

Optimalisation d'un réseau d'air comprimé

Ing. R. JANUS
ISICHt - Mons

A l'heure où l'énergie est sur le point de devenir un luxe, nous nous penchons sur la diminution du coût de production de l'air comprimé dans une entreprise chimique. Cet objectif est atteint en étudiant les composants actuels de production et de séchage de l'air comprimé, en analysant les techniques nouvelles, en concevant une nouvelle installation, en consultant les fournisseurs et en réalisant une étude de rentabilité.

Mots clés : air comprimé, énergie, compresseur, sécheur, consommation spécifique, URE.

Energy costs are increasing so much that it is very important to decrease energy demand, for example energy used to produce compressed air. Our goal in this thesis is to study how to decrease compressed air cost in a chemical factory. We will analyse all the different components used to produce high quality compressed air and will design a new plant.

Key words: compressed air, energy, compressor, drier, specific consumption

1. Introduction

1.1 Contexte

Dans le cadre de la réduction de ses coûts énergétiques et pour répondre aux attentes de la multinationale à laquelle elle appartient, une entreprise chimique nous a proposé d'étudier un de leurs réseaux d'air comprimé. Le but étant de réduire au maximum la consommation énergétique. En effet, pouvant représenter jusqu'à 40% de l'électricité consommée par une entreprise, l'air comprimé est un fluide aux enjeux multiples dont une mauvaise gestion peut non seulement engendrer un surcoût important, mais également une faible disponibilité et une fiabilité réduite avec des conséquences néfastes sur la production. Cette entreprise chimique ne peut en aucun cas manquer d'air comprimé sous peine de voir ses processus de production à l'arrêt, la majorité de la régulation étant assurée par des vannes automatiques.

L'entreprise nous a donc confié l'étude du réseau d'air comprimé d'une de ses deux Unités : l'Unité de Recyclage du Cuivre. Néanmoins, il faut signaler que cette entreprise possède deux Unités de production qui chacune possède son réseau d'air. Les deux réseaux peuvent être interconnectés (nous verrons l'intérêt plus tard). Le réseau de l'Unité Recyclage est le réseau dont les équipements sont les plus anciens, voilà pourquoi l'entreprise oriente ses priorités sur ce réseau.

1.2 Les stations d'air comprimé en général

Avant toute chose, nous trouvons utile d'expliquer brièvement en quoi consiste une station d'air comprimé.

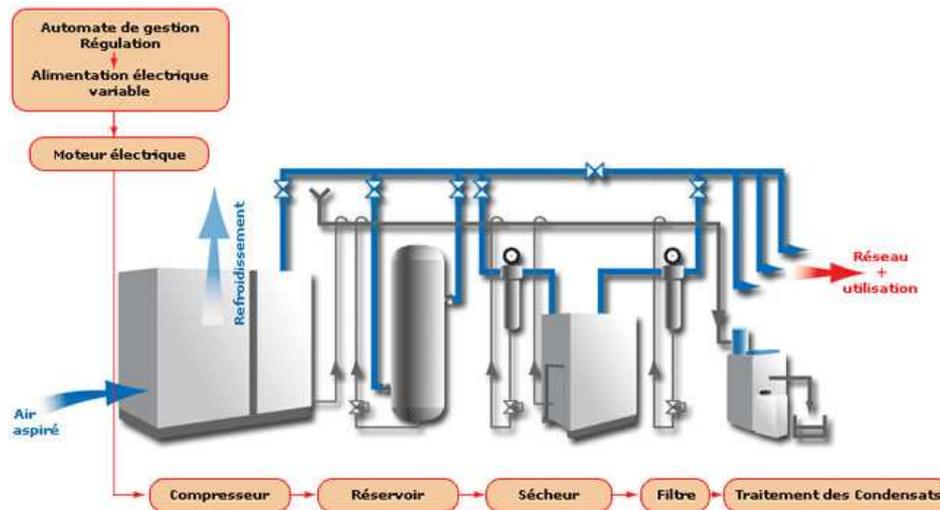


Figure 1 : fonctionnement d'une station d'air comprimé

Tout d'abord, un (ou plusieurs) compresseur(s) amène l'air atmosphérique à la pression désirée, dite pression de consigne. Ensuite, une unité de séchage extrait l'humidité de l'air. Nous verrons qu'il existe diverses méthodes plus ou moins énergivores. Constatons également la présence d'un réservoir tampon dont le rôle est d'éviter des chutes de pression ponctuelle et un récupérateur de condensats. Enfin, le réseau distribue l'air comprimé aux consommateurs

2. Etude de l'installation existante de production d'air comprimé

Ce point a pour but de donner un aperçu global de l'installation que nous devons étudier.

2.1 Présentation du réseau d'air comprimé

Notre premier travail fut de réaliser les plans du réseau d'air comprimé. En effet, l'entreprise ne disposait pas de plan suffisamment précis. Cette

première approche nous a permis de distinguer les artères principales du réseau d'air comprimé mais aussi de prendre contact avec la production et de relever les différents consommateurs.

2.2 Les compresseurs en place

Les 3 compresseurs installés sont des compresseurs de marque Worthington. Ce sont des compresseurs à palettes datant de 1975.

Données de base fournies par le constructeur :
Puissance absorbée par compresseur : 45 kW au moteur
Capacité de chacun des compresseurs : 400 Nm³/h
Gamme de pression couverte: 5 à 8.5 bars à l'origine

2.3 L'architecture du réseau

Il faut savoir que dans cette installation, les compresseurs ne sont pas situés dans le même local mais que le réseau est alimenté par 2 sources. D'une part, les compresseurs que nous appellerons Nord et Sud et d'autre part le compresseur que nous appellerons Cuivre

3. Consommation théorique et dispositifs de mesures mis en place

Ce paragraphe reprendra tout d'abord l'ensemble des données fournies par les constructeurs concernant la consommation d'air comprimé de leur appareil. Ensuite, nous expliquerons les différents dispositifs de mesures qu'il a fallu mettre en place, leur principe de fonctionnement et leur type d'acquisition.

3.1 Consommation théorique moyenne

Ces estimations sont issues des cahiers de charge et des documents techniques

	consommation max		Cas de simultanéité		
			Léger	Moyen	Lourd
Dépoussiéreurs (en continu)	127	Nm ³ /h	127	127	127
1 pompes à membranes	84	Nm ³ /h		84	
2 Pompes à membranes	168	Nm ³ /h			168
Filtres d'installation	29,5	Nm ³ /h	29,5	29,5	29,5
Déchargement Camions 1	100	Nm ³ /h		100	100
Déchargement Camions 2	100	Nm ³ /h			100
Consommation instantanée max totale (Nm ³ /h) :			156.5	340.5	524.5

Nous pouvons voir selon les 3 cas de fonctionnement que le débit est fort variable. Les déchargements de camions ainsi que le fonctionnement des pompes sont aléatoires.

N'oublions pas que nous devons ajouter à ce débit, celui consommé par les fuites ainsi que celui consommé par les vannes modulantes.

3.2 Les mesures effectuées

La mesure de pression

Cette mesure de pression (bar) était déjà installée à notre arrivée. Cette mesure est ramenée au système central de l'entreprise.

Les mesures de débit

Nous disposions dans un premier temps d'une lecture sur colonne d'eau. Afin de pouvoir enregistrer les données, nous devions récupérer la mesure sous un signal de 4-20 mA. Nous avons pour cela installé un transmetteur de débit à la sortie du compresseur Worthington Cuivre mais aussi à la sortie commune des 2 compresseurs Worthington Nord et Sud. Le type de débitmètre installé est un diaphragme. Le transmetteur est, quant à lui, une cellule Rosemount convertissant le ΔP en signal 4-20 mA.

Les mesures de puissance

Dans le but de mesurer la puissance instantanée des compresseurs, nous avons installé des analyseurs de réseau.

