

# Économie d'énergie dans les centrales frigorifiques :

## La haute pression flottante

Octobre 2010/White paper

par Christophe Borlein

membre de l'AFF et de l'IIF-IIR

# Sommaire

Avant-propos	I
Introduction	II
L'installation frigorifique	1
La haute pression	2
Les différents modes de régulation de la HP	3
Concrètement sur le terrain	5
Application sur un entrepôt frigorifique	6
Application plus générique	7
Les Certificats d'Économie d'Énergie (CEE)	8
Conclusion	9

# Avant-propos



*Princess Elisabeth est la première station Antarctique opérant uniquement sur base d'énergies renouvelables, ce projet démontre qu'il est aujourd'hui possible d'atteindre un objectif «Zéro Emission» quelles que soient les conditions.*

*Photos : International Polar Foundation / René Robert*

Le froid et le conditionnement d'air représentent 15 % de la consommation électrique mondiale, cela correspond à 4,5 % des émissions globales de gaz à effet de serre (GES).

Que ce soit dans l'industrie agroalimentaire, l'entreposage ou les grandes et moyennes surfaces (GMS) le froid représente une part considérable de la consommation énergétique (de 30 à 80 %). Il est le premier poste sur lequel les utilisateurs souhaiteraient faire des économies, mais c'est aussi celui qui est le moins connu et le plus critique. Malgré des solutions qui existent depuis des années, le choix initial privilégie le fonctionnement et le prix au détriment de la consommation.

Parmi les solutions d'économie d'énergie dans le froid, la haute pression (HP) flottante fait partie des solutions les plus connues voire la plus connue pour une installation frigorifique. Cette solution lorsqu'elle est correctement mise en œuvre sur une installation permet de faire des économies allant jusqu'à plus de 30 %.

Cependant, toutes les installations frigorifiques n'en sont pas équipées. Certaines installations équipées de HP flottante ne font que peu d'économie, car il faut mettre en œuvre correctement cette solution pour maximiser les économies d'énergie sans entraîner de problèmes techniques.

Ce document explique pourquoi la HP flottante génère des économies d'énergie par rapport à une régulation à HP fixe, et donne les contraintes techniques à respecter.



# Introduction

La HP flottante est une solution d'économie d'énergie paradoxale. Elle doit être la solution la plus connue parmi les solutions d'économie d'énergie, mais elle est inconnue dans son fonctionnement et ses limites.

La mise en œuvre technologique de la HP flottante est relativement aisée. Cependant les réglages, voire l'adaptation de l'installation pour tirer le maximum des économies d'énergie, sont plus délicats et sont rarement réalisés. Certaines HP flottantes installées sur des systèmes frigorifiques ne procurent pas d'économie d'énergie, car elles n'ont pas ou mal été paramétrées. D'autres entraînaient des problèmes techniques et, au lieu de traiter les difficultés à la source, elles ont été abandonnées.

Ce White Paper survole les composants d'une installation frigorifique participant à la HP flottante. Une explication est donnée sur ce qu'est la HP et par quels biais elle est régulée.

Le mode de régulation de HP historique est présenté, puis la HP flottante. La mise en œuvre physique sera abordée.

Les raisons qui font que la HP flottante fait des économies d'énergie sont expliquées et illustrées par 2 exemples.

Dans une annexe un peu plus technique sont traités les dysfonctionnements qu'il peut y avoir suite à une mauvaise mise en œuvre de la HP flottante





## Le fonctionnement des installations frigorifiques

# L'installation frigorifique

## Constitution

Une installation frigorifique est un système thermodynamique qui transporte les calories d'un point froid (ex. : une chambre froide), via l'évaporateur, à un point chaud (ex. : l'extérieur) avec le condenseur (la Figure 1 représente un système frigorifique permettant de situer les appareils).

Pour comprendre l'intérêt et le fonctionnement (de manière sommaire) de la HP flottante, il n'est pas nécessaire de comprendre le fonctionnement complet de l'installation frigorifique.

