

# Compresseurs, le coeur des installations de réfrigération

MAÏTÉ GODERIS | UGENT, XANDER VAN HEULE | UGENT, ERIK DUVELLIÉ | BITZER, STEVEN LECOMPTÉ | UGENT

Dans la réfrigération par compression de vapeur, un agent frigorigène est mis en circulation au moyen d'un compresseur. L'agent frigorigène extrait et libère de la chaleur en raison des différentes pressions dans le système, créées avec le compresseur et la soupape de détente. À basse pression, l'agent frigorigène va s'évaporer, extrayant la chaleur de l'espace qui doit être refroidi (évaporateur). À haute pression, il se condense et libère de la chaleur (condensateur). Dans un tel système, le compresseur est le seul composant où se produit une conversion d'énergie entre le travail mécanique (via l'arbre de transmission) et le flux. En dehors du réglage sur les soupapes, c'est aussi le seul composant qui permet un réglage actif. Il est clair que le compresseur est un composant essentiel d'un cycle de réfrigération à compression de vapeur. Ce n'est donc pas une coïncidence si les premières machines commerciales du XIXe siècle étaient basées sur les principes du compresseur à piston, fondé sur l'expérience des machines à vapeur. Avant d'aborder les développements actuels et les défis pour le futur, quelques concepts de base ont été actualisés.

## Types de compresseurs et applications

Les compresseurs peuvent être scindés en deux catégories : les turbocompresseurs et les compresseurs volumétriques. Cette dernière catégorie comprend, entre autres, les célèbres compresseurs à vis, Scroll, à piston et à palettes. Chaque type de compresseur présente des caractéristiques spécifiques et des applications typiques. Celles-ci sont brièvement expliquées ci-dessous.

### Turbocompresseurs

Dans les turbocompresseurs, le flux se déplace généralement radialement vers l'extérieur à travers la turbine. La pression est augmentée de façon dynamique,

par la rotation qui se produit pendant le passage. Les turbocompresseurs, en raison de leurs débits volumétriques importants, sont principalement utilisés dans des systèmes ayant une puissance

de réfrigération très élevée (grands systèmes de climatisation et refroidisseurs). En gros, il existe deux types différents. Le type axial est principalement destiné aux grands débits, tandis que

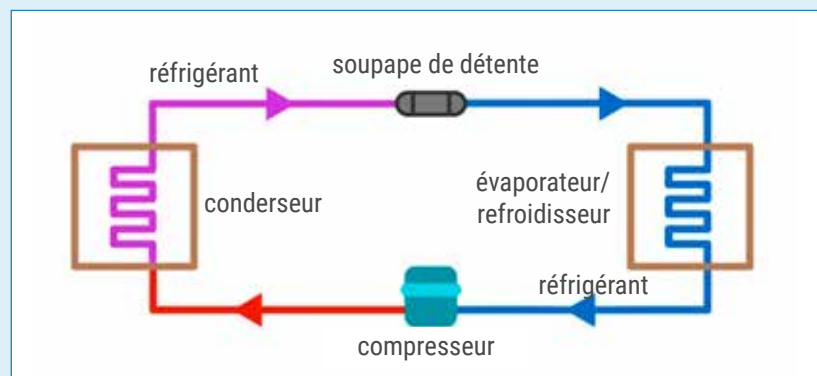


Figure 1 : Schéma d'ensemble de la réfrigération par compression de vapeur.

les turbocompresseurs centrifuges sont principalement destinés aux applications à haute pression.

Les turbocompresseurs peuvent atteindre un rendement énergétique élevé et sont compacts pour les débits importants. Ils ne nécessitent pas d'huile et n'ont pas de soupapes (moins d'entretien), ont un fonctionnement silencieux et offrent un bon réglage de la vitesse. Cependant, seul un faible rapport de pression est possible par étage de compression, et les turbocompresseurs sont sensibles à l'aspiration de gouttelettes de liquide (c'est-à-dire à une surchauffe trop faible). Les turbocompresseurs sont adaptés à l'utilisation de l'eau comme fluide frigorigène.

#### Compresseurs volumétriques

Outre les turbocompresseurs, il existe également des compresseurs volumétriques. Dans les turbocompresseurs, l'agent frigorigène est comprimé en augmentant sa vitesse. Dans les compresseurs volumétriques, cela se fait en réduisant le volume d'un espace géométrique fermé. Certains types de compresseurs volumétriques sont expliqués ci-dessous.

#### • Compresseur Scroll

Le "scroll" utilise un concept de compactage breveté pour la première fois en 1905. Un "scroll" est une spirale évolutive qui, combinée à un "contre" scroll, formant une série de "poches" en forme de croissant entre les deux éléments. Pendant la compression, une spirale reste stationnaire (scroll fixe), tandis que l'autre scroll (scroll circulant) se déplace autour de la spirale stationnaire (en orbite, mais sans tourner). Pendant ce mouvement, les chambres situées entre les deux spirales sont déplacées du bord vers le centre, diminuant simultanément le volume. Lorsque la chambre atteint le point central, le gaz comprimé est évacué par le biais de la sortie qui s'y trouve. Comme le gaz est



Compresseur Scroll

comprimé dans plusieurs chambres en même temps, le processus se déroule de manière très uniforme. Tant le processus d'aspiration (dans la partie extérieure des éléments du scroll) que le processus d'évacuation (dans la partie intérieure) se déroulent presque en continu.

Parce que le compresseur Scroll est aussi un excellent moteur d'expansion de gaz, il peut basculer après l'arrêt, en cas d'augmentation de la pression interne. Pour éviter cela, un clapet anti-retour est installé du côté haute pression. Les compresseurs Scroll sont souvent utilisés dans les pompes à chaleur, la climatisation et les refroidisseurs à eau/glycol.