L'acquisition a été réalisée de la manière suivante :



Figure 2 : analyseur de réseau

Durant des périodes d'échantillonnage de 30 s, l'appareil calculait la puissance minimale, maximale ainsi que la puissance moyenne.

La mesure a été effectuée au niveau des sous-stations électriques de l'entreprise.

Les données enregistrées ont été transférées dans un PC par port-série. Les données peuvent ensuite être traitées par EXCEL.

4. Les fuites

4.1 Recherche des fuites

Cela consiste en une détection par ultrasons et un repérage des fuites d'air comprimé. Elles sont localisées à l'aide d'étiquettes et repérées sur plan, puis listées dans un tableau de façon à être retrouvées rapidement. Leur classement permet de savoir quelles sont les fuites sur lesquelles il faut intervenir rapidement et l'enjeu qu'elles représentent sur la consommation globale.

4.2 Principe

Quand un gaz quelconque passe à travers un orifice, il génère un débit turbulent avec des éléments haute fréquence pouvant être détectés. En balayant la zone de test avec un détecteur d'ultrasons, nous pouvons « entendre » des sons tumultueux correspondants à ces éléments (sons associés à un affichage analogique).

4.3 Matériel utilisé

Système d'inspection ultrasonique détectant les fréquences entre 20KHz et 100KHz ; celles-ci sont converties en fréquences de 50Hz à 3KHz. Un réglage en modulation de fréquence permet d'obtenir une réponse extrêmement étroite.

4.4 Méthodologie

Un balayage systématique de tout le réseau a été effectué : tout d'abord à distance (par émission directe et par réflexion), puis si besoin était, à proximité pour affiner la mesure. Les fuites ont été repérées, listées et étiquetées d'une certaine couleur suivant leur importance.

4.5 Résultats

Les fuites ont été classées par l'auditeur suivant leur importance. De par son expérience, l'auditeur estime la consommation d'une fuite en se référant au son émis par l'appareil. Il associe un ordre de grandeur de consommation à chaque fuite et peut ainsi calculer la consommation annuelle des fuites.

Importance fuites	Nombre de fuites	kWh/fuite	Total (kWh)
jaunes	33	0,25	8,25
oranges	4	0,5	2
rouges	1	1	1
Total	38		11,25

Estimation du coût des fuites d'air comprimé

L'estimation des fuites d'air comprimé avoisine les **11 kWh**. Si on pose la valeur de la consommation spécifique à 120 Wh/Nm³, on obtient un débit de fuites de +/- 100 Nm³/h.

Sachant que le réseau est maintenu sous pression 7 jours/semaine, 24h/24 et 365 jours/an, cela représente 8760 heures/an.

Consommation des fuites : 96360 kWh, soit environ 7700 €/an

L'origine des fuites étant en général assez simple à identifier, la réparation de la majorité des fuites est très rentable. La rentabilité est souvent largement inférieure à 1 an.

Pour la réparation de ces fuites, nous estimons en accord avec l'auditeur, que 40 heures de travail sont nécessaires (à 40 €/h), ce qui fait un investissement de 1.600 €.

A cela, il faut le matériel nécessaire à la réparation des fuites repérées mais il nous paraît marginal. Nous pouvons donc dire que la réparation de l'ensemble des fuites est rentable en moins de 6 mois.

5. Compresseurs : Analyse des mesures, modes de régulation et coût de fonctionnement annuel

5.1 Analyse des mesures

L'analyse des mesures constitue une partie très intéressante car elle permet de réellement observer le lien entre la production d'air et le fonctionnement des différents secteurs de l'Unité recyclage.

Nous commencerons ce chapitre en citant les différentes données et informations que nous avons dû collecter afin d'analyser au mieux l'impact de la production sur la consommation d'air. Nous analyserons ensuite les profils de débit, tout d'abord d'une manière générale pour terminer par des phénomènes plus précis.

Les profils de puissance seront ensuite analysés et permettront de définir la consommation spécifique des compresseurs Worthington.

Profil de puissance des compresseurs

Cette mesure a été réalisée sur 2 des 3 compresseurs pour des raisons de disponibilité du matériel de mesure. Nous avons mesuré les puissances absorbées sur les compresseurs Nord et Sud en même temps que la somme des débits produits par chacun des 2 compresseurs. Mais nous verrons qu'il a été malgré tout possible de déterminer la consommation spécifique de chaque compresseur à 6.5 bars.

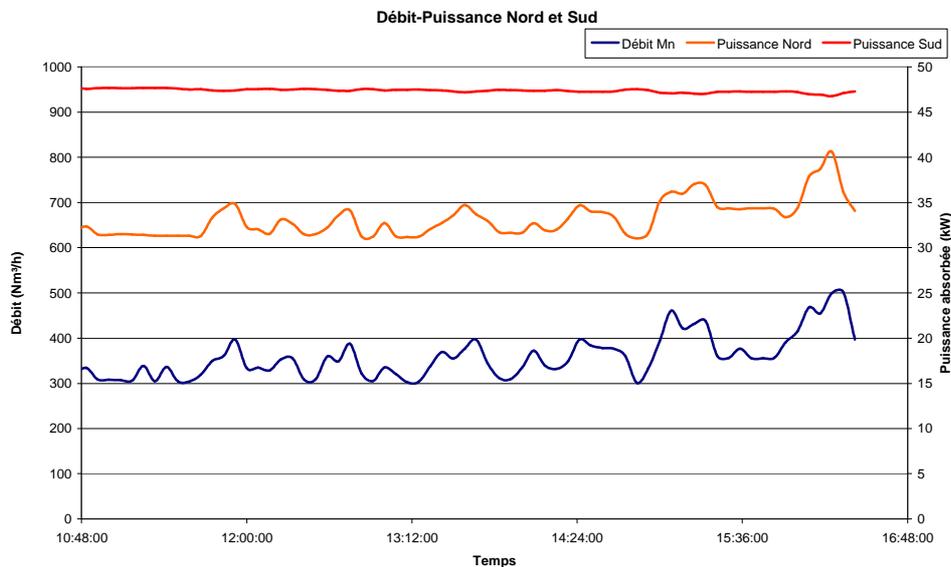


Figure 3 : courbes obtenues

Courbe supérieure = courbe de puissance du compresseur Worthington Sud
Courbe centrale = courbe de puissance du compresseur Worthington Nord
Courbe inférieure = courbe de débit produit par les 2 compresseurs Worthington Nord et Sud

Si nous observons les allures des courbes, nous pouvons constater que :

- Le compresseur Sud est toujours en pleine charge (47 kW), même lorsque le débit est minimum, c'est-à-dire à +/- 300 Nm³/h.
- Les profils du débit et de la puissance du Nord sont identiques. Nous déduisons donc que le Sud ne peut débiter plus de 300 Nm³/h lorsqu'il fonctionne en même temps que le compresseur Nord. Lorsqu'il fonctionne seul, le Sud est capable de débiter 390 Nm³/h. Ce fait s'explique comme suit : le Nord couvre également la plage de fonctionnement du compresseur Sud car les consignes de pression ne sont pas assez espacées. Pour une pression intermédiaire, les machines se partagent la consommation.

En retranchant les 300 Nm³/h à la totalité du débit, nous pouvons trouver le lien entre la puissance absorbée et le débit produit par le Nord.

