à une température de 20°C. La puissance nécessaire à la circulation de l'eau sous pression est de 25 kW.

La consommation des tours de refroidissement équipés de pompes et de ventilateurs, est quant à elle de 20 kW. Un total de 45 kW est donc à comptabiliser pour l'ensemble du circuit de refroidissement.

2.6.1 Énergie volumique de production

7527 Nm³/h à 6,8 b sont délivrés en moyenne par les compresseurs.

Pour les consommations d'énergie correspondante, en prenant en compte également les sècheurs et le refroidissement des compresseurs, cela représente une puissance de 971 kW + 22,7 kW + 45 kW = 1038,7 kW.

Ce qui donne une consommation spécifique produite de 1038,7 kW / 7527 Nm³/h = 138 Wh/Nm³

2.6.2 Énergie volumique à l'utilisation

Avec un débit de fuites de 2537 Nm³/h, le débit moyen estimé utile étant de : 7527 - 2537 (fuites)

= 4990 Nm³/h

Ce qui nous donne une énergie volumique à l'utilisation de 1038,7 kW / 4990 = 208,15 Wh/ Nm³

2.6.3 Coût de l'air comprimé

2.6.3.1 Air comprimé produit

Avec un prix moyen d'électricité de 0,12 DT HT le kWh, le coût total énergétique de l'air comprimé produit dans les conditions décrites est de 138 x 0,12 = 0,1656 centimes DT le Nm³ ou 16,56 DT H.T. le kNm³.

2.6.3.2 Air comprimé utilisé

Compte tenu des déperditions du réseau et des centrales, son coût énergétique à l'utilisation est de 208,15 x 0,12 = 0,2498 cts DT le Nm³ ou 24,98 DT H.T. le kNm³.

2.6.3.3 Estimation du coût énergétique d'air comprimé par pneu

Avec une production annuelle de 10 millions de pneus, et 7527 Nm³/h x 8664 h = 65 213 928 de Nm³ par an ce-la nous donne 6,5214 Nm³ / pneu, ≈ 0,9 kW / pneu ou encore 10,8 DT Centimes /pneu.

2.6.3.4 Évaluation de la consommation annuelle

Sur 361 jours et 8664 h à raison de 1038,7 kW, la dépense énergétique en production est proche de **9 millions de kWh x 0,12 DT = 1080 000 DT H.T.** Auxquels il faut encore ajouter les coûts de maintenance des installations (+ 12% et 129600 DT H.T.) et les frais financiers annuels (+ 13 % et 140400 DT H.T.) pour un obtenir un coût global de l'air comprimé de : **1350 000 DT H.T.**

Questions:

- Le budget global du poste de dépense pour l'air comprimé est-il équilibré ?
- Les coûts de conduite des installations sont-ils adaptés ?
- Comment peut-on réduire ou optimiser le prix de Nm³ d'air produit et surtout utilisé ?
- Les technologies des machines utilisées sont-elles compatibles avec cet objectif ?
- La maintenance et le secours des installations sont-ils adaptés ?
- La délégation de tout ou partie de la gestion des installations est-elle une solution envisageable ?

3 Sur quelles voies d'amélioration travailler en priorité ?

Tout d'abord la réduction des fuites et la rationalisation des utilisations avant toute optimisation des réseaux et de la production d'air comprimé.

3.1 Fuites

C'est le premier sujet qui vient souvent à l'esprit, le plus évident à évoquer mais certainement pas le plus facile à résoudre. Le retour d'expérience sur un grand nombre d'études nous permet de retenir un objectif réaliste de di-vision par moitié du taux de fuite constaté dans les situations les plus courants

Dans l'étude de cas retenu ici, un taux de fuite proche de 1/3 du débit moyen a été constaté, il nous paraît donc possible de se fixer un objectif de réduction du taux de fuite à 1/6 du débit moyen, aller au delà sera très difficile parce que des raisons structurelles lourdes de la configuration des installations l'empêcheront (constitution et configuration même des réseaux et raccords).