Les compresseurs Scroll sont généralement utilisés pour des applications avec de plus petites puissances frigorifiques allant jusqu'à 40 kW. Des COP élevés peuvent être obtenus avec des rapports de pression faibles à moyens. En outre, aucune soupape n'est nécessaire pour ces applications. Les compresseurs Scroll pour les applications de congélation peuvent être équipés d'une soupape de décharge. Les compresseurs Scroll assurent une compression uniforme avec de faibles pulsations de gaz et un fonctionnement silencieux. En raison de l'absence (partielle) de soupapes et, dans certaines versions, de la possibilité de réglage axial et radial de la spirale, ce type de compresseur est relativement insensible aux faibles surchauffes.



Schroefcompressor

#### • Compresseur à vis

Les compresseurs à vis (à double rotor) sont constitués d'un boîtier contenant deux rotors hélicoïdaux en rotation. Pendant la rotation, le fluide frigorigène se déplace du côté de l'entrée vers le côté de la sortie. L'espace entre les spirales est réduit, ce qui comprime le fluide frigorigène. Un compresseur à vis a un rapport volumétrique intégré fixe  $V_i$  (qui peut être variable grâce à un curseur intégré). En outre, un clapet anti-retour est nécessaire pour éviter le reflux après l'arrêt.

Le compresseur à vis est léger, compact, comporte peu de parties mobiles, pas de soupape et convient pour des puissances très élevées. Le compresseur présente un bon équilibre au sol et garantit peu de vibrations. Des vitesses élevées peuvent être atteintes et une large plage de régime est disponible grâce à l'engrenage en continu. Les compresseurs à vis sont insensibles aux faibles surchauffes. Le COP le plus élevé est obtenu par rapport à la pression optimale.

Une étanchéité est nécessaire entre les rotors par injection d'huile. Le refroidissement à l'huile peut également permettre d'élargir le domaine d'application. Pour l'huile, un séparateur d'huile interne ou externe est nécessaire. Outre les compresseurs à vis à double rotors, des modèles à un seul rotor sont également proposés, équipés de disques dentés rotatifs s'emboîtant latéralement (rotors de passage). Ils

sont principalement utilisés pour les refroidisseurs eau/glycol.

• **Compresseurs à piston**

Les compresseurs à piston (conception alternative) se composent d'une chambre de cylindre contenant un piston mobile. La chambre est reliée à la fois au côté basse pression et au côté haute pression par des soupapes. Lors de l'aspiration, la vanne d'entrée est ouverte et augmente le volume du cylindre. Lors de la réduction du volume du cylindre, le fluide frigorigène est comprimé. Lorsque les conditions souhaitées sont atteintes, la soupape d'échappement est ouverte et le fluide frigorigène peut quitter le compresseur. Les compresseurs à piston conviennent pour les grandes puissances, où 8 à 24 cylindres peuvent être combinés par machine.

Les compresseurs à piston nécessitent donc la présence de soupapes ; celles-ci peuvent également être utilisées pour la régulation de puissance. Si le mécanisme du vilebrequin à piston est utilisé, il y a un rapport volumétrique fixe intégré, alors que pour la variante à piston linéaire/libre, il y a un volume réglable. En outre, il existe des variantes à piston double.

• **Compresseur à palettes**

Un compresseur à palettes se compose d'un stator cylindrique dans lequel tourne un rotor qui est supporté au centre (excentrique). Ce rotor est la

seule partie mobile du compresseur et contient des cloisonnements qui glissent de façon radiale vers l'intérieur et vers l'extérieur. Lorsque le rotor tourne, les cloisonnements volent contre la paroi intérieure du stator. C'est ainsi que se forment les volumes : entre les deux cloisonnements, la paroi du stator et le rotor. Au fur et à mesure que le rotor tourne, cet espace se réduit et la compression a lieu.

Le compresseur à palettes nécessite une lubrification à l'huile, afin d'éliminer le contact des palettes avec le rotor. Les compresseurs à palettes se caractérisent par leur faible régime, par exemple par rapport à un compresseur à vis. Les compresseurs à palettes conviennent pour un fonctionnement à long terme et sont donc souvent utilisés pour des applications continues, par exemple dans l'industrie du papier, l'industrie alimentaire et le secteur pétrochimique. Grâce à leur construction robuste, ces compresseurs sont également moins sensibles à l'encrassement.

**Performance et quantités caractéristiques**

**Puissance de refroidissement**

Les performances d'un compresseur ont été et sont souvent caractérisées par des variables orientées système, telles que la puissance de refroidissement ou le coefficient de performance (COP). Ces variables sont relativement faciles à mesurer et leur importance

est immédiatement reconnaissable.

Toutefois, ces paramètres ne dépendent souvent pas uniquement du compresseur, mais sont également influencés par d'autres composants. Le fonctionnement optimal ou correct du compresseur ne peut pas en être directement déduit. C'est pourquoi l'accent est mis aujourd'hui sur les quantités qui dépendent uniquement du fonctionnement du compresseur lui-même.

**Rendement volumétrique**

Une variable importante est le rendement volumétrique ou le degré de remplissage. Cette variable est le rapport entre le débit massique réel comprimé et le débit massique maximal où les pertes ne sont pas prises en compte. Elle peut être déterminée directement à partir du volume déplacé et de la vitesse de rotation. Il est évident que cette caractéristique ne peut être utilisée que pour les machines volumétriques et non pour les turbocompresseurs.