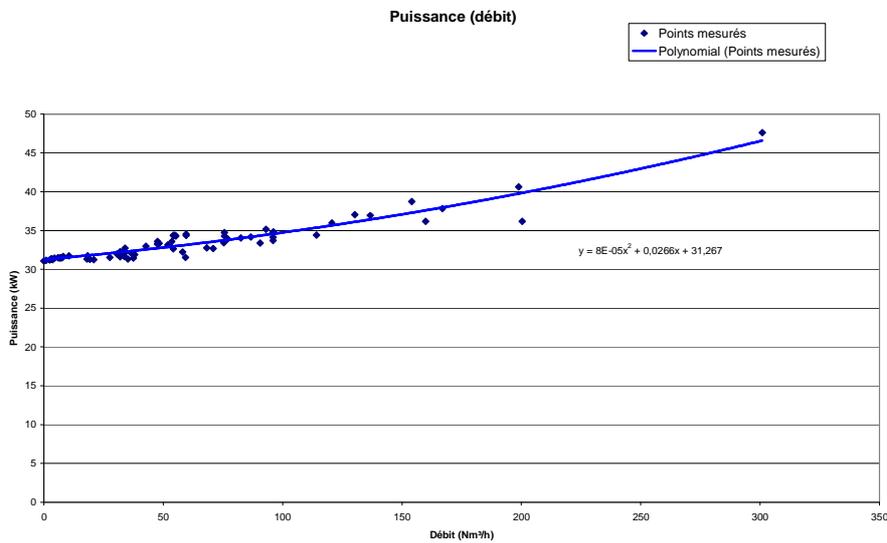


Figure 4 : puissance absorbée en fonction du débit

Nous observons sur le graphe que lorsque le compresseur Nord tourne à vide, il consomme 32 kW soit 70 % de sa puissance maximale.

Consommation spécifique des compresseurs

La consommation spécifique permet de comparer des machines entre elles.

Elle est définie de la manière suivante :

La consommation spécifique (C_s) représente l'énergie nécessaire pour fournir le débit réel ; elle s'exprime en Wh / Nm³. Elle représente le rapport entre l'énergie électrique absorbée par le compresseur et le débit d'air réellement délivré.

La valeur de référence pour les compresseurs actuels est de 120 Wh / Nm³.

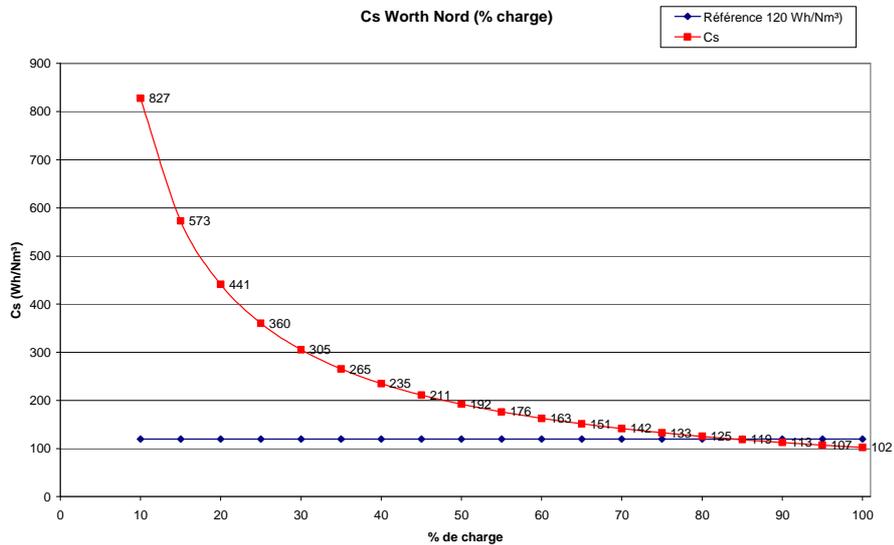


Figure 5 : consommation spécifique en fonction de la charge

Cette courbe a été obtenue en divisant la puissance consommée par le débit produit à des instants précis et caractéristiques.

Nous constatons qu'à pleine charge, la Cs du Nord est de 102 Wh/Nm³. Ce qui n'est pas un mauvais résultat. A 80% de la charge maximale, la Cs est de 125 Wh/Nm³ alors que pour les nouveaux compresseurs, la Cs doit être de 120 Wh/Nm³ à cette valeur. Par contre, une fois que le compresseur fonctionne à charge partielle, la Cs devient très mauvaise. En effet, à 50% de la charge, la Cs est de 192 Wh/Nm³, ce qui correspond à une augmentation de 54% par rapport à 80% de la charge et de 88% par rapport à 100% de charge ; ce qui est énorme.

Nous verrons que cette mauvaise Cs est due d'une part à la vétusté des machines mais aussi au mode de régulation interne. Un point est consacré aux différents modes de régulation des compresseurs.

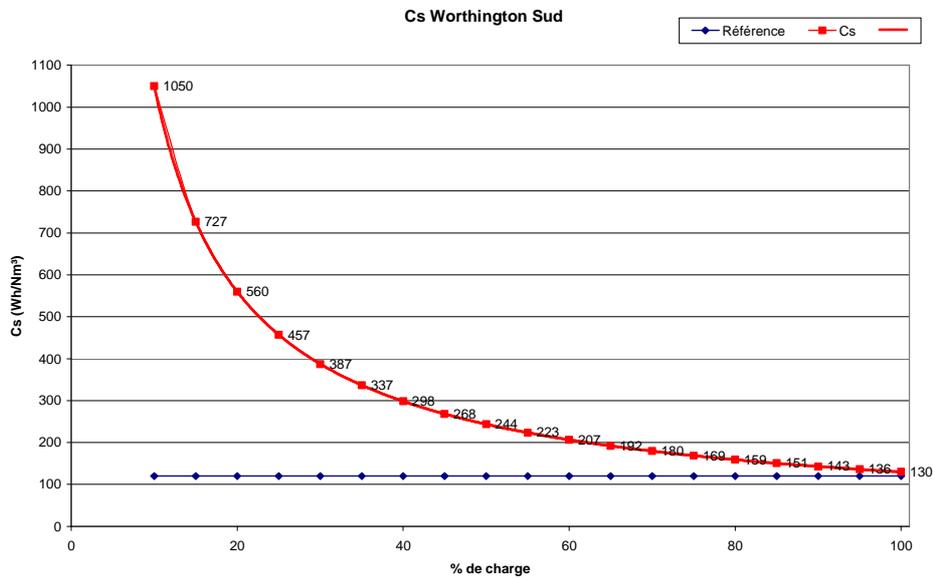


Figure 6 : consommation spécifique en fonction de la charge

Lorsque le compresseur Sud fonctionne simultanément avec le compresseur Nord, son débit maximum est de 300 Nm³/h. Ce qui fait chuter sa Cs et la rend très mauvaise.

Nous constatons donc que même lorsque le compresseur Sud est à pleine charge, sa Cs demeure supérieure à la référence de 120 Wh/Nm³.

A 50% de la charge, la Cs spécifique est égale au double de ce qu'elle devrait être à 80% de la charge maximale. Ce qui est énorme.

Ces compresseurs sont très énergivore à charge partielle.

La cause de cette mauvaise consommation spécifique est la suivante:

Outre le rendement du moteur vieux de 30 ans qui n'est certainement pas des plus excellents si nous le comparons au rendement des moteurs actuels, il faut également savoir que ces compresseurs ont entre 130000 et 175000 heures de fonctionnement. Bien que les machines tournantes aient une

grande durée de vie, les palettes s'usent d'une part par le frottement qu'elles exercent sur la partie cylindrique du stator mais aussi par son frottement sur les parties latérales du stator. Ce frottement, malgré le film d'huile de lubrification, occasionne à long terme des fuites internes dans la machine. Comme nous avons pu le constater, le compresseur Sud ne sait plus débiter ses 400 Nm³/h initiaux mais est actuellement limité à 300 Nm³/h lorsqu'il fonctionne simultanément avec le Nord. La puissance maximale n'ayant pas changé, il est donc normal que la consommation spécifique soit plus élevée et donc mauvaise.

Comme nous l'avons vu lors de l'analyse de la puissance, lorsqu'ils fonctionnent à vide, les compresseurs consomment pas moins que 70% de leur consommation de pleine charge, ce qui constitue des pertes énormes.

Il est évident que le problème énergétique des compresseurs se situe dans leur marche à vide et le fait qu'ils tournent sans cesse.

Cette dernière remarque nous permet d'introduire le point suivant qui sera consacré aux différents types de régulation.