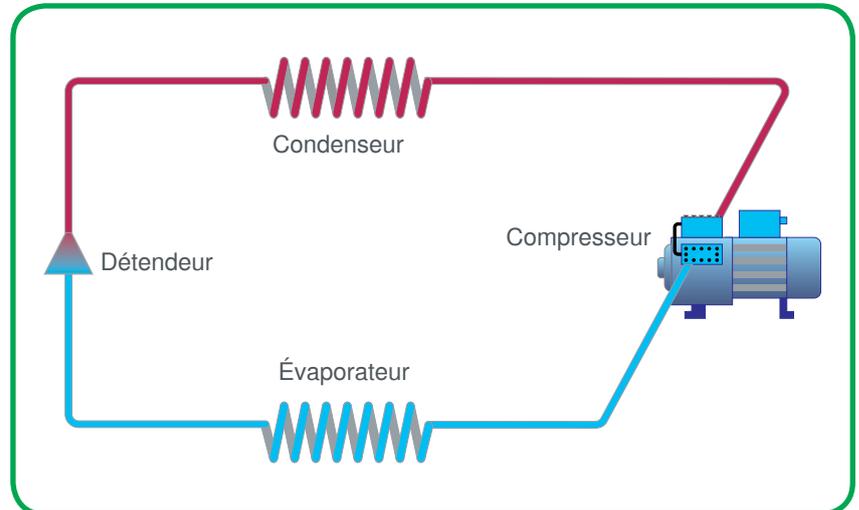


Fig.1 Représentation d'un système frigorifique

## Les compresseurs

Le compresseur est le cœur du circuit, c'est lui qui met le fluide en mouvement, c'est lui aussi qui en général consomme le plus. Sa consommation n'est pas stable et dépend de plusieurs variables, les plus importantes sont la basse et haute pression. Certains compresseurs sont munis d'un organe mécanique permettant de réduire la puissance frigorifique. L'usage de ces dispositifs de charge partielle influe sur les performances du compresseur.

En matière de consommation, l'information la plus utile est le COP (COefficient de Performance). Le COP prend en compte la variation des rendements internes du compresseur ainsi que le régime du cycle frigorifique. Il est donc nécessaire d'avoir le régime de fonctionnement associé au COP pour pouvoir le juger. (Ex. : -10 °C/+35 °C). Le COP est le rapport de la puissance frigorifique produite (ou utile) sur la puissance électrique consommée. Le COP évolue dans le même sens qu'un rendement.

Il y a plusieurs types de compresseurs, les plus représentatifs sont :

- Les compresseurs à pistons ;
- Les compresseurs scroll ;
- Les compresseurs à vis.

Les explications qui vont suivre s'appliquent à ces 3 types de compresseurs. A noter qu'il y a quelques particularités sur certains compresseurs.

## Les condenseurs

Le condenseur permet d'évacuer les calories vers l'extérieur. Il se situe généralement sur le toit ou à l'extérieur. Il peut aussi réchauffer de l'eau pour un autre usage.

On peut distinguer 4 catégories dans les condenseurs :

- Les condenseurs secs
- Les condenseurs humides
  - Condenseurs évaporatifs,
  - Condenseurs adiabatiques,
  - Condenseurs hybrides.
- Les condenseurs à eau
  - A eau perdue,
  - Sur tour de refroidissement ouverte,
  - Sur tour de refroidissement fermée,
  - Sur tour de refroidissement hybride,
  - Sur aéroréfrigérant sec,
  - Sur aéroréfrigérant adiabatique,
  - Sur réseaux de chaleur ou réseaux intermédiaires de chaleur.
- Évapo-condenseur ou autre réchauffeur de gaz

Le principe de la HP flottante peut s'appliquer à tous ces condenseurs (sauf évapo-condenseur et sur réseaux de chaleur), cependant les explications données dans ce document sont surtout applicables aux condenseurs et aéroréfrigérants secs. Il y a quelques subtilités pour l'appliquer aux autres condenseurs.

# La haute pression

La HP se crée par l'équilibre entre la puissance à évacuer, en rouge sur le graphique, et la puissance évacuée en vert.

Le système doit évacuer une quantité d'énergie qui dépend de la puissance frigorifique instantanée et du rendement des compresseurs.

Le condenseur peut évacuer une certaine puissance dépendant de ses conditions de fonctionnement : plus l'écart de température entre l'air extérieur et le fluide frigorigène est important, plus la puissance évacuée est importante.