**Performance énergétique**

En outre, la performance énergétique du compresseur peut être comparée à un processus de référence. Le rendement isentropique en est un exemple : la puissance absorbée réelle du compresseur est comparée à la puissance d'un processus de compression réversible et adiabatique. Il convient de noter que la plupart des compresseurs ne sont pas adiabatiques. De plus, il existe d'autres options à considérer comme processus de référence comme par exemple, un processus isotherme. Il s'agit du scénario de référence le plus favorable d'un point de vue énergétique, mais difficile à atteindre dans la pratique. Un processus polytropique peut alors fournir une estimation en tant que scénario intermédiaire. Pour ce faire, il faut toutefois déterminer un exposant polytropique. Cet exposant dépend aussi fortement du fluide frigorigène utilisé. Par conséquent, les performan-



**Compresseur à piston**



**Compresseur à palettes**



ces d'un compresseur avec différents fluides frigorigènes ne peuvent pas être évaluées à l'aide de ce paramètre.

### Performance thermique

En outre, les pertes de chaleur peuvent également être évaluées. Cela peut se faire, par exemple, en définissant un facteur de perte de chaleur : le rapport entre les pertes de chaleur et la consommation totale de puissance. Pour les petits compresseurs hermétiques, les pertes de chaleur peuvent représenter 70 % de la puissance totale. Pour les compresseurs plus grands, dotés d'un système de refroidissement actif, cette proportion est plutôt de l'ordre de 10 à 20 %.

### Norme européenne

En Europe, les compresseurs sont caractérisés sur base de la norme EN 13771-1. Celle-ci propose des procédures pour tester les compresseurs en fonction de trois paramètres : la pression d'évaporation, la pression de condensation et la surchauffe à l'entrée du compresseur. Pour ce faire, le débit massique et la consommation énergétique sont mesurés. La norme requiert deux instruments différents pour mesurer le débit massique. L'écart maximal entre ces deux mesures est limité à 4 %.

### Incertitudes

Il est important de garder à l'esprit que lorsque les paramètres ci-dessus sont déterminés, des incertitudes sont présentes. Ces incertitudes peuvent avoir plusieurs causes. Tout d'abord, les erreurs sur les résultats des appareils de mesure utilisés joueront un rôle important. En outre, la reproductibilité des expériences joue également un rôle. La même expérience peut donner des résultats différents à un endroit différent. Ceci est influencé par la qualité de l'installation, la méthode de mesure et d'étalonnage, les propriétés du fluide frigorigène, etc. Il existe également des incertitudes sur la conception du

compresseur, notamment en ce qui concerne le volume mort, l'efficacité du moteur, les fuites internes, l'alignement des roulements, etc.

Les valeurs fonctionnelles des compresseurs sont souvent préparées sur la base d'un nombre limité de points de mesure ; en plus de ces points de fonctionnement, la valeur réelle peut donc varier. Les écarts moyens sur les valeurs de débit massique et de puissance sont respectivement de 4 et 5 %. Les erreurs absolues maximales peuvent atteindre 9 et 17 %.

### Contrôle et maintenance

#### Contrôle de la capacité

Le contrôle de la capacité peut se faire de plusieurs manières. Les méthodes les plus courantes sont : le contrôle marche/arrêt, la connexion en parallèle de plusieurs compresseurs, l'ajout d'une dérivation et le réglage de la vitesse. Ces méthodes sont brièvement présentées ci-dessous et complétées par quelques méthodes de contrôle de la capacité spécifiques aux compresseurs.

- **Contrôle marche/arrêt** : le moyen le plus simple est d'allumer et d'éteindre le compresseur pour fournir la puissance demandée. Cette méthode donne généralement lieu à des performances médiocres en raison de la grande variabilité des conditions de fonctionnement. Cette technique ne convient que si l'on dispose d'un tampon thermique suffisamment grand ou si la charge est presque constante.
- **Connexion en parallèle** : ici, plusieurs compresseurs peuvent être placés en parallèle. Une bonne régulation est possible selon que les compresseurs sont en service ou éteints. Cette méthode peut s'avérer pratique si la demande a une large portée. Ce contrôle de la capacité peut également être appliqué avec des contrôles supplémentaires par compresseur.
- **Dérivation** : une autre méthode consiste à mettre en place une dérivation. Cela peut se faire à l'intérieur du com-

presseur ou à l'extérieur du système. L'avantage est que le compresseur peut toujours fonctionner à son point de fonctionnement le plus favorable.

L'inconvénient est que le travail du compresseur n'est pas réduit ou seulement légèrement pour une capacité réduite.

- **Réglage de la vitesse** : la régulation de la vitesse se fait principalement à l'aide d'un convertisseur sur un moteur asynchrone où la vitesse peut ainsi être modulée. En modifiant la vitesse, on peut adapter directement la capacité des compresseurs volumétriques, en supposant que la géométrie et, le cas échéant, le calage des soupapes restent inchangés. Pour les turbocompresseurs, on obtiendra une nouvelle courbe caractéristique qui donne la relation entre la pression et le débit.
- **Contrôle des soupapes** : dans les compresseurs à piston, la capacité peut être contrôlée en réglant l'ouverture et la fermeture des soupapes d'entrée et de sortie. Dans ce cas, la quantité d'agent frigorigène qui est aspirée, peut être réduite en fermant la soupape d'entrée plus tard, de manière à obtenir un reflux contrôlé.
- **Contrôle du volume mort** : dans les compresseurs à piston, il y a généralement un volume inutilisé d'agent frigorigène qui n'est pas expulsé. Cela empêche le piston de heurter les soupapes à piston ou la culasse. La réexpansion de ce volume mort a pour effet de réduire l'espace disponible pour la course d'aspiration. Le volume mort entraîne donc une réduction de la capacité. Le volume mort peut être augmenté en intégrant des volumes supplémentaires qui peuvent être ouverts.
- **Contrôle de la longueur de la course** : cette méthode n'est possible que pour les compresseurs à piston à entraînement linéaire. Pour un mécanisme de vilebrequin à piston, cela ne peut se faire qu'en modifiant la position du maneton.
- **Curseur** : le curseur d'un compresseur

à vis peut être utilisé pour modifier la durée de l'aspiration, de la même manière que pour le contrôle des soupapes.

