

Université Mohamed khider BISKRA
Faculté des sciences et la technologie
Département de génie mécanique

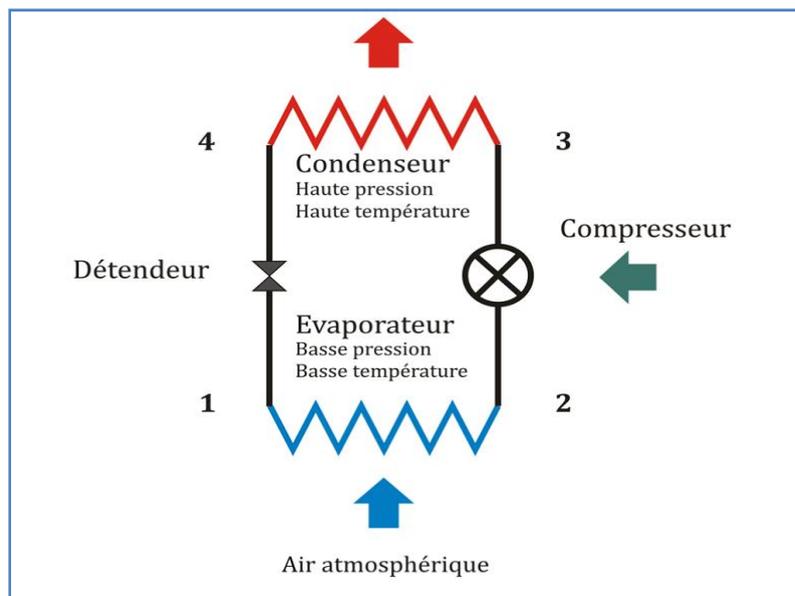
Chapitre 4 : Cycle thermodynamique d'une pompe à chaleur

Machines frigorifiques et pompes à chaleur 3 Année
Licence énergétique

Cycle thermodynamique d'une pompe à chaleur

Définition

Une pompe à chaleur (PAC) est une machine thermodynamique destinée à assurer le chauffage d'un local ou d'un système à partir d'une source de chaleur externe dont la température est inférieure à celle du local ou du système à chauffer.



Principe de fonctionnement de la Pompe À Chaleur

Les machines sont des dispositifs qui permettent de convertir les différentes formes d'énergies (de pression, potentielle, cinétique, thermique, mécanique) entre elles. Les dispositifs permettant la conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique et la conversion inverse constituent la famille des machines thermiques.

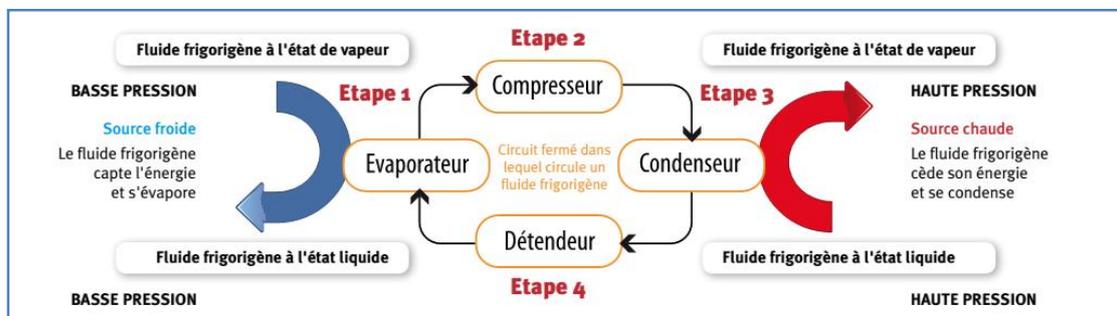
Parmi les machines génératrices, on trouve les installations de production de froid (appelées machines frigorifiques), ou de chaleur (les pompes à chaleur), ainsi que, dans une certaine mesure, les compresseurs.

D'un point de vue thermodynamique, les machines frigorifiques (réfrigérateurs) et les pompes à chaleur sont des machines thermiques qui travaillent à l'envers : ils consomment bien du travail mais pour prélever de la chaleur d'une source froide pour la restituer à une source chaude.

