



Les systèmes d'air comprimé

Problématique

Grâce à sa souplesse, à sa flexibilité et à la simplicité de sa mise en œuvre, l'air comprimé est un vecteur énergétique adopté par la plupart des industries. Ses applications courantes sont variables et diversifiées. On l'utilise à différentes fins :

- Pour la commande pneumatique des actionneurs (vérins pour robots automatisés ou stations d'emballage, commande des vannes de régulation de débit de combustible dans un four de briqueterie, etc.);
- Comme source directe d'énergie pour l'outillage pneumatique (chaînes de montage, ateliers de maintenance, etc.);
- Comme air de procédés pour l'application de la peinture, pour le sablage ou pour le transport pneumatique de produits.

La supervision des installations d'air comprimé se limite généralement aux mesures visant à assurer une pression et un débit suffisants. Un surdimensionnement est souvent demandé et apprécié.

La facilité de son utilisation ne doit toutefois pas cacher les vrais coûts de son exploitation. Ainsi, l'achat de l'électricité représente plus de 75 % des coûts sur toute la durée de vie de l'installation

d'air comprimé, c'est-à-dire 10 ans ; l'investissement initial et l'entretien se partagent en parts égales le reste des coûts. Il est donc essentiel de mieux comprendre comment sont répartis les coûts de l'énergie consommée par un système d'air comprimé, pourquoi un tel système coûte cher et comment réduire les coûts en améliorant l'efficacité du système.

Principes de base

Une multitude de compresseurs sur le marché

Le compresseur est un équipement mécanique qui aspire de l'air et le refoule, après élévation de sa pression, généralement dans un ballon de stockage intermédiaire puis dans un réseau de distribution. Il existe une grande variété de compresseurs (figure 1). Grâce à sa robustesse, à sa simplicité et à son coût d'investissement, le compresseur à vis domine le marché des compresseurs utilisés.

Figure 1. Les différents types de compresseurs

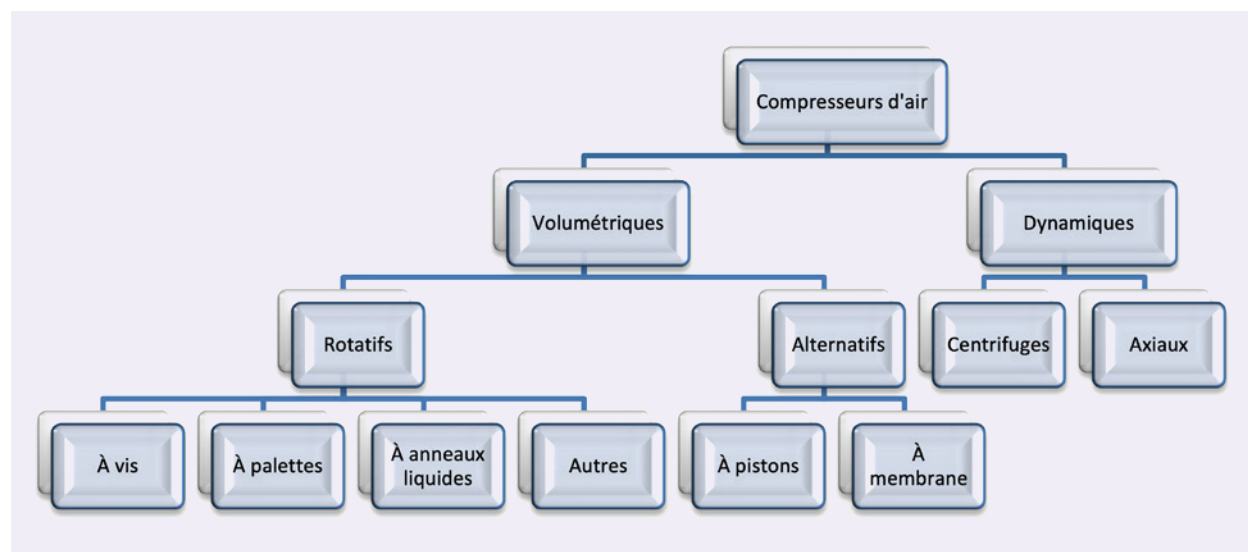
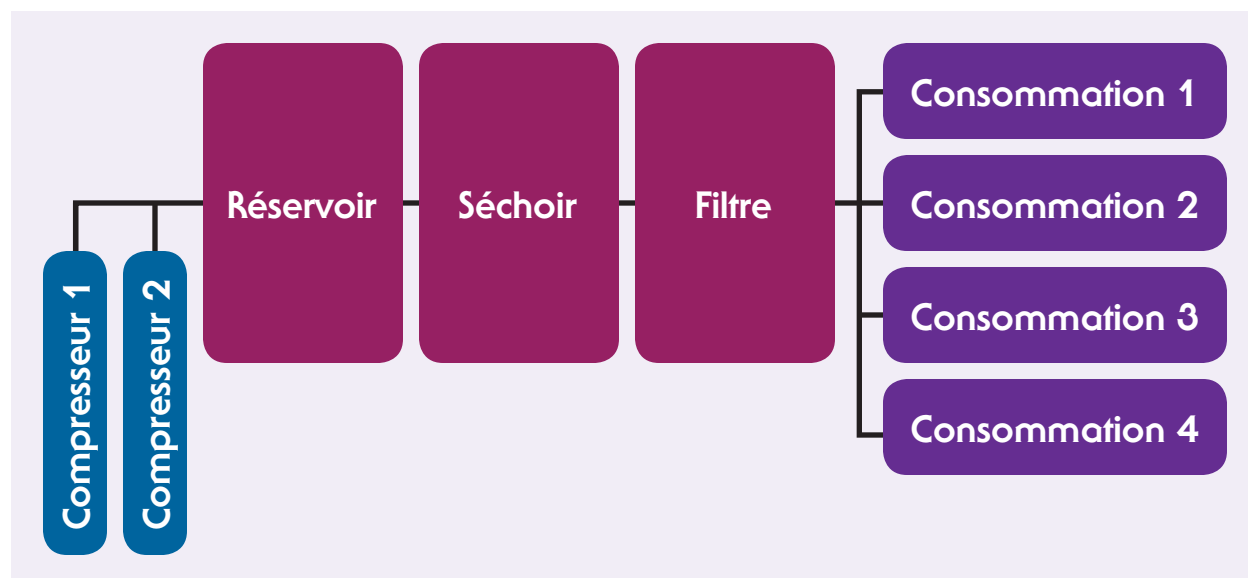