- **Levage des Scrolls** : pour un compresseur Scroll, il est possible de lever temporairement un scroll. Ainsi, le processus d'aspiration et de compression s'arrête et le compresseur fonctionne à vide. La capacité peut être contrôlée par une commande périodique.

### Graissage

Dans les compresseurs, il y a de l'huile de graissage pour limiter les frottements. Outre cette fonction de graissage, l'huile assure également le refroidissement du compresseur. Ceci est particulièrement important pour les substances actives telles que le NH<sub>3</sub> et le CO<sub>2</sub>, moins pour les HFC. En outre, l'huile permet également d'évacuer les impuretés dues à l'abrasion. L'huile assure également l'étanchéité des chambres de compression et peut réduire le bruit généré par le compresseur.

L'huile peut être d'origine synthétique ou non synthétique et contient souvent des additifs, en fonction des conditions environnementales. Entre autres, des additifs contre l'oxydation, pour empêcher la formation de mousse ou pour garantir la séparation de l'eau et de l'huile peuvent être ajoutés. Pour chaque type de compresseur, un lubrifiant spécifique est recommandé. Lors du choix des lubrifiants, il est conseillé de suivre les recommandations du fabricant.

### Développements actuels et défis Agents frigorigènes naturels

Les agents frigorigènes naturels tels que l'ammoniac, le CO<sub>2</sub>, le glycol, les mélanges de butane et de propane (hydrocarbures) et l'eau, sont de plus en plus utilisés, grâce à leurs valeurs avantageuses PRP. Toutefois, les agents frigorigènes naturels peuvent également présenter quelques inconvénients

: toxicité (ammoniac), inflammabilité (butane et propane) et haute pression (CO<sub>2</sub>). Ces problèmes peuvent être évités en installant un système indirect dans lequel deux frigoporteurs sont utilisés. Le risque pour la sécurité est ainsi limité, tandis que les avantages thermophysiques peuvent tout de même être exploités.

### De meilleures prestations

- **Injection liquide/vapeur**

Un compresseur peut atteindre des températures très élevées pendant son fonctionnement. Pour refroidir le compresseur, du liquide peut être injecté. De la vapeur peut également être injectée pour augmenter l'efficacité. L'injection de vapeur scinde la compression en deux étapes, ce qui réduit le travail du compresseur. La qualité du fluide frigorigène à l'entrée de l'évaporateur est réduite, ce qui permet d'obtenir une capacité et un COP plus élevés.

- **Moteurs à aimant permanents sur compresseurs (semi-)hermétiques**

L'utilisation de moteurs à aimant permanents sur les compresseurs permet d'accroître l'efficacité. Au démarrage, le rotor se synchronise avec le champ tournant du moteur, ce qui fait que le rotor fonctionne à une vitesse synchrone. De ce fait, il n'y a pas de pertes dues au rotor et à l'induction. Par conséquent, il est possible d'obtenir un rendement plus élevé. Outre l'augmentation du rendement, il est également possible de comprimer un débit massique plus important que lorsqu'un moteur asynchrone est utilisé. Avec un moteur asynchrone, la vitesse dépend fortement du couple requis.

### Augmentation de la durée de vie avec l'IA

L'Intelligence Artificielle (IA) sera utilisée dans un avenir proche pour améliorer la durée de vie des compresseurs et de l'ensemble de l'installation. Grâce aux technologies actuelles, il est possible de tout connecter et de tout

surveiller. Cela se fait déjà fréquemment aujourd'hui. Malheureusement, les données disponibles sont peu exploitées. Elles ne sont souvent analysées que lorsque le compresseur est déjà défectueux, c'est-à-dire lorsqu'il est déjà trop tard.

Une première étape consiste à faire analyser ces données disponibles par l'IA et à les rapporter sous forme de résumé. L'IA peut rapidement détecter des changements complexes et les décrypter afin que les mesures nécessaires puissent être prises à temps. De tels systèmes d'IA sont déjà disponibles, mais ne sont pas encore appliqués couramment.

La réfrigération commerciale (supermarchés) en est un bel exemple. Dans ce domaine, de nombreux enregistrements sont effectués et il est possible de consulter à tout moment les pressions et les températures de chaque réfrigérateur et de chaque compresseur.

Si la température d'un réfrigérateur dépasse les limites de tolérance, une alarme s'enclenche immédiatement. Toutefois, si, pour une raison quelconque, un compresseur se dérègle mais que la température dans les réfrigérateurs reste dans les limites de la tolérance, aucune alarme ne sera émise. Le compresseur finira par "lâcher". En se basant uniquement sur les températures, il n'est pas possible de garantir le bon fonctionnement du compresseur. De même, en termes de consommation énergétique, l'analyse de ces données peut se révéler très utile. La conception d'un système de réfrigération (calcul de la charge de refroidissement) repose sur des hypothèses. Dans la réalité, l'installation ne fonctionne pas toujours comme elle avait été conçue. En analysant et en optimisant les conditions réelles de fonctionnement, on peut optimiser l'efficacité énergétique, accroître la fiabilité de l'installation et réduire le coût du cycle de vie.

## Vers une réfrigération écoénergétique en cinq étapes

Dans de nombreuses entreprises industrielles, la consommation énergétique de l'installation frigorifique représente une part considérable de la facture énergétique. Un compresseur de 125 kW tournant en moyenne 3 000 heures par an, coûte 75 000 euros/an en dépenses énergétiques sur la base d'un prix de l'énergie de 0,2 euro/kWh. De nombreuses entreprises ne réalisent pas qu'une régulation adéquate peut considérablement réduire cette facture. Ces dernières disposent également déjà de nombreuses données, qui ne sont cependant nullement exploitées. Ci-dessous un plan étape par étape explicitant la façon dont la problématique peut être abordée.

