

Optimisation des performances énergétiques des installations de production, de distribution et d'utilisation de l'air comprimé

1. Constat de la situation

1.1. Exploitation et dimensionnement

Suite à une série de 20 diagnostics et prédiagnostics Air Comprimé réalisés dans des usines d'aliments pour animaux, il s'est avéré que 70% des usines auditées présentaient à ce poste un potentiel d'économie d'énergie supérieur ou égal à 30%.

L'entretien du poste de production, de distribution et d'utilisation de l'air comprimé est dans la majorité des usines, relativement délaissé. Seule la maintenance périodique conseillée par le constructeur de compresseur est assurée (soit en interne ou soit en externe) de façon globalement satisfaisante.

Le plus souvent, une attention ponctuelle est portée à ce poste uniquement dans le cas où :

- un problème d'exploitation intervient (incident de fonctionnement, problème de qualité de l'air...)
- la centrale d'air arrive à saturation de production.

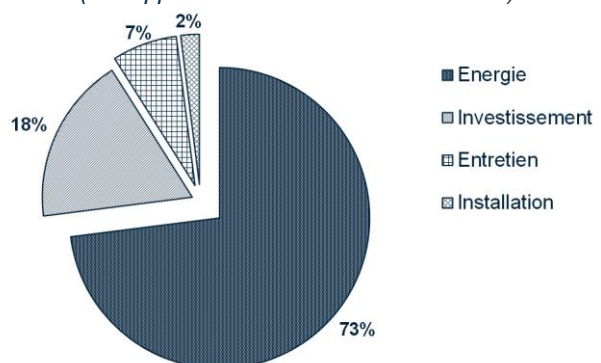
Dans ce dernier cas, le réflexe le plus commun est de mettre en place une centrale d'air comprimé d'une capacité supérieure à celle existante, sans chercher auparavant à optimiser l'installation existante (réduction des fuites d'air, mise en place d'une cuve tampon, optimiser le réglage des utilisateurs d'air...).

Le dimensionnement d'une centrale d'air est, dans la quasi totalité des cas, réalisé de façon empirique, entraînant le plus souvent des surdimensionnements d'installations, donc des surconsommations d'énergie électrique.

Or, comme le montre le graphique ci-après, le coût de l'énergie électrique dans le coût total de fonctionnement (investissement + exploitation) d'une centrale d'air est très important.

Exemple de la part relative des coûts d'une centrale de production d'air (données constructeur) pour un compresseur d'une puissance de 75 kW produisant de l'air à 7 bar et sur une période de fonctionnement de 40

000 h (soit approximativement entre 6 et 7 ans).



1.2. Consommation électrique des postes de production d'air comprimé

Le poste de production de l'air comprimé consomme en moyenne 2,3 kWh électrique par tonne d'aliment dosé. Les consommations constatées par TECALIMAN varient de 0,7 à 6,2 kWh / tonne dosée selon les sites audités.

La part de la consommation électrique d'un poste de production d'air comprimé par rapport à la consommation totale d'électricité d'une usine d'aliments du bétail varie de 2% à 11,8% (selon les sites audités par TECALIMAN).

Le coût de l'énergie électrique consommée par le poste de production d'air comprimé peut varier entre 17,5 et 280 cts de Francs par tonne d'aliments dosés (évaluation établie à partir des prix d'achat de l'énergie obtenus dans le cadre du suivi de performances énergétiques de TECALIMAN de l'année 2000).

L'air comprimé est une énergie pratique, non dangereuse, « propre », instantanée, mais chère.

Globalement, il faut garder à l'esprit que 1 kWh d'air comprimé appliqué au niveau des utilisateurs d'air, équivaut approximativement à 10 kWh électriques consommés à la centrale de production, soit un rendement de 10 %.

Les 90% d'énergies restants sont dissipées pour partie sous forme de chaleur, de fuites d'air, de pertes de charge...

2. Unités employées pour caractériser le débit d'air comprimé

L'unité usuelle du débit d'air est le mètre cube par heure (m^3/h).