Figure 2. Schéma type d'une installation d'air comprimé



Un rendement total limité

Un système d'air comprimé peut être décomposé en trois sous-systèmes (figure 2) :

- La production, incluant un moteur électrique et un élément compresseur. Le rendement à la production est de l'ordre de 30 %. Plus de 70 % de l'énergie consommée est perdue sous forme de chaleur.
- La distribution, incluant un réseau de transport avec ses canalisations, ses coudes et ses vannes. La distribution est affectée par les pertes de charge et les fuites dans le réseau. Les meilleurs rendements sont de l'ordre de 80 % et peuvent être aussi bas que 50 %.
- L'utilisation finale, incluant des actionneurs et l'outillage pneumatique. Les fuites aux raccordements et les rendements des moteurs pneumatiques font que le rendement à l'utilisation finale oscille entre 40 % et 80 %.

Le rendement global à l'utilisation est donc souvent entre 10 % et 15 % et atteint, dans les meilleurs cas, 20 %. Autrement dit, l'énergie, sous sa forme pneumatique à l'utilisation, coûte jusqu'à dix fois le prix de l'énergie électrique alimentant le compresseur ! L'analyse des facteurs qui affectent ces rendements offre une série de possibilités d'optimisation qui ne doivent pas être ignorées.

Calcul du débit

La compression et la détente de l'air obéissent à la loi générale des gaz parfaits, liant pression, température et volume du gaz selon l'équation 1.

$$\text{Équation 1} \quad \frac{P1 \times V1}{T1} = \frac{P2 \times V2}{T2}$$

Avec P1 et P2 : Pressions initiale et finale (en kPa – abs)
 V1 et V2 : Volumes initial et final (en litres)
 T1 et T2 : Températures initiale et finale (en K)

L'équation 1 permet de comparer le fonctionnement de l'équipement et les caractéristiques nominales fournies par le constructeur, c'est-à-dire dans des conditions normales de 20 °C (ou 293,15 K) et 101,325 kPa.

Soit, par exemple, un compresseur à vis qui, pour un réservoir fermé de 1000 litres sous les conditions de 2,4 bars (1 bar = 100 kPa) et 22 °C (conditions initiales), a mis 72 secondes pour porter ce réservoir à une pression de 7,8 bars à une température de 29 °C (conditions finales). Le débit d'air libre équivalent refoulé par le compresseur est calculé selon les formules suivantes :

Volume d'air libre équivalent initial

$$\frac{P \times V \times 293,15}{T \times 101,325} = \frac{240 \times 1000 \times 293,15}{295,15 \times 101,325} = 2\,352 \text{ litres}$$

Volume d'air libre équivalent final

$$\frac{780 \times 1000 \times 293,15}{302,15 \times 101,325} = 7\,469 \text{ litres}$$

Débit d'air libre équivalent moyen

$$\frac{7\,469 - 2\,352}{72} = 71 \text{ l/s} = 4,26 \text{ m}^3/\text{min}$$

La comparaison du débit de fonctionnement au débit nominal de l'équipement fourni par le constructeur donne une bonne idée de l'efficacité du compresseur.

Effet de la température d'aspiration

Pour mieux apprécier l'effet de la température d'air à l'aspiration, comparons le débit à l'aspiration (D_2) à 40 °C à un débit de référence (D_1) de 1 l/s à 25 °C d'air extérieur. La pression à l'entrée du compresseur est la pression atmosphérique dans les deux cas, soit $P_1 = P_2$.