### Étape 1 : Cartographier le profil de l'installation frigorifique actuelle

Un cycle frigorifique à compression se décline en 4 étapes :

1. Un compresseur qui comprime le gaz de l'évaporateur vers le condenseur ;
2. Un condenseur où la chaleur est dégagée dans l'environnement ;
3. Un détendeur où le fluide se dilate ;
4. Un évaporateur où la chaleur est absorbée et l'environnement se refroidit.

Les installations industrielles sont généralement pilotées par un système PLC automatisé couplé à un synoptique graphique affichant divers paramètres du process. Pour évaluer le fonctionnement de l'installation frigorifique actuelle, il convient de mesurer autant de paramètres que possible et d'enregistrer ces informations dans une feuille de calcul. Ci-dessous une liste de paramètres pertinents pour cartographier le fonction-

nement de l'installation frigorifique :

- Consommation électrique du compresseur
- Pression d'aspiration et de refoulement du compresseur
- État du compresseur (marche/arrêt) et heures de fonctionnement
- Température devant et derrière le compresseur
- Température devant et derrière le détendeur

### Étape 2 : Comparer l'installation frigorifique actuelle sur le diagramme de Mollier

Un cycle frigorifique est un cycle thermodynamique. Ce cycle peut être visualisé sur un diagramme de Mollier. Il s'agit d'un diagramme en fonction de l'enthalpie et, spécifiquement pour le secteur de la réfrigération, de la pression logarithmique. Les différents états thermodynamiques peuvent y être clairement

établis si, par exemple, les températures et les pressions sont connues. La puissance de l'installation frigorifique est principalement déterminée par la puissance électrique absorbée du compresseur. Elle est tributaire de la pression d'entrée et de sortie, de la température et du degré de surchauffe.

### Étape 3 : Mesurer les performances de l'installation frigorifique à l'aide d'un système de mesure en continu.

Le monitoring d'une installation frigorifique impose de surveiller les différents paramètres 24h/24. Si les capteurs requis ne sont pas en place, ils peuvent facilement être ajoutés. Outre les paramètres thermodynamiques de l'installation frigorifique, le profil de consommation et donc le process frigorifique doivent également être surveillés. La régulation d'une installation frigorifique

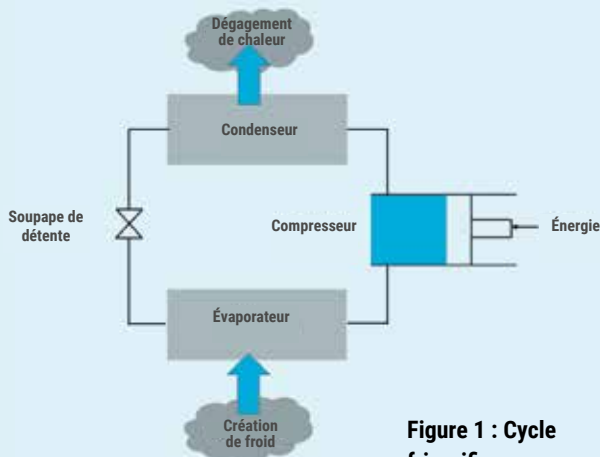
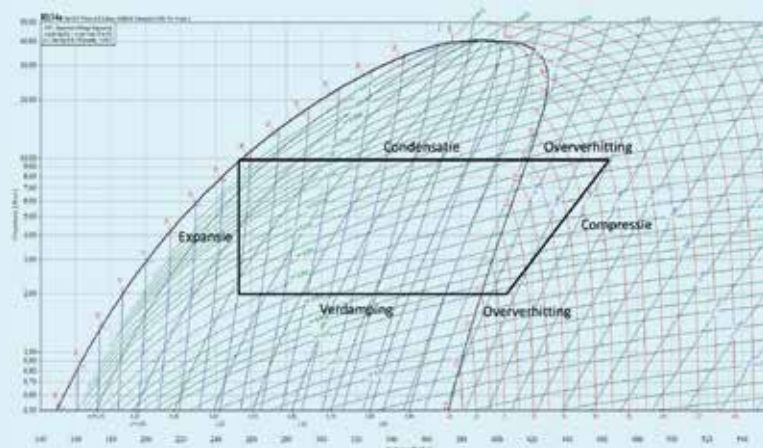


Figure 1 : Cycle frigorifique.

Figure 2 : Diagramme de Mollier.





est souvent inadaptée à un profil de consommation variable. Dans un abattoir, par exemple, une grande capacité frigorifique est requise au début du processus frigorifique des animaux abattus dans les chambres froides. Le monitoring de l'ouverture/fermeture des portes des chambres froides donne une très bonne idée de la puissance frigorifique requise ; les pointes de consommations peuvent alors éventuellement être prévenues. L'usage d'un variateur de fréquence permet de mieux piloter la capacité frigorifique requise en fonction de la demande. Ces données sont lues dans un « Energy Data Logger », qui les transmet à intervalles réguliers à une plateforme énergétique en ligne sur Internet.