Lorsque le but recherché est de **produire du froid** (extraction de chaleur à un corps, ou à un milieu, pour le refroidir ou le maintenir à une température inférieure à l'ambiance) alors la machine thermique utilisée est une **machine frigorifique**

Si, au contraire, le but recherché est la **production de chaleur** (à partir de chaleur gratuite récupérée à une température plus **basse**) pour chauffer un milieu, ou le maintenir à une température suffisamment haute, alors la machine thermique devient **une pompe à chaleur**.

Dans certains cas spécifiques, on peut utiliser à la fois le froid produit à la source froide et la chaleur rejetée au « puits chaud ». Un tel système est alors généralement appelé thermofrigopompe.



LE COEFFICIENT DE PERFORMANCE D'UNE POMPE À CHALEUR

Pour caractériser l'efficacité d'une pompe à chaleur on introduit le coefficient de performance (COP) par la relation

$$\text{COP} = (\text{énergie utile}) / \text{énergie apportée au système}$$

COP d'une PAC ditherme idéale

La structure générale d'une PAC **ditherme** (soumise à deux sources de chaleur) est donnée ci – dessous. Grâce à l'énergie mécanique (ou équivalente) W fournie à ce système, on absorbe à la source froide (qui est à la température T_f) l'énergie thermique Q_f et on rejette à la source chaude (à la température $T_c > T_f$) l'énergie thermique Q_c .

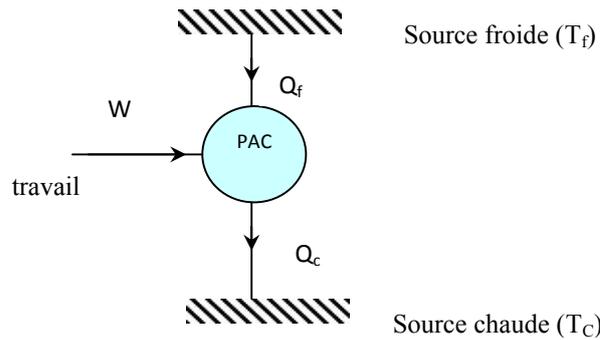


Schéma d'une pompe à chaleur ditherme

L'énergie utile pour une PAC étant la chaleur rejetée à la source chaude Q_c , le COP d'une PAC ditherme idéale peut alors s'écrire :

$$COP_{id} = \frac{Q_c}{W}$$

L'application du premier principe à ce système donne :

$$Q_f - Q_c + W = 0$$

Ou

$$W = Q_c - Q_f$$

En supposant que la machine ainsi considérée décrit un cycle thermodynamiquement idéal

(donc réversible), l'application du second principe au système ditherme, permet d'écrire :

$$\frac{Q_f}{T_f} - \frac{Q_c}{T_c} = 0 \quad (\text{Égalité de Clausius})$$

Ou

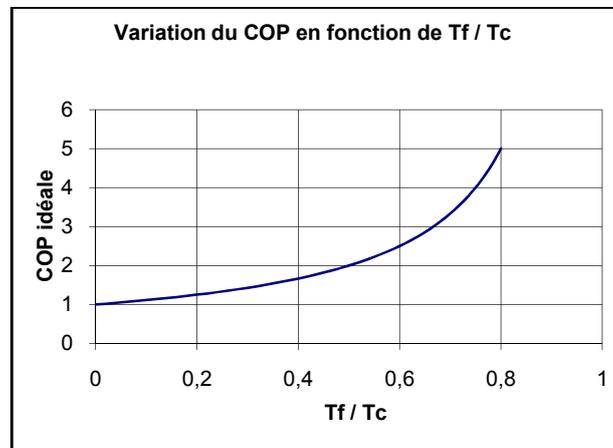
$$\frac{Q_f}{Q_c} = \frac{T_f}{T_c}$$

En considérant les conditions l'équation s'écrit :