La loi des gaz parfaits peut aussi être écrite sous forme de débits au lieu de volumes, soit :

$$D_2 = D_1 \times \frac{T_2}{T_1} = D_1 \times \frac{311,15}{298,15} = 1,05 \times D_1$$

Autrement dit, le besoin de compression pour refouler un débit d'air donné est plus élevé de 5 % si la température de l'air à l'entrée est de 40 °C au lieu de 25 °C. La consommation énergétique évolue dans les mêmes proportions. Il est donc intéressant d'alimenter le compresseur en air d'aspiration le plus froid possible pour améliorer le rendement énergétique.

Effet de la pression de refoulement

La consommation d'énergie pour la production d'air comprimé est directement liée à la pression de refoulement du compresseur. Cette dernière est souvent réglée à des valeurs plus élevées que celles qui sont nécessaires pour les équipements. Une règle empirique indique qu'une pression de refoulement excessive de 1 bar engendre une augmentation de 6 % des coûts énergétiques sans apporter d'utilité supplémentaire. De plus, les pertes dues aux fuites s'amplifient si la pression augmente. Plus le potentiel de réduction de la pression est grand, plus la marge d'économies possibles est importante.

Description technique

Les bonnes pratiques de base

Tout d'abord, une bonne analyse des besoins est nécessaire pour déterminer les exigences des équipements en pression, débit et qualité d'air comprimé.

Ensuite, un emplacement de la centrale d'air comprimé ne permettant pas d'évacuer la chaleur dégagée par les compresseurs ni d'aspirer un air froid augmente les coûts d'exploitation.

Par ailleurs, il est rentable d'éviter les usages abusifs et non appropriés de l'air comprimé, tels que le refroidissement des machines, le nettoyage des accessoires ou le dépoussiérage des tenues de travail. Il est souvent possible d'exécuter ces travaux à moindres coûts et plus efficacement par d'autres moyens. De plus, ces usages augmentent le débit volumétrique des compresseurs et leur consommation électrique, en plus de causer des chutes de pression et de perturber la chaîne de production. Certaines machines peuvent en effet s'arrêter si la pression chute sous un seuil critique. Les pertes de production alors subies par l'usine dépassent de loin la consommation d'énergie relative à l'air comprimé maladroitement utilisé !

Les équipements annexes

Selon les spécifications imposées par l'utilisation finale, les compresseurs d'air sont accompagnés d'équipements auxiliaires qui présentent des possibilités d'économies d'énergie (tableau 1).

Des indicateurs clés

Le pilotage efficace d'une centrale d'air comprimé requiert des indicateurs simples et pertinents et une référence à laquelle comparer leur progression. Dresser l'état de départ, l'objectif à terme, les jalons d'avancement et les points d'alertes en cas de dérives favorise une exploitation efficace.

Les indicateurs usuels et les valeurs recommandées sont les suivants :

- *Le taux des heures de charge par rapport aux heures de fonctionnement du compresseur (%)*. Plus ce taux est élevé, moins le compresseur tourne à vide. En tournant à vide, le compresseur consomme le tiers de sa puissance à pleine charge sans produire d'air comprimé. Un taux de charge de 80 % à 90 % est un objectif raisonnable et réalisable.
- *La consommation spécifique, aussi appelée indicateur de performance énergétique (IPE) de la centrale (Wh/m³)*. C'est l'énergie effectivement absorbée par le compresseur rapportée au débit d'air comprimé délivré à sa sortie, exprimé en débit d'air libre équivalant aux conditions normales. Cet indicateur est représentatif de la qualité de la conception et de la gestion de l'installation d'air comprimé. Il est important de le connaître et de le contrôler, car le rendement peut vite se dégrader. Un compresseur neuf de 30 kW ayant un débit de 5,7 m³/min, fonctionnant à pression de 7 bars et à des taux de charge de 90 % et de 60 %, offre un IPE entre 90 Wh/m³ et 107 Wh/m³.
- *Le taux de fuites relativement à la quantité produite d'air comprimé (%)*. Un taux maximal de 10 % de fuites est généralement accepté.

Stratégies de mise en œuvre et résultats attendus

Actions prioritaires

Suivant le principe de prioriser 20 % de mesures à forte efficacité pouvant produire 80 % des résultats d'amélioration, les actions prioritaires sont les suivantes :

- *Fuites* : les fuites sont la principale source de pertes dans la majorité des installations d'air comprimé. La méthode de la vidange du réservoir est l'une des méthodes simples utilisées pour déterminer la proportion des fuites (voir l'étude de cas).