L'expression d'un débit d'air comprimé est fonction de la pression et de la température de l'air comprimé considéré.

De ce fait, un débit d'air comprimé est le plus souvent exprimé dans des conditions normalisées de température et de pression.

Pour exemple, les débits d'air comprimé, communiqués par les constructeurs de compresseurs et de sécheurs, sont le plus souvent donnés pour une température d'air à $20^\circ C$ et une pression correspondant à la pression atmosphérique.

Il est très fréquent d'utiliser comme unité de débit d'air comprimé le normal mètre cube par heure (Nm^3/h). Le débit d'air comprimé est dans ce cas donné pour une pression équivalent à la pression atmosphérique et pour une température de $0^\circ C$.

3. Caractérisation des performances énergétiques d'une installation d'air comprimé

Les performances énergétiques d'une installation sont caractérisées par sa consommation spécifique d'énergie (Cs), avec :

$$Cs = \frac{\text{Energie électrique consommée (Wh)}}{\text{Volume d'air comprimé produit ou consommé (m}^3 \text{ ou Nm}^3)}$$

Unités usuelles de ce ratio : Wh/m^3 : ou Wh/Nm^3

La consommation spécifique d'énergie peut se définir en 3 points distincts du réseau d'air comprimé :

- En aval du poste de production d'air comprimé, elle exprime l'énergie électrique consommée par la centrale de production ramenée à la quantité d'air produite par cette centrale
- En aval du poste de séchage de l'air comprimé, elle exprime l'énergie électrique consommée par les postes de production et de séchage ramenée à la quantité d'air comprimé fournie au réseau de distribution
- En amont des utilisateurs d'air comprimé, elle exprime l'énergie électrique consommée par les postes de production et de séchage de l'air comprimé ramenée à la quantité d'air comprimé réellement consommée par l'ensemble des utilisateurs.

La consommation spécifique optimale d'une installation d'air comprimé correspond à la consommation spécifique obtenue au niveau du compresseur quand celui-ci produit son débit d'air nominal (ceci pour une pression donnée).

Exemple 1 :

Un compresseur appelant une puissance de 53,1 kW pour produire à la pression de 7 bar un débit d'air de 482 Nm^3/h , a une consommation spécifique optimale de :
 $53100 \text{ Watt} / 482 \text{ Nm}^3/h = 110 \text{ Wh/Nm}^3$

4. Facteurs influençant la consommation d'énergie électrique d'une installation d'air comprimé

4.1. Facteurs liés à la production d'air comprimé

4.1.1. Les techniques de compression

Les compresseurs peuvent se classer selon : leur technique de compression, leur nombre d'étages de compression, leur gamme de débit, leur mode de refroidissement, leur mode de lubrification...

Les compresseurs rencontrés dans l'industrie des aliments pour animaux utilisent la technique de la compression volumétrique.

Cette compression est obtenue par réduction de l'espace contenant l'air aspiré à la pression atmosphérique. Elle se caractérise par le taux de compression qui correspond à :

Pression Absolue de l'Air Comprimé Refoulé en Sortie de Centrale
Pression Absolue de l'Air Aspiré par la Centrale

La pression est exprimée en bar

Ainsi, pour un débit d'air comprimé produit constant, l'énergie électrique appelée par la centrale augmente, si le taux de compression augmente.

Cette technologie de compression se répartie en 2 grandes familles :

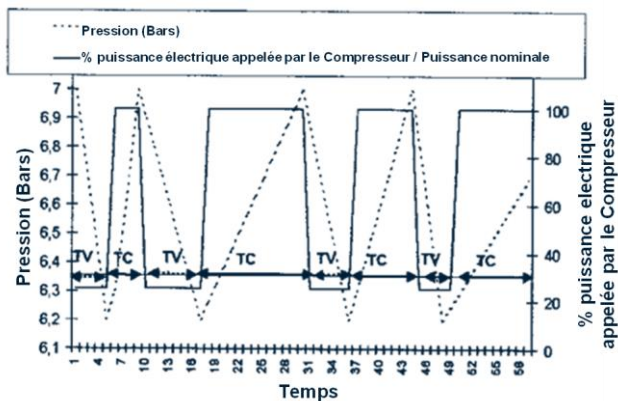
- les compresseurs rotatifs : les compresseurs à vis lubrifiée représentent 80 à 85 % des applications des usines d'aliments pour animaux, les compresseurs à palettes représentent 10 à 15 % des applications. (Il existe aussi des compresseurs à lobes, à spirale...)
- les compresseurs alternatifs : les compresseurs à pistons représentent moins de 5% des applications

