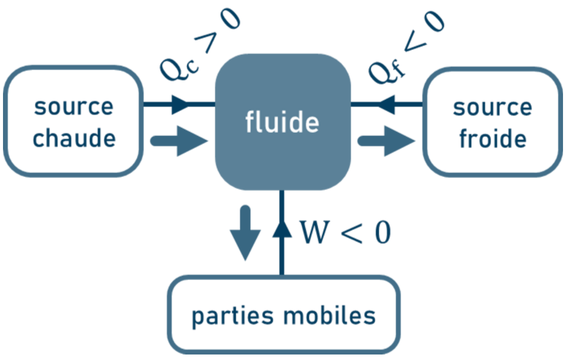
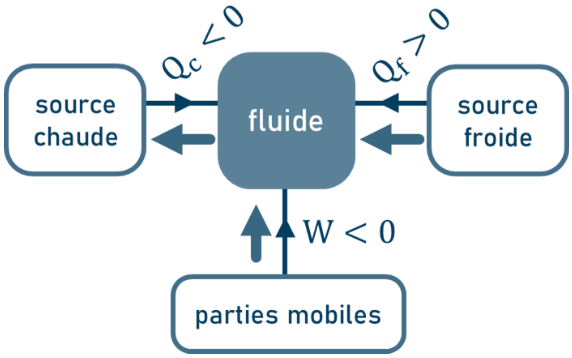
I - MACHINES THERMIQUES : RAPPELS ET GÉNÉRALITÉS

Machine thermique - Une machine thermique est dispositif dans lequel un fluide subit des **transformations cycliques**, au cours desquelles il échange de l'énergie par **travail et transfert thermique** avec l'extérieur.

I.1 - Principe général d'une machine thermique





Cas du moteur : On prend de la chaleur à une source chaude, une partie est utilisée pour produire un travail récupérable, et l'autre partie est transmise à une source froide.

Cas d'une machine frigorifique : On exerce un travail sur le fluide, dans le but de le forcer à prélever de l'énergie à une source froide, pour la transmettre à une source chaude.

I.1.A - Rendement et efficacité

Dans tous les cas, le rendement ou l'efficacité (aussi appelée « coefficient de performance ») s'exprime par le rapport de l'énergie souhaitable récupérée, sur l'énergie dépensée :

Rendement d'un moteur	Efficacité d'une machine frigorifique	Efficacité d'une pompe à chaleur
On doit chauffer un fluide afin de récupérer un travail mécanique : $(Q_c > 0, W < 0)$ $\quad \eta = -\dfrac{W}{Q_c} < 1$	On doit compresser un fluide pour prélever de la chaleur à une source froide, et la relâcher dans la source chaude : $(W > 0, Q_f > 0)$ $\quad e = \dfrac{Q_f}{W} < \infty$	On doit compresser un fluide pour prélever de la chaleur à une source froide, et la relâcher dans la source chaude : $(W > 0, Q_c < 0)$ $\quad e = -\dfrac{Q_c}{W} < \infty$

I.2 - Cycle de Carnot (rappel)

I.2.A - Rendement et efficacité de Carnot (rappel)

Démonstration manuscrite – Rendement d'un cycle de Carnot

Retrouver l'expression du rendement de Carnot pour un moteur, et démontrer qu'il est atteint lorsque les transformations subis par le fluide sont réversibles. Les températures des sources sont notées T_c et T_f.