La pression peut également être donnée sous forme de température dite saturante (température à partir de laquelle le gaz se liquéfie, se condense). La température augmente quand la pression augmente. En fonction des fluides, une HP à 40 °C n'aura pas la même pression.

Sur le graphique, il apparaît clairement que lorsque la température de la HP atteint la température extérieure, la puissance évacuée est nulle.

Plus la HP est haute (ou chaude), plus la puissance évacuée par le condenseur augmente (l'écart de température augmente) et inversement. Il en est de même pour la puissance à évacuer sauf qu'elle réagit beaucoup moins vite.

Afin de réguler ce point d'équilibre, la capacité du condenseur est ajustée en pilotant les ventilateurs. En augmentant le débit de ventilation, la capacité du condenseur augmente et inversement comme le montre la figure 3.

La variation de la puissance à évacuer n'est pas ou peu modulable. Le seul moyen d'intervenir sur la HP est donc le pilotage de la ventilation des condenseurs.

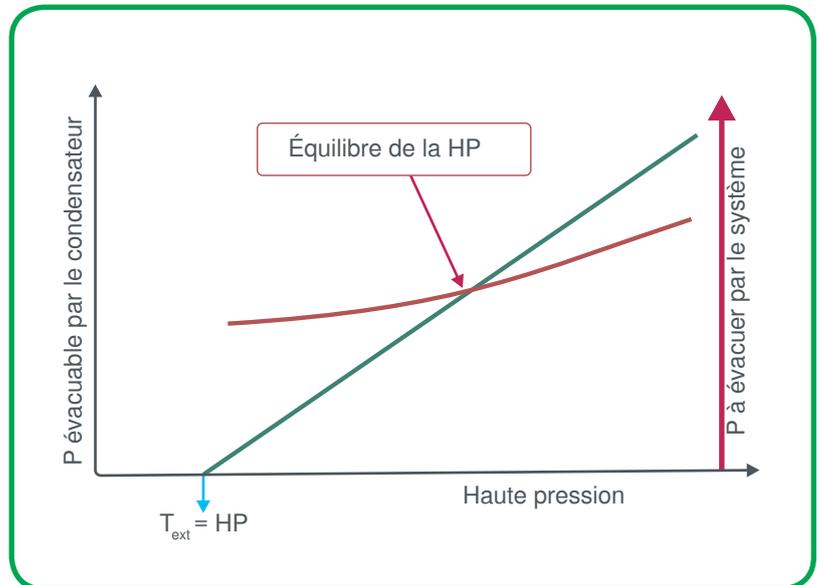


Fig.2 haute pression en fonction des puissances évacuables

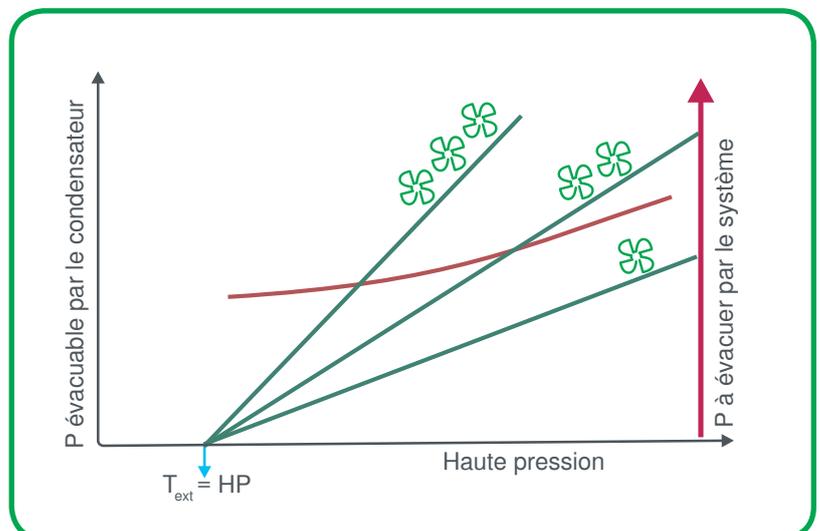


Fig.3 influence du débit des ventilateurs

La HP flottante consiste à réguler la pression de condensation à une valeur permettant d'obtenir la plus faible consommation des couples compresseurs/condenseurs (et auxiliaires)  
Ce n'est surtout pas d'abaisser la HP au maximum,.