4.1.2. Le mode de régulation des compresseurs

4.1.2.1 Les différents modes de régulation

Pour les compresseurs à vis lubrifiés, 3 modes de régulation sont à distinguer :

- **Le mode Tout ou Rien (ToR)** : Un pressostat ajuste le fonctionnement du compresseur (pleine charge, marche à vide ou arrêt complet) afin de maintenir la pression de réseau entre une valeur haute et une valeur basse (voir cycle présenté ci-après). Ce mode de régulation doit toujours être accompagné d'une réserve d'air correctement dimensionnée pour permettre de passer des pics de consommations et pour éviter des cycles complets de fonctionnement du compresseur (marche en charge + marche à vide) trop courts.



Dans le graphique ci-dessus : Tc = correspond au temps de fonctionnement en pleine charge du compresseur et Tv à son temps de fonctionnement à vide.

- **Le mode progressif (ou modulant) :** ce mode de régulation permet de maintenir sur le réseau une pression stable, tant que le débit d'air appelé par l'usine se maintient, approximativement, entre 60 et 100% du débit nominal de la centrale. Ce mode de régulation est souvent plus consommateur d'énergie que les 2 autres modes de régulation.
- **La Variation Electronique de Vitesse (VEV)** obtenue à l'aide d'un variateur de fréquence. Ce mode de régulation permet d'ajuster la puissance appelée par le compresseur au débit d'air appelé par le réseau. Il a comme avantage de permettre une bonne stabilité de la pression de service du réseau (+/- 0,1 bar). Le principal inconvénient, par rapport aux autres modes de régulation, est l'investissement financier qui est beaucoup plus important.

Remarque : Les compresseurs pilotés par VEV ne sont pas disponibles chez tous les constructeurs et dans toutes les gammes de puissances.

Pour les compresseurs à palettes, seuls les 2 premiers modes de régulation existent.

4.1.2.2 Choix du mode de régulation

La consommation spécifique énergétique devrait être le principal critère de choix du mode de régulation. Cela n'est pas le cas aujourd'hui. Comme il a été expliqué précédemment, pour avoir une consommation spécifique optimale du compresseur ou des compresseurs installés, il convient de produire un débit d'air le plus proche possible du débit nominal de ce (ou ces) compresseur(s).

Comparaison entre une régulation en Tout ou Rien et un régulation par VEV :

Pour un compresseur à vis lubrifiée, la régulation en tout ou rien sera plus intéressante (soit une consommation spécifique plus faible) si le débit d'air produit se situe entre 80 et 100% de son débit nominal. Pour un débit d'air comprimé produit se situant en deçà de 80% du débit nominal du compresseur, la régulation par VEV sera énergétiquement plus intéressante. Le seuil de 80% est approximatif et dépend des machines comparées. Toutefois, compte tenu de l'écart du montant de l'investissement entre un compresseur en régulation ToR

et en régulation par VEV, seule une étude technico-économique permet de définir le temps de retour sur cet écart d'investissement. Le temps de retour est déterminé à partir du débit moyen d'air à fournir au réseau, de la consommation spécifique moyenne obtenue pour les différents compresseurs et modes de régulations étudiés, ainsi que du prix d'achat de l'électricité.

4.1.3. Dimensionnement d'une installation

Une centrale d'air surdimensionnée est la source d'une surconsommation d'énergie.

Ceci est principalement vrai pour les compresseurs régulés en mode ToR et en mode modulant.