$$cop = \frac{T_c}{T_c - T_f} = \frac{1}{1 - \frac{T_f}{T_c}}$$

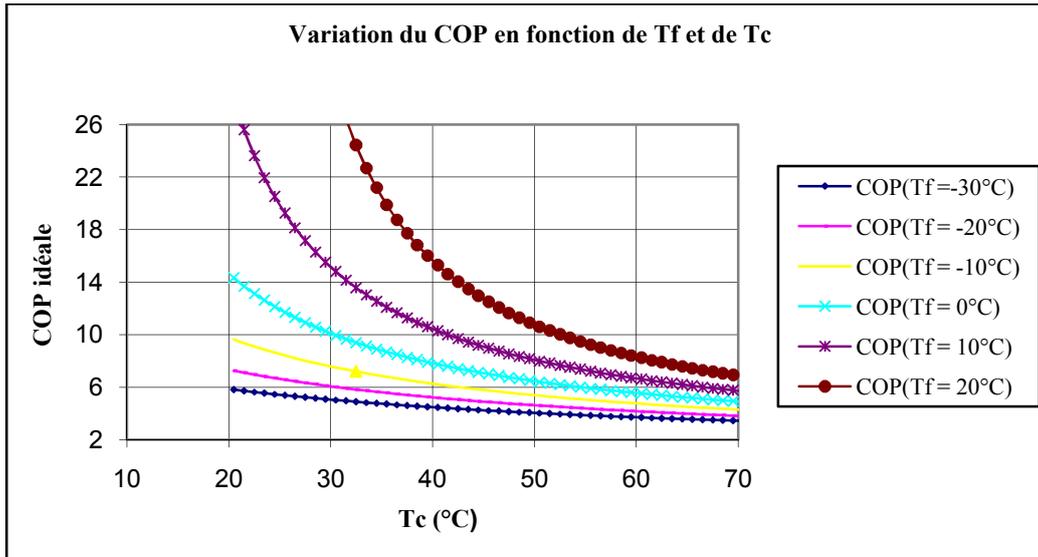
Ce COP (appelé parfois efficacité de Carnot ou COP de Carnot) constitue la limite théorique que l'on peut obtenir pour une machine quelle que soit la perfection technique de celle-ci.

Ce rapport indique néanmoins un résultat intéressant : la machine est d'autant plus efficace que T_f / T_c est proche de l'unité : c.à.d. que la température de la source froide soit proche de la température de la source chaude. La courbe ci – après montre l'évolution du COP en fonction du rapport T_f / T_c



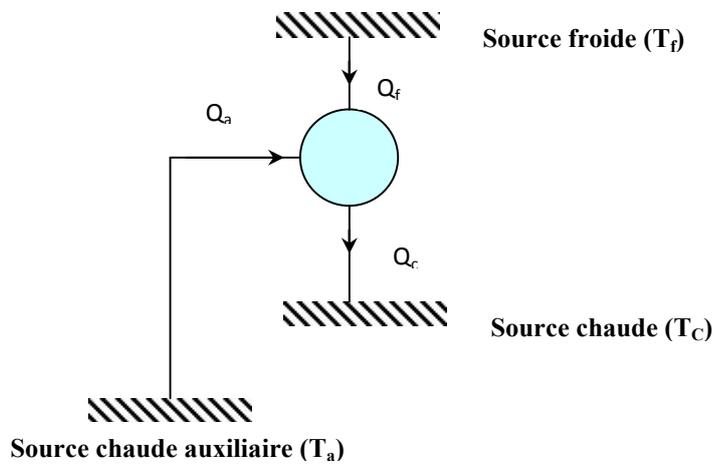
Dans la réalité les COP des machines réelles (qui sont thermodynamiquement irréversibles) sont généralement voisins de la moitié des valeurs idéales attendues.

La figure ci dessous montre la variation du COP théorique en fonction de la température T_c pour différentes valeurs de la température T_f .



COP D'UNE PAC TRITHERME IDÉALE

Dans ce type de pompe à chaleur, on ne fournit pas de travail mais de la chaleur par l'intermédiaire d'une source thermique auxiliaire de température T_a .