5.2 Les modes de régulation

Dans ce point, nous déterminerons tout d'abord les différents modes de régulation interne des compresseurs et nous expliquerons pourquoi les Worthington sont mauvais.

Le fonctionnement continu (la modulation)

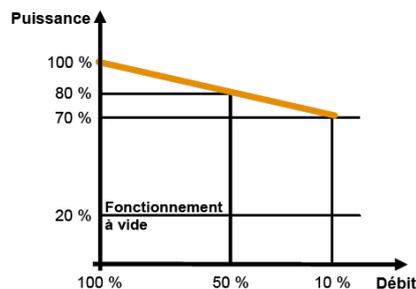


Figure 7 : le fonctionnement continu (la modulation)

Au point de vue application, le contrôle constant de la pression (aussi connu sous le contrôle par modulation ou par obturation) est le type de contrôle le plus simple. L'ouverture du clapet, de la soupape d'aspiration est contrôlée d'une façon variable selon la demande d'air. Lors de la charge partielle, la performance du compresseur diminue au lieu de la consommation d'énergie. C'est pour cette raison que la consommation d'énergie à demi-charge reste de +/- 80% de la consommation à pleine charge. Au point de vue économie d'énergie, ce type de contrôleur n'a donc pas sa place dans un compresseur stationnaire.

Le fonctionnement tout ou rien (TOR)

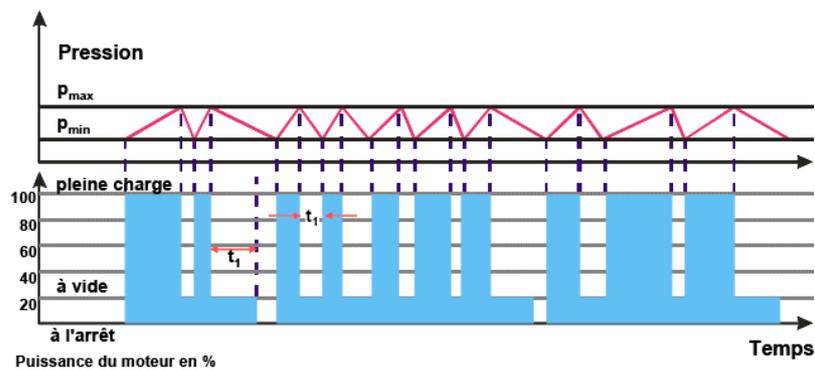


Figure 8 : le fonctionnement tout ou rien

La régulation TOR ou « pleine charge/marche à vide » est aujourd'hui la régulation la plus rencontrée pour des systèmes dépourvus de régulation de vitesse. Si la pression de service atteint la valeur de la pression p_{\min} , alors le compresseur est mis en fonctionnement et débite à pleine charge. En atteignant p_{\max} , le compresseur ne s'arrête pas mais continue à fonctionner à vide. Si il n'y a pas de nouvelle demande d'air, le compresseur s'arrête après un temps qui peut être défini (temporisation). Par contre, si une nouvelle demande a lieu, il repart en charge. L'inconvénient de ce type de fonctionnement est la perte d'énergie durant la marche à vide. Remarquons que la marche à vide consomme 20% de la puissance à pleine charge au lieu des 70% consommés par le mode continu.

La variation de vitesse

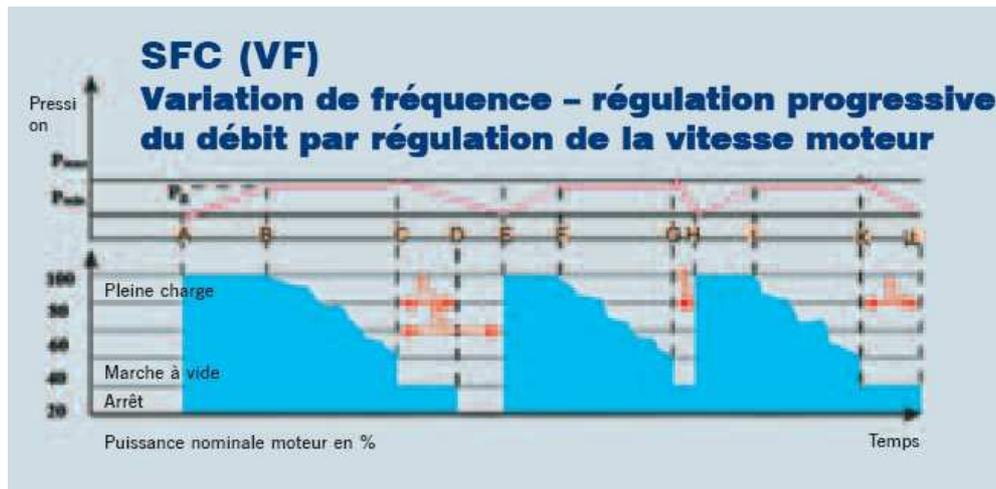


Figure 9 : la variation de vitesse

La régulation de la vitesse des compresseurs modernes est réalisée par modification de la vitesse de rotation grâce aux variateurs de fréquence. Le démarrage du compresseur a lieu à p_{\min} . Le moteur suit alors la courbe caractéristique jusqu'à une vitesse qui est définie par le quotient de la pression à chaque instant par la pression de réglage. Si la consommation d'air sort du domaine de régulation de la machine, alors, selon le contrôle défini, le système passe en fonctionnement à vide ou bien alors s'arrête.

La puissance consommée par le moteur du compresseur suit fidèlement le profil de consommation d'air des installations. Le gain d'énergie est donc significatif car les temps de marche à vide sont réduits.

Sur le graphe ci-dessous, nous pouvons constater que le compresseur à vitesse variable doit être utilisé dans une certaine plage de débit. En effet, à basse vitesse, le rendement n'est plus acceptable. Idem lorsque nous sommes en haute vitesse. Pour cause : il y a le variateur de vitesse qui consomme énormément d'énergie à pleine charge mais également les pertes mécaniques. Il est donc prévu dans les systèmes de gestion lorsqu'il y a plusieurs compresseurs que le compresseur à vitesse variable ne fonctionne que dans la plage où il est à son meilleur rendement.

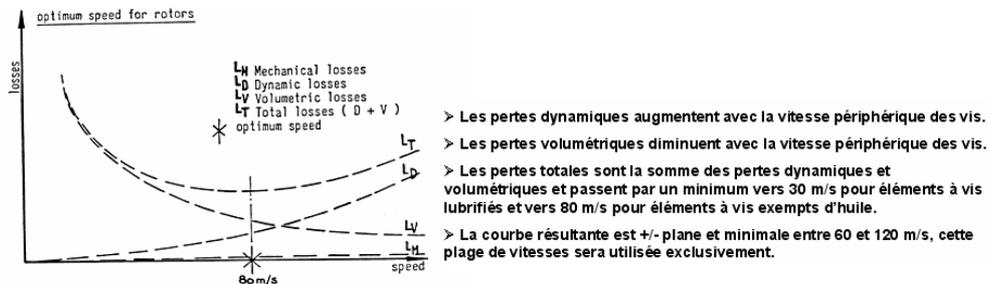


Figure 10 : différentes pertes en fonction de la vitesse périphérique des vis
(Source Atlas Copco)

Les compresseurs actuels

Les compresseurs actuels sont équipés d'une régulation interne de type continu, c'est-à-dire qu'il y a modulation de l'ouverture du clapet d'admission d'air entre les états totalement ouvert et totalement fermé. Comme nous l'avons vu, cette modulation entraîne un fonctionnement à vide énergivore. En effet, le rotor à palette reste sous pression et tourne dans son air.

Pour preuve, lors des mesures, nous avons constaté que la puissance absorbée, alors que le compresseur ne débitait pas, était de 31 kW sur les 45 kW disponibles, soit 68% de la consommation à pleine charge.

