

Machines thermiques

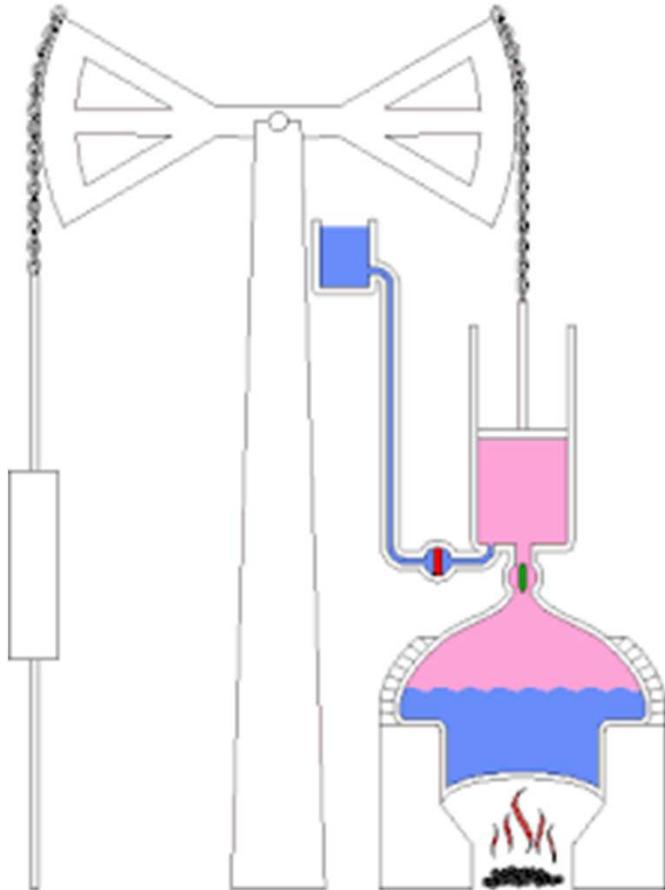
La physique c'est fun depuis longtemps!



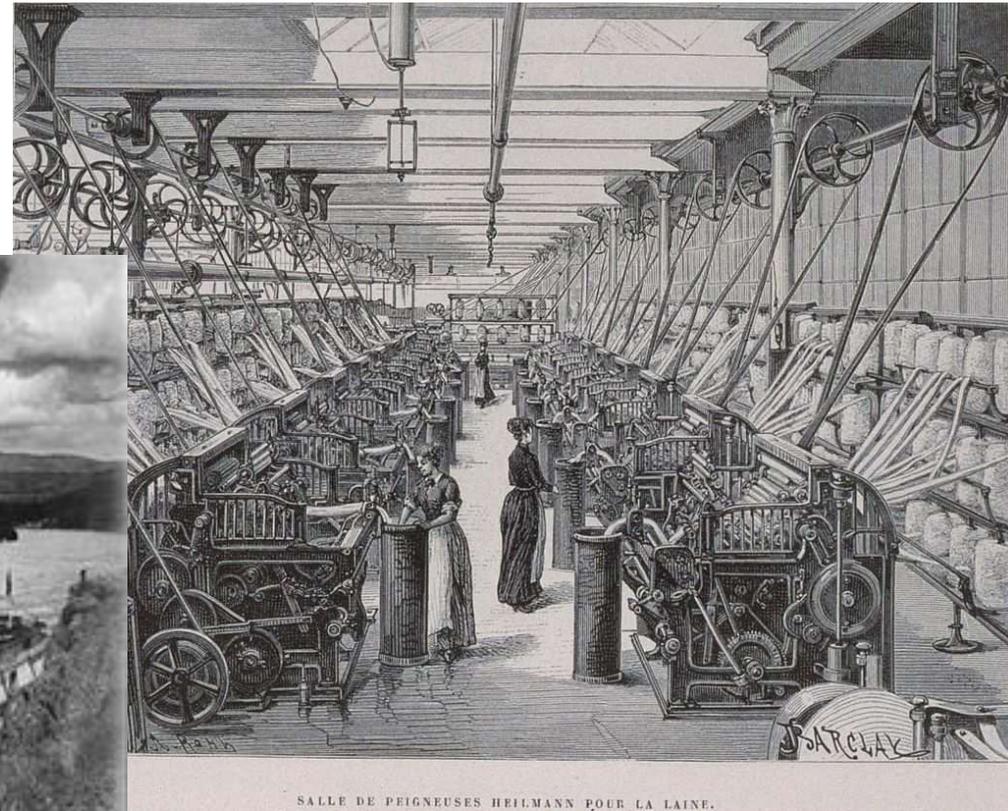
Heron d'Alexandrie

(1^{er} siècle av. JC)

Once upon a time: Newcomen engine (1712)

