

► Correction : Pompe à chaleur

1. Une pompe à chaleur est une **machine thermique** qui vise à capturer des calories d'une **source froide** (l'extérieur de la maison) pour les transmettre à une **source chaude** (l'intérieur de la maison). Elle est composée de quatre éléments :

Elle est composée de quatre éléments :

- Un **évaporateur** qui vaporise le fluide calorifique en contact avec la source froide. Au cours de cette étape, le fluide passe d'un mélange liquide/vapeur à un état gazeux.
- Un **compresseur** qui augmente la pression du fluide (et donc sa température, de par la loi des gaz parfaits). Le fluide reste sous forme de vapeur.
- Un **condenseur** qui restitue les calories capturées à la source froide dans la zone à réchauffer. Le fluide passe de l'état gazeux à l'état liquide.
- Un **détendeur** qui abaisse la pression et la température de sorte que le fluide repasse dans un état de mélange liquide/gaz.

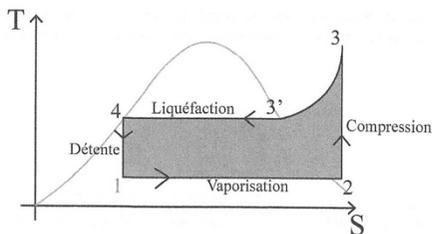
Un réfrigérateur fonctionne sur le même principe. En effet, une pompe à chaleur n'est rien d'autre qu'un réfrigérateur branché à l'envers !

Question d'examinateur

Quelle est l'utilité du compresseur et du condenseur ?

En augmentant la pression du fluide, on déplace son point d'évaporation : le fluide qui entre dans l'évaporateur est à basse pression de sorte que celui-ci se transforme en vapeur à basse température (à la température de la source froide), ce qui facilite la capture des calories.

2. Détaillons les différents trajets du diagramme entropique :



- 1 → 2 : **Vaporisation** : il s'agit d'un changement d'état qui se fait à température constante. Le passage de l'état liquide à l'état gazeux correspond à une diminution de la cohésion moléculaire : les particules sont agitées, ce qui constitue une **augmentation du désordre** et donc de l'entropie.
- 2 → 3 : **Compression** : la compression est **isentropique** (dans le cas idéal). L'augmentation de la pression provoque également l'augmentation de la température selon la loi des gaz parfaits.
- 3 → 3' : **Refroidissement** : le gaz refroidit au contact du condenseur avant de changer de phase. Ce refroidissement est supposé isobare. De fait le premier principe donne $dU = C_p dT = \delta Q$, or $dS = \frac{\delta Q}{T} = C_p \frac{dT}{T}$. On obtient donc l'équation :

$$S = S_0 + C_p \cdot \ln\left(\frac{T}{T_0}\right)$$

Où T est la température du gaz et T_0 une température de référence.

- 3' → 4 : **Liquéfaction** : encore un changement d'état à température constante. Cette fois, les molécules s'organisent et le désordre diminue, comme l'entropie.
- 3 → 1 : **Détente** : la détente est supposée isentropique.

⊕ Petit plus

On peut se demander pourquoi le point 2 ne se trouve pas sur la courbe de changement de phase. Cette opération s'appelle la **surchauffe**. On cherche à s'assurer qu'il ne reste plus une goutte de liquide dans le fluide de sorte à exploiter au maximum le potentiel de la vapeur. De plus, cela permet de protéger le compresseur. L'opération réciproque s'appelle le **sur-refroidissement** qui consisterait à décaler le point 4 vers la gauche pour s'assurer qu'il n'y ait plus de gaz dans le fluide.

3. L'**efficacité** énergétique est le rapport entre l'énergie utile fournie par la machine thermique et l'énergie apportée pour son fonctionnement. Ce rapport **peut être supérieur à 1**, à l'inverse d'un rendement.

Pour mémoire

Dans le cas d'un **rendement**, la grandeur d'entrée (par exemple, la puissance électrique fournie à un moteur électrique) est **directement** transformée pour produire la grandeur de sortie (la puissance mécanique de l'arbre moteur). De fait, le rendement ne peut pas dépasser 1.

Dans le cas de la pompe à chaleur, l'énergie électrique n'est **pas directement** transformée pour obtenir le transfert thermique : elle ne fait que **rendre le transfert possible**.

Cas réversible : Cycle de Carnot

L'énergie interne et l'entropie sont des **fonctions d'état**. Leur variation est nulle sur un cycle complet. En considérant les valeurs absolues des flux thermiques, on peut écrire :

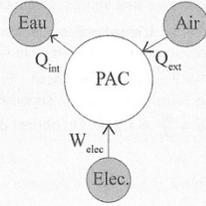
$$\text{— 1}^{\text{er}} \text{ principe : } \Delta U = W_{\text{elec}} - |Q_{\text{int}}| + |Q_{\text{ext}}| = 0$$

$$\text{— 2}^{\text{nd}} \text{ principe : } \Delta S = -\frac{|Q_{\text{int}}|}{T_{\text{eau}}} + \frac{|Q_{\text{ext}}|}{T_{\text{ext}}} = 0$$

• Piège

Soyez vigilant avec le signe des transferts thermiques. On applique la **règle du portefeuille** au système : on compte **positivement** l'énergie que reçoit le fluide et en **négalif** l'énergie qui en sort. Par exemple :

- Q_{int} est le transfert entre l'eau de la piscine et le fluide caloporteur. On chauffe l'eau de la piscine, la chaleur va donc du fluide vers l'eau : ce transfert est **négalif**.
- Q_{ext} est le transfert entre l'air extérieur et le fluide caloporteur. Le fluide absorbe des calories à l'extérieur, le transfert est **positif**.