Que le cycle soit réversible ou non, la variation des fonctions d'état sur un cycle est nulle :

$$\Delta U_{cycle} = Q_c + Q_f + W = 0 \qquad \text{et} \qquad \Delta S_{cycle} = \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} + S_{cr} = 0$$

On peut alors manipuler ces deux expressions pour faire apparaitre l'expression du rendement :

$$\frac{Q_c}{T_c} + \frac{-Q_c - W}{T_f} = -S_{cr} \quad \xRightarrow{\times T_f \ \div Q_c} \quad \frac{T_f}{T_c} - 1 - \frac{W}{Q_c} = -\frac{T_f\, S_{cr}}{Q_c} \qquad \text{i.e.} \quad \boxed{\eta = -\frac{W}{Q_c} = \left(1 - \frac{T_f}{T_c}\right) - \frac{T_f\, S_{cr}}{Q_c}}$$

On peut retrouver dans chaque cas le rendement de Carnot (chaque démonstration est au programme) :

Rendement d'un moteur	Efficacité d'une machine frigorifique	Efficacité d'une pompe à chaleur
$\eta = -\dfrac{W}{Q_c} = \boxed{1 - \dfrac{T_f}{T_c}}$	$e = \dfrac{Q_f}{W} = \boxed{\dfrac{T_f}{T_c - T_f}}$	$e = -\dfrac{Q_c}{W} = \boxed{\dfrac{T_c}{T_c - T_f}}$

II - PRINCIPES DE LA THERMODYNAMIQUE EN SYSTÈME OUVERT

Premier principe industriel par unité de temps (ou en puissance)

Pour un fluide entrant et sortant d'un composant industriel, avec un débit massique D_m, on a :

$$D_m\left(\left(h_s+\frac{1}{2}v_s^2+g\,z_s\right)-\left(h_e+\frac{1}{2}v_e^2+g\,z_e\right)\right)=\mathcal{P}_{th}+\mathcal{P}_i \qquad \text{avec} \quad \begin{cases}\mathcal{P}_{th}=\delta Q/dt\\ \mathcal{P}_i=\delta W_i/dt\end{cases}$$

Où $\mathcal{P}_{th}$ et $\mathcal{P}_i$ sont la **puissance thermique (ou flux thermique)** et la **puissance mécanique** transmises au fluide (en W).

Premier principe industriel par unité de masse traversant

Pour un fluide entrant et sortant d'un composant industriel, on a :

$$\left(h_s+\frac{1}{2}v_s^2+g\,z_s\right)-\left(h_e+\frac{1}{2}v_e^2+g\,z_e\right)=q+w_i \qquad \text{avec} \quad \begin{cases}q=\delta Q/dm\\ w_i=\delta Q/dm\end{cases}$$

Où q et w_i sont le **transfert thermique massique** et le **travail indiqué massique** reçus par unité de masse de fluide traversant (en $J.kg^{-1}$).

Attention : il faut bien comprendre la signification de ces deux formules, et la différence entre les deux :

- La première est exprimée en $W = J.s^{-1}$, c'est-à-dire qu'on compte les transferts d'énergie avec le fluide en **joules par seconde** ;
- La seconde est exprimée en $J.kg^{-1}$, c'est-à-dire qu'on compte les transferts d'énergie avec le fluide en **joules par kilogramme de fluide ayant traversé le composant** (donc la masse totale de fluide dans tout le circuit n'est absolument pas un paramètre pertinent dans cette expression).

II.1 - Deuxième principe en système ouvert

Deuxième principe industriel par unité de masse traversant

Pour un fluide entrant et sortant d'un composant industriel, on a : $s_s - s_e = s_{ech} + s_{cr} = \frac{q}{T_{ext}} + s_{cr}$

Où s_{ech} est l'entropie massique reçue par le fluide par unité de masse traversant (en $J.K^{-1}.kg^{-1}$) et s_{cr} l'entropie créée par unité de masse de fluide traversant le composant.

Deuxième principe industriel par unité de temps (ou en puissance)

Pour un fluide entrant et sortant d'un composant industriel, on a :

$$D_m(s_s-s_e)=\frac{\delta s_{ech}}{dt}+\frac{\delta s_{cr}}{dt}=\frac{\mathcal{P}_{th}}{T_{ext}}+\sigma$$

Où σ est appelé « taux de création d'entropie » (en $J.K^{-1}.s^{-1}$), ou parfois « puissance entropique ».