Tableau 1. Équipements annexes et économies d'énergie

Équipements annexes	Points à surveiller
<p>Les sècheurs d'air</p> <p>À la sortie du compresseur, l'air comprimé est saturé en humidité et plus chaud que l'air ambiant. En refroidissant, la vapeur contenue dans l'air se condense dans le réseau de distribution. Il en résulte un risque de corrosion des canalisations au point final d'utilisation. C'est pourquoi un sécheur d'air est souvent installé. Les sècheurs les plus utilisés dans les industries sont les sècheurs à réfrigération.</p>	<p>Les pertes de charge occasionnées par un sécheur d'air comprimé se situent entre 0,2 et 0,4 bar, voire plus si le sécheur est sous-dimensionné. C'est un point à surveiller. Le taux de séchage exigé et le réglage du point de rosée de l'équipement influencent aussi le rendement énergétique du sécheur.</p>
<p>Purgeurs et séparateurs</p> <p>Les compresseurs, sècheurs et réservoirs d'air comprimé doivent être équipés de purgeurs qui évacuent les condensats liquides du système d'air comprimé.</p> <p>Une purge manuelle n'est jamais aussi efficace qu'une purge automatique. Il existe trois catégories de purgeurs :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le purgeur automatique à flotteur. Le flotteur peut se bloquer à l'usage. • L'électrovanne à temporisation. Les intervalles choisis par l'utilisateur ne sont pas toujours adéquats. • Le purgeur thermodynamique dit « intelligent ». • Les prix varient selon les modèles et les marques entre 100 € à 400 € l'unité. <p>Les séparateurs d'huile sont employés pour récupérer les gouttelettes de lubrifiant emportées dans l'air comprimé au refoulement.</p>	<p>Des dispositifs de purge mal entretenus peuvent entraîner des pertes importantes d'air comprimé, donc d'énergie et d'argent.</p> <p>Il n'est pas rare qu'une purge manuelle évacue entre 300 et 500 litres d'eau du ballon d'air, soit 30 % à 50 % du volume d'un ballon de 1 m³. Cette pratique pénalise la capacité de stockage.</p>
<p>Les réservoirs de stockage d'air</p> <p>Ils visent à préserver la stabilité et l'efficacité du système d'air comprimé :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ils diminuent la fréquence des cycles à vide/en charge ou marche/arrêt et réduisent les démarrages du moteur. • Ils répondent aux demandes de pointe grâce à l'air emmagasiné, évitant l'utilisation d'un compresseur supplémentaire. • Ils permettent la décantation de l'eau libre et de l'huile contenues dans le flux d'air comprimé (évacuées grâce aux purgeurs installés). • Ils amortissent les variations de pression et permettent ainsi des pressions plus stables dans le système d'air comprimé. 	<p>Un volume de stockage correspondant à une réserve d'une minute est recommandé. Un réservoir n'est jamais trop grand. Un réservoir trop petit force les compresseurs à se remettre en fonctionnement trop souvent. Une fatigue prématurée de la mécanique et une surconsommation d'énergie en sont les conséquences directes.</p>
<p>Les récupérateurs de chaleur</p> <p>La majorité de l'énergie consommée par les compresseurs est dégagée sous forme de chaleur. Selon les échangeurs thermiques utilisés pour la récupération, un taux de 65 % est atteignable.</p>	<p>Les calories récupérées étant de faible niveau thermique (température d'environ 70 °C), il est nécessaire de bien étudier l'exploitation de cette chaleur avant d'investir dans sa récupération. Les usages conseillés sont le chauffage des locaux, le chauffage ou le préchauffage de l'eau pour le procédé. Il faut aussi tenir compte de la simultanéité possible de la récupération et de l'exploitation de cette chaleur.</p>

- **Taux de charge et IPE**: un suivi journalier ou, au minimum, hebdomadaire des heures de fonctionnement, des taux de charge et de la consommation des compresseurs permet d'intervenir rapidement en cas de dérives. Ainsi, un faible taux de charge invite à vérifier si le compresseur n'est pas surdimensionné relativement aux besoins. Pour un taux de charge inférieur à 50 %, envisager le changement du compresseur par un autre de taille adaptée est un scénario rentable pour l'entreprise. De plus, l'investissement se trouve rapidement amorti en considérant la valeur résiduelle à la vente du premier compresseur. Comprendre les variations et les résultats de l'IPE requiert une investigation minutieuse, l'IPE étant un indicateur synthétique.
- **Efficacité du compresseur**: il est fréquent que les industriels, par souci d'économies à l'investissement, se procurent des compresseurs d'occasion. Dans ce cas, il est impératif de réaliser un test d'efficacité de l'équipement pour connaître le débit réel du compresseur et le comparer au débit nominal annoncé par le constructeur. S'il n'est pas possible de réaliser ce test avant de conclure l'acte d'achat, il est recommandé d'inclure, dans le contrat de vente, une clause explicite de test en présence d'un représentant du revendeur. Un faible rendement à la production pénalisera le rendement global de l'installation.
- **Pression de service**: exiger un bar de plus à la compression signifie une augmentation de 6 % de la consommation d'énergie. Il est donc nécessaire de faire un bon recensement des exigences en pression et de veiller à ce que la chute de pression de service reste en dessous de 0,5 bar.