Sachant que l'efficacité est définie comme :

$$e = \frac{\text{énergie thermique reçue par l'eau}}{\text{énergie électrique}} = \frac{|Q_{int}|}{W_{elec}}$$

En injectant l'expression issue du second principe dans celle issue du premier principe, on obtient :

$$W_{elec} - |Q_{int}| + \frac{T_{ext}}{T_{eau}} |Q_{int}| = 0 \Rightarrow e = \frac{|Q_{int}|}{W_{elec}} = \frac{T_{eau}}{T_{eau} - T_{ext}}$$

■ **A.N.** : Dans les conditions spécifiées par le vendeur, l'efficacité de la PAC est $e = 19.8$

Cas irréversible

Le premier principe donne toujours $\Delta U = W_{elec} - |Q_{int}| + |Q_{ext}| = 0$.

En revanche, le second principe s'écrit : $\Delta S = -\frac{|Q_{int}|}{T_{eau}} + \frac{|Q_{ext}|}{T_{ext}} + S_{créée} = 0 \Rightarrow \frac{|Q_{int}|}{|Q_{ext}|} \geq \frac{T_{eau}}{T_{ext}}$

Dans le cas irréversible, l'efficacité vérifie :

$$e = \frac{|Q_{int}|}{W_{elec}} = \frac{|Q_{int}|}{|Q_{int}| - |Q_{ext}|} \Rightarrow e_{reel} = \frac{1}{1 - \frac{|Q_{ext}|}{|Q_{int}|}} \leq \frac{1}{1 - \frac{T_{ext}}{T_{eau}}} = e_{ideal}$$

4.

4.1. On calcule la masse d'eau évaporée en une heure :

$$m = \gamma S \rho_{eau}$$

Avec $\rho_{eau} = 1 \text{ kg/L}$. On remonte à l'énergie consommée grâce à l'enthalpie massique de vaporisation :

$$E = m \cdot L_{vap}$$

■ **A.N.** : On trouve $m = 6 \text{ kg/h}$ et $E = 13.8 \text{ MJ} = 3.83 \text{ kWh}$.

✍ Pour mémoire

L'évaporation est une réaction **endothermique** : elle consomme des calories et **refroidit** l'eau de la piscine. Ce phénomène se produit tant que l'équilibre thermodynamique entre la teneur en vapeur d'eau de l'air et l'eau liquide n'est pas établi, autrement dit tant que la **pression de vapeur saturante** n'est pas atteinte. Comme la piscine est à l'air libre, cet équilibre n'est jamais atteint : c'est pour cela qu'on met une bâche sur les piscines.

4.2. Pour contrer la perte thermique due à l'évaporation, il faut fournir de la puissance à la PAC. Elle peut être calculée à partir de l'efficacité et de l'énergie perdue pendant une heure :

$$P_{PAC} = \frac{1}{3600} \frac{E}{e}$$

■ **A.N.** : $P_{PAC} = 766 \text{ W}$

4.3. Dans le cas d'une résistance (rendement unitaire), la puissance dissipée vaut :

$$P_{résistance} = \frac{E}{3600}$$

■ **A.N.** : $P_{résistance} = 3.83 \text{ kW}$

L'installation d'une PAC permet de réduire la consommation d'un facteur égal à son efficacité par rapport à un système de chauffage résistif.

5. Les panneaux solaires reçoivent une puissance $P_{toit} = P_{soleil} S_{toit}$. Par conséquent la surface de panneau solaire à utiliser est :

$$S_{toit} = \frac{P_{toit}}{P_{soleil}}$$

■ **A.N.** : Pour $P_{toit} = P_{évaporation} = 3.83 \text{ kW}$, on trouve $S_{toit} = 13 \text{ m}^2$

On peut donc sans problème imaginer un système de panneaux thermodynamiques installé sur le toit d'une maison. Pour étudier l'intérêt énergétique de cette solution, il faudrait étudier le fonctionnement de la pompe qui envoie l'eau dans les conduits des panneaux solaires, ainsi que les aléas de la météo.

⊕ Petit plus

Il existe de nombreux systèmes de chauffage de piscine. Les équipements solaires ont l'avantage d'être très économiques à l'utilisation et écologiques, mais sont dépendants de l'ensoleillement. Les systèmes les plus répandus sont les systèmes passifs, comme la **bâche solaire** qui permet d'éviter l'évaporation, et l'abri de piscine qui permet en plus de profiter de l'*effet de serre*.