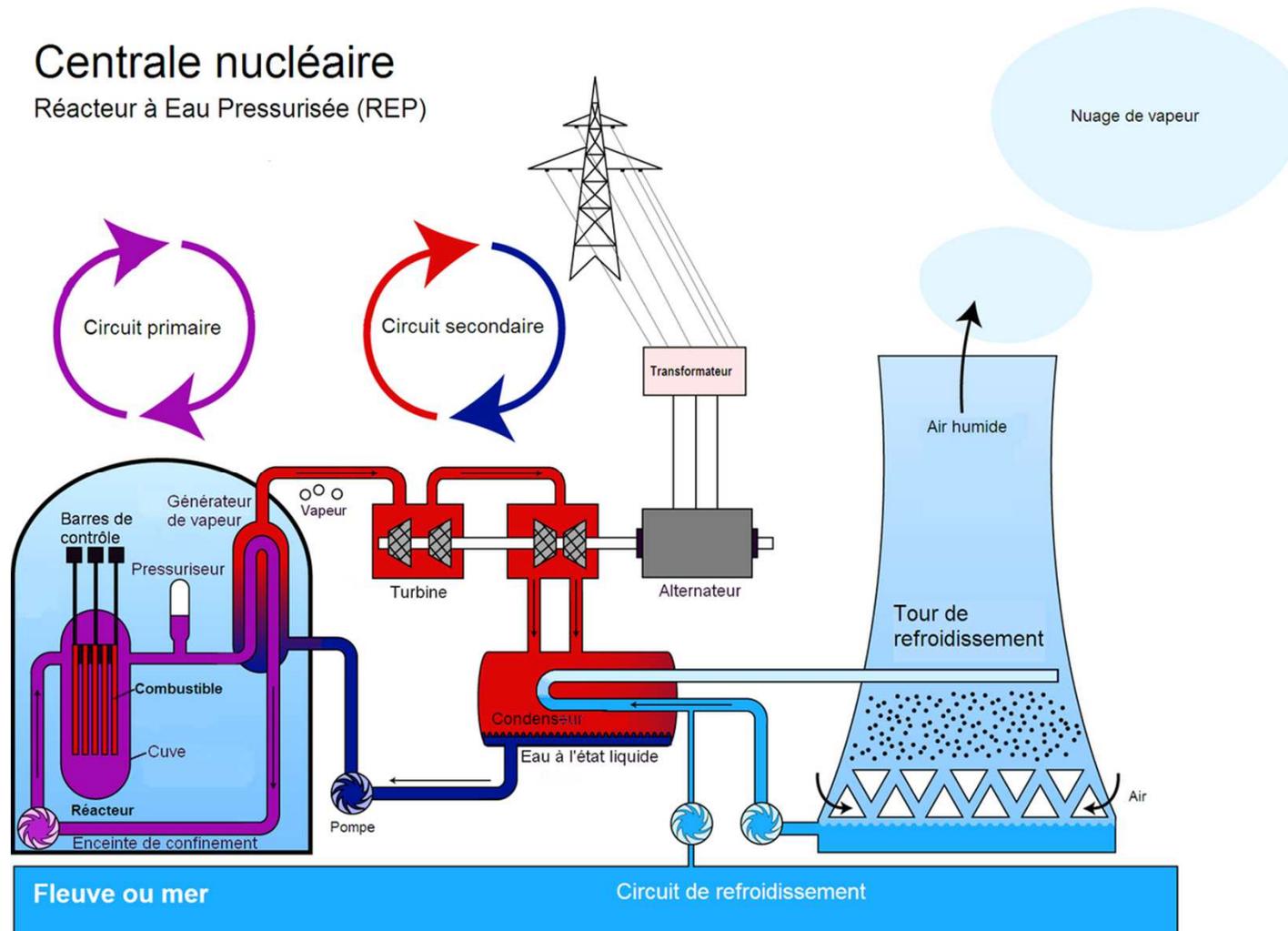


Et alors... c'est la révolution industrielle!



Et ça continue ...

Centrale nucléaire Réacteur à Eau Pressurisée (REP)



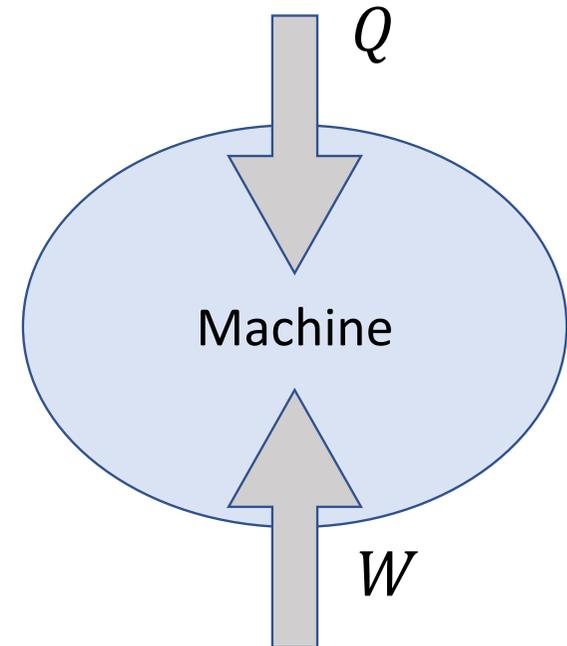
Modélisation des machines thermiques

Définition : Machine thermique

Une **machine** est un système permettant la conversion ou le transfert d'énergie.

Une **machine thermique** permet de **convertir** un travail en transfert thermique ou inversement.

C'est un système dans lequel un **fluide**, appelé agent thermique ou fluide caloporteur, subit une **transformation cyclique**, ce qui permet une conversion d'énergie.



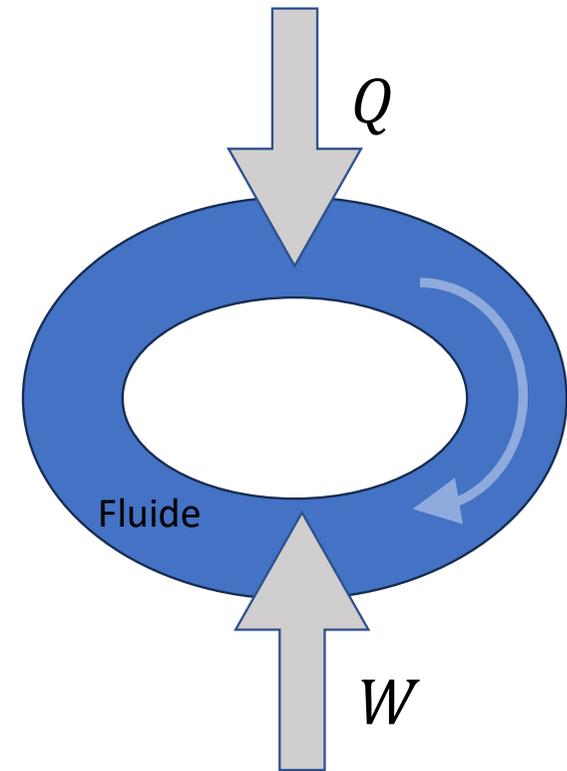
Modélisation des machines thermiques

Définition : Machine thermique

Une **machine** est un système permettant la conversion ou le transfert d'énergie.

Une **machine thermique** permet de **convertir** un travail en transfert thermique ou inversement.

C'est un système dans lequel un **fluide**, appelé agent thermique ou fluide caloporteur, subit une **transformation cyclique**, ce qui permet une conversion d'énergie.