# Les différents modes de régulation de la HP

La mise en application de la régulation de la HP n'est pas identique en fonction des condenseurs. Il est aisément compréhensible que la régulation ne soit pas mise en œuvre et réglée de la même manière sur un condenseur sec ou sur une tour de refroidissement. Cependant, les méthodes développées ci-dessous sont applicables, avec quelques adaptations.

## HP fixe ou à hystérésis

C'est la méthode la plus usuelle, quoique de moins en moins utilisée.

Elle consiste à réguler une HP à une valeur fixe qui peut être tenue toute l'année. Pour obtenir une HP fixe, il faut utiliser une régulation à zone neutre ou PID, ce qui est rarement le cas. L'usage le plus courant est l'utilisation de pressostat ou de régulateur à hystérésis créant des régulations en escaliers de la HP (Figure 4)

La HP n'est pas vraiment régulée fixe, elle va varier sans maîtrise en fonction de la température extérieure, de la puissance à évacuer et aussi du nombre de ventilateurs en panne.

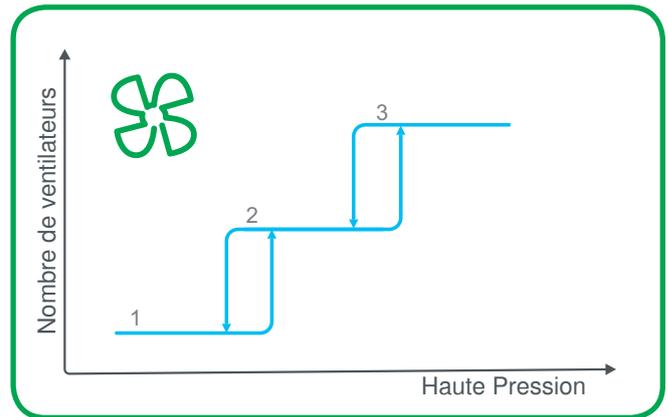


Fig.4 Variation de la HP en fonction du nombre de ventilateurs

## HP flottante

Réduire la HP est intéressant sur le plan énergétique : quand la HP diminue le COP des compresseurs augmente, et inversement. La Figure 5 donne le COP en fonction de la température de condensation pour un compresseur à vis, la variation du COP est nettement visible. Il passe, par exemple, de 1,9 à -10 °C/+50 °C à 4,7 à -10 °C/+20 °C soit une variation de 62 %.

La Figure 6 donne le pourcentage de gain (ou de perte) sur le COP pour les variations d'un degré de température de condensation (écarts de température donnés en Kelvin) en fonction de la HP et pour différentes températures d'évaporation. Tous les compresseurs ne réagissent pas de la même manière, il est donc nécessaire d'utiliser les caractéristiques des compresseurs en place pour pouvoir évaluer correctement les économies d'énergie