Mais ceci ne pouvant être qu'un objectif obtenu ou même dépassé que très ponctuellement, la difficulté va rési-der dans la conservation de ce taux de fuite à cette valeur de 1/6 du débit moyen. Ici doit se mettre en place un véritable plan de gestion de ces déperditions avec visites et recherches fréquentes, réparations et contrôles des étanchéités des installations de distribution.

Ce travail pourra être réalisé en interne si la main d'œuvre existante est adaptée et suffisante ou bien encore confié à une entreprise extérieure qui pourra éventuellement s'engager sur le maintien du taux de fuite à un ni-veau bas.

3.2 Utilisations

Ici les problèmes seront à résoudre au cas par cas suivant les procédés, ces derniers sont trop nombreux et diversifiés pour que nous puissions en dresser une liste exhaustive.

Néanmoins l'amélioration de ces utilisations devra ce faire, bien sûr sans oublier l'obligation première de bon fonctionnement du procédé, en ayant en tête le souci de maîtrise des consommations d'air comprimé et par conséquent de l'énergie.

Ces démarches devront se faire étudiant les possibilités de substitution par d'autres fluides, énergies ou moyens mécaniques plus efficaces et quand l'air comprimé n'est pas substituable en étudiant les conditions d'utilisation du débit, de la pression et de la température, (niveaux et quantités excessives le plus souvent) ainsi que de la qua-lité strictement nécessaire mais suffisante de l'air comprimé utilisé.

Dans les utilisations d'air comprimé les postes les plus consommateurs sont les débits d'air libre (fuites, soufflet-tes et buses) ce sont ceux-ci qui sont à aborder en priorité par des solutions de suppression, substitution ou d'optimisation.

3.3 Distribution

L'amélioration des réseaux de distribution représente rarement une économie d'énergie significative en elle-même par les pertes de charge évitées (environ 1% par 0,1 b gagné si l'on tient compte à la fois des gains sur les puissances de compression et des fuites diminuées par la baisse de pression) en comparaison des gains réalisés sur les fuites et utilisations ainsi que sur la production d'air comprimé.

Par contre elle permet souvent une fiabilisation et une amélioration de la qualité de la fourniture d'air comprimé aux utilisations et une réduction des déperditions que les fuites.

Un meilleur bouclage ou maillage des réseaux, l'augmentation des sections de tuyauterie ou leur dédoublement permettront ces gains sur les pertes de charge mais souvent au prix d'investissements lourds dans des longueurs de canalisations qui ne permettent pas toujours un retour rapide de ceux-ci sur les économies générées.

Par contre la suppression d'un certain nombre de perte de charge locale ponctuelle, restriction, filtres, vannes, etc. devenues inutile ou superflues permet d'obtenir ces gains en pression à moindre frais.

De même, toute mesure permettant d'éviter les fuites, notamment l'isolement par des vannes des branches non utilisées ponctuellement ou d'une manière plus permanente verra son investissement rapidement remboursé.

3.4 Production

Ici intervient l'autre partie importante des sources d'économie avec la réduction des fuites, c'est à dire l'efficacité de production d'air comprimé. On peut estimer que 80 % des économies potentielles sont présentes dans ces deux postes : la réduction des fuites et l'efficacité de production d'air comprimé.

3.4.1 Compression d'air

Différents types de compresseurs peuvent-être plus ou moins efficaces « en pleine charge sur banc d'essai » que ce soit en raison de leur technologie, de leur conception, de la qualité de leur fabrication sans parler des vertus qui leur sont généreusement attribuées sur les plaquettes commerciales des constructeurs, mais les écarts entre les uns et les autres ne dépassent généralement pas quelques points (souvent 4 à 5% tout au plus).