Les bilans énergétique et entropique au cours d'un cycle s'écrivent alors :

$$\frac{Q_f}{T_f} - \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_a}{T_a} = 0$$

$$Q_f - Q_c + Q_a = 0 \quad \text{D'où} \quad Q_a = Q_c - Q_f \quad (\text{égalité de Clausius})$$

Le coefficient de performance calorifique est, dans ce cas :

$$COP_{tri} = \frac{Q_c}{Q_a}$$

$$\frac{Q_f}{Q_c} = \frac{T_f(T_a - T_c)}{T_c(T_a - T_f)}$$

L'équation s'écrit alors:

$$cop = \frac{1}{1 - \frac{Q_f}{Q_c}} = \frac{T_c}{(T_c - T_f)} \frac{(T_a - T_f)}{T_a}$$

Ce coefficient de performance est d'autant plus élevé que les températures T_c et T_f sont plus voisines et que T_a est plus éloignée de T_c .

Pour les mêmes températures T_c et T_f , les coefficients de performance des systèmes fonctionnant grâce à une fourniture de chaleur (systèmes au moins trithermes) sont inférieurs à ceux des systèmes recevant de l'énergie mécanique.

D'une manière générale, les pompes à chaleur trithermes ont une efficacité thermique faible. Elles sont surtout utiles pour valoriser une source chaude à température modérée (rejets industriels, énergie solaire, biomasse) qui sans cela serait inutilisée, de sorte que l'efficacité a relativement peu d'importance.

Cycles thermodynamique des pompes à chaleur à compression mécanique de vapeur

Introduction

Quelles que soient la puissance et la nature du fluide frigorigène, une pompe à chaleur à compression mécanique de vapeur comprend essentiellement les machines et dispositifs suivants :

Un évaporateur : qui vaporise le frigorigène en prélevant de la chaleur au frigoporteur (air, eau etc...) qui se refroidit. La vapeur sortant de cet évaporateur est saturée. L'évaporation s'effectue à la température de vaporisation T_f , correspondant à la pression d'évaporation p_f du fluide frigorigène. Le frigorigène prend au fluide frigoporteur la chaleur qu'il a absorbée dans son circuit d'utilisation.



Un compresseur mécanique et son moteur : le compresseur aspire, sous la pression p_F , la vapeur de frigorigène issue de l'évaporateur et la comprime jusqu'à la pression p_C pour la rejeter dans le condenseur. La pression p_C sera telle que la température de saturation correspondant à cette pression soit légèrement supérieure à la température du fluide de refroidissement dont on dispose.

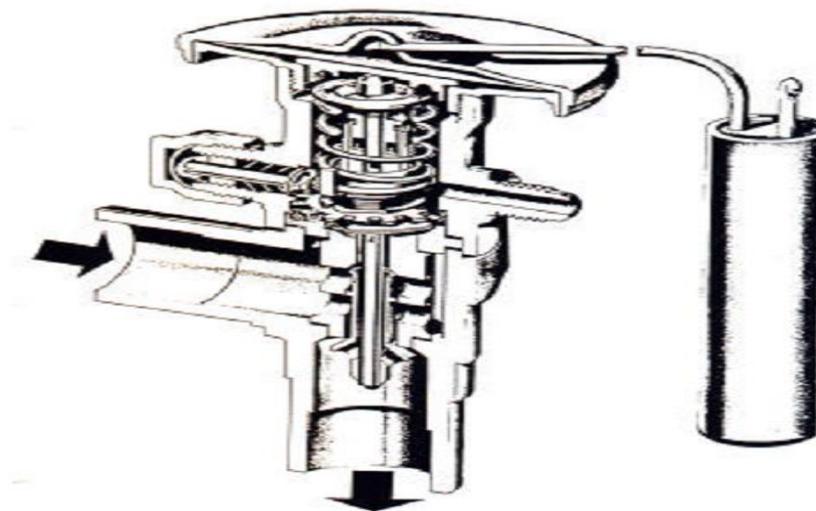


Un condenseur : c'est un échangeur de chaleur à surface avec circulation d'un côté du fluide frigorigène à condenser et de l'autre côté de fluide de refroidissement (air, eau, etc....) appelé aussi fluide caloporteur. Il condense le frigorigène en cédant la chaleur au caloporteur qui s'échauffe de T_{c1} à T_{c2} . Le fluide frigorigène quittant cet

échangeur est saturant. La condensation s'effectue à la température de condensation T_C correspondant à la pression de condensation p_C . On a : $T_C > T_{c2} > T_{c1}$.