Qui fait quoi ?

Pour piloter efficacement une centrale d'air comprimé, l'équipe technique doit réaliser certains contrôles réguliers, en plus de veiller à la bonne maintenance des équipements selon les recommandations du constructeur (tableau 2). Si l'entreprise ne dispose pas des compétences nécessaires pour établir un programme d'efficacité énergétique des centrales d'air comprimé, faire appel à un expert externe est l'occasion d'optimiser la consommation et de former les techniciens aux bonnes pratiques énergétiques.

Barrières fréquentes

Le manque de connaissances, les mauvaises habitudes et les fausses croyances (« quand c'est gros, c'est bon et ça marche mieux », « notre usine est particulière ») induisent des erreurs de surdimensionnement et une réticence à recourir à l'expertise externe. Pourtant, l'ouverture de l'entreprise à son environnement et l'acquisition de nouvelles compétences grâce à la formation et au contact avec l'expertise externe ne peuvent qu'améliorer sa compétitivité. Une entreprise est un centre dynamique de création de valeur ajoutée : les technologies s'améliorent, les compétences techniques se développent et deviennent plus accessibles, les solutions acceptables dans le passé peuvent ne plus l'être aujourd'hui. Le bon gestionnaire est celui qui se remet en cause et ne se limite pas à des décisions qui le réconfortent ou justifient des choix passés.

Tableau 2. Contrôles réguliers à réaliser

Action	Fréquence
Relevé des heures de fonctionnement, des heures en charge et de la pression de service	Journalière
Contrôle des purgeurs	Journalière
Calcul de l'IPE. En cas de dérive, chercher les causes immédiatement	Hebdomadaire
Inspecter l'installation, rechercher les fuites et les éliminer immédiatement si possible, sinon programmer une intervention rapide	Hebdomadaire
Test de fuite	Annuelle
Test d'efficacité du compresseur	Annuelle

Conclusion

La puissance absorbée par un compresseur dépend principalement du débit d'air, du taux de compression et de la température d'aspiration. Ainsi, le contrôle du débit, de la pression et de la température offre des potentiels de réduction de la consommation de l'énergie. De plus, la plupart des bonnes pratiques reposent sur un entretien adéquat et sur des réparations sans besoin d'investissements importants. Elles se traduisent donc par des gains financiers sans frais ou à faible coût.

Références

Ressources naturelles Canada. Qu'est-ce que l'air comprimé ?
<https://www.nrcan.gc.ca/energie/produits/reference/14967>

Portail énergie du service public de Wallonie. Production de l'air comprimé en industrie.
<https://energie.wallonie.be/fr/production-de-l-air-comprime-en-industrie.html?IDC=8040&IDD=97785>

Suisse énergie. Air comprimé efficient.
<https://www.suisseenergie.ch/page/fr-ch/air-comprime-efficient?p=17542,17547,17549>

Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources. 1987.
Compresseurs et turbines. Série de la gestion de l'énergie à l'intention des industries, commerces et institutions, vol. 14.
https://www.nrcan.gc.ca/sites/oe.nrcan.gc.ca/files/pdf/commerciaux/motdepasse/telecharger/SGE_14_compresseurs_et_turbines.pdf

Étude de cas : Diagnostic et mesures d'amélioration du rendement des compresseurs d'une usine de matières plastiques au Maroc

Pour des raisons de confidentialité, le nom de l'entreprise ne peut être mentionné.

Description

L'entreprise, située dans la région du Grand Casablanca, a plus de trente ans d'activité dans la transformation de matières plastiques par extrusion, dont les principaux produits sont les sachets et les films techniques. La loi interdisant l'usage de certains sachets plastiques dès 2016 a contribué à réduire la part de marché et les bénéfices de l'entreprise. C'est pourquoi le nouveau directeur s'est tourné vers la chasse aux gaspillages pour réduire les coûts d'exploitation. Une étude de l'efficacité énergétique de l'entreprise a été conduite en partenariat avec la coopération allemande (GIZ), incluant les systèmes d'air comprimé.

L'usine est dotée d'une centrale d'air comprimé avec deux compresseurs à vis de 30 kW chacun et un réservoir de 1000 litres. Un compresseur à la fois est utilisé, l'autre étant un compresseur de secours. Le procédé utilisé par l'entreprise est dit procédé d'extrusion par soufflage de gaine grâce à l'air comprimé à pression réduite. L'air comprimé est aussi utilisé pour différents actionneurs et vérins pneumatiques.

Stratégie de mise en œuvre et financement

Le prédiagnostic a inclus les visites des installations, la collecte et la compilation des données existantes (factures, relevés de production) permettant d'élaborer une première ligne de référence, un plan de mesurage et de vérification, ainsi que des pistes d'économies d'énergie. Le diagnostic énergétique approfondi des équipements a reposé sur l'exploitation des données du plan de mesurage, l'évaluation technico-économique des pistes d'économie d'énergie et l'élaboration d'un plan d'actions hiérarchisées.