#### Étape 4 : Cartographier les performances et les dérives

Sur la base des mesures en ligne ci-dessus, les paramètres et alarmes suivants deviennent disponibles ; les données sont alors converties en informations :

#### Paramètres :

- COP de l'installation frigorifique (effet frigorifique utile/apport énergétique net) en fonction de la charge.
- Consommation d'énergie
- Consommation d'énergie/énergie absorbée
- Profil de charge de l'installation frigorifique
- Températures de réfrigération

#### Alarmes :

- Consommation énergétique trop élevée
- COP trop bas
- Installation dérégulée
- Surchauffe
- Sous-refroidissement
- Fuite de liquide frigorigène

#### Étape 5 : Consigner les paramètres de régulation et évaluer les ajustements

Les mesures ci-dessus doivent être effectuées sur quelques mois pour surveiller le fonctionnement de l'installation frigorifique à différentes charges et pendant différentes saisons. Ensuite, les différents paramètres de régulation sont ajustés dans le PLC en collaboration avec le technicien frigoriste. Limiter la pression de refoulement du compresseur d'1 bar peut permettre d'économiser des dizaines de milliers d'euros par an. Ces connaissances sont généralement présentes chez le client final ou le fournisseur de l'installation frigorifique.

Une fois ces ajustements effectués sur l'installation frigorifique, revenir à l'étape 4 pour les évaluer. Le monitoring énergétique est un processus dit PDCA (« Plan, Do, Check, Act »). Chaque ajustement doit être réévalué.

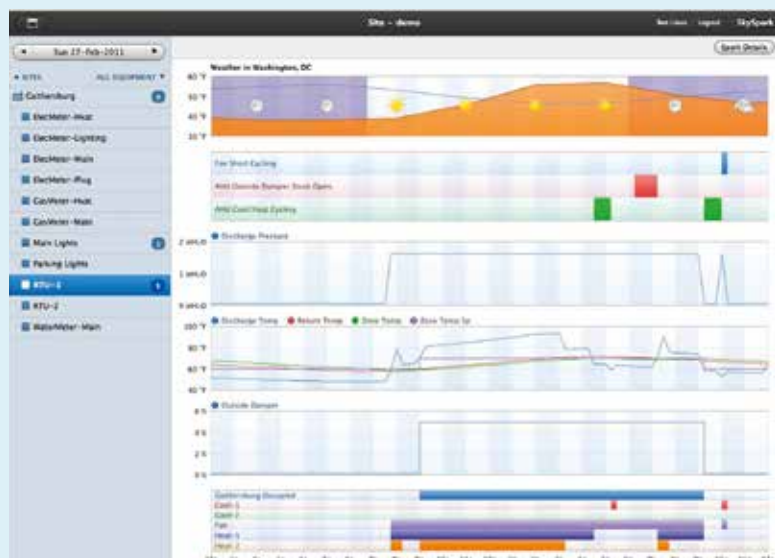


Figure 3 : Exemple de mesures en ligne.

## Les défis de la lubrification des compresseurs frigorifiques

L'huile est un élément essentiel d'une installation frigorifique. L'article ci-dessous explicite les fonctions les plus importantes de ce médium ainsi que les bonnes pratiques pour garantir un fonctionnement optimal du système et pour faire le bon choix.

### Rôle du lubrifiant dans un système frigorifique

L'huile a plusieurs fonctions dans un système frigorifique. Elle lubrifie les pièces mobiles des compresseurs, telles que les pistons, les vis, les spirales, les ailettes, etc. Elle assure également l'étanchéité parce que les joints gonflent et dissipent la chaleur. Elle fait finalement office de fluide d'entraînement pour certains instruments de régulation des compresseurs à vis ou sert de liquide de refroidissement.

### Quelles sont les propriétés essentielles de l'huile ?

- La lubrification, qui est liée à l'épaisseur du film d'huile.
- Sa solubilité avec le réfrigérant. La dissolution du fluide frigorigène dans l'huile provoque une diminution de viscosité ; cela se décline parfois par du moussage au démarrage, ce qui est indésirable. La solubilité doit donc être la plus faible possible.
- La miscibilité avec le réfrigérant à l'état liquide. L'huile est véhiculée mécaniquement dans le système, ne doit pas stagner dans le circuit tout en recirculant vers le compresseur. La miscibilité doit être la meilleure possible.
- La viscosité, dépendant des technologies et des températures du système.

Celle-ci doit garantir la bonne épaisseur du film lubrifiant entre les pièces mobiles.

Malgré les séparateurs d'huile (à noter que les installations n'en sont pas toutes équipées), l'huile circule dans tout le système en ayant tendance à s'accumuler dans les zones les plus froides. Un dépôt est alors possible sur les parois des échangeurs (surtout les évaporateurs) et réduit leur efficacité. Si l'huile ne recircule pas correctement vers le compresseur, des dysfonctionnements peuvent s'ensuivre. Tels que des pannes de la pompe à huile ou le grippage du compresseur (tous les compresseurs n'ont pas de pompe à huile). Compte tenu de ces critères, l'huile doit être choisie avec soin afin qu'elle soit la plus adaptée à l'installation.

### Comment choisir la bonne huile ?

Le choix du lubrifiant est crucial pour le bon fonctionnement du système frigorifique. Il doit être choisi en fonction du type d'huile, du type de compresseur et du fluide frigorigène utilisé. Il doit être adéquat pour éviter les problèmes de lubrification qui sont la cause principale de panne du compresseur. Dans certains cas, un changement de lubrifiant peut même améliorer les performances d'une installation et/ou

résoudre des problèmes.

Le choix du lubrifiant a notamment une influence significative sur le rendement de l'installation. Même si l'huile de refroidissement ne génère pas d'énergie, ses propriétés influencent directement la réduction des pertes énergétiques. La viscosité est la résistance à l'écoulement du lubrifiant : plus la viscosité est faible, moins il faut d'énergie pour faire fonctionner le compresseur. Cependant, une viscosité trop faible peut endommager la machine par la rupture du film d'huile.

Le coefficient de frottement est une mesure de la capacité des molécules lubrifiantes à glisser les unes sur les autres lorsqu'elles sont soumises à une pression ou à un module de cisaillement. Il ne faut pas confondre celui-ci avec le coefficient de frottement entre deux pièces mobiles en mouvement relatif...