Il en va tout autrement dans les conditions réelles de fonctionnement sur site des que l'on introduit, l'usure du temps qui a pu fortement dégradé les qualités mécaniques de vieilles machines, les conditions d'exploitation et de maintenance qui leur sont appliquées et surtout les différents modes de régulations résidant

Un compresseur «aux mauvaises performances» en pleine charge, mais disposant d'un type de régulation adaptée à la fluctuation des besoins de l'usine pourra se montrer globalement plus efficace qu'un compresseur dernier cri mais disposant d'une régulation mal adaptée et énergivore.

Une étude fonctionnelle s'impose donc ici pour jauger de l'efficacité globale d'une station de compression plutôt que de s'en référer uniquement à des argumentaires technico-commerciaux qui sauront séduire par leurs aspects « de haute technologie» et les performances virtuelles en laboratoire des équipements proposés à l'achat.

Concernant la maintenance, plusieurs points sont à vérifier régulièrement :

- La température d'air aspiré (10°C d'élévation peuvent représenter environ 3,5% d'énergie ne plus)
- La qualité d'air aspiré,(humidité, poussières et même gaz aspiré peuvent dégrader l'efficacité)

- Le colmatage des filtres d'aspiration qui entraîne des surconsommations énergétiques (1% pour 0,05 b)
- Dans le compresseur le colmatage des filtres à huile, des séparateurs air/huile (± 10 % sur l'efficacité)

3.4.2 Traitement d'air comprimé

De même que pour les compresseurs, les équipements de traitement d'air comprimé, sécheurs, filtres, purges et séparation des condensats peuvent-être plus ou moins efficaces que ce soit en raison de leur technologie, de leur conception, de la qualité de leur fabrication « sans parler des vertus qui leur sont généreusement attribuées sur les plaquettes commerciales des constructeurs », une étude fonctionnelle permettra d'évaluer ou même de mesurer leur degré d'efficacité.

Les points à observer principalement sont les suivants :

- Pour les sécheurs frigorifiques ou à adsorption, la technologie est-elle adaptée au point de rosée nécessaire ?
- Leur capacité est-elle suffisante pour traiter les débits passants ?
- Quelle en est la consommation d'énergie en électricité directe ou en air comprimé notamment pour les ré-génération des sécheurs par adsorption ?
- Pour les sécheurs frigorifiques, les fluides frigorigènes sont-ils toujours compatible avec l'évolution de la réglementation ?
- Pour les filtres, leur degré de filtration est-il adapté au besoin ? Quel est leur degré de colmatage ? n'est-il pas temps de changer leur cartouches ?
- Pour les purges, fonctionnent-elles correctement, un test est peut-être nécessaire ?
- Pour la séparation des condensats, leur degré d'efficacité est-il toujours compatible avec l'évolution de la réglementation ?
- Fonctionnent-ils correctement, n'est-il pas temps de changer les filtres et consommables qu'ils comportent ?

4 Réduction des consommations d'énergie

4.1 Réduction des débits

Revenons à l'étude cas, le bilan énergétique ayant été établi et les voies d'amélioration cernées, il sera possible désormais d'évaluer les futures performances.

Pour rappel le débit moyen était de 7527 Nm³/h à 6,8 b dont 2537 Nm³/h de fuites avec un débit utile de 4990 Nm³/h, un débit minimum de 6680 Nm³/h et un débit maximum de 8600 Nm³/h.

Les fuites pouvant être réduites de moitié, le débit moyen passera à $4990 + (2537/2) = 6258$ nm³/h, ce qui re-présente une réduction de 1269 m³/h et 16,86 % du débit moyen.

Pour ne pas compliquer outre mesure la démonstration de cette étude de cas, nous tiendrons compte mais nous ne développerons pas ici les économies de 658 Nm³/h possibles sur les utilisations et qui sont spécifiques aux procédés de cette entreprise.