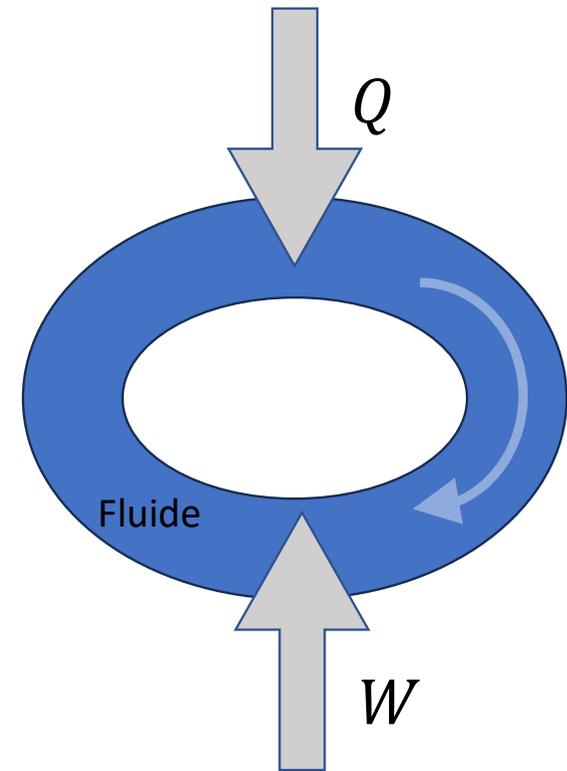
Modélisation des machines thermiques

Définition : Cycle thermodynamique

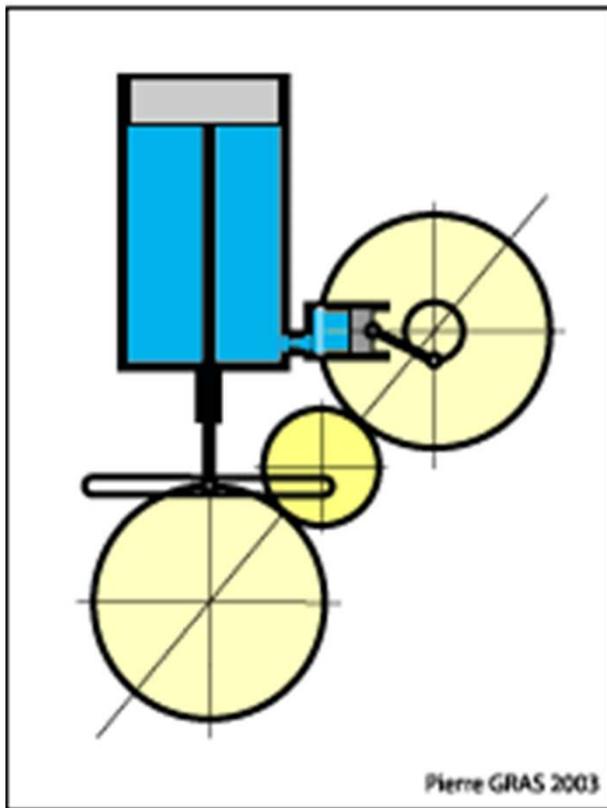
Un ***cycle thermodynamique*** est une succession de transformations d'un système qui le ramènent dans son état initial.

Le cycle commence et se finit dans le même état d'équilibre. La ***variation sur un cycle des grandeurs d'état est donc nulle*** :