Pour un compresseur régulé en tout ou rien (cas de la grande majorité des installations), la consommation spécifique dépend du taux d'engagement en charge du compresseur (qui dépend du débit produit). Plus le taux d'engagement en charge est faible, plus la consommation spécifique est élevée.

Exemple 2 :

En partant du même compresseur que l'exemple 1 et en considérant un taux d'engagement en charge moyen de 38%, la consommation spécifique en aval du compresseur est égale à :

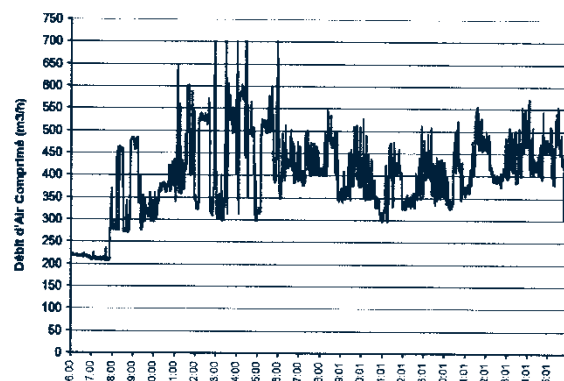
$$= 156 \text{ Wh/Nm}^3$$

Soit une consommation spécifique supérieure de 42% à la consommation spécifique optimale (voir exemple 1).

Une centrale d'air correctement dimensionnée doit satisfaire aux variations d'appel d'air du réseau, mais également produire (dans la mesure du possible) un débit moyen d'air le plus proche possible du débit nominal (pour avoir une consommation spécifique la plus faible possible).

Il faut garder à l'esprit que pour optimiser le dimensionnement d'une centrale d'air :

- il est possible, dans certains cas, de lisser certains pics d'appel d'air du réseau en mettant en place des cuves d'air correctement dimensionnées.
- il peut être opportun de remettre en cause le réglage (période de fonctionnement, pression...) des « gros » utilisateurs d'air.
- il très fortement recommandé de disposer du profil du débit d'air appelé par le réseau (comme l'exemple présenté ci-dessous et issu d'une campagne de mesure de TECALIMAN).



- il est possible de mettre en cascade la production de plusieurs compresseurs afin de satisfaire aux besoins d'air du réseau.

4.1.4. La pression de production

La pression de production de l'air comprimé doit être adaptée aux besoins des utilisateurs, tout en intégrant les pertes de charges du réseau.

Il faut noter que la diminution de la pression de production de l'air comprimé de 1 bar engendre une diminution de la consommation spécifique de la centrale d'environ 7%.

Beaucoup d'installations visitées présentaient un potentiel de diminution de la pression de production de 0,5 à 0,7 bar.

Il est donc important de remettre en cause ce réglage.

4.1.5. Les périodes de fonctionnement des compresseurs

Le fonctionnement des compresseurs le week-end, ou plus généralement durant les longs arrêts de fonctionnement d'une usine, est, sauf cas exceptionnels, une aberration et donc à proscrire.

4.1.6. La qualité de l'air aspiré

Un air aspiré propre (exempt de poussière), sec et le plus frais possible est le gage d'une bonne efficacité énergétique de la centrale de production.

Ainsi, une augmentation de 10°C de la température de l'air aspiré diminue de 3,5 % le rendement énergétique du compresseur.

Pour ces raisons, il est important d'avoir un local air comprimé correctement conçu (prise d'air, filtration, évacuation de l'air chaud...).

4.2. Facteurs liés aux techniques de séchage et de traitement de l'air comprimé

4.2.1. Les techniques de séchage

4.2.1.1 Le séchage par réfrigération

Cette technique permet d'obtenir un point de rosée de +2 à +3°C (soit une teneur en eau de 5,6 à 6,8 mg d'eau par m³ d'air comprimé). Elle présente l'avantage d'être, parmi les 3 techniques de séchage présentées, la moins consommatrice en énergie et la moins onéreuse à l'investissement.