Des réunions hebdomadaires sur l'état d'avancement ont été tenues avec les responsables de l'entreprise. Pour réduire les résistances et engager l'équipe technique dans la démarche, des explications ont été fournies à chaque visite sur les procédures et les objectifs des mesures et des vérifications réalisées. Des ateliers thématiques de sensibilisation et de formation du personnel ont aussi été tenus.

La GIZ a été le partenaire financier de cette mission, par l'intermédiaire de son programme « Initiatives allemandes pour les technologies favorables au climat ». Elle a aussi assuré le suivi technique et la coordination des travaux du consultant externe.

Résultats techniques et financiers

Diagnostic initial

Le diagnostic initial a porté sur l'efficacité du compresseur, les heures de fonctionnement et le coût de l'énergie consommée.

Efficiences du compresseur : la première étape fut un test de débit réel du compresseur afin de le comparer à son débit nominal. La plaque signalétique du compresseur indique un débit d'air libre de 5,2 m³/min sous 8 bars. Le test donne un débit réel de 4,26 m³/min, soit une efficacité de 82 %. C'est un taux acceptable.

Suivi des heures de fonctionnement et des heures de charge du compresseur : le calculateur de régulation du compresseur intègre deux compteurs très importants pour la gestion de l'énergie relative à l'air comprimé. Ce sont le compteur des heures de fonctionnement du compresseur et celui des heures de charge. Le suivi de ces compteurs pendant la période d'observation indique un taux moyen de fonctionnement du compresseur relativement au temps d'ouverture de l'usine de 96,7 % et une valeur moyenne de 19,5 % d'heures de charge par rapport aux heures totales de fonctionnement du compresseur. Le tout indique que le compresseur est surdimensionné par rapport aux besoins de l'usine.

Bilan énergie consommée et air comprimé produit : les mesures par wattmètre indiquent une puissance en charge de 30 kW et une puissance à vide de 11,2 kW. L'usine est ouverte 132 h/semaine (6500 h/an). Selon les taux mesurés ci-dessus, le compresseur fonctionne 6285 h/an et le travail en charge dure 1 222 h/an.

- **Consommation énergétique annuelle :**

$$C_A = 1\ 222\ h \times 30\ kW + (6\ 285 - 1\ 222)\ h \times 11,2\ kW = 93\ 365\ kWh/an$$
- **Quantité annuelle d'air produite :**

$$Q_A = 1\ 222\ h \times 4,26\ m^3/min \times 60\ min = 312\ 343\ m^3$$
- **Indice de performance énergétique :**

$$IPE = (93\ 365/312\ 343) \times 1000 = 299\ Wh/m^3$$
- **Besoin moyen de l'usine, y compris les fuites :**

$$Q_{moy} = 312\ 343\ m^3 / (6500\ h/an \times 60\ min/h) = 0,80\ m^3/min.$$

Cette valeur représente à peine 19 % du débit réel du compresseur. Cela confirme que le compresseur est surdimensionné. De plus, l'IPE est trop élevé. L'énergie consommée par le compresseur en tournant à vide, soit plus de 60 % de l'énergie totale, contribue à cette valeur élevée de l'IPE.

Part de l'air comprimé dans la consommation énergétique annuelle : selon les factures, la consommation moyenne globale annuelle de l'usine, pendant les trois dernières années, avec une activité stable, est de 413 937 kWh. La production de l'air comprimé représente donc 22,5 % de l'énergie consommée par l'usine. L'air comprimé est le poste le plus énergivore du site.

Cinq actions ont été proposées (tableau 3).

Action 1. Chasser les fuites d'air comprimé

Il s'agit de vérifier le réseau de distribution, surtout les machines, les actionneurs pneumatiques et les prises rapides, puis d'obturer toutes les fuites. La mesure des fuites s'est faite par la méthode de la vidange du ballon. Il est facile de localiser les fuites pendant les heures d'arrêt, lorsqu'il y a peu de bruit. Ainsi, les tests ont été réalisés un lundi matin, avant le démarrage de l'usine : la pression dans le réservoir (1000 litres) et le réseau (170 litres) a été montée à la pression maximale, et le temps nécessaire pour que la pression chute a été mesuré. La pression est passée de P1 = 7,8 bars à P2 = 4 bars en 631 secondes. Cette baisse est due aux fuites.