$$\Delta U = 0, \Delta H = 0, \Delta S = 0$$

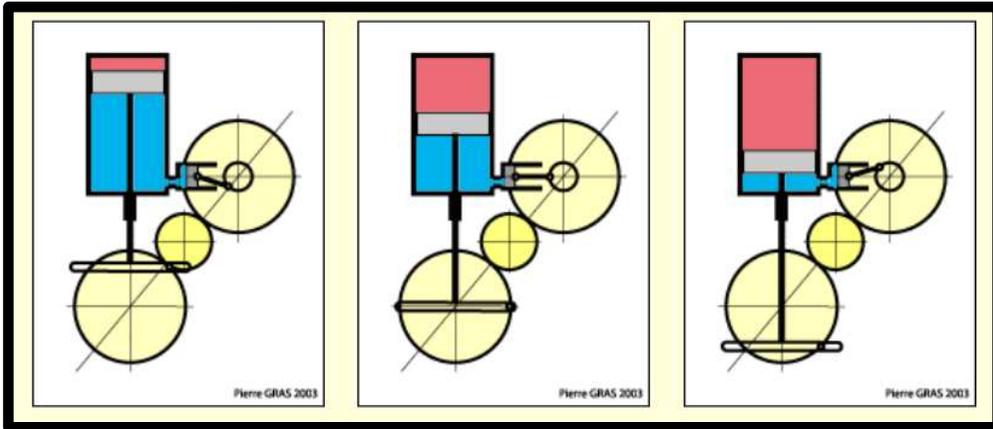


Exemple de cycle : le moteur Stirling

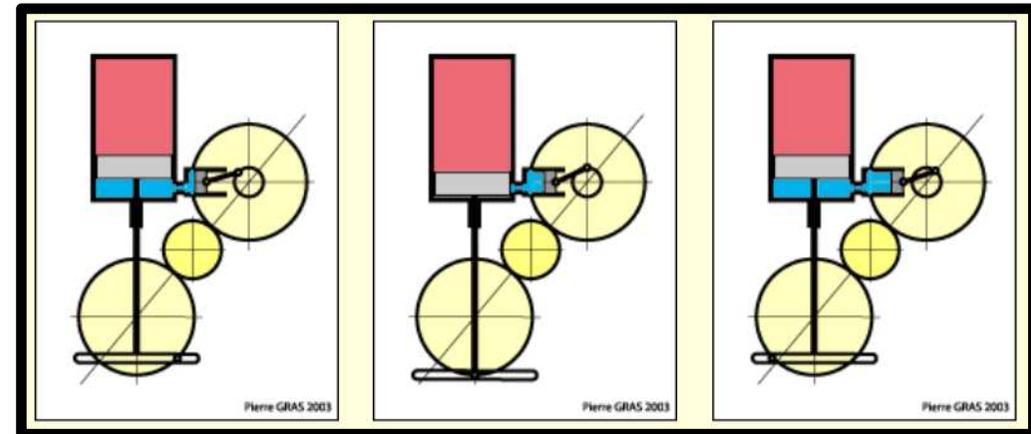


Exemple de cycle : le moteur Stirling

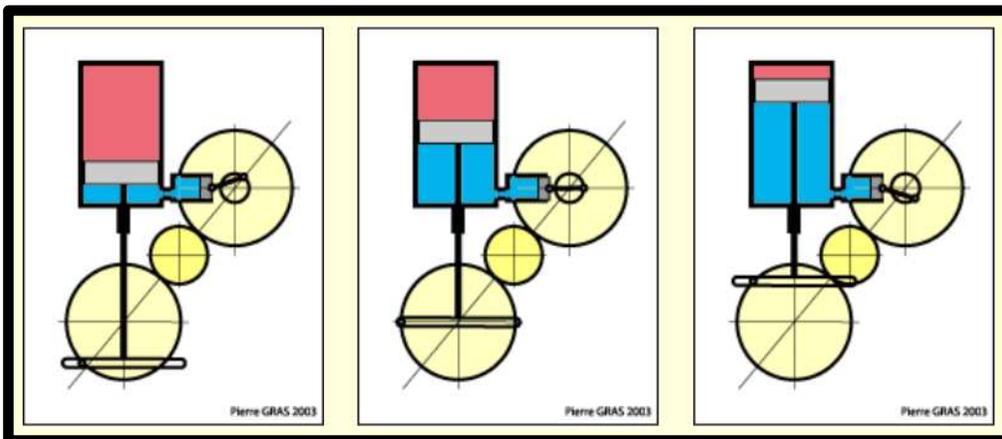
1. Chauffage



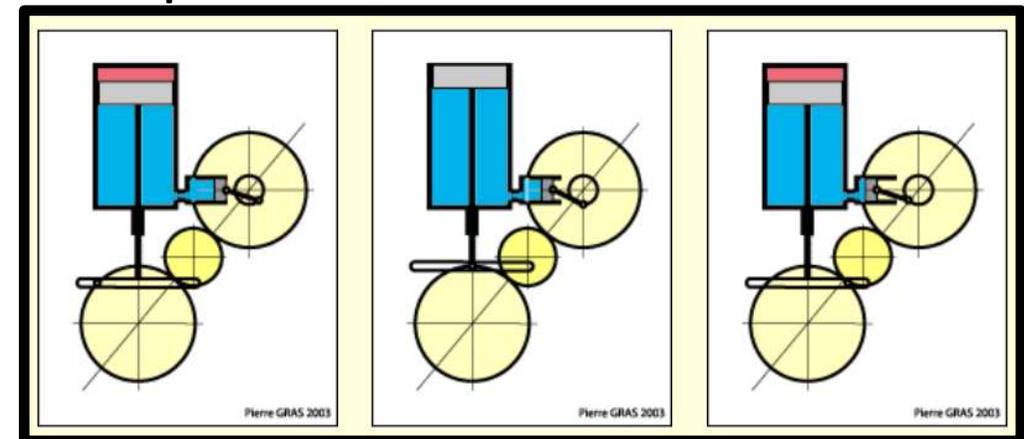
2. Détente



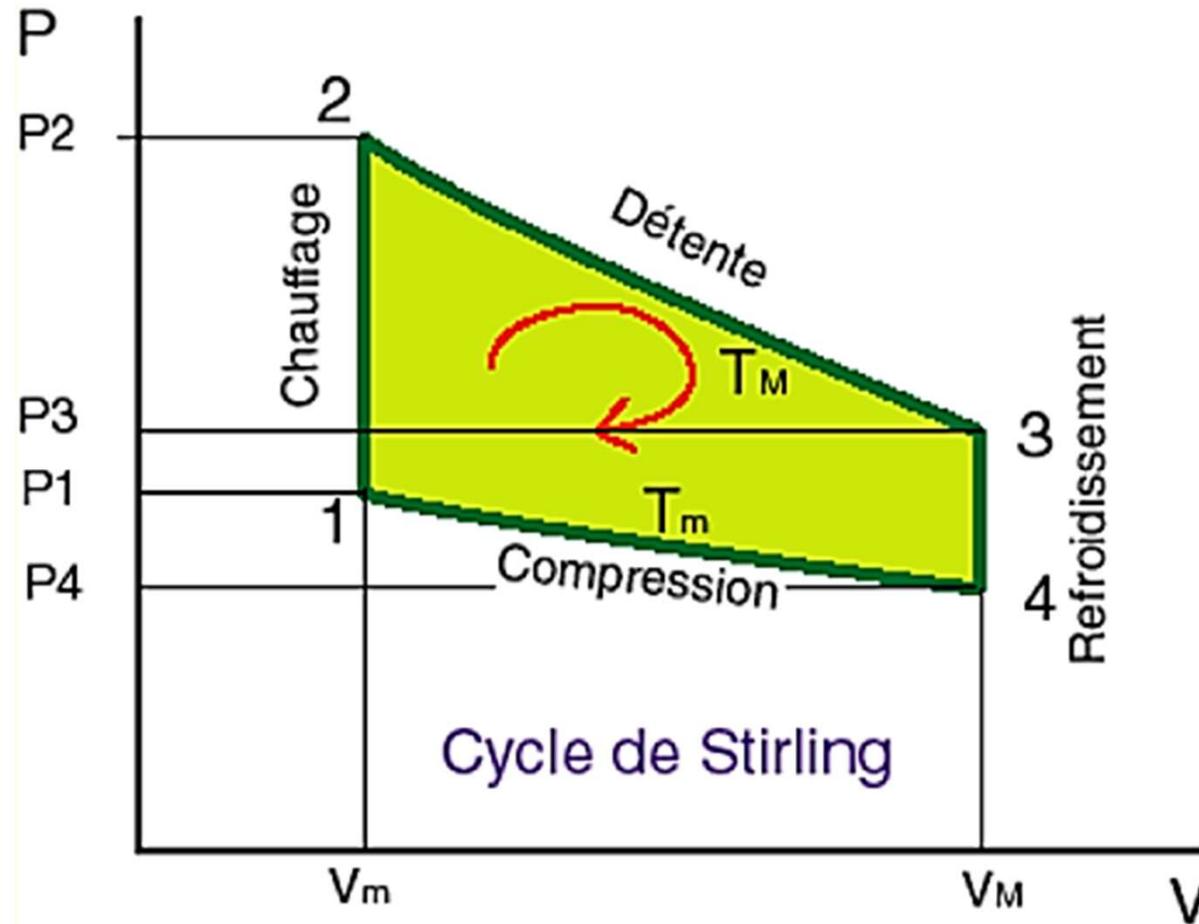
3. Refroidissement



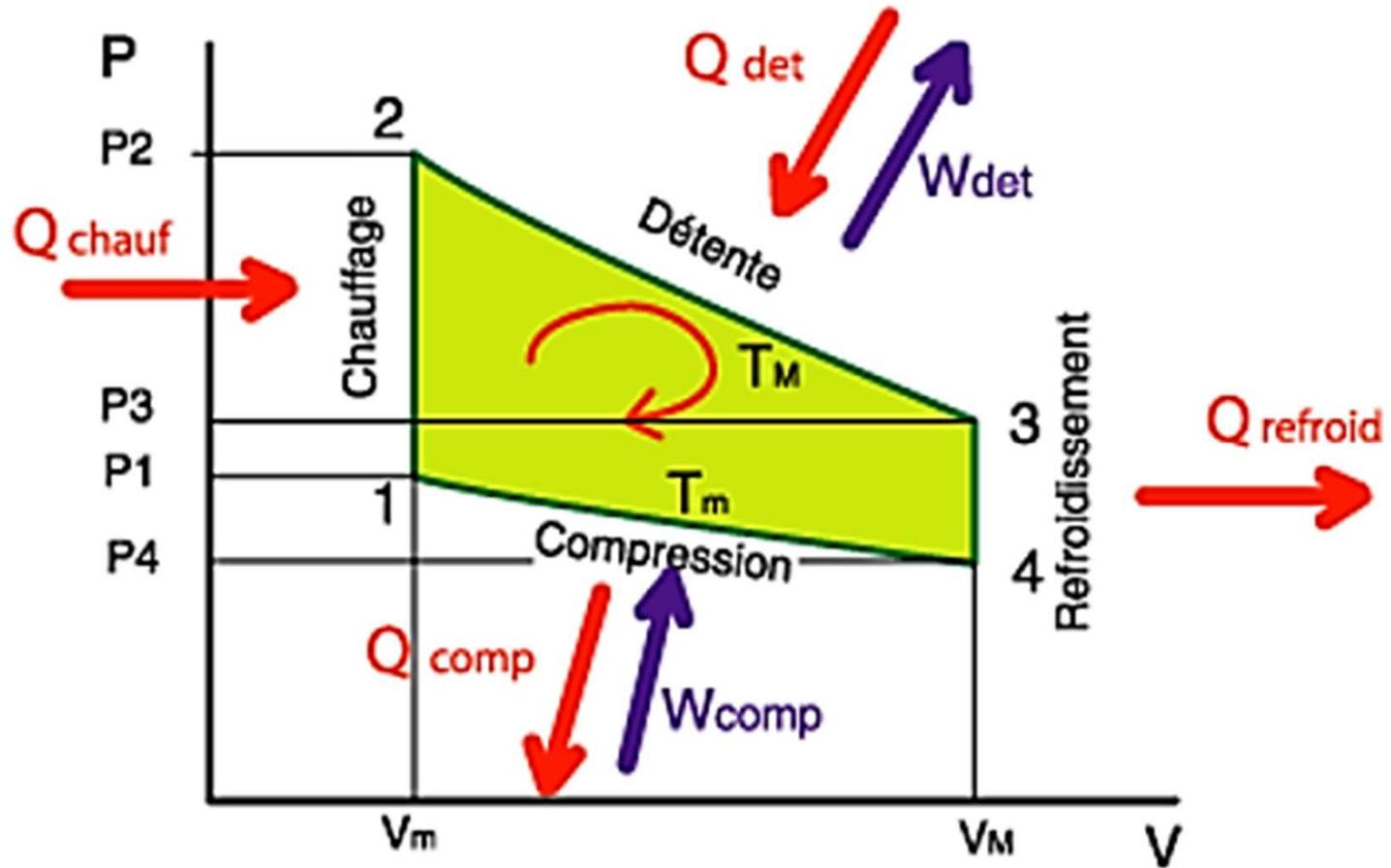
4. Compression



Représentation dans le diagramme de Watt

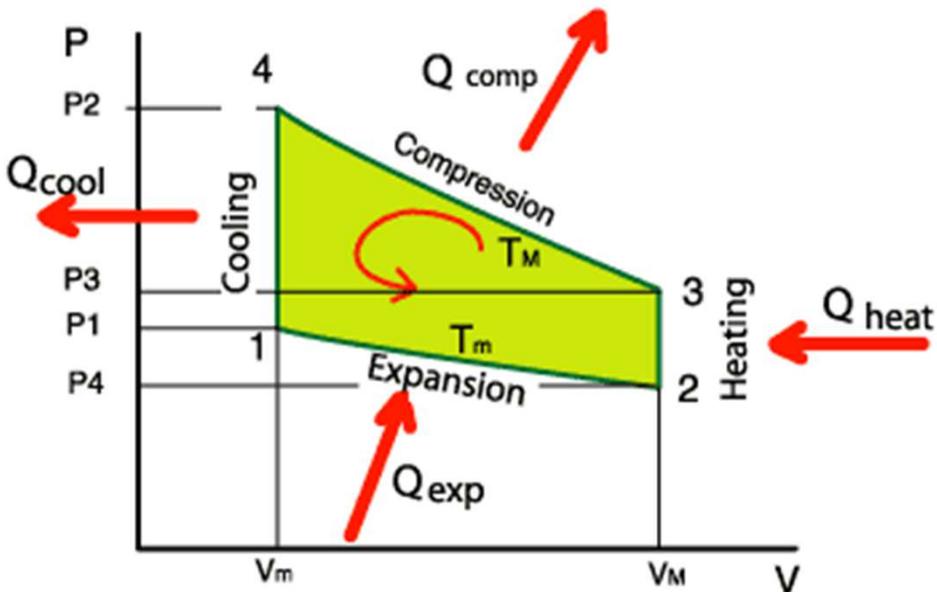


Représentation dans le diagramme de Watt



Représentation dans le diagramme de Watt

Et si on le fait tourner à l'envers?



Définition : Moteur ou récepteur ?