Au total avec la réduction des fuites de débit sera diminué de $1269 + 658 = 1927$ Nm³/h, nous travaillerons donc pour l'évaluation des futures performances avec les débits suivants :

- un débit utile de $4990 - 658 = 4332$ Nm³/h
- un débit minimum de $6680 - 1927 = 4753$ Nm³/h
- un débit moyen réduit de $7527 - 1927 = 5600$ Nm³/h (-25,6 %)
- un débit maximum de $8600 - 1927 = 6673$ Nm³/h

4.2 Réduction des pertes de charge

Nous avons vu que la perte de charge globale était d'environ 1 bar.

Des améliorations sur la configuration des réseaux permettraient de gagner 0,2 bar mais les investissements en tuyauteries seraient conséquents les faibles enjeux d'économie et ne présente pas une justification économique suffisante (retour d'investissement en 6 ans) pour être entrepris.

La perte de charge des sècheurs est inévitable à moins de changer et de dimensionner largement les appareils, ce qui a été aussi exclu.

Reste donc le remplacement des débitmètres à diaphragme par des débitmètres d'un autre type présentant une perte de charge minime bien

inférieure à 0,1 bar et suffisant au pilotage et aux comptages des installations, le gain en pression est proche de 0,3 bar et représente une économie permanente de l'ordre -2% d'énergie.

4.3 Ajustement des moyens de production

Les paramètres de consommation ayant été modifiés, désormais la consommation moyenne sera de 5600 Nm³/h à 6,5 b avec un débit maximum à priori proche de 6673 Nm³/h, il faut prévoir l'ajustement des moyens de production aux besoins nouveaux.

Dans l'étude de cas présente, il n'est pas nécessaire de modifier immédiatement la disposition et les tailles des machines (2 centrifuge de 4000 Nm³/h, une vis exempt de lubrification de 1500 Nm³/h, un piston en secours de 1510 Nm³/h pour une capacité totale de 11 000 Nm³/h secours compris) mais si l'objectif de réduction de débit est atteint, seuls les deux compresseurs centrifuges (2 x 4000 Nm³/h) seront sollicités.

Par contre dans ce cas de figure la régulation du second compresseur centrifuge sera fortement sollicitée :

Avec un débit moyen de 5600 Nm³/h – 4000 Nm³/h de capacité du premier compresseur centrifuge, Il reste 1600 Nm³/h à fournir en moyenne par le second compresseur centrifuge de même capacité de 4000 Nm³/h, ce qui donne un taux de charge du second compresseur de $1600/4000$ Nm³/h = 40 %.

Si nous en restions là, cette machine de longues périodes de « blow-off » régulation par mise à l'atmosphère qui sont tout sauf satisfaisante d'un point de vue énergétique puisque pendant ces périodes le compresseur ne délivrant aucun débit aux réseaux et utilisation il continue néanmoins à consommer 80 à 85 % de sa puissance à pleine charge. Il faut prévoir un ajustement de la régulation de ces machines pour éviter ce phénomène.

4.4 Ajustement de la régulation des compresseurs

Sans trop rentrer dans les détails de réalisation, cet ajustement dans le cas présent passe par l'installation d'un automate de régulation qui fera fonctionner les deux compresseurs simultanément

comme s'il s'agissait d'un seul et même compresseur à double effet et non plus en cascade de pression.

Dans ce cas le taux de charge devient $5600 / (2 \times 4000) = 70\%$ ce qui permet de travailler dans la zone de modulation par vanne papillon de ce type de compresseur et à l'extrême limite de ne plus rencontrer ou très rarement de période de «blow-off». Le ratio énergétique est alors proche de l'optimum avec 120 à 130 Wh/Nm³.

Mais cette solution dans d'autres situations peut ne pas suffire parce que le taux de charge global sera encore plus faible que 70 %. Dans ce cas si l'on veut obtenir un ratio énergétique décent, il faudra étudier la faisabilité de l'installation d'un compresseur volumétrique (généralement à vis et de préférence à variation de débit) de capacité suffisante pour couvrir les maximums de consommation.