Les **causes de création d'entropie** dans un système ouvert son semblables à celles en système fermé : inhomogénéités, transformations brutales, vibrations, frottements, viscosité, etc.

II.2 - Systèmes à entrées ou sorties multiples

On généralise sans problème à des systèmes avec plusieurs entrées et sorties :

$$\sum_{\substack{\text{entrees}\\ i}} D_{m,i}=\sum_{\substack{\text{sorties}\\ j}} D_{m,j} \quad\Rightarrow\quad \begin{cases}\displaystyle\sum_{\substack{\text{sorties}\\ i}} D_{m,i}\left(h_s+\frac{1}{2}v_s^2+g\,z_s\right)-\sum_{\substack{\text{entrées}\\ j}} D_{m,j}\left(h_e+\frac{1}{2}v_e^2+g\,z_e\right)=\mathcal{P}_{th}+\mathcal{P}_i\\ \displaystyle\sum_{\substack{\text{sorties}\\ i}} D_{m,i}\,s_i-\sum_{\substack{\text{entrées}\\ j}} D_{m,j}\,s_j=\frac{\delta s_{ech}}{dt}+\frac{\delta s_{cr}}{dt}=\frac{\mathcal{P}_{th}}{T_{ext}}+\sigma\end{cases}$$

III - COMPOSANTS INDUSTRIELS USUELS

On propose ci-dessous un tableau récapitulatif des différents composants présentés dans cette partie. **Les apprendre par cœur n'est pas recommandé** ; il est tout à fait possible de les retrouver en quelques secondes.

Composant	Rôle	w_i	q	Premier principe
Compresseur, pompe	Augmenter la pression du fluide	oui	non	$\boxed{h_s - h_e = w_i > 0}$ ou $\boxed{D_m(h_s - h_e) = P_i > 0}$
Turbine	Récupérer un travail en diminuant la pression du fluide	oui	non	$\boxed{h_s - h_e = w_i < 0}$ ou $\boxed{D_m(h_s - h_e) = P_i < 0}$
Ech. thermique (simple flux)	Réaliser un échange thermique avec l'extérieur	non	oui	$\boxed{h_s - h_e = q}$ ou $\boxed{D_m(h_s - h_e) = \mathcal{P}_{th}}$
Ech. thermique (double flux)	Réaliser un échange thermique entre deux écoulements	non	non	Voir TD
Tuyère	Convertir l'enthalpie en énergie cinétique	non	non	$\boxed{\left(h_s + \frac{1}{2}v_s^2\right) - \left(h_e + \frac{1}{2}v_e^2\right) = 0}$
Détendeur	Diminuer la pression du fluide	non	non	$\boxed{h_s - h_e = 0}$
Mélangeur	Mélanger deux fluides	non	non	$\boxed{D_{m,s}h_s - \left(D_{m,e1}h_{e,1} + D_{m,e2}h_{e,2}\right) = 0}$
Séparateur	Séparer un mélange diphasique	non	non	$\boxed{\left(D_{m,V}\, h_V + D_{m,L}\, h_L\right) - D_{m,e}\, h_e = 0}$

IV - EXEMPLES DE CYCLES INDUSTRIELS CLASSIQUES

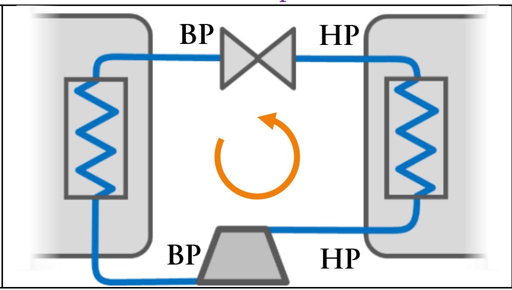
IV.1 - Pompe à chaleur

IV.1.A - Structure schématique d'une pompe à chaleur

On considèrera un cas particulier fonctionnant entre un jardin à 5°C, et une maison dont les radiateurs sont à 35°C.