Un détendeur : qui alimente en frigorigène l'évaporateur sans excès ni défaut. Le frigorigène y subit la détente de p_C à p_F .



Ces divers éléments sont reliés par des tuyauteries équipées des armatures de service et de sécurité usuelles.

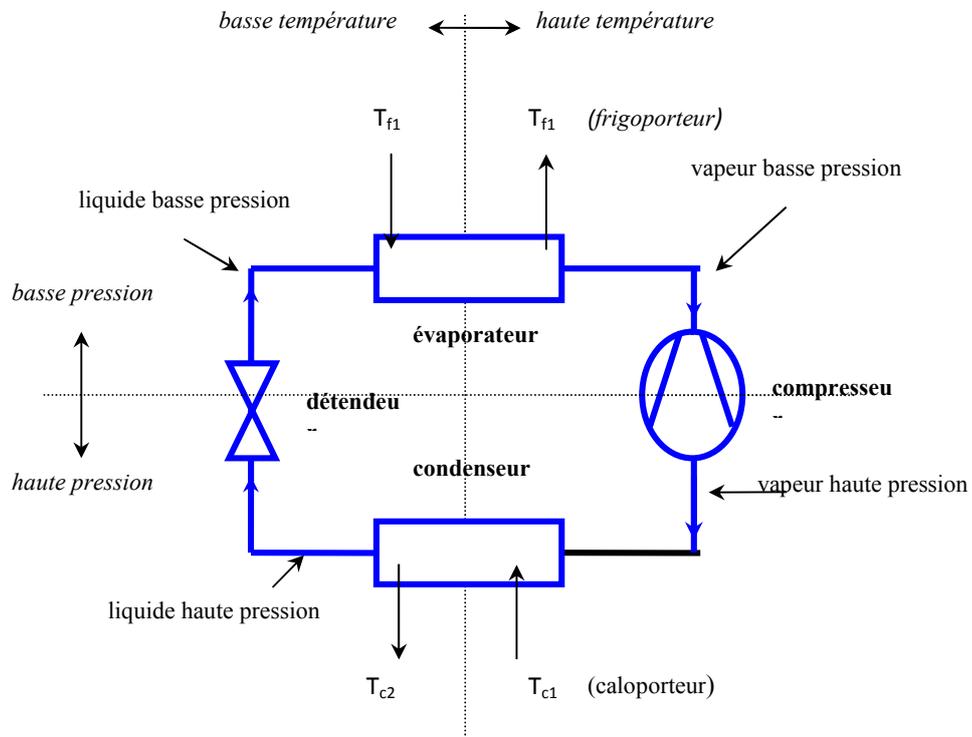
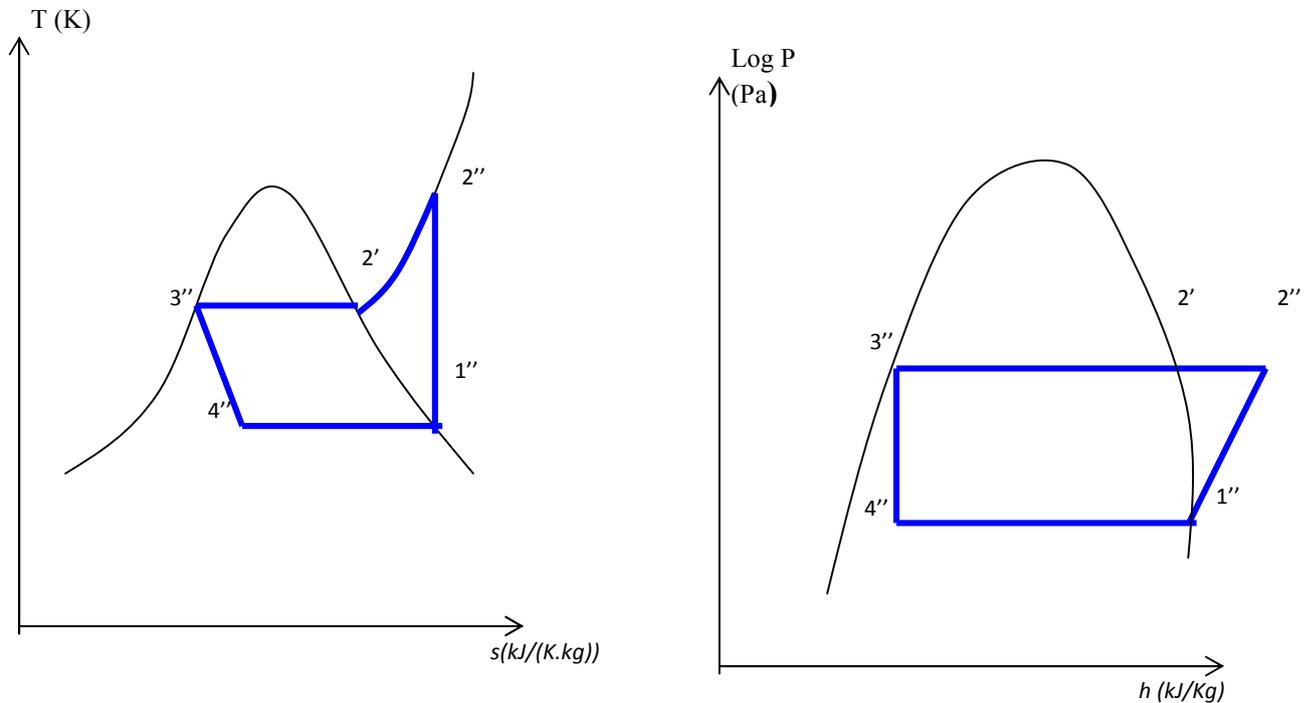