- **Débit équivalent des fuites :**
$$V \times \frac{P1 - P2}{t} = 0,42\ m^3/min$$
- **Quantité annuelle d'air comprimé perdue :**

$$Q_p = 0,42\ m^3/min \times 60\ min/h \times 6500\ h/an = 163\ 800\ m^3/an$$

Tableau 3. Actions mises en œuvre

Action	Investissement	Gains annuels escomptés
1. Chasser les fuites d'air comprimé	540 €. Trois corps de vérins pneumatiques, des prises rapides et des raccords ont été remplacés. Une fuite minime située à une hauteur élevée sera réparée lors de la période de l'entretien annuel.	<ul style="list-style-type: none"> Taux de fuite de 8 % après les mesures, au lieu de 52 % avant. Gains financiers : 4280 €. TRI : 1,5 mois. CO₂ équivalent évité : 32 tonnes.
2. Minimiser la pression de service du compresseur	Aucun. Simple réglage des points de consigne du compresseur à des valeurs moins élevées.	<ul style="list-style-type: none"> Économie d'énergie : 7 469 kWh. Gains financiers : 709 €. TRI : Immédiat. CO₂ équivalent évité : 5,3 tonnes.
3. Purgeur d'eau pour l'actuel réservoir d'air	410 € Purgeur thermodynamique, installé par le technicien de l'entreprise.	<ul style="list-style-type: none"> Gains financiers : 1 163 €. TRI : 4,2 mois. CO₂ équivalent évité : 8,7 tonnes.
4. Équiper le compresseur d'une gaine d'évacuation de chaleur	200 € Réalisation et installation de la gaine d'évacuation de chaleur en tôle.	<ul style="list-style-type: none"> Économie d'énergie : 5 %, soit 4 668 kWh. Gains financiers : 443 €. TRI : 5,5 mois. Meilleures conditions de travail dans l'atelier. CO₂ équivalent évité : 3,3 tonnes.
5. Installer un compresseur adapté	8700 € Acquisition et installation du nouveau compresseur. Valeur résiduelle de l'ancien compresseur estimée à 11 000 € par un revendeur de matériel d'occasion. Mais l'industriel a préféré transférer l'ancien compresseur sur un autre site de production.	<ul style="list-style-type: none"> Économie d'énergie : 66 260 kWh par an. Allègement de la redevance de puissance mensuelle de 101 €. Gain total escompté : 7 506 €. TRI : 14 mois. CO₂ équivalent évité : 47,2 tonnes.
Notes : <ul style="list-style-type: none"> TRI : temps de retour sur investissement. Consommation actuelle : 93 365 kWh/an. Prix moyen pondéré de l'électricité de 0,095 €/kWh H.T., taux de change : 10 MAD/€. Facteur d'émission du mix énergétique de la production d'électricité au Maroc : 712 g de CO₂ équivalent/kWh. Les économies dégagées ne sont pas cumulatives du fait de certains effets croisés. 		

- **Surconsommation annuelle d'énergie :**
 $E_p = 163\,800 \text{ m}^3/\text{an} \times 299 \text{ Wh/m}^3 = 48\,976 \text{ kWh}$

- **Taux de fuite :** $\frac{163\,800}{312\,343} = 52,44 \%$

Ces fuites représentent l'équivalent de la consommation énergétique d'un mois et demi de toute l'usine !

Action 2. Minimiser la pression de service du compresseur

La régulation de production d'air comprimé par le compresseur est fixée sur un intervalle de 7,4 à 7,9 bars. C'est une plage très étroite, dont les valeurs sont supérieures aux exigences des équipements. Il en résulte, d'une part, des cycles de charge et décharge du compresseur très courts et répétitifs, ce qui fatigue la mécanique et nécessite une maintenance plus fréquente et, d'autre part, un excès de consommation d'énergie et un accroissement des pertes par fuites d'air.

Les équipements de l'usine peuvent fonctionner de façon satisfaisante avec une pression de 6 bars. Un simple réglage des points de consigne du compresseur à des valeurs moins élevées permet de réaliser des économies

d'énergie. Le nouvel intervalle de pression de service sera donc de 5,5 à 6,5 bars, en tenant compte des pertes de charge.

Action 3. Purgeur d'eau pour le réservoir d'air

La proximité de la mer accentue le phénomène d'humidité. Si l'eau de condensation n'est pas évacuée, la capacité du réservoir tampon d'air est rapidement réduite. Des gouttelettes d'eau peuvent même être transportées vers les équipements et les actionneurs pneumatiques et causer des dommages tels que des usures anormales, de la détérioration de joints, des fuites, etc. Une purge manuelle du réservoir d'air a été réalisée un lundi matin avant le démarrage de l'usine. Cette purge a duré plus de 15 minutes pour dégager un volume de 300 litres d'eau. C'est presque le tiers du volume du réservoir !

Action 4. Équiper le compresseur d'une gaine d'évacuation de chaleur

La chaleur dégagée par le compresseur n'est pas évacuée à l'extérieur, ce qui entraîne une augmentation de la température de l'air à l'aspiration, donc une surconsommation énergétique et une fatigue de la mécanique. Une élévation de température de plus de 15 °C est notée par exemple entre le local du compresseur et le local où est installé le broyeur.