4.2.1.2 Le séchage par adsorption par air perdu et sans chaleur

Cette technique permet d'obtenir un point de rosée beaucoup plus faible que la technique par réfrigération et donc des teneurs en eau par volume d'air comprimé également plus faible. Le point de rosé obtenu peut varier de -20°C (soit une teneur en eau de 0,88 mg d'eau par m³ d'air comprimé) à des températures beaucoup plus basses.

Cette technique de séchage est la plus consommatrice en énergie. En effet, elle consomme 15 à 20% du débit nominal d'air

comprimé du sécheur afin de régénérer l'alumine servant à assécher l'air.

4.2.1.3 Le séchage par adsorption par chaleur (interne ou externe)

Cette technique :

- permet d'obtenir des points de rosée équivalents et même plus bas qu'avec la technique par air perdu et sans chaleur.
- est moins consommatrice d'énergie que la solution précédente, mais à la base, l'investissement financier est plus important.

4.2.2. Choix du sécheur

Le choix du ou des sécheurs doit prendre en compte :

- la qualité d'air exigé par :
 - la nature des utilisateurs,
 - la structure du réseau (canalisation extérieure...),
 - la localisation géographique de l'usine.
- la possibilité de combiner différentes techniques de séchage, afin de répondre aux exigences spécifiques de certains utilisateurs ou bien de répondre à des contraintes saisonnières de qualité d'air comprimé
- sa consommation d'énergie
- son montant d'investissement.

La consommation spécifique d'énergie au niveau du séchage est égale à :

$$C_s = \frac{\text{Wh électrique consommé compresseur + sécheur}}{\text{Volume d'air comprimé produit} - \text{Volume d'air utilisé par sécheur}}$$

Exemple 3 :

En partant de l'exemple 2 et en considérant que le sécheur installé est à adsorption à air perdu sans chaleur et qu'il a un débit nominal de 600 Nm³/h (la consommation en air du sécheur supposée égale à 15% du débit nominal), la consommation spécifique en aval du sécheur est égale à :

$$= 307 \text{ Wh/Nm}^3$$

Soit une consommation spécifique supérieure de :

- 179 % à la consommation spécifique optimale (voir exemple 1)
- 97 % à la consommation spécifique en exploitation (voir exemple 2).

Remarque :

La pression de service et la température de l'air comprimé à traiter, ainsi que la température ambiante ont une influence sur la stabilité du point de rosée « nominale » d'un sécheur.

De ce fait, pour dimensionner correctement un sécheur par rapport aux débits d'air comprimé à traiter, il est nécessaire de prendre en compte des valeurs extrêmes de fonctionnement de la pression service, de la température de l'air comprimé et de la température ambiante.

4.2.3. Les filtres déshuileurs

Il est important de limiter le nombre de filtres déshuileurs et leurs degrés de filtration au strict nécessaire. En effet, ce type de filtre génère de l'ordre

de 0,2 à 0,3 bar de perte de charge, ce qui entraîne une surconsommation d'énergie électrique au niveau de la centrale de 1,5 à 2%.

4.3. Facteurs liés à la distribution

4.3.1. Les fuites d'air comprimé

Les différents diagnostics air comprimé, réalisés par Tecaliman dans les usines d'aliments pour animaux, montrent qu'il est fréquent de trouver des débits de fuites représentant entre 20 et 60 % du débit appelé par l'usine. Pour être considéré comme satisfaisant, le taux de fuite ne doit pas excéder 10 à 15%.

En l'absence de chasses aux fuites d'air réalisées régulièrement, les débits de fuites représentent fréquemment de 45 à plus de 60% du débit appelé par l'usine.

La consommation spécifique au niveau de la distribution est égale à :

$$Cs = \frac{\text{Energie électrique consommée (Wh)}}{\text{Volume d'air comprimé produit} - \text{Volume de fuite d'air}}$$

Plus le taux de fuites est important, plus la consommation spécifique au niveau des utilisateurs est importante.