Cette solution de compresseur volumétrique à variation de débit (généralement par variation de

vitesse du moteur électrique) est applicable dans la très grande majorité des cas si l'on veut obtenir ou conserver un ratio énergétique acceptable de l'ordre de 120 à 130 Wh/Nm³. Toutefois si le taux de charge de l'installation est supérieur à 75% environ elle ne présente pas plus d'avantage qu'un système traditionnel de régulation de type « tout-ou-rien » par exemple.

Dans l'étude de cas présente de l'entreprise STAX, le ratio énergétique des compresseurs est déjà de 129 Wh/Nm³ à 6,8 b, il sera difficile de beaucoup l'améliorer même en passant à 6,5 b avec un ratio réduit de 2% à 126,5 Wh/Nm³, au mieux ce ratio pourra être amélioré de 5 % et conserver à un ratio proche de **120 Wh/Nm³** par l'installation d'un automate de régulation propre aux compresseurs centrifuges ou par l'installation d'une variation de débit sur un nouveau compresseur à vis.

5 Améliorations possibles de la qualité de fourniture aux utilisations

5.1 huiles et poussières

Nous avons travaillé ici sur un cas de figure comprenant exclusivement des compresseurs délivrant un air comprimé non lubrifié. La démarche et la logique énergétique auraient sensiblement été la même avec des compresseurs lubrifiés. Toutefois d'autres contraintes liées à la pollution par hydrocarbure et aux poussières auraient interféré dans les choix d'amélioration. Ces critères en sont :

- La qualité d'air comprimé à délivrer aux utilisations
- L'adaptation des degrés de filtration aux besoins (ni trop, ni trop peu)
- Les pertes de charges parfois importantes et les coûts de maintenance en consommables des filtres
- La pollution par hydrocarbures des condensats
- La mise en conformité avec la législation du traitement et du rejet des condensats

5.2 Humidité

Le séchage ne pose pas de problème dans l'étude de cas présente, par contre il y aurait pu y avoir comme assez souvent une dérive du point de rosée dans des conditions de température, ambiante

ou d'air comprimé, excessive ou bien encore par dépassement du débit nominal du ou des sècheurs notamment ici avec la mise en parallèle des deux appareils, le fluide n'étant pas forcément discipliné et ne respectant pas la parité de passage et de traitement entre les deux sècheurs.

Une autre question aurait pu être de savoir si la technologie de séchage de l'air était adaptée aux besoins et s'il n'aurait pas mieux fallu installer un sécheur par adsorption fournissant un point de rosée négatif (-20°C, -40°C).

5.3 Régularité de pression

Une autre question qui est souvent posée concerne la régularité de pression de l'air comprimé fourni. De notre point de vue il s'agit assez souvent d'un faux problème ou alors réservé à des procédés bien particuliers. La régularité de pression doit intervenir au niveau des utilisations et le meilleur moyen de l'assurer et encore d'installer aux postes d'utilisation des régulateurs pour la régler localement au niveau souhaité. Nous ne voyons pas bien pour notre part où serait l'impératif d'une linéarité de pression au sein des réseaux de distribution.

6 Évaluation des futures performances

6.1.1 Énergie volumique de production

Dans l'étude de cas 5600 Nm³/h à 6,5 b sont désormais délivrés en moyenne par les compresseurs. Pour les consommation d'énergie correspondante, avec un ratio énergétique pour les compresseurs de 120 Wh/Nm³ qui donne 5600 x 0,12 = 672 kW et en prenant en compte également les sècheurs et le refroidissement que nous retenons ici inchangés cela donne une puissance de 672 kW +22,7 kW + 45 kW = 739,7 kW.