Détendeur : abaisse la pression du fluide, et donc sa température

Côté source froide :
Échangeur (appelé « **évaporateur** »)
Le fluide prend de l'énergie à l'extérieur par transfert thermique ($q > 0$)



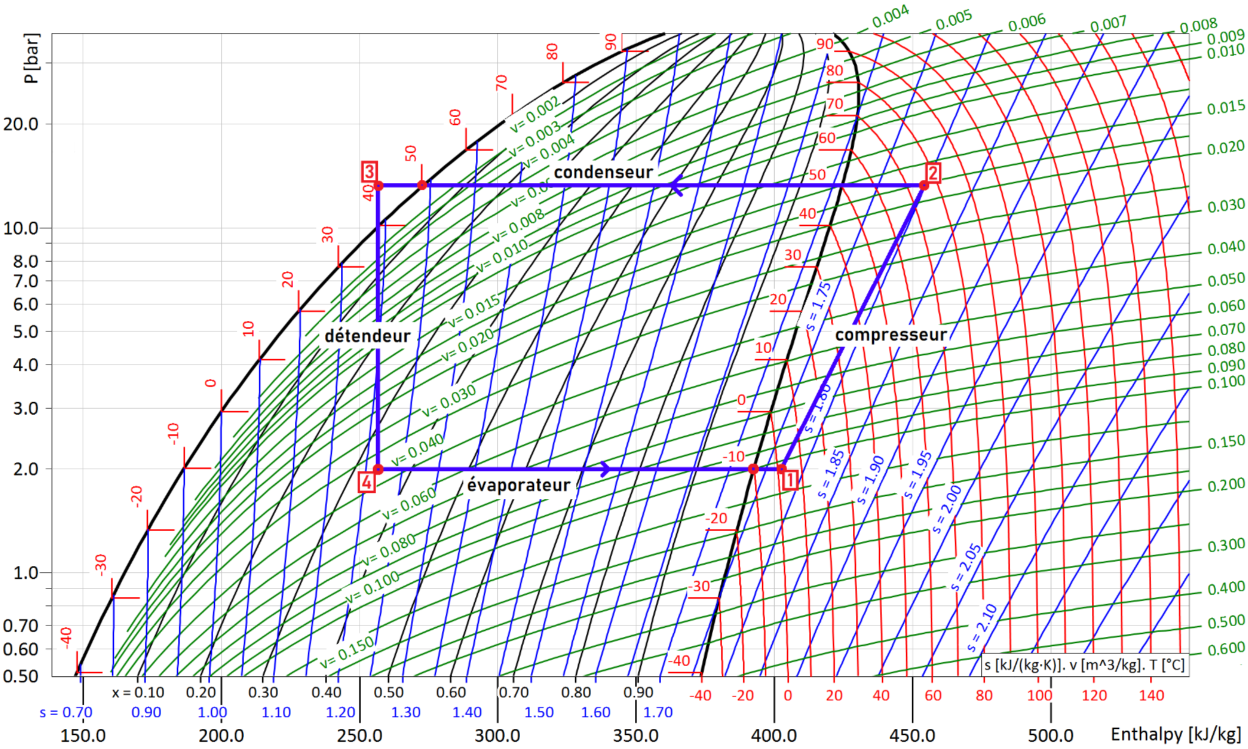
Côté source chaude :
Échangeur (appelé « **condenseur** »)
Le fluide cède de l'énergie à la maison par transfert thermique ($q < 0$)

Compresseur : augmente la pression du fluide, et donc sa température

IV.1.B - Cycle dans un diagramme des frigoristes

On considèrera que du côté basse pression le fluide est à 2 bar, et à que du côté haute pression, il est à 15 bar. On ajoute que :

- Le compresseur prend en entrée le fluide à l'état que vapeur saturante ;
- Le condenseur amène le fluide à l'état de liquide saturant.