Exemple 4 :

En partant de l'exemple 3 et en considérant un taux de fuites d'air comprimé de l'installation de 30%, la consommation spécifique à l'utilisation est égale à :
= 440 Wh/Nm³

Soit une consommation spécifique supérieure de :

300 % à la consommation spécifique optimale (voir exemple 1)

182 % à la consommation spécifique en exploitation (voir exemple 2)

4.3.2. Les pertes de charge du réseau

Elles sont définies comme étant la chute de pression entre la sortie de la centrale de production d'air et un utilisateur d'air comprimé visé. Si les pertes de charges sont importantes, elles vont impliquer d'augmenter la pression de production (d'où une augmentation de la consommation) pour satisfaire le besoin en pression des utilisateurs. Il est à noter que le débit de fuites d'air augmente avec la pression.

Il est primordial que le réseau principal soit, à sa conception, largement dimensionné pour faire face aux extensions futures.

4.4. Facteurs liés aux utilisateurs d'air comprimé

La nature de l'utilisateur et le réglage de chaque utilisateur a une incidence directe sur sa consommation d'air.

Les décolmateurs industriels représentent la principale famille d'utilisateurs d'air comprimé. Or, il est fréquent de constater, dans une même usine, que 2 décolmateurs installés sur 2 filtres identiques, traitant des produits relativement proches, aient des réglages différents, sans qu'il

soit possible de retrouver les motivations qui puissent expliquer ces différences de réglage.

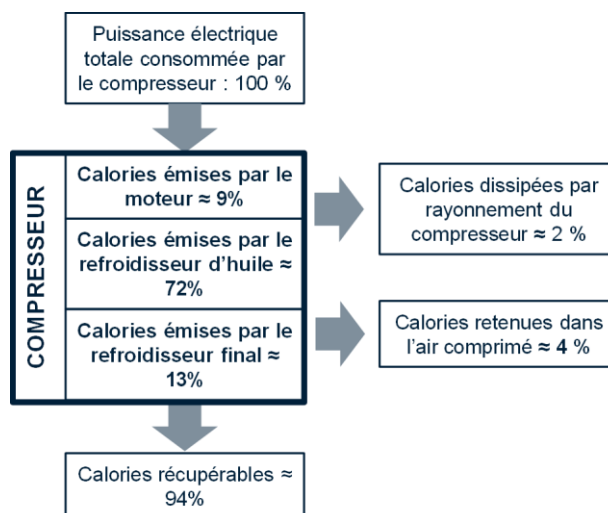
Exemple de réglage d'un décolmateur industriel pour un filtre de 15m² ayant des poches de 1,5m.

	Réglage 1	Réglage 2	Réglage 3
Pression relative (bar)	4,5	4	4
Intervalle (s)	25	25	35
Durée (ms)	200	110	110
Consommation d'air (Nm ³ /h)	23	10,3	7,4

⇒ Un rapport de 3,1 existe entre les consommations extrêmes d'air comprimé.

5. Récupération de la chaleur dissipée par les compresseurs

5.1. Bilan thermique d'un compresseur



5.2. Récupération de calories pour préchauffer l'eau d'alimentation d'une chaudière

5.2.1. Principe de fonctionnement

Le schéma ci-après décrit le principe de fonctionnement.

Un échangeur Huile/Eau est placé dans le compresseur sur le circuit d'huile chaude. Cet échangeur est dit « alimentaire » ou de « sécurité » afin d'éviter les risques de contamination de l'eau par l'huile.

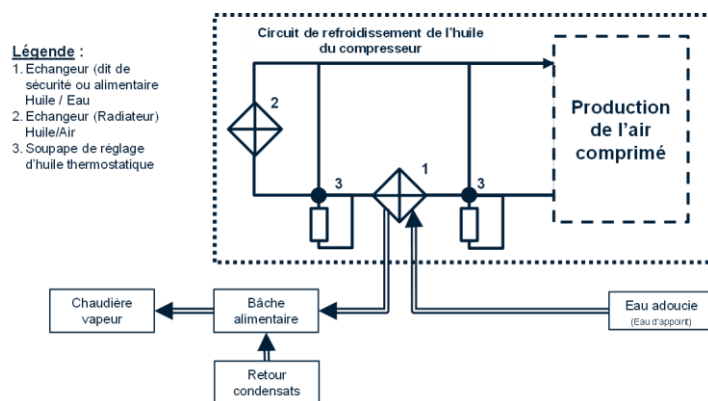
Sur le circuit d'huile :

Deux soupapes de réglage d'huile thermostatique, placées en amont et en aval de l'échangeur permettent d'optimiser le fonctionnement du refroidissement de l'huile. Ainsi, quand la production d'eau chaude n'est pas nécessaire, l'huile est dirigée vers l'échangeur Huile/Air (qui assure le refroidissement de l'huile).