- Un **moteur thermique** est une machine qui **fournit globalement**, c'est-à-dire sur un cycle complet, **du travail** au milieu extérieur.

$$\text{Moteur thermique} \Leftrightarrow W_{\text{cycle}} < 0$$

Exemples : moteur à combustion interne, machine à vapeur, centrale thermique, réacteur d'avion...

- Un **récepteur thermique** est une machine qui **consomme globalement**, c'est-à-dire sur un cycle complet, **du travail** du milieu extérieur. Il fournira, en échange, de la chaleur.

$$\text{Récepteur thermique} \Leftrightarrow W_{\text{cycle}} > 0$$

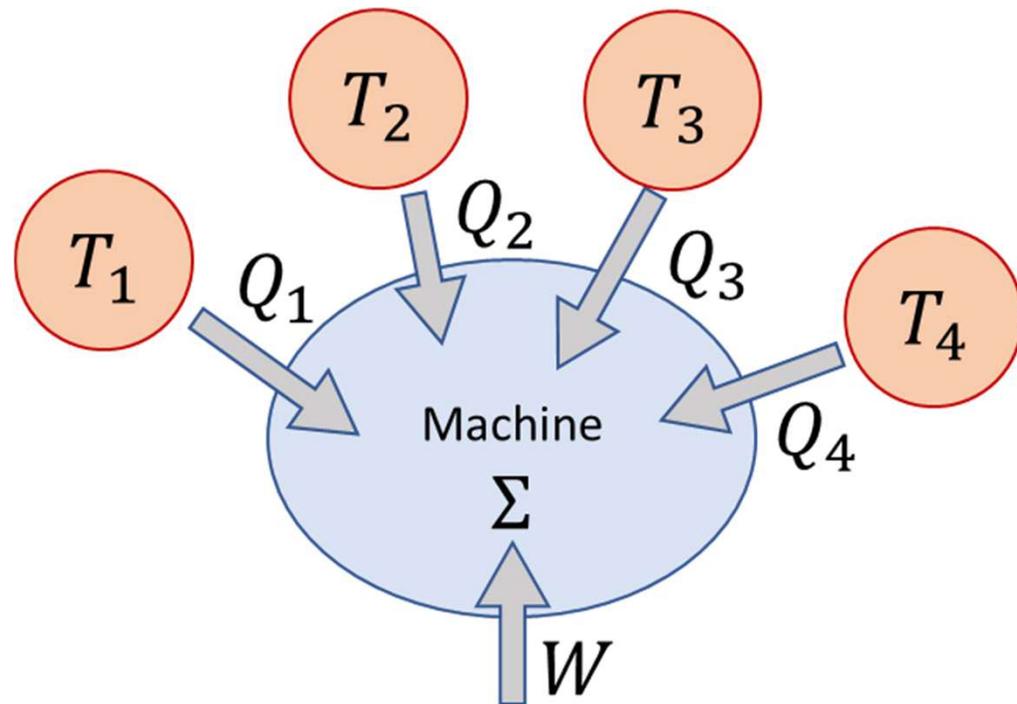
Exemples : réfrigérateur, climatiseur, pompe à chaleur...

Comment faire un bon moteur ?

Au fait, c'est quoi un bon moteur ?