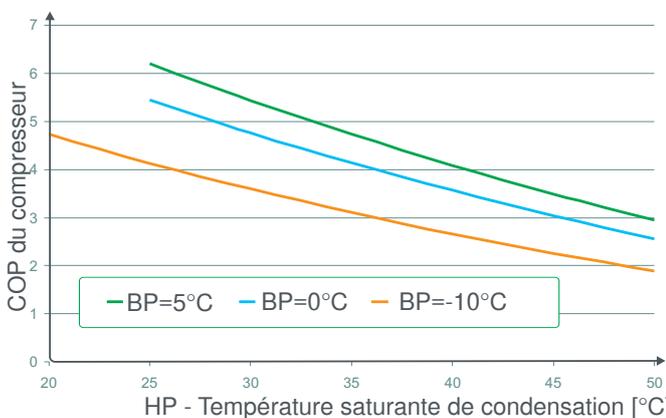


Fig.5 Variation du COP en fonction de la HP d'un compresseur à vis

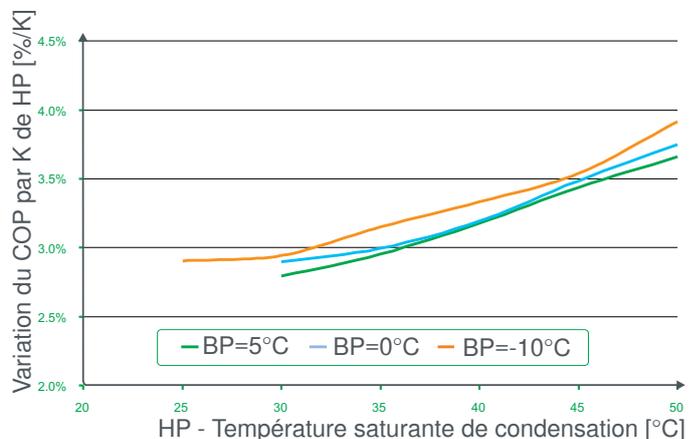


Fig.6 Variation en % du COP par K en fonction de la HP

# Les différents modes de régulation de la HP

Cependant, pour réduire la HP, il est nécessaire de faire fonctionner plus de ventilateurs. Les économies sont donc moindres que celles calculées sur le compresseur. Il est nécessaire de calculer le COP sur l'ensemble compresseur et condenseur pour faire des calculs sur le HP flottante. L'utilisation des ventilateurs doit être raisonnée. Il peut arriver que les économies faites sur les compresseurs soient complètement compensées par les ventilateurs, voire même dépassées, le graphique de la figure 7 met en évidence l'existence d'un optimum. Ce phénomène se produit souvent sur des installations fonctionnant en dessous de 50 % de leur pleine charge

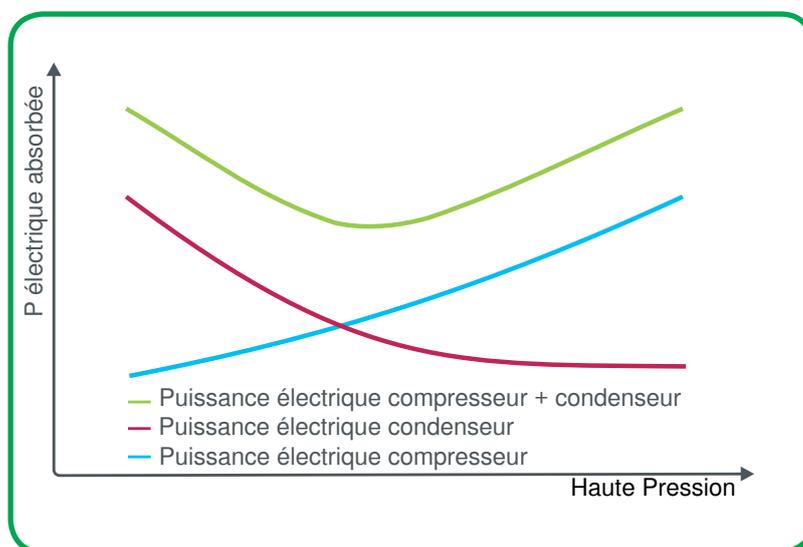


Fig.7 Optimisation des puissances compresseur/condenseur

Pour synthétiser, la HP flottante consiste à réguler la pression de condensation à une valeur permettant d'obtenir la plus faible consommation du couple compresseur/condenseur (et auxiliaires).  
Ce n'est surtout pas d'abaisser la HP au maximum, ce qui pourrait en plus d'une surconsommation, provoquer des dysfonctionnements sur l'installation (cf. annexe)..

## Concrètement sur le terrain

L'installation est relativement simple (voir exemple de la figure 8).

L'automate embarquant les algorithmes de HP flottante récupère les informations de HP sur le fluide frigorigène et la température extérieure puis traite ces informations.

L'automate convertit la pression en température (dépend du fluide frigorigène utilisé)

Il calcule l'écart avec la température extérieure.

Cet écart est un paramètre à réguler. Il est utilisé dans un PID (il s'agit d'un bloc de régulation) qui donne le pourcentage de puissance du condenseur à utiliser.

Ce pourcentage est traduit en ordre de marche des ventilateurs.