Sur le circuit d'eau :

L'échangeur doit être placé en aval de l'adoucisseur afin de protéger l'échangeur contre les risques d'entartrage.

Le réseau d'eau en aval de l'échangeur doit être calorifugé



5.2.2. Faisabilité technique

Elle dépend essentiellement de 2 facteurs :

- de la marque du compresseur. En effet, tous les constructeurs de compresseurs ne fabriquent pas d'échangeur Huile/Eau. Pour éviter tous problèmes de fonctionnement, il est fortement recommandé de mettre en place un échangeur de la même marque que le compresseur.
- de la distance entre le local compresseur et la chaufferie.

5.2.3. Economie d'énergie envisageable

Le potentiel d'économie d'énergie réalisable dépend de plusieurs facteurs :

- De la température initiale de l'eau dans la bache alimentaire
- Du taux d'engagement du compresseur (temps de marche en charge/temps de fonctionnement total du compresseur)
- De la puissance nominale du compresseur
- Du débit d'eau appelé par la chaudière

6. Conclusions

Pour optimiser la consommation spécifique d'une installation de production, de séchage et de distribution de l'air comprimé, il convient de disposer d'une photo, la plus précise possible, des besoins en air comprimé de l'usine (profil du débit d'air comprimé appelé).

Les performances énergétiques sont évaluées à partir :

- de la consommation spécifique de la centrale d'air (ratio : Wh électrique consommé /m³ d'air comprimé produit)
- du taux de fuites de l'installation
- du dimensionnement de la centrale de production d'air comprimé par rapport aux besoins en air de l'usine
- du volume des réserves d'air disponible sur le réseau
- du taux d'engagement en charge du ou des compresseurs

- de la pression de production du compresseur
- de la conception du local air comprimé
- de la nature et du dimensionnement du sécheur d'air (notamment de l'adéquation de la technologie du sécheur d'air par rapport à la nature des utilisateurs)
- de l'intérêt économique et énergétique de préchauffer l'eau d'alimentation de la chaudière en récupérant la chaleur disponible sur le compresseur
- et des spécificités propres à chaque installation. Ainsi, il peut être nécessaire d'étudier la qualité de l'air comprimé (teneur en humidité), les pertes de charge sur le réseau (entre notamment le poste de production et un utilisateur significatif distant le plus possible du compresseur), la consommation des utilisateurs les plus significatifs...

Pour cela, le diagnostic air comprimé est un outil permettant de réaliser un état des lieux de l'existant et de définir des actions d'amélioration. Il est à noter que ces diagnostics sont subventionnés par l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie).

Ce diagnostic permet aussi de conduire une réflexion sur l'opportunité financière d'externaliser la production de l'air comprimé (acheter l'air au m³). Pour mener à bien cette réflexion, il convient de réaliser un bilan technique et financier (sur plusieurs années) de l'exploitation de l'installation. A partir de ce bilan, l'industriel doit définir ces exigences en matière d'externalisation (délai d'intervention en cas de panne, qualité de l'air...) afin de réaliser un appel d'offre et de définir un contrat de fourniture.

La faisabilité d'une externalisation de la production d'air comprimé dépend, à la base, de la consommation annuelle de m³ d'air comprimé par l'usine.

L'externalisation est un moyen de garantir la révision périodique des performances énergétiques de l'installation d'air comprimé jusqu'au débitmètre de facturation. En effet, la marge de gain de l'exploitant dépend pour partie du différentiel : prix d'achat de l'électricité à l'usine par rapport au prix de vente du m³ d'air comprimé.