Cas général

Machine en contact thermique avec des thermostats



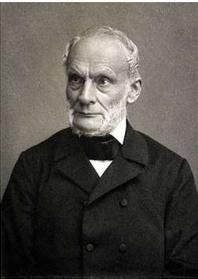
Propriété : Bilan d'énergie sur un cycle

Sur un cycle thermodynamique : $W + \sum_i Q_i = 0$

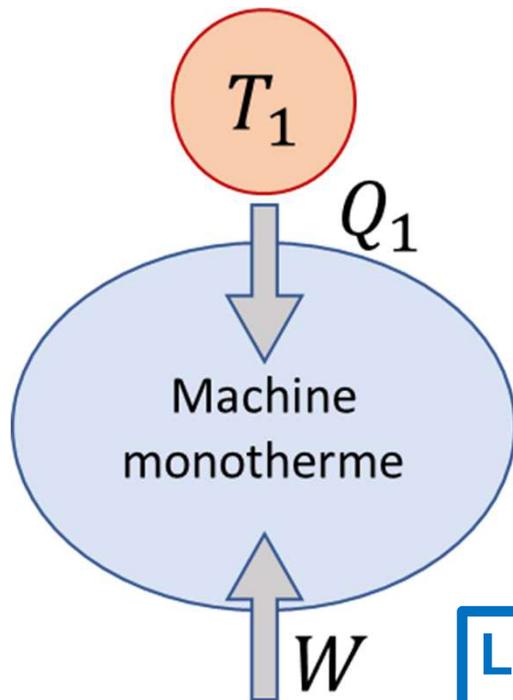
Propriété : Bilan d'entropie sur un cycle (inégalité de Clausius (1850))

Sur un cycle thermodynamique, l'ensemble des transferts thermiques reçus par un système vérifie l'**inégalité de Clausius** :
 $\Delta S = 0$

$$S_{\text{créée}} = -S_{\text{reçue}} = -\sum_i \frac{Q_i}{T_i} \Rightarrow \boxed{\sum_i \frac{Q_i}{T_i} \leq 0}$$

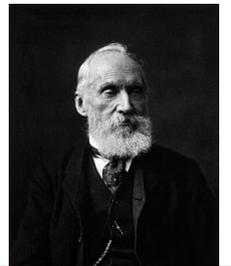
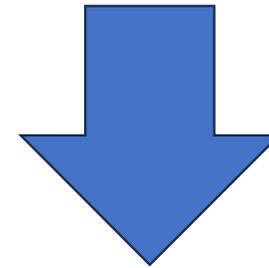


Machine monotherme



L'inégalité de Clausius devient $\frac{Q_1}{T_1} \leq 0 \Rightarrow Q_1 \leq 0$.

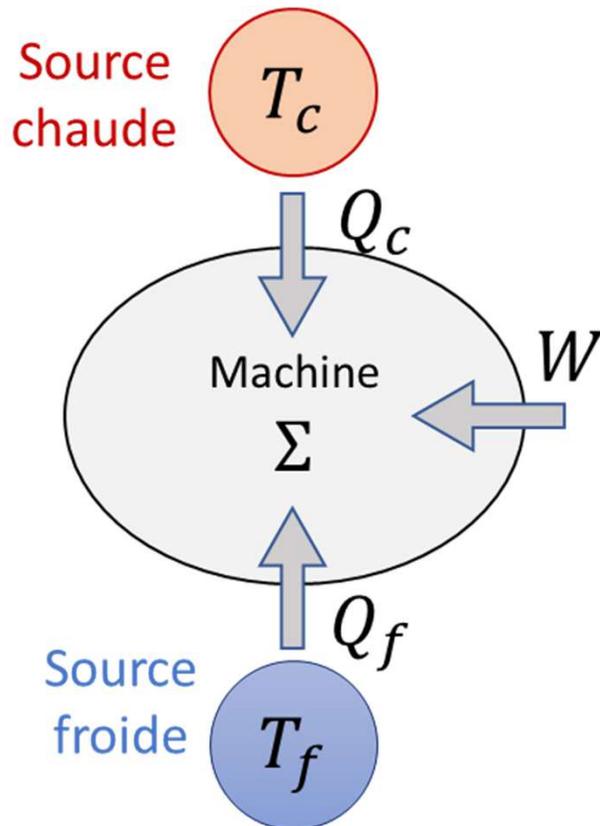
Premier principe, on obtient : $W = -Q_1 \geq 0$



Loi : Énoncé historique du second principe par Kelvin (1873)

Un système décrivant un cycle monotherme ne peut que recevoir du travail et fournir du transfert thermique.