IV.1.C - Efficacité de la pompe à chaleur

L'efficacité d'une pompe à chaleur est définie par :

$$e = -\frac{Q_c}{W} = \frac{\mathcal{P}_c}{\mathcal{P}_i} = -\frac{q_c}{w} = -\frac{\text{énergie libérée par le fluide dans le condenseur}}{\text{travail massique fourni par le compresseur}}$$

Dans le cas particulier représenté sur le diagramme thermodynamique ci-dessus, on obtient :

$$e = -\frac{q_c}{w} = -\frac{h_3 - h_2}{h_2 - h_1} = \frac{450 - 250}{450 - 400} = \frac{200}{50} = 4 \quad \text{(pour 1 J dépensé en travail, 4 J de chaleur dans la maison)}$$

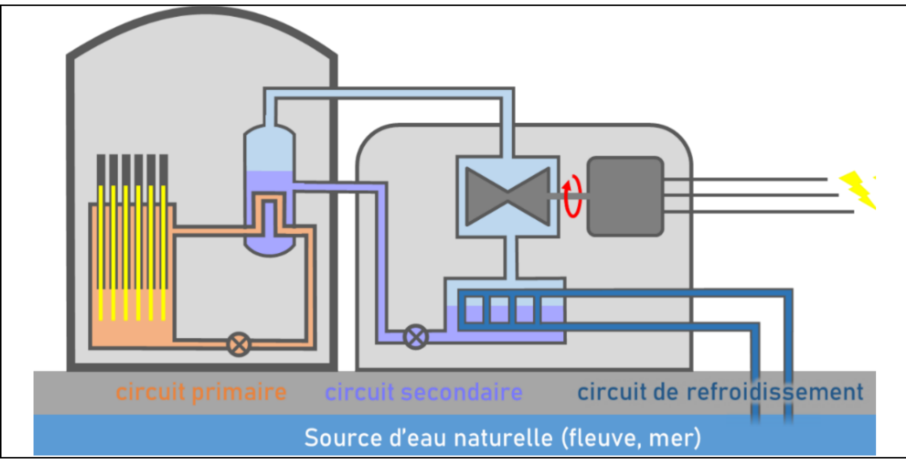
Sachant que la source chaude et froide sont à 35°C et 5°C, l'expression de l'efficacité de Carnot donne :

$$e_{\text{Carnot}} = \frac{T_c}{T_c - T_f} = \frac{35 + 273}{35 - 5} \simeq 10$$

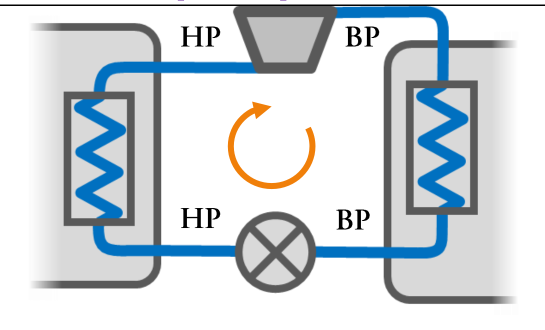
Comme prévu, l'efficacité de Carnot est supérieure à l'efficacité réelle. Cela est dû aux différentes irréversibilités, qu'on constate au niveau de la compression et de la détente sur le diagramme des frigoristes.

IV.2 - Cycle de Rankine

IV.2.A - Structure schématique d'une centrale nucléaire

Bât. de confinement Générateur de vapeur Cœur du réacteur Pompe		Zone non-nucléaire Turbine Condenseur Alternateur Pompe