Ce qui permet une consommation spécifique produite de 739,7kW / 5600 Nm³/h = **132 Wh/Nm³**

6.1.2 Énergie volumique à l'utilisation

Avec un débit résiduel de fuites de 1268 Nm³/h, le débit moyen utile est : 5600 - 1268 (fuites) = 4332 Nm³/h

Ce qui nous donne une énergie volumique à l'utilisation de 739,7 kW / 4332 = **170,75 Wh/Nm³**

6.1.3 Coût de l'air comprimé

6.1.3.1 Air comprimé produit

Avec un prix moyen d'électricité de 0,12 DT HT le kWh, le coût total énergétique de l'air comprimé produit dans les conditions décrites est de 0,132 x

0,12 = 1,584 cts DT le Nm³ ou 15,84 DT H.T. le kNm³.

6.1.3.2 Air comprimé utilisé

Compte tenu des déperditions du réseau et des centrales, son coût énergétique à l'utilisation est de 170,75 x 0,12 = 2,049 centimes DT le Nm³ ou 20,49 DT H.T. le kNm³.

6.1.3.3 Estimation du coût énergétique d'air comprimé par pneu

Avec une production annuelle de 10 millions de pneus, et 5600 Nm³/h x 8664 h = 48 518 400 de Nm³ par an ce-la nous donne 4,852 Nm³ / pneu, ≈ 828 W / pneu ou encore 9,94 DT Centimes /pneu.

6.1.3.4 Évaluation de la consommation annuelle

Sur 361 jours et 8664 h à raison de 739,7 kW, la dépense énergétique en production est proche de **6 408 761 kWh x 0,12 DT = 769 051 DT H.T.**

Auxquels il faut encore ajouter les coûts de maintenance des installations à peu près proportionnellement réduit (13% et 99975 DT H.T.) et les frais financiers annuels des investissements passés (140400 DT H.T.) pour un obtenir un coût global de l'air comprimé de **1 009 425 DT H.T.**

7 Économies d'énergie

Par rapport à la situation initiale de 9 millions de kWh et 1080 000 DT H.T. de dépense, l'économie d'énergie annuelle est ici de 9 - 6,408761 = **2 591 239 kWh et de 310 950 DT H.T. (-28,8 %)**

8 Économie globale

Ici en parlant d'économie globale nous prenons en compte aussi l'économie de maintenance mais sans pouvoir évaluer précisément les gains de productivité des chaînes de fabrications et autres économies induites par l'amélioration de fonctionnement des procédés et par la démarche globale d'efficacité énergétique initiée.

Par rapport au coût global initial de 1350 000 DT H.T. l'économie annuelle est ici de 1350 000 - 1009425 = **340 575 DT H.T. (-25,2 %)**

9 Investissements nécessaires

9.1 Évaluation des investissements.

L'évaluation des investissements nécessaires se fait sur la base des matériels listés pour permettre les améliorations à la fois fonctionnelles et énergétiques. Elle doit tenir compte à la fois bien sûr des prix des matériels mais aussi des coûts d'installations. Ces prix peuvent être obtenus auprès des fournisseurs dans l'optique d'une enveloppe budgétaire, avant d'être au moment voulu, affiner par la pression et la dextérité des services achats.

Néanmoins de notre point de vue, l'optique doit en rester le coût global de possession et d'exploitation, comprenant pour l'air comprimé, prioritairement les consommations énergétiques, ensuite les valeurs d'investissement et enfin les coûts de maintenance et de conduite des installations.

Séparer ces trois postes, dans les choix de dépenses en privilégiant les investissements au moins disant et ensuite une maintenance à coût minimum en ignorant totalement les consommations énergétiques, a conduit et conduit bon nombre d'entreprises à des situations de gabegies énergétiques. Pour l'étude de cas, la liste des matériels à investir aboutit à une somme totale de 630 000 DT H.T.