La gaine d'évacuation de chaleur



Photo : Abdessamad Marhfoul

Action 5. Le compresseur est surdimensionné par rapport aux besoins

Le débit réel du compresseur est de 4,26 m³/min. Les besoins moyens de l'usine, y compris les fuites, sont de 0,80 m³/min. Le compresseur est donc largement surdimensionné. Un compresseur d'une puissance de 7,5 kW, au lieu de 30 kW pour l'actuel compresseur, et délivrant un débit nominal de 1,5 m³/min sous 7,5 bars, assurera aisément les besoins de l'usine, estimés à 0,5 m³/min (30 m³/h) après réparation des fuites existantes.

Le calcul des économies d'énergie se fait comme suit :

- **Fonctionnement en charge du compresseur :** 20 min
- **Énergie consommée :**
 $E = (20 \text{ min} \times 7,5 \text{ kW} + 40 \text{ min} \times 2,5 \text{ kW})/60 = 4,17 \text{ kWh}$

- **Indice de performance énergétique :**
 $IPE = 4,17 \text{ kWh} / 30 \text{ m}^3 = 139 \text{ Wh/m}^3$
- **Nouvelle consommation :**
 $NC_A = 139 \text{ Wh/m}^3 \times 30 \text{ m}^3/\text{h} \times 6500 \text{ h/an} = 27105 \text{ kWh/an}$
- **Économie :** $C_A - NC_A = (93\,365 - 27\,105) \text{ kWh/an} = 66\,260 \text{ kWh/an}$

Pour terminer, la nécessité du second compresseur a été discutée avec la direction de l'usine. Initialement en panne, donc inutilisé, le compresseur de secours a été réparé. Toutefois, son rendement s'est avéré médiocre. Deux options étaient alors possibles : soit le maintien de ce compresseur en place, malgré un usage très peu fréquent et un coût de production d'air comprimé très élevé du fait du mauvais rendement ; soit la vente de ce compresseur et la mise en place d'un programme rigoureux de maintenance du nouveau compresseur, limitant les risques de panne, donc de nécessité d'un compresseur de secours. La direction de l'usine a préféré le statu quo, représentant une option de secours sécurisante malgré les surcoûts élevés associés à l'usage de ce compresseur.

Conclusion

Toutes les mesures recommandées ont été implantées, permettant de dégager des économies énergétiques et financières de l'ordre de 7840 € par an, représentant 20 % de la consommation totale de l'usine avant la mise en œuvre des mesures d'économies.

Cette étude de cas montre l'importance relative des mesures d'économies proposées, les fuites et le bon dimensionnement du compresseur représentant des potentiels d'économies particulièrement élevés. Finalement, toute entreprise désirent mettre en œuvre de telles mesures doit prendre en considération les technologies installées, les conditions de fonctionnement et, surtout, le personnel en charge des équipements pour que le programme soit un succès.

Références

Disponibles auprès de l'auteur.

Les fiches techniques du Programme international de soutien à la maîtrise de l'énergie (PRISME) sont publiées par l'Institut de la Francophonie pour le développement durable (IFDD).

Directeur de la publication :

Jean-Pierre Ndoutoum, Directeur, IFDD

Comité éditorial :

Mamadou Kone, Spécialiste de programme, IFDD
 Romaric Segla, Expert, programme Énergie, IFDD
 Louis-Noël Jail, Chargé de communication, IFDD

Supervision technique :

Maryse Labriet, Eneris Consultants, info@enerisconsultants.com

Auteur :

Abdessamad Marhfoul, ingénieur en efficacité énergétique, ENERGEST, Maroc, marhfoul.abdessamad@gmail.com

M. Marhfoul est expert en efficacité énergétique dans l'industrie. Il est gestionnaire de l'énergie certifié (certification CEM) et formateur en gestion environnementale profitable (GEP), agréé par l'agence de coopération allemande GIZ et membre de l'association allemande PREMANet (Profitable Resource Efficient Management).

Édition et réalisation graphique :
 Perfection Design inc.



L'Institut de la Francophonie pour le développement durable (IFDD) est un organe subsidiaire de l'Organisation internationale de la Francophonie (OIF). Il est né en 1988 de la volonté des chefs d'État et de gouvernement des pays francophones de conduire une action concertée visant le développement du secteur de l'énergie dans les pays membres. En 1996, cette action a été élargie à l'environnement. Basé à Québec (Canada), l'Institut a aujourd'hui pour mission, notamment, de :

- contribuer au renforcement des capacités nationales et au développement de partenariats dans les domaines de l'énergie et de l'environnement,
- promouvoir l'approche développement durable dans l'espace francophone.

Institut de la Francophonie pour le développement durable (IFDD)

56, rue Saint-Pierre, 3^e étage
 Québec, Canada G1K 4A1
 Téléphone : +1 418 692-5727
 Télécopie : +1 418 692-5644
 Courriel : ifdd@francophonie.org
 Site Internet :
www.ifdd.francophonie.org

Mai 2019

Imprimé sur papier contenant 100 % de fibres recyclées postconsommation.