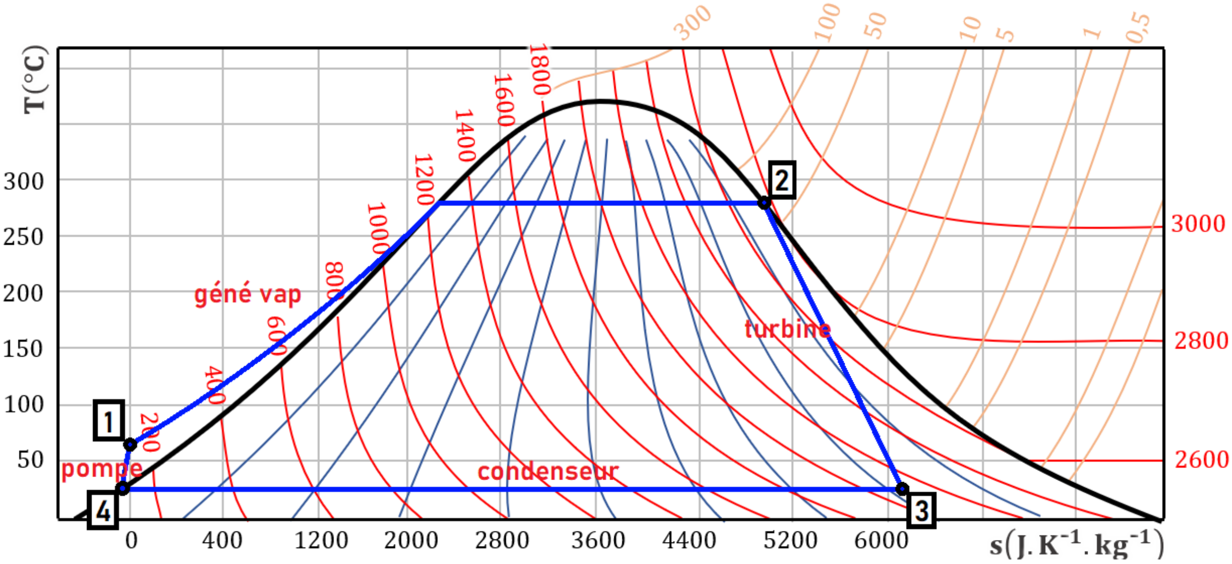
La partie génératrice d'énergie utile (travail mécanique récupéré par la turbine) est le circuit secondaire. On étudie donc ci-dessous cette partie de la centrale, dans laquelle le fluide tourne en circuit fermé entre la source chaude et la source froide :

<table>
<tr><td colspan="3">Turbine : abaisse la pression du fluide
(détente de vapeur) en prélevant un travail</td></tr>
<tr><td><u>Côté source chaude</u> :
Échangeur (appelé « génér. de vap. »)
Chauffe et vaporise l’eau sous pression</td><td>
</td><td><u>Côté source froide</u> :
Échangeur (appelé « condenseur »)
Refroidit et condense la vapeur</td></tr>
<tr><td colspan="3">Pompe : augmente la pression du fluide
pour le faire circuler vers l’élément suivant</td></tr>
</table>

IV.2.B – Cycle dans un diagramme entropique

On considèrera que le fluide atteint des températures extrêmales 275°C et 30°C. De plus, on ajoute que :

- La turbine prend en entrée un fluide à l’état de vapeur saturante, à haute température ;
- Le condenseur prend en entrée le fluide à basse température, et l’amène à l’état de liquide saturant.



IV.2.C – Rendement du cycle de Rankine

Le rendement d’un moteur est défini par :

$$\eta = -\frac{W}{Q_c} = -\frac{\mathcal{P}_m}{\mathcal{P}_c} = -\frac{w}{q_c} = \frac{\text{travail récupéré dans la turbine}}{\text{chaleur fournie par la source chaude}}$$

Dans le cas particulier représenté sur le diagramme thermodynamique ci-dessus, on obtient :

$$\eta = -\frac{w}{q_c} = -\frac{h_2 - h_1}{h_3 - h_2} \simeq -\frac{2800 - 150}{2000 - 2800} \simeq 0{,}3$$

Sachant que le circuit primaire d’un réacteur nucléaire est d’environ 300°C, et que la source froide est l’eau d’un fleuve à 15°C, l’expression du rendement de Carnot donne :

$$e_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_f}{T_c} = 1 - \frac{15 + 273}{300 + 273} \simeq 0{,}5$$

On retrouve encore une fois un rendement moindre que celui de Carnot.