De plus, l'inconvénient majeur des compresseurs Worthington est qu'ils fonctionnent non-stop. Il n'y a, en effet, aucun système de régulation qui leur permet de s'arrêter. Par exemple, lorsque le débit est inférieur à 300 Nm³/h, il serait intéressant qu'il n'y ait plus qu'un seul Worthington en fonctionnement, cela permettrait d'économiser le fonctionnement à vide du second compresseur.

Mais l'entreprise ne peut se permettre de vérifier en tout temps le débit demandé et d'éteindre ou d'allumer le second compresseur, c'est pourquoi elle préfère en laisser 2 constamment en fonctionnement.

Il pourrait être intéressant d'envisager le marche-arrêt automatique des Worthington sur base de la consommation ou de la pression du réseau mais

il est peu intéressant d'effectuer des modifications sur des machines qui ont déjà plus 30 ans.

Nous calculerons le coût de fonctionnement des compresseurs au point suivant.

5.3 Coût annuel de fonctionnement des compresseurs

Le coût annuel de fonctionnement a été calculé de la manière suivante :
Sur base des mesures de débit effectuées durant les 16 jours, nous avons statistiquement caractérisé le débit.

Nous avons calculé les pourcentages de temps durant lesquels la demande d'air était comprise entre 100 et 125 Nm³/h, entre 125 et 150 Nm³/h, entre 150 et 175 Nm³/h et ainsi de suite.

Nous considérons ensuite que :

- de 0 à 300 Nm³/h, le compresseur Worthington Sud débite et le Worthington Nord fonctionne à vide.
- de 300 Nm³/h à la demande maximale, le Worthington Sud fonctionne à pleine charge et le compresseur Worthington Nord fait l'appoint.
- les 2 compresseurs Worthington suivent évidemment leur courbe de Cs.

Voici les constatations suite au calcul :

La consommation spécifique (Cs) moyenne de l'installation est donc de 252,7 Wh/Nm³ alors que la référence est de 120 Wh/Nm³.

Le coût de production d'1 Nm³ d'air est de 2 c€ /Nm³ alors qu'une bonne installation le produit pour 1 c€.

Ce résultat nous laisse entrevoir d'importants gains d'énergie réalisables.

Ces résultats sont confirmés par l'auditeur qui avait calculé une Cs de 248 Wh/Nm³.

6. Le séchage de l'air

6.1 L'installation générale de séchage

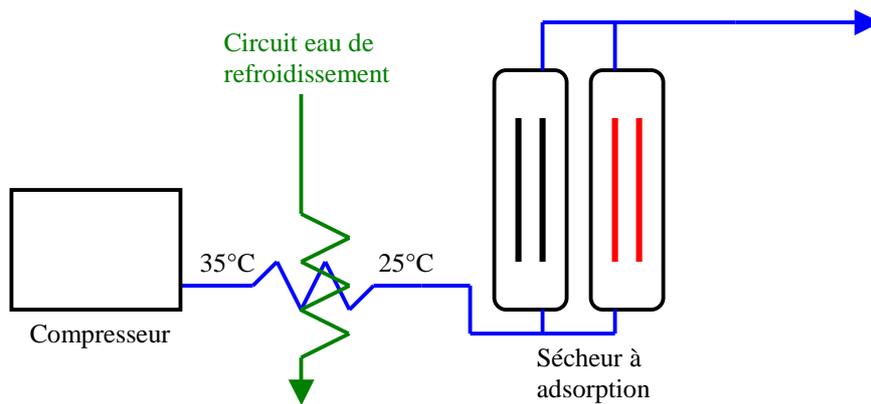


Figure 11 : l'installation de séchage de l'air

Actuellement, le séchage est réalisé de la manière suivante :

A la sortie de l'échangeur air/air intégré au compresseur, l'air est à une température de 35°C avant d'entrer dans un échangeur air/eau. L'eau provient du circuit de refroidissement général de toute l'Unité Recyclage. La température de ce circuit varie de 20 à 25°C suivant la saison.

Une fois sorti de cet échangeur, l'air maintenant à 25°C au maximum continue sa course vers le sécheur à adsorption d'où il ressort à un point de rosée de maximum -40°C sous pression.

6.2 Les sécheurs à adsorption

L'installation est actuellement équipée de 2 sécheurs à adsorption qui permettent d'atteindre des points de rosée inférieurs à -40°C.

Pourquoi un point de rosée si bas ?

Si un point de rosée si bas est requis, c'est tout simplement parce l'entreprise possède des conduites à l'extérieur. Il se peut donc que les

conduites soient soumises à des températures de l'ordre de -15°C durant l'hiver. L'effet du vent sur les conduites peut entraîner des températures encore plus basses. L'humidité de l'air pourrait alors se condenser, donc geler dans les tuyauteries et entraîner des dommages au sein des installations

7. Solutions envisagées

7.1 Dimensionnement de nouveaux compresseurs

La solution pour gagner un maximum d'énergie est de prévoir le remplacement des compresseurs Worthington.

Nous avons ciblé notre étude selon 2 axes :

Tout d'abord, nous avons prévu le remplacement des compresseurs dans le but de maintenir l'Unité Recyclage totalement autonome. C'est-à-dire qu'en cas de panne d'un des compresseurs, la production devra être assurée.

Une autre solution a également été étudiée : un seul compresseur plus conséquent assurerait l'alimentation en air comprimé de toute l'Unité Recyclage, le back up étant assuré par le 2^{ème} réseau. Nous rappelons que ces 2 réseaux sont isolés mais qu'ils peuvent être réunifiés par l'ouverture d'une vanne.

Solution 1 (Trois compresseurs) : 2 TOR (dont 1 en back up) et 1 variable

Tout d'abord, nous allons introduire le mode de régulation de l'ensemble de plusieurs machines lorsque l'une d'entre elles est une machine à vitesse variable.

Signalons tout d'abord que le compresseur à vitesse variable doit être le compresseur le plus puissant, celui qui débite le plus. En effet, si le compresseur à vitesse variable est par exemple de taille identique au compresseur TOR, lorsque le compresseur TOR sera mis en marche et que le compresseur à vitesse variable devra faire l'appoint, ce dernier risque de fonctionner à un taux de charge inférieur à 20%. A ce pourcentage de charge, son rendement est mauvais, voilà pourquoi nous éviterons cette

situation en prenant un compresseur à vitesse variable plus gros que les compresseurs TOR.

Soit les machines suivantes : 1 machine variable débitant 400 Nm³/h et une machine TOR débitant 300 Nm³/h.

Prenons dans notre cas, un débit variant de 130 à 700 Nm³/h.

De 130 à 320-360 Nm³/h, le compresseur à vitesse variable reprend le débit complet. L'autre compresseur est alors à l'arrêt. 320-360 Nm³/h correspondent à 80-90% de la charge maximale que peut reprendre un compresseur à vitesse variable. On ne dépasse jamais ce pourcentage car à plus de 90%, le rendement du compresseur à vitesse variable se dégrade et de plus, il fonctionne à une fréquence supérieure à 50Hz. Cette situation est donc déconseillée par les fournisseurs. A 360 Nm³/h, un compresseur TOR est mis en fonctionnement à pleine charge, le compresseur à vitesse variable fournit le surplus que ne peut fournir le compresseur TOR. Pour les débits supérieurs à 80-90% du débit maximal du compresseur à vitesse variable, les 2 compresseurs sont donc en fonctionnement.

La régulation et la mise en fonctionnement des compresseurs ne sont pas organisées en fonction du débit demandé mais en fonction de la pression de consigne et de la pression mesurée sur le réseau, la pression du réseau étant une image du débit demandé. La pression diminue si le débit augmente et inversement.

Le bon fonctionnement du système est assuré par un gestionnaire supérieur qui tient compte d'une multitude de paramètres dont notamment la pression du réseau, l'état actuel de chaque compresseur, le nombre d'heures de marche et les capacités des compresseurs.