Machine ditherme

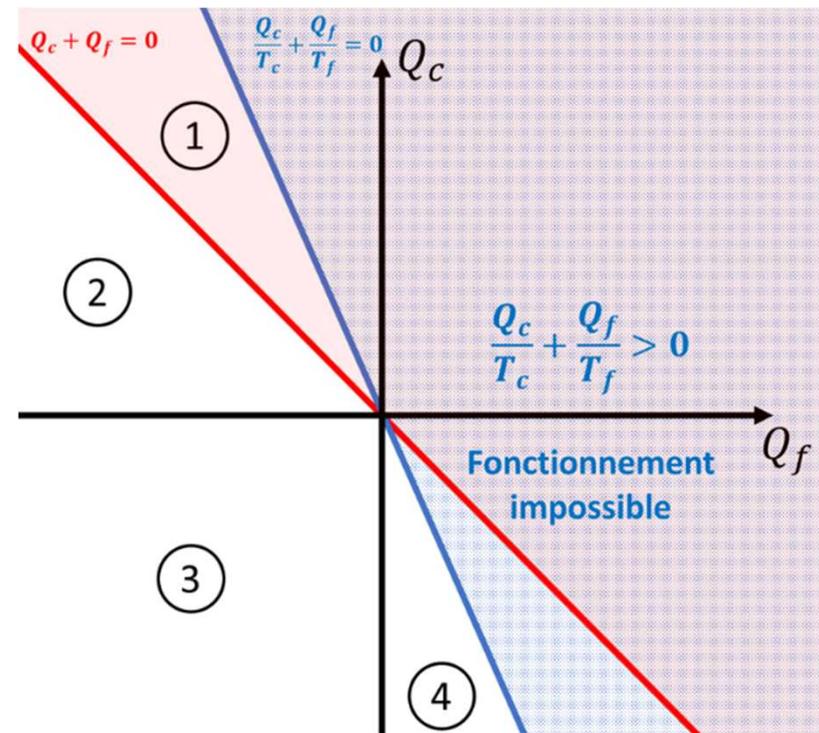


Propriété : Relations de fonctionnement

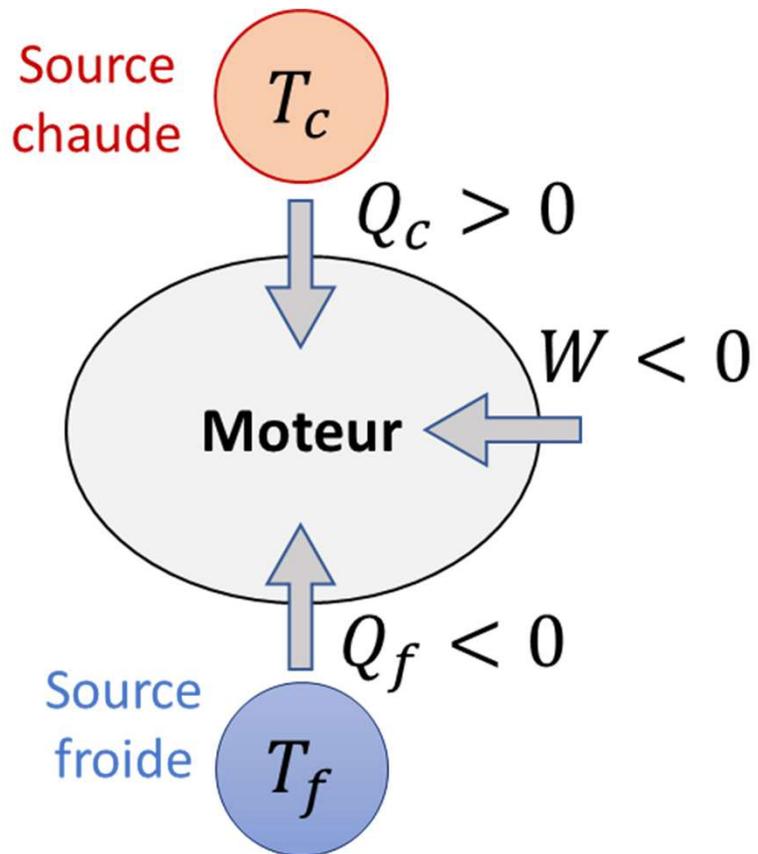
Le premier principe donne $W = -(Q_c + Q_f)$

Le second principe donne l'inégalité de Clausius :

$$\frac{Q_c}{T_c} \leq -\frac{Q_f}{T_f}$$



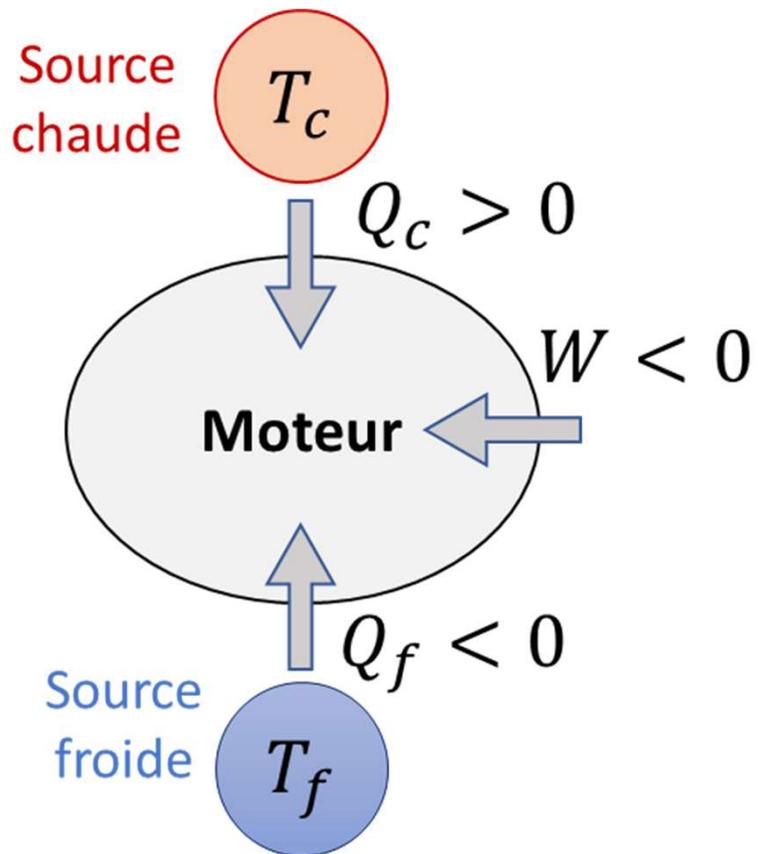
Pour faire un moteur...



Principe : Principe de Carnot (1824)

Pour qu'un système décrive un ***cycle moteur***, il doit nécessairement échanger de l'énergie thermique avec au moins 2 sources de température différentes : en ***prélevant de l'énergie à la source chaude***, et en ***restituant une partie à la source froide***.

Pour faire un bon moteur...



Définition : Rendement d'un moteur thermique

On définit un **rendement** (ou une efficacité) comme étant le rapport de la quantité utile sur la quantité qui nous coûte :

$$\eta = \frac{\text{quantité utile}}{\text{quantité coûteuse}}$$

Le rendement d'un moteur thermique est le rapport du travail fourni $-W$, fourni au milieu extérieur, sur le transfert thermique Q_c prélevé à la source chaude :