9.2 Délai financier des retours sur investissement.

Heureusement en ce qui concerne l'air comprimé, compte tenu de l'importance du poste énergétique, les retours d'investissement sur les économies globales obtenues sont assez rapides avec des délais rarement supérieurs à 3 ans, le plus souvent proche de **2 ans** (ce qui a été le cas de l'étude de cas présente avec un $TRI = 630000 / 340575 = 1,85$ ans) et parfois même inférieur à un an quand il n'y a pas nécessité d'acquisition de nouveaux compresseurs.

10 mise en œuvre des améliorations

La mise en œuvre des améliorations passe par la modification pas à pas des installations en commençant tout d'abord par la réduction des fuites et la mise en place d'un programme de gestion qui verra des équipes intervenir à intervalles réguliers qui sont intervenir pour rechercher colmater et réparer les défauts d'étanchéité.

Une seconde phase verra les différentes utilisations (buses, soufflettes, outils, automatismes, etc.) modifier dans leur alimentation en air comprimé pour atteindre les économies escomptées, des essais préalables seront bien entendu réalisés avant de généraliser à l'ensemble des usages ces modifications.

Un troisième phase consistera à modifier des éléments de réseaux aux endroits indiqués afin d'obtenir les baisses de pertes de charge escomptées, ces opérations plus lourdes de mise en œuvre que les précédentes devront se faire hors pression généralement pendant des arrêts de fabrication de l'usine, (nuits, week-end ou jours fériés) ce qui risque de retarder d'autant leur mise en place.

Enfin la dernière phase verra souvent intervenir les modifications et installations nouvelles dans la centrale des compresseurs qui comme pour les réseaux sont lourdes de mise en œuvre et nécessitent des arrêts de production. Elles interviendront souvent en dernier lieu, sauf si des machines « rendent l'âme » prématurément parce qu'elles demandent les investissements les plus lourds, souvent aussi les décisions les plus longues et lorsque la décision est prise, des délais de livraison non négligeable notamment pour les compresseurs d'une certaine taille.

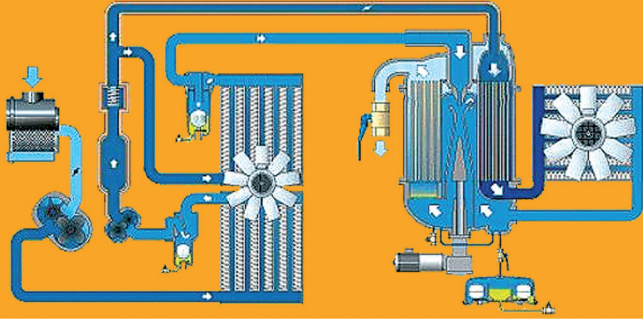
Dans l'ensemble de ces démarches il est souhaitable aussi qu'une personne soit chargée, en interne ou venant d'une société extérieure, du suivi de la mise en œuvre des préconisations d'économie d'énergie afin que les réalisations pratiques correspondent bien à celles-ci et que cette personne puisse orienter ou conseiller les différents intervenants.

11 suivi de l'évolution des consommations

Le suivi des consommations et des performances des installations nécessite la mise en place d'un tableau de bord et de mesures physiques. Ces dernières enregistreront dans le tableau de bord principalement les puissances absorbées par les machines et les débits, pressions, températures, hygrométrie d'air comprimé consommé.

Ces informations permettront de connaître en permanence la performance des installations de production d'air comprimé et les taux de fuites des installations. Elles pourront être avantageusement complétées par des informations concernant la maintenance (coûts et périodicité) propres à suivre et garantir leur fiabilité.

Ce suivi peut s'inscrire désormais dans le cadre d'une norme ISO 50001 de système de management de l'énergie qui peut aboutir à une certification internationale.



BANQUE MONDIALE

Agence Nationale pour la Maîtrise de l'Energie

Cité Administrative Montplaisir, Avenue de Japon B.P. 213

Tél : (216) 71 906 900 - Fax : (216) 71 904 624

Direction de l'Efficacité Energétique dans l'Industrie

E-mail : ugp_pee1@anme.nat.tn

Site web : www.anme.nat.tn