La volatilité est également importante ; au moins l'huile transporte du réfrigérant dans le système, au plus élevé le rendement des évaporateurs.

Les propriétés à froid, notamment la fluidité de l'huile à très basse température, contribuent grandement à améliorer le rendement des évaporateurs.

Un article technique de Grasso montre que l'épaisseur du film d'huile



qui adhère aux parois tubulaires de l'évaporateur dépend de la viscosité du lubrifiant. Cela signifie par exemple que la contamination de l'ammoniac liquide par du lubrifiant peut réduire le transfert thermique de 25 % et le coefficient de performance (COP) de plus de 4 %. L'utilisation d'huiles synthétiques peut réduire l'épaisseur du film d'huile de plus de 50 % à -35 °C et jusqu'à 74 % à -40 °C par rapport aux huiles minérales. Les huiles synthétiques de haute qualité peuvent donc offrir des avantages significatifs par rapport aux huiles minérales traditionnelles en termes de rendement énergétique.

### Huiles pour réfrigérants HFO et mélanges HFO

Les fabricants d'HFC ont développé des solutions à très faible PRG appelées hydrofluoroléfinés (HFO). L'un des principaux avantages des HFO est qu'elles offrent un très faible PRG aux propriétés intéressantes. Ces réfrigérants sont classés A2L – légèrement inflammables, par opposition aux hydrocarbures hautement inflammables.

Un facteur important est l'interaction entre ces nouveaux réfrigérants A2L et l'huile du compresseur.

Les HFO purs, de par leur double liaison insaturée, ont une solubilité plus élevée avec les huiles polyol esters (POE) existantes qu'avec les HFC. La miscibilité est également plus élevée. En combinaison avec une solubilité plus élevée, cela conduit à une plus grande dilution et donc à une réduction de la viscosité dans le compresseur. Par exemple, la viscosité souhaitée de 18 cSt pourrait être réduite de moitié si les compresseurs existants comportaient une huile standard contenant du R-1234ze aux mêmes vitesses, ce qui présenterait des risques importants pour le compresseur. La viscosité serait alors nettement inférieure à la limite minimale fixée par les fabricants de compresseurs (généralement 10-15 cSt pour un compresseur à piston). Une viscosité

Type de fluide frigorigène	Plage d'application T°C	Température d'ébullition	Température critique	Type de compresseur	Marque	Solutions	
<b>HFO</b>							
Solstice ze (R-1234ze)	- 15 °C à + 10 °C	- 18,9 °C	+ 109 °C	Centrifuge	Mobil	Mobil EAL Arctic 100, Mobil EAL Arctic 68	
				Piston		Mobil SHC Gargoylle 32	
				Vis		Mobil EAL Arctic 170, Mobil EAL Arctic 220	
Solstice yf (R-1234yf)	- 25 °C à 0 °C	- 29 °C	+ 94 °C	Centrifuge	CPI	Gamme Icematic	
				Piston	Mobil	Mobil EAL Arctic 100, Mobil EAL Arctic 68	
					CPI	Emkarate RL 32-3 MAF, Gamme Icematic, Solest 31HE	
				Vis	Mobil	Mobil EAL Arctic 22CC, Mobil SHC Gargoylle 32	
Solstice zd (R-1233zd)	> 18 °C	+ 18 °C	+ 165 °C	Centrifuge	CPI	Emkarate RL170H	
					Mobil	Mobil EAL Arctic 100, Mobil EAL Arctic 170	
					Hermétique	CPI	Emkarate RL85M
Solstice 513A (R-513A)	- 25 °C à 0 °C	- 29 °C	+ 97 °C	Centrifuge	CPI	Emkarate RL220H, Gamme Icematic	
				Piston	Mobil	Mobil EAL Arctic 100, Mobil EAL Arctic 68	
					CPI	Emkarate RL 32-3 MAF, Emkarate RL68H, Gamme Icematic, Solest 31HE	
Vis	Mobil	Mobil EAL Arctic 22CC, Mobil SHC Gargoylle 32					
Solstice L40X (R-455A)	- 40 °C à 0 °C	- 52 °C	+ 87 °C	Centrifuge	CPI	Emkarate RL170H, Gamme Icematic	
				Piston	Mobil	Mobil EAL Arctic 100, Mobil EAL Arctic 170	
					CPI	Emkarate RL 32-3 MAF, Gamme Icematic, Solest 68	
				Vis	Mobil	Emkarate RL 32-3 MAF, Gamme Icematic, Solest 31HE	
Solstice L41y (R-454B)	- 20 °C à 0 °C	- 50 °C	+ 80 °C	Centrifuge	CPI	Emkarate RL220H, Gamme Icematic	
				Piston	Mobil	Mobil EAL Arctic 100, Mobil EAL Arctic 68	
					CPI	Emkarate RL 32-3 MAF, Emkarate RL68H, Gamme Icematic, Solest 31HE	
				Vis	Mobil	Mobil SHC Gargoylle 32	
Solstice N15 (R-515B)	- 15 °C à + 10 °C	- 18 °C	+ 108 °C	Centrifuge	CPI	Emkarate RL170H	
				Piston	Mobil	Mobil EAL Arctic 100, Mobil EAL Arctic 170	
					CPI	Emkarate RL220H, Gamme Icematic, Solest 68-220	
				Vis	Mobil	Emkarate RL 32-3 MAF, Gamme Icematic, RL68H, Solest 31HE	
Solstice N40 (R-448A) & Solstice 449A (R449A)	- 40 °C à 0 °C	- 45 °C	+ 83 °C	Centrifuge	CPI	Emkarate RL220H, Gamme Icematic, Solest 31HE	
				Piston	Mobil	Mobil EAL Arctic 100, Mobil EAL Arctic 68	
					CPI	Emkarate RL 32-3 MAF, Emkarate RL68H, Gamme Icematic, Solest 31HE	
				Vis	Mobil	Mobil EAL Arctic 22CC, Mobil SHC Gargoylle 32	
Solstice N71 (R-471A)	- 15 °C à + 10 °C	- 16,8 °C	+ 112 °C	Centrifuge	CPI	Emkarate RL170H	
				Piston	Mobil	Mobil EAL Arctic 100, Mobil EAL Arctic 170	
					CPI	Emkarate RL220H, Gamme Icematic	
				Vis	Mobil	Emkarate RL68H, Gamme Icematic	
<b>CO<sub>2</sub></b>							
R-744	- 40 °C à - 10 °C	sublimation - 78 °C point triple - 56 °C	+ 30,9 °C	Piston	CPI	Emkarate RL100HB, Emkarate RL68HB, Emkarate RL85HB	
<b>Ammoniac</b>							
R-717 (non miscible)	- 30 °C à - 10 °C	- 33 °C	+ 132 °C	Centrifuge & Piston	Mobil	Mobil Gargoylle Arctic 68 NH, Mobil Gargoylle Arctic Oil 300, Mobil Gargoylle Arctic SHC NH 68, Mobil Gargoylle SHC 226E	
				Vis		CPI	CPI 1008, CPI 1009, CPI 4628
				Pompe à chaleur		CPI	Gamme Icematic
<b>Hydrocarbure</b>							
R-290	- 35 °C à - 10 °C	- 42 °C	+ 96 °C	Centrifuge & Piston	Mobil	Mobil Gargoylle Arctic Oil 300, Mobil Gargoylle Arctic SHC 200 series	
				Vis		CPI	CPI 1507, CPI 1516
						Mobil	Mobil Gargoylle Arctic Oil 300, Mobil Gargoylle Arctic SHC 200 series
Mobil	Mobil Glygoylle 22 (non miscible)						