Dans notre cas, nous dimensionnons les compresseurs de la manière suivante :

- Le compresseur à vitesse variable doit être plus important que les 2 compresseurs TOR.
- La somme du débit maximal de l'ensemble des compresseurs (TOR+variable) doit être supérieure à 700 Nm³/h (débit maximum demandé par l'installation).

- La somme du débit des 2 compresseurs TOR doit être supérieure à 700 Nm³/h.

De la sorte, nous choisissons dans le catalogue des fournisseurs des machines répondant à nos critères.

Solution 2 : Un seul compresseur à vitesse variable

Pour dimensionner un compresseur à vitesse variable, il faut seulement tenir compte du débit maximum qui lui sera demandé. Partant de là, nous pouvons choisir dans le catalogue du fournisseur le compresseur correspondant. L'inconvénient de cette solution est que lorsque le compresseur est entretenu ou s'il tombe en panne, l'Unité Cuivre est dépendante de l'autre réseau.

7.2 Méthode de calcul du gain d'énergie sur les compresseurs

Solution 1 (Trois compresseurs) : 2 TOR et 1 variable

Le coût annuel de fonctionnement avec 2 compresseurs (un compresseur à vitesse variable, 2 compresseurs TOR dont 1 en back up) a été calculé de la manière suivante :

Pour comparer les solutions au cas actuel, nous avons évidemment repris les mêmes pourcentages de temps de fonctionnement aux différents débits.

Etant donné que les fournisseurs nous ont fourni les courbes de Cs de leur compresseur à vitesse variable, nous pouvons faire correspondre à un débit, une consommation énergétique.

Rappelons que le compresseur à vitesse variable fonctionne seul tant que la demande reste inférieure à 80% de son débit maximum. Au-delà de ces 80%, le compresseur TOR fonctionne à pleine charge et c'est le compresseur à vitesse variable qui reprend le débit supplémentaire.

Vous trouverez ici, la courbe de Cs et le tableau de calculs complet pour un seul fournisseur.

Soit la combinaison d'un compresseur à vitesse variable RLR 60V (476 Nm³/h) et un compresseur TOR RLR 40 (335 Nm³/h) de chez X :

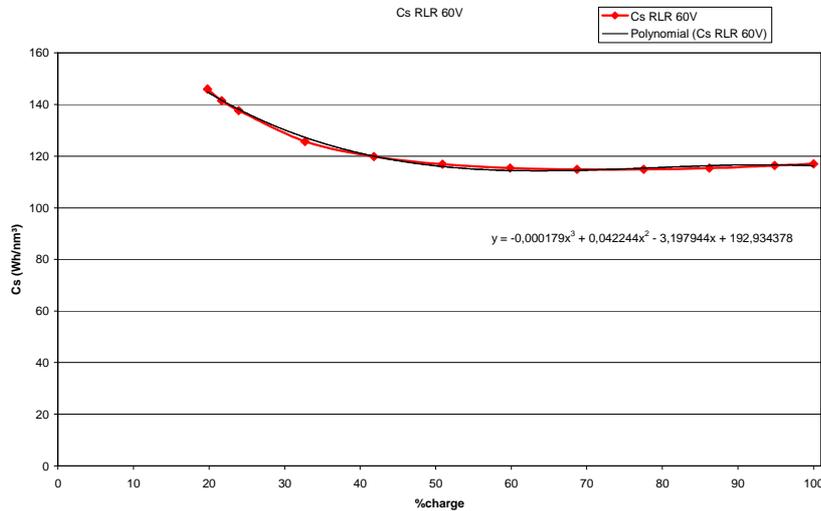


Figure 12 : courbe de consommation spécifique du compresseur à vitesse variable (RLR 60V)

Sachant que le fonctionnement actuel des compresseurs coûte 56 696 €/an à l'entreprise, le gain s'élève donc à 33426.7 €/an avec les compresseurs de chez X.

Solution 2 : Un seul compresseur à vitesse variable

Le coût annuel de fonctionnement avec un nouveau compresseur à vitesse variable a été calculé de la manière suivante :

Pour comparer les solutions au cas actuel, nous avons évidemment repris les mêmes pourcentages de temps de fonctionnement aux différents débits.

Nous avons calculé les pourcentages de temps durant lesquels la demande d'air était comprise entre 100 et 125 Nm³/h, entre 125 et 150 Nm³/h, entre 150 et 175 Nm³/h et ainsi de suite.

Etant donné que les fournisseurs nous ont fourni les courbes de Cs de leur compresseur à vitesse variable, nous pouvions faire correspondre à un débit, une consommation énergétique.

Nous insérerons dans le corps du travail, la courbe de Cs et le tableau de calculs complet pour un seul fournisseur.

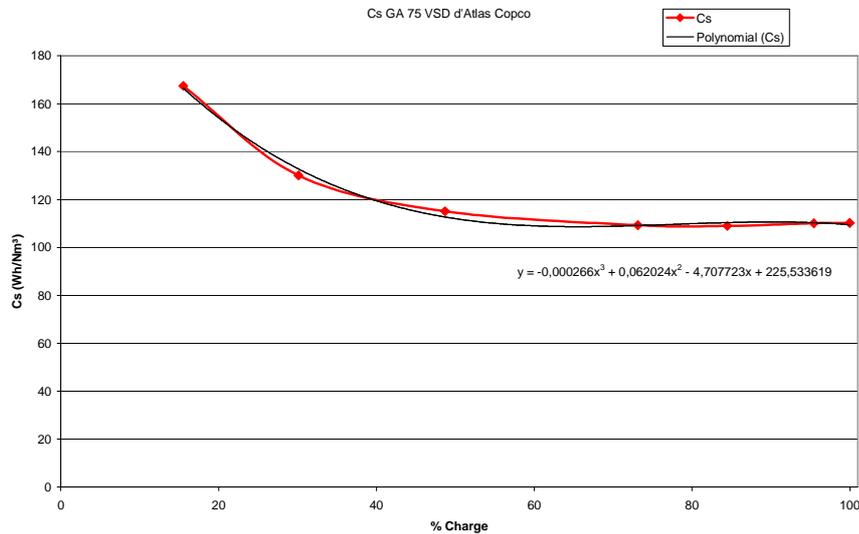


Figure 13 : courbe de Cs du compresseur GA 75 VSD de chez Y

D'après cette courbe, nous pouvons faire correspondre à tout débit, une puissance. Connaissant la proportion de temps durant laquelle le compresseur fonctionne à ce débit, nous pouvons calculer l'énergie consommée à ce débit. En sommant l'énergie consommée des différentes plages de débit, nous connaissons la consommation journalière et donc la consommation annuelle.

Sachant que le fonctionnement actuel des compresseurs coûte 56 696 €/an à l'entreprise, le gain s'élève donc à 29 094 €/an avec ce compresseur GA 75 VSD de chez Y.

7.3 Dimensionnement d'un nouveau système de séchage

Une solution a été étudiée pour limiter le fonctionnement des sécheurs à adsorption qui sont de gros consommateurs d'énergie.

Le point de rosée conseillé pour les types d'utilisation (vérins à air comprimé, distributeurs d'air comprimé, air de mesure, etc...) est de + 3°C.

Si nous travaillons actuellement à un point de rosée inférieur à -40°C sous pression, c'est tout simplement parce l'entreprise possède des conduites extérieures. Si nous regardons dans un diagramme psychrométrique nous constatons que cette température de point de rosée de -40°C sous pression correspond à un point de rosée de -20°C en détendu. Ce qui est suffisant pour nos hivers et naturellement beaucoup trop bas pour les saisons plus douces.

Nous avons donc pensé incorporer un sécheur frigorifique entre le ou les compresseurs et le sécheur à adsorption qui constitueront la nouvelle installation. Celui-ci permettra d'obtenir un point de rosée de $+3^{\circ}\text{C}$ sous pression et de consommer beaucoup moins d'énergie (1.5 - 2 kW).