$$\eta = \frac{-W}{Q_c}$$

Maximiser le rendement



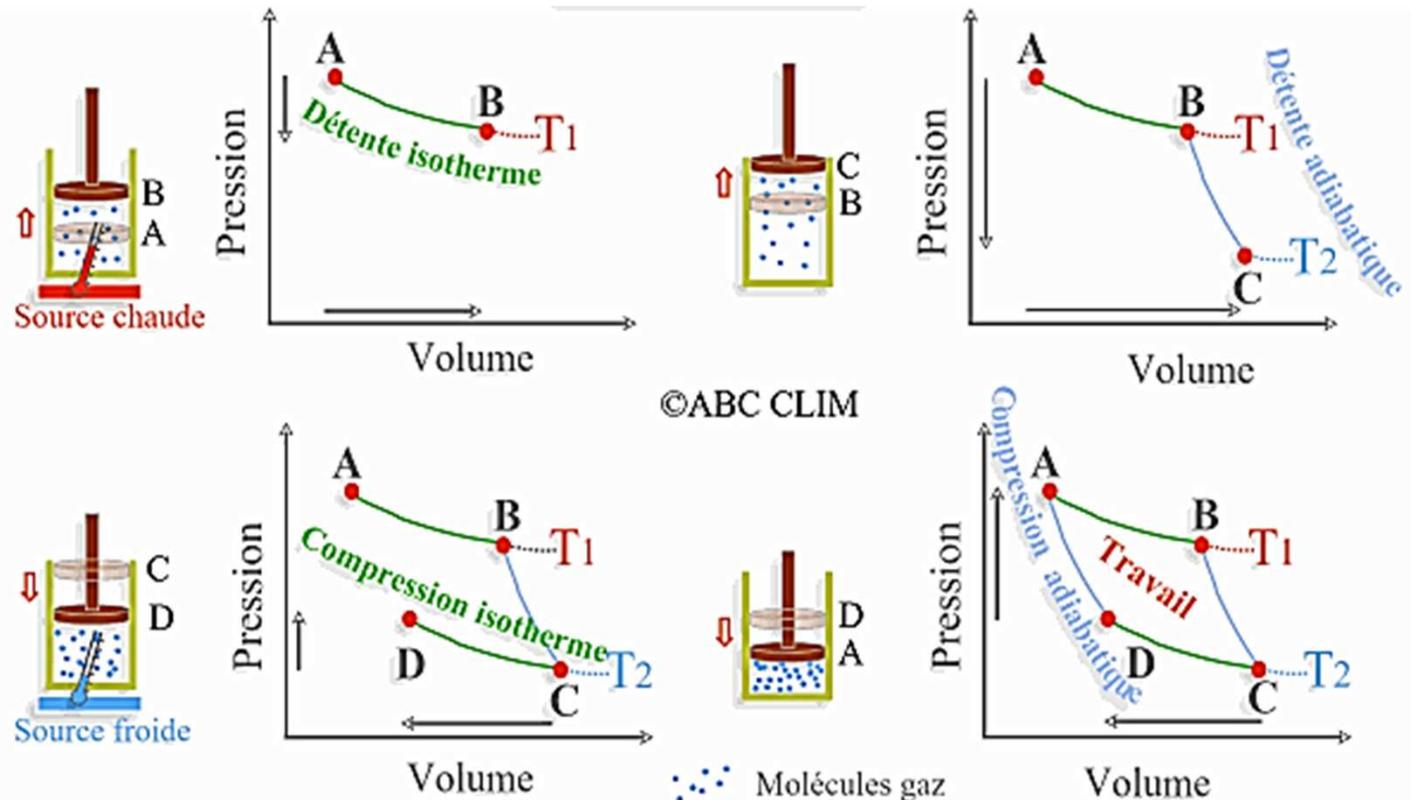
Cycle de Carnot

Théorème de Carnot

Le rendement d'un moteur thermique ditherme est inférieur à une valeur limite, appelée **rendement de Carnot**, fonction de la température des deux sources :

$$\eta \leq 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

Le **rendement de Carnot** est obtenu pour le cas limite du **cycle moteur réversible**.



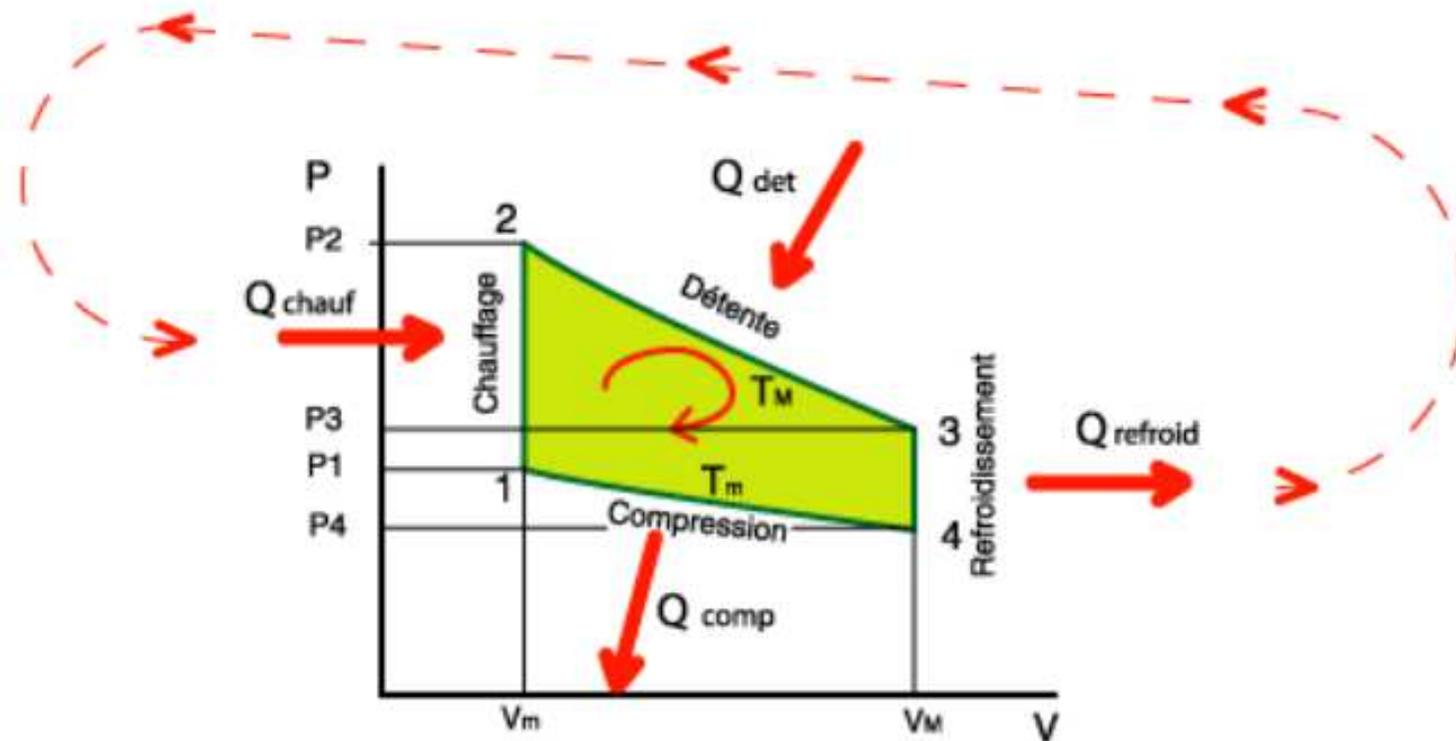
Savoir-faire 1 – Justifier et utiliser le théorème de Carnot.

1. Proposer un schéma de principe pour un moteur ditherme.
2. Etablir l'expression du rendement de Carnot pour un moteur ditherme.
3. Une centrale nucléaire peut être modélisée par une machine thermique fournissant du travail électrique et travaillant avec, comme source chaude, le réacteur et, comme source froide, l'eau d'une rivière. Calculer le rendement de Carnot d'une telle centrale pour les valeurs typiques, $T_c = 600\text{ K}$ et $T_f = 300\text{ K}$.
4. En réalité, le rendement est compris entre 30 et 40 %. Comment expliquer cette baisse de rendement ?
5. Pour pouvoir atteindre le rendement de Carnot, les échanges thermiques avec les deux sources sont alors nécessairement isothermes (pour assurer la réversibilité). Lorsque le fluide n'est pas en contact avec les sources, l'évolution est forcément adiabatique (le système ne doit pas échanger de transfert thermique) réversible (et donc isentropique). Représenter le cycle correspondant, appelé cycle de Carnot, dans un diagramme de Clapeyron.

Et le cycle de Carnot en vrai?