plus faible entraîne l'usure des pièces mobiles du compresseur et une perte d'exploitation en cas de panne du compresseur, se déclinant par l'arrêt du système. L'utilisation d'huiles standards avec des mélanges HFC/HFO résulte en une baisse de viscosité plus faible, ce qui peut être néfaste.

Par conséquent, des huiles spécifiques ont été développées et formulées. Elles maintiennent et améliorent la miscibilité, la qualité de la lubrification, le grade de viscosité, la stabilité chimique, la compatibilité des matériaux, les coûts et la disponibilité ; les risques associés à l'utilisation d'huiles standards sont alors limités.

### La maintenance

Pour éviter les risques de casse, il est important de respecter les intervalles de vidange recommandés par le construc-


teur et de ne pas mélanger les huiles. Une maintenance préventive régulière doit être réalisée avec par exemple l'Acitest Unipro WW ; à faire également, des analyses de laboratoire plus poussées tels qu'Axilis® Oils pour vérifier l'état de l'installation en fonction de la qualité de l'huile et des contaminants. Ci-dessous une liste de bonnes pratiques pour la maintenance des systèmes frigorifiques :

- Suivre les intervalles de vidange d'huile recommandés par le fabricant du compresseur. Par exemple, pour un compresseur à vis à réfrigérant HFC, il est recommandé de changer l'huile toutes les 8 000 à 10 000 heures d'exploitation. Choisir une huile de qualité prolonge la durée de vie du lubrifiant et du compresseur et réduit les pertes ;
- Une analyse périodique de l'huile peut minimiser le risque de panne du com-

presseur et donc le risque d'interruption de la chaîne du froid, la perte de marchandises ou les interruptions de production en général. Des tests réguliers permettent de prolonger l'intervalle de vidange d'huile ;


- L'huile n'a pas de date d'expiration, mais a une date limite d'utilisation recommandée. Après cette date, une analyse doit être effectuée pour déterminer si l'huile répond toujours aux spécifications d'origine ;
- Ne pas utiliser de récipients ouverts pour les huiles POE (polyol ester) et PAG (polyalkylène glycol), car ces huiles sont particulièrement hygroscopiques, c.-à-d. très sensibles à l'humidité ;
- Choisir l'emballage adapté aux besoins est respectueux de l'environnement, évite les déchets inutiles et est donc plus économique.

### Les bonnes pratiques de stockage de Climalife



**Stockez les fûts et les bidons à l'intérieur, à l'abri de la lumière et de l'humidité.**

Dans de bonnes conditions de stockage, l'huile non ouverte peut être conservée pendant 2 à 4 ans (en fonction de la marque, du type et du fabricant).




**Bonnes pratiques pour stockage à l'extérieur**


Si vous ne pouvez pas stocker vos fûts à l'intérieur, veillez à :

Ce que le bouchon soit bien positionné afin d'éviter tout risque d'infiltration d'eau.


Couchez les fûts ou inclinez-les de manière à ce que l'eau puisse s'écouler.



Éviter le stockage vertical - risque d'infiltration d'eau à l'intérieur du fût.




**Huiles minérales**  
Molécules de différentes tailles = plus de friction



**Huiles synthétiques**  
Molécules de taille uniforme = moins de friction


Les huiles synthétiques présentent de nombreux avantages, tels que leur longévité (intervalles de vidange plus longs) et l'amélioration des performances de l'installation.



Certaines huiles synthétiques peuvent également être très hygroscopiques = il est recommandé de les utiliser le plus rapidement possible après ouverture afin d'éviter que l'humidité ne s'infilte dans le système.

Climalife propose une large gamme de conditionnements pour répondre à vos besoins.

Lors de la production, les fûts de lubrifiants sont scellés à l'azote afin d'éviter l'introduction de tout composant extérieur dans l'installation.



Vérifiez l'état de vos filtres 3 mois après une vidange ou une recharge.