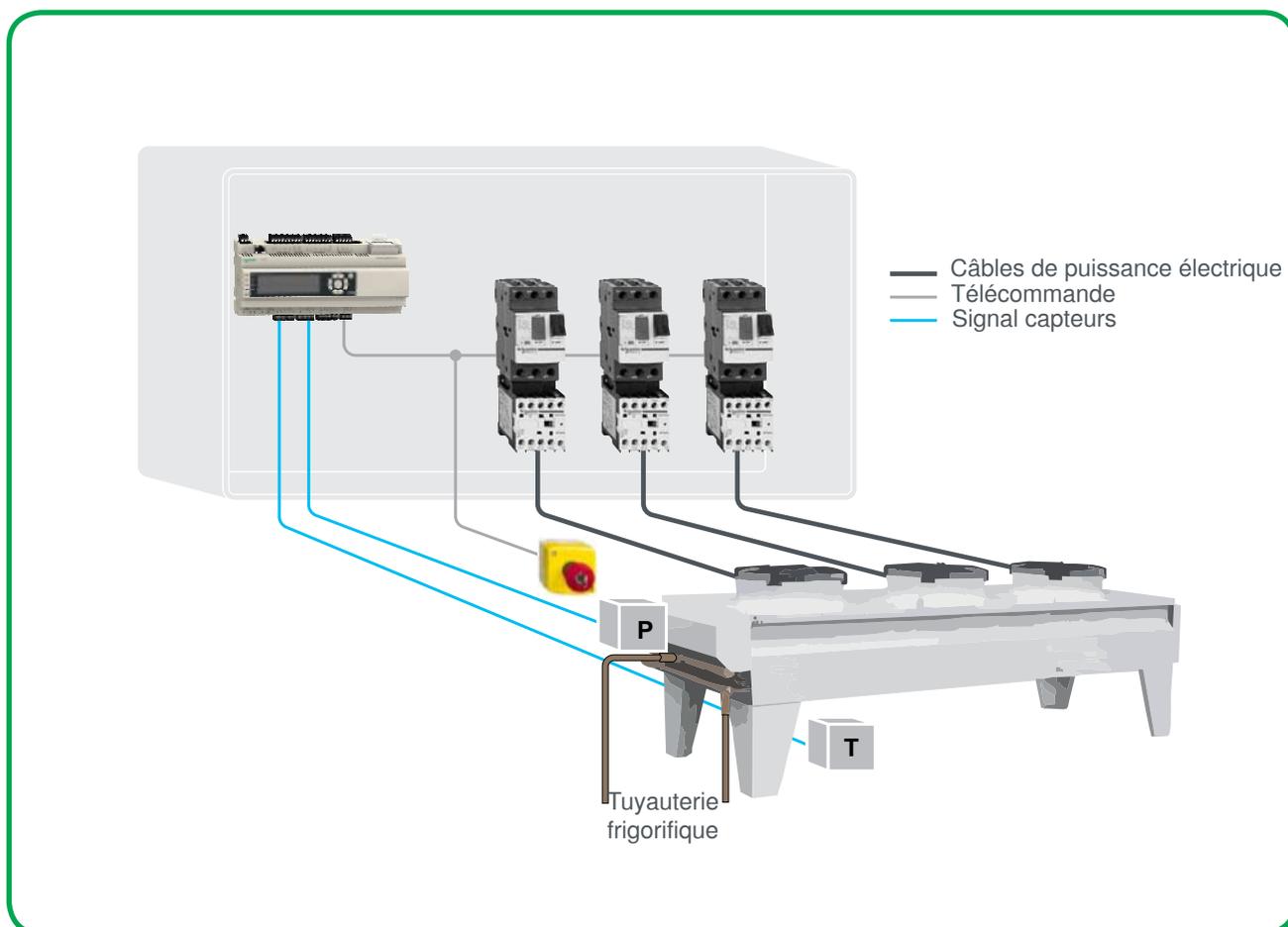


Fig.8 Exemple d'installation

# Application sur un entrepôt frigorifique

Exemple de calcul sur un entrepôt frigorifique, une HP fixe à 40 °C est comparée à une HP flottante. La comparaison est faite pour 2 températures extérieures : 30 °C et 15 °C