Durant les mois où il ne gèle pas, le sécheur à adsorption sera by-passé. Etant donné qu'il n'y a pas de possibilité de gel du 15 mai au 15 octobre, le sécheur frigorifique peut parfaitement convenir pour assurer la déshumidification de l'air comprimé. Ceci constitue le premier avantage de l'installation d'un sécheur frigorifique. Il est également envisageable d'installer une régulation de l'ouverture ou la fermeture des vannes en prenant compte de la température extérieure. Par exemple, lorsque la température est supérieure à 10°C , on ne travaille que sur le sécheur frigorifique.

Le second avantage est que le sécheur frigorifique garantit lors de ses périodes de fonctionnement simultané avec le sécheur à adsorption, une augmentation de la durée des cycles d'activité des cloches

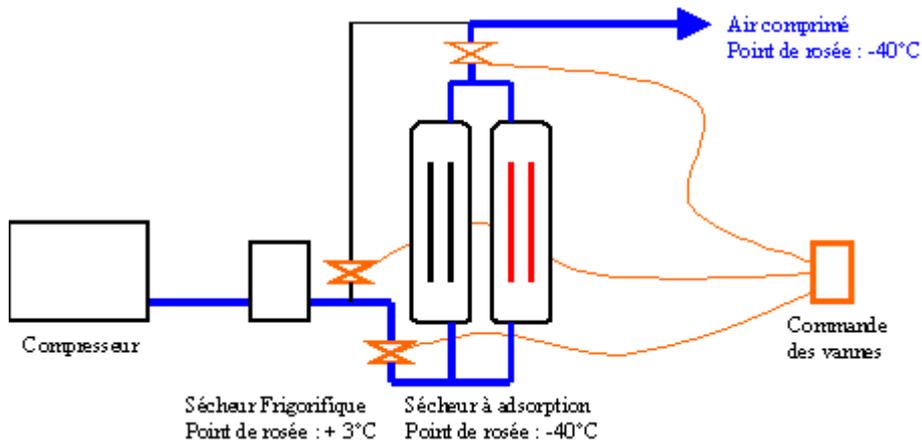


Figure 14 : schéma de principe du by-pass du sécheur à adsorption
Mode hiver.

Fonctionnement d'hiver (7 mois/an)

Le fonctionnement d'hiver serait le suivant :

Un sécheur frigorifique serait placé entre le ou les compresseurs afin de diminuer le point de rosée sous pression à +3°C. Ce fonctionnement est réellement intéressant si le sécheur à adsorption est équipé d'une régulation de basculement de cloche par rapport au point de rosée.

Explication :

Actuellement, les sécheurs à adsorption sont équipés d'une régulation qui permute l'activité des cloches de séchage toutes les 4h30. Mais rien ne dit qu'après 4h30, la cloche qui était active n'est plus capable de sécher l'air, que son point de rosée n'est plus suffisamment bas. Le cycle s'inverse sans doute trop tôt, d'autant plus que le sécheur à adsorption est surdimensionné. Le basculement de cloche devrait avoir lieu lorsque le point de rosée de la cloche active n'est plus suffisamment bas.

Dans notre cas, le sécheur Anderberg qui peut être récupéré pourrait être équipé d'une régulation de basculement des cloches par rapport au point de rosée.

Fonctionnement d'été (5 mois/an)

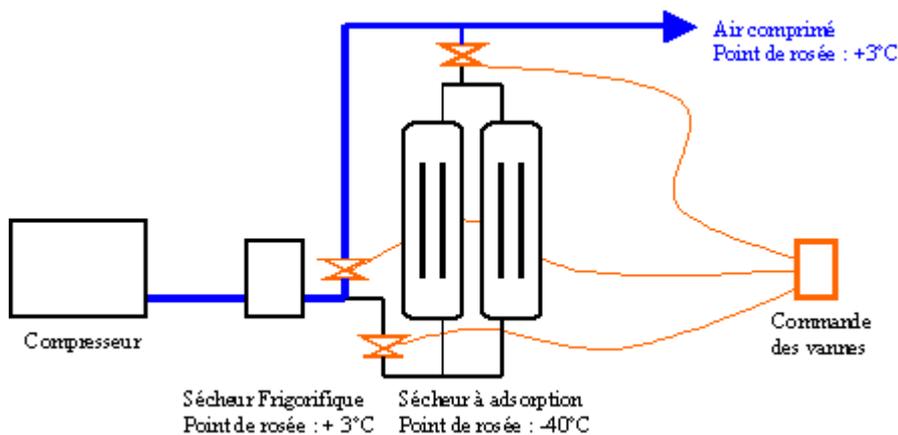


Figure 15 : schéma de principe du by-pass du sécheur à adsorption
Mode été.

5 mois par an (au moins), il n'est pas nécessaire de sécher l'air à un point de rosée de -40°C sous pression. Il est donc énergétiquement intéressant de by-passer le sécheur à adsorption durant la période où le risque de gel est faible, c'est-à-dire du 15 mai au 15 octobre.

Il faut prévoir un système de régulation ouvrant et fermant les vannes tout ou rien (TOR) aux instants voulus.

Conclusion

Type de fonctionnement	Coût de fonctionnement €/an	Gain annuel €/an
Actuel	5513,0	Néant
Frigo+sécheur ads	4469,5	1043,4
Frigo+sécheur ads régulé	1717,8	3795,2

Nous pouvons constater que le gain d'énergie à réaliser est nettement inférieur au gain réalisable grâce aux compresseurs. Néanmoins, nous pouvons réduire le coût de séchage de 70% par rapport au meilleur cas de fonctionnement actuel.

La solution associant un type de fonctionnement été/hiver et une régulation du basculement de cloche par rapport au point de rosée est nettement plus avantageuse que celle associant un type de fonctionnement été/hiver sans régulation de point de rosée.

Nous préconiserons donc la solution d'un sécheur frigorifique associé à une régulation du basculement de cloche de séchage par rapport au point de rosée. Nous verrons que cette solution est plus coûteuse mais plus rentable.

8. Choix de la solution et du fournisseur

Nous développons en ce point la comparaison entre les 2 solutions et nous orienterons l'entreprise sur les fournisseurs qui nous paraissent les plus intéressants.

8.1 Autonomie de l'Unité Recyclage

Il est évident que l'entreprise doit choisir dans un premier temps, si elle désire maintenir l'Unité Recyclage totalement autonome ou pas. Si la solution choisie est la solution composée de 3 machines (1 à vitesse variable et 2 TOR dont 1 en back up), l'Unité Recyclage sera totalement indépendante et pourra répondre à la demande d'air comprimé en tout temps. Par contre, si la solution choisie est la solution comprenant 1 compresseur à vitesse variable, lors des entretiens ou lors d'une panne, l'Unité recyclage devra être alimentée par le second réseau situé dans le second secteur de l'usine.

8.2 Consommation énergétique et investissement

	1 machine			3 machines		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Cs (Wh/Nm ³)	134	123	112,4	118,5	114,9	112,4
Consommation annuelle (kWh/an)	389042,8	351592,7	321845,7	338967,9	328851	321845,7
Coût annuel (€/an)	30597,1	28127,4	25747,6	27117,4	26308,1	25747,6
Gain annuel (€/an)	31611,9	34081,6	36461,4	35091,6	35900,9	36461,4
Total investissement (€)	42163	42174	25866	54563	55409	48391
Pay back total (année)	1,3	1,2	0,8	1,6	1,5	1,3

Nous observons que la Cs moyenne est meilleure pour tous les fournisseurs dans le cadre de la solution à 3 machines. Notons toutefois que Z obtient la même Cs dans les 2 cas.

De manière générale, l'investissement est plus important pour la configuration à 3 machines. Ceci est dû au fait qu'une machine est achetée pour assurer le back up en cas d'arrêt d'une des 2 machines en fonctionnement.

L'amortissement est plus rapidement réalisé lors de l'achat d'une seule machine.