Schéma d'une installation d'une pompe à chaleur

Le cycle fondamental d'une telle machine (à compression mono-étagée ou à un seul compresseur) peut être décomposé en quatre étapes illustrées dans un diagramme entropique ($T = f(s)$) ou bien dans un diagramme enthalpique ($\log P = g(h)$) plus traditionnellement utilisé par les frigoristes.



Cycles thermodynamiques théoriques d'une PAC à compression

LES ÉTAPES DE TRANSFORMATION:

1''- 2'': **compression adiabatique réversible** (isentropique) : au point 1, le liquide est entièrement vaporisé.

2'-3'': **condensation isotherme et isobare** : il y a liquéfaction. La différence d'enthalpie entre 2' et 3 représente la quantité de chaleur laissée au condenseur (donc fournie au caloporteur).

3''- 4'' : **détente isenthalpique** du liquide frigorigène au travers d'une vanne de laminage. L'enthalpie ne varie pas car le froid produit sert pratiquement à refroidir le fluide.

4''-1'' : **évaporation isotherme et isobare**et le cycle recommence.

BILAN DES ÉCHANGES DE CHALEUR ET DE TRAVAIL

Chaleur extraite à l'évaporateur : $Q_f = h_1'' - h_4'' > 0$

Travail de compression : $w = h_2'' - h_1'' > 0$

Chaleur dégagée au condenseur : $Q_c = h_3' - h_2' < 0$

Détente (isenthalpique) : $h_4' = h_3''$ d'où $\Delta h = 0$

LE COEFFICIENT DE PERFORMANCE THÉORIQUE

Par définition le coefficient de performance d'une PAC théorique décrivant le cycle idéal est :

$$COP_{th} = \text{chaleur produite} / \text{travail reçu}$$

$$= \frac{|Q_c|}{W} \text{ car ce terme ne saurait être négatif)}$$

$$\text{d'où} \quad COP_{th} = (h_2'' - h_3'') / (h_2'' - h_1'')$$

Remarque : Pour apprécier l'efficacité de cette machine thermique par rapport à la machine idéale de Carnot, on introduit « le rendement exergetique » η_{th} défini par :

$$\eta_{th} = COP_{th} / COP_{id}$$

$$\eta_{th} = COP_{th} \cdot TC / (TC - TF).$$

$$\eta_{th} = ((h_2'' - h_3'') \cdot TC) / ((h_2'' - h_1'') \cdot (TC - TF)) < 1$$

References

Polycopie, Professeurs Me Béatrice JOURDON de Génie Electrique et M Abdoulaye NDIAYE de Physique Appliquée, Lycée Paul LANGEVIN de MARTIGUES (Bouches du Rhône)