	HP à 40 °C	HP flottante	Économie
Pour une température extérieure de 30 °C			
Besoin frigorifique	300 kW	300 kW	
Valeur de la HP	40 °C	40 °C	
Puissance électrique des compresseurs	129 kW	129 kW	
Puissance électrique des condenseurs	22 kW	22 kW	
Puissance totale	151 kW	151 kW	0 %
Pour une température extérieure de 15 °C			
Besoin frigorifique	240 kW	240 kW	
Valeur de la HP	40 °C	25 °C	
Puissance électrique des compresseurs	103 kW	62 kW	
Puissance électrique des condenseurs	7 kW	15 kW	
Puissance totale	110 kW	77 kW	<b>30 %</b>

Lorsque la température extérieure est élevée, les économies d'énergie sont faibles, voire inexistantes. Dès que la température extérieure diminue, les économies d'énergie augmentent fortement. Il est à noter qu'en France la température moyenne est d'environ 11 °C, bien loin de 30 °C. Les économies sont donc conséquentes, mais dépendantes de plusieurs facteurs.

# Application plus générique

Cet exemple va permettre de voir l'impact de 2 facteurs – La température extérieure et la charge de l'installation – qui influencent les performances de l'installation et celles de la HP flottante.

L'installation prise pour exemple permet de produire 500 kW de froid à son régime maximal, soit une BP à -10 °C et une HP à 50 °C. Les compresseurs ont un COP de 3,4 à -10/+30 °C. Le condenseur a une puissance de ventilation de 40 kW, il évacue 685 kW avec un écart de 10 °C. La HP minimum est limitée à 20 °C pour des contraintes techniques.

Les Figures 9 et 10 donnent la puissance électrique absorbée de l'ensemble compresseur et condenseur dans différentes conditions de températures extérieures et de régulation. Chaque courbe représente la puissance absorbée par l'ensemble compresseur et condenseur pour plusieurs températures extérieures.

En abscisse figure l'écart entre la température extérieure et la HP. L'addition de la valeur en abscisse et de la température extérieure donne la valeur de la HP.

Ce graphique permet de définir quels sont les algorithmes les plus adaptés pour consommer le moins possible.

Sur cet exemple, lorsque l'installation fonctionne à pleine puissance frigorifique (Figure 9), soit 500 kW de froid, le fonctionnement avec tous les ventilateurs est le moins énergivore quelle que soit la température extérieure.

Lorsque l'installation est en régime partiel à 40% de charge (Figure 10), la puissance absorbée diminue avec la réduction de la HP. À partir de la HP optimale, la puissance absorbée augmente bien que la HP continue de diminuer. Les économies sont de l'ordre de 1,5 %/K à droite de la HP optimale et de -1,5 %/K à gauche de la HP optimale. Ces valeurs ne sont pas génériques à toutes les installations.

Une valeur de la HP optimale se dessine : le but de la régulation par HP flottante sera de réguler l'installation à cette valeur.

A noter que ces valeurs étant pour une installation donnée, il est nécessaire de faire la démarche sur chaque installation pour déterminer les HP optimales