9. Conclusion

Avant d'entamer cette conclusion, nous tenons à recadrer le contexte de notre étude. En effet, il nous a été demandé d'étudier le réseau d'air comprimé et d'y apporter un gain énergétique. Néanmoins, nous avons constaté qu'il serait intéressant d'étudier le second réseau avant d'effectuer tout investissement.

Nous conseillons à l'entreprise de réaliser une étude similaire en connectant les 2 réseaux. Lorsque nous voyons le gain d'énergie réalisable sur le réseau d'air comprimé de l'Unité Cuivre, il ne serait pas étonnant que le gain d'énergie réalisable sur le second réseau soit du même ordre de grandeur.

Il peut être également intéressant de prévoir une nouvelle salle qui pourrait accueillir la nouvelle installation au niveau de l'Unité recyclage.

Cependant, voici les résultats et la conclusion en ce qui concerne l'étude qui nous a été demandée.

10. Situations futures et gains financiers engendrés

Le point le plus important pour l'entreprise est de constater que le gain d'énergie réalisable est de l'ordre de 50 %, soit 36000 € /an.

D'une consommation annuelle de 775000 kWh/an soit 62000 €/an, nous en arrivons à 320000 kWh/an soit 26000 €.

Nous résumons ci-dessous les 2 solutions envisagées. Chacune d'elles présente des avantages et des inconvénients que nous proposons à l'entreprise d'analyser.

Les données utilisées font référence aux fournisseurs Z.

Solution 1 : Trois compresseurs

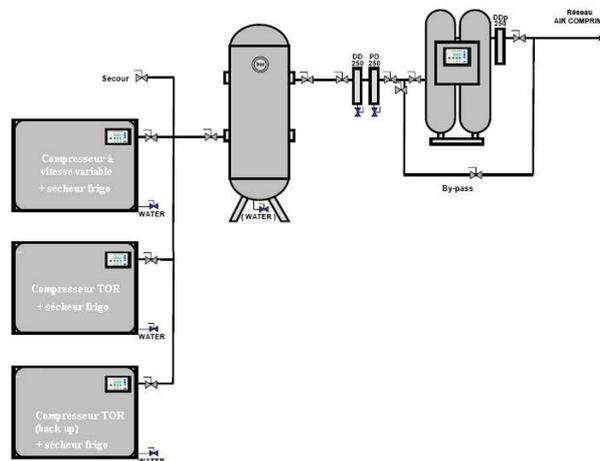


Figure 16 : schéma d'ensemble de la solution à 3 compresseurs

Avantage : autonomie par rapport au second réseau en cas de panne d'un compresseur ou d'entretien de l'un d'entre eux.

Inconvénient : l'investissement est plus important.

Cette solution nécessite donc l'investissement de 3 compresseurs : 1 compresseur à vitesse variable et 2 compresseurs tout ou rien (TOR). Deux compresseurs seront suffisants pour fournir la demande maximale de 700 Nm³/h, un compresseur assurera le back up en cas de défectuosité d'un des 2 compresseurs prioritaires. L'Unité Recyclage demeure donc totalement indépendante.

Le sécheur à adsorption de marque Anderberg, présent actuellement à la sortie des compresseurs Nord et Sud, devra être muni d'une régulation par rapport à son point de rosée permettant d'allonger ses cycles de fonctionnement, ce qui diminuera de 50% sa consommation lors de son fonctionnement. De plus, une régulation par rapport à une minuterie ou alors par rapport à la température extérieure devra by-passer le sécheur à adsorption durant les mois de l'année où la température est supérieure à 7°C (5 mois/an minimum). Ce qui diminue la consommation du sécheur de 40 %. La consommation totale du système de séchage sera finalement réduite de 80%.

A retenir :

Coût de fonctionnement actuel	62.209	€/an
Coût de fonctionnement futur	25.748	€/an
Gain annuel	36.461	€/an
Investissement	48.391	€
Pay back	1,3	an

La consommation énergétique annuelle passe de 777610 kWh/an à 321846 kWh/an soit de 62209 €/an à 25748 €/an.

Le gain annuel est de 36461€/an.

L'investissement de 48391€ est amorti en 1.3 an.

Dans cette configuration, la seule salle pouvant répondre à ce nombre de machines est la salle des Nord et Sud.

Solution 2 : Un compresseur

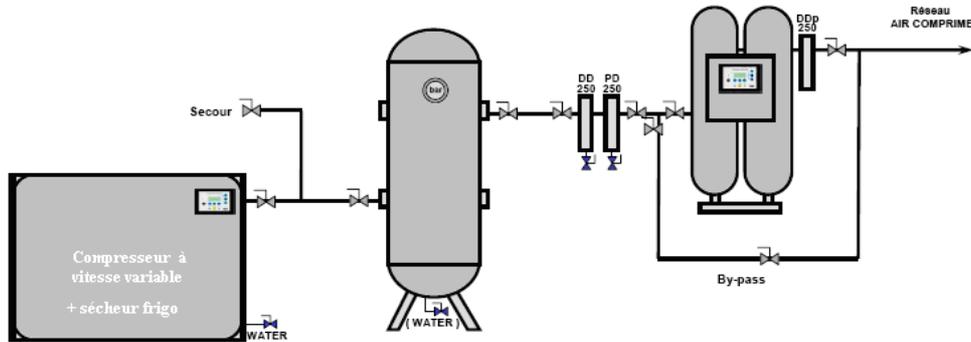


Figure 17 : schéma d'ensemble de la solution à 1 seul compresseur

Avantage : ne nécessite l'investissement que d'une seule machine

Inconvénient : dépendance au second réseau lorsqu'il y a une panne ou un entretien.

Cette solution nécessite l'investissement d'1 compresseur : 1 compresseur à vitesse variable. Dans cette configuration, l'Unité de Recyclage n'est pas indépendante en cas de défectuosité du compresseur mais aussi lors de son entretien.

Le même équipement que précédemment doit être installé sur le sècheur à adsorption de marque Anderberg.

A retenir :

Coût de fonctionnement actuel	62.209	€/an
Coût de fonctionnement futur	25.748	€/an
Gain annuel	36.461	€/an
Investissement	25.866	€
Pay back	0,8	an

La consommation énergétique annuelle passe de 777610 kWh/an à 321846 kWh/an soit de 62209 €/an à 25748 €/an.

Le gain annuel est donc de 36461 €/an.

L'investissement de 25866 € est amorti en 0.8 an.

Dans cette configuration, la nouvelle installation peut être disposée dans l'une ou l'autre salle, l'espace y est suffisant dans les 2 cas.

11. Bibliographie

- [1] REEVE A., *Débitmétrie : le choix d'un débitmètre*, Revue Pratique de Contrôle Industriel n° 185, traduction de Pierre Thureau, février 1994.
- [2] LEFEBVRE J., *Mesure des débits et des vitesses des fluides*, Edition Masson, 1986.
- [3] FLOWTEC AG, *Flow Hand-Book, multiples auteurs, 1989*.
- [4] PANORAMIS Atlas Copco.
- [5] Le carnet du régleur, Edition Valence.
- [6] Cours du séminaire KAESER.
- [7] Cours de mécanique des fluides de 2^{ème} ; *Mr L. Docquier ISIC HERB*
- [8] Cours de thermodynamique de 2^{ème} et 3^{ème} ; *Mr Demoulin ISC HERB*
- [9] <http://hlbmatos.free.fr/Compresseurs> : site sur les compresseurs (principe)
- [10] <http://www.gatt.club.fr/> : généralité sur les capteurs
- [11] <http://www.drm.ch/pages/fundabac.htm> : site sur le Fundabac
- [12] <http://www.verder.fr/> : site sur les pompes Verder-Almatec
- [13] <http://www.ademe.fr/> : généralité sur les stations de compression
- [14] Documents techniques Worthington
- [15] Documents techniques d'Atlas Copco
- [16] Documents techniques de Kaeser
- [17] Documents techniques de Compair
- [18] Catalogue Vannes Green-Fisher