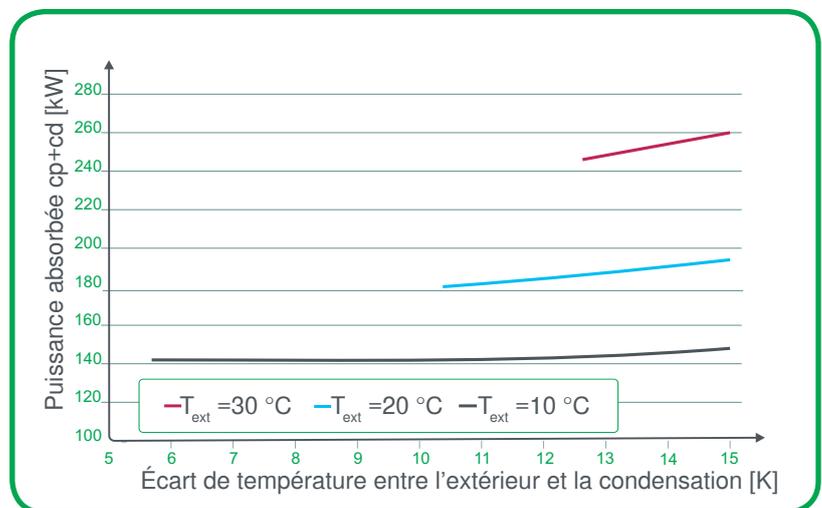


Fig.9 Puissance électrique de l'ensemble à 500kW

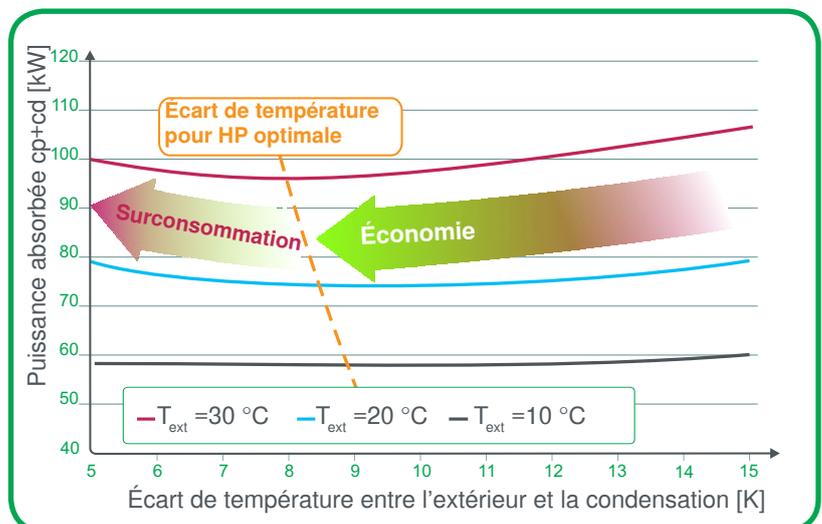


Fig.10 Puissance électrique de l'ensemble à 200kW

# Les Certificats d'Économie d'Énergie (CEE)

Le dispositif des certificats d'économies d'énergie repose sur une obligation de réalisation d'économies d'énergie imposée aux vendeurs d'électricité, de gaz, de fioul domestique, de gaz de pétrole liquéfié et de chaleur ou de froid par réseaux (qui sont appelés « obligés » dans le dispositif).



Des fiches standard servent à calculer le nombre de kWh cumac<sup>1</sup>, pouvant être revendus à un obligé.

Une fiche standard est dédiée à la HP flottante, elle est numérotée BAT-TH-34 « Système de régulation sur une installation frigorifique permettant d'avoir une haute pression flottante », elle s'applique aux locaux de commerces de distribution alimentaire.

Pour une installation frigorifique de 500 kW en froid positif, avec une température de condensation de 40 °C, la HP flottante maintenant un écart de 10 K, les CEE s'élèvent à 2 361 MWh cumac. Pour une valorisation de 3 €/MWh cumac, cela représente environ 7 000 € de recette complémentaire grâce aux CEE pour l'installation d'une HP flottante.

Pour plus d'informations sur le dispositif :

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Certificats-d-economies-d-energie,188-.html>

<sup>1</sup> - kWh cumac : énergie CUMulée sur la durée de vie de l'action d'économie d'énergie, et ACTualisée avec une perte de rendement annuel. C'est d'unité d'échange des CEE.

# Conclusion

Dans le contexte climatique actuel, les solutions d'économies d'énergie sont recherchées. L'aspect environnemental n'est pas suffisant pour justifier les investissements parfois colossaux. Les solutions comme la HP flottante ont l'avantage de réduire l'impact environnemental sans oublier l'aspect financier.

La HP flottante reste une solution d'économie d'énergie efficace et actuelle. Il peut y avoir des différences entre des solutions et leurs mises en œuvre.

Pour améliorer le retour sur investissement, l'aspect mise en service ne doit pas être oublié.

Cette solution, en fonction des installations, n'est pas très coûteuse, et pourtant elle peut faire des économies d'énergie très significatives, pouvant dépasser 30 %. La HP flottante est la solution avec le meilleur retour sur investissement pour les installations frigorifiques.

Toutes les installations neuves, à l'heure actuelle, doivent avoir un système de régulation par HP flottante efficace.

**Schneider Electric SA**

35 rue Joseph Monier  
F-92500 Rueil Malmaison - France  
Phone: + 33 (0) 1 41 29 70 00  
Fax: + 33 (0) 1 41 29 71 00  
<http://www.schneider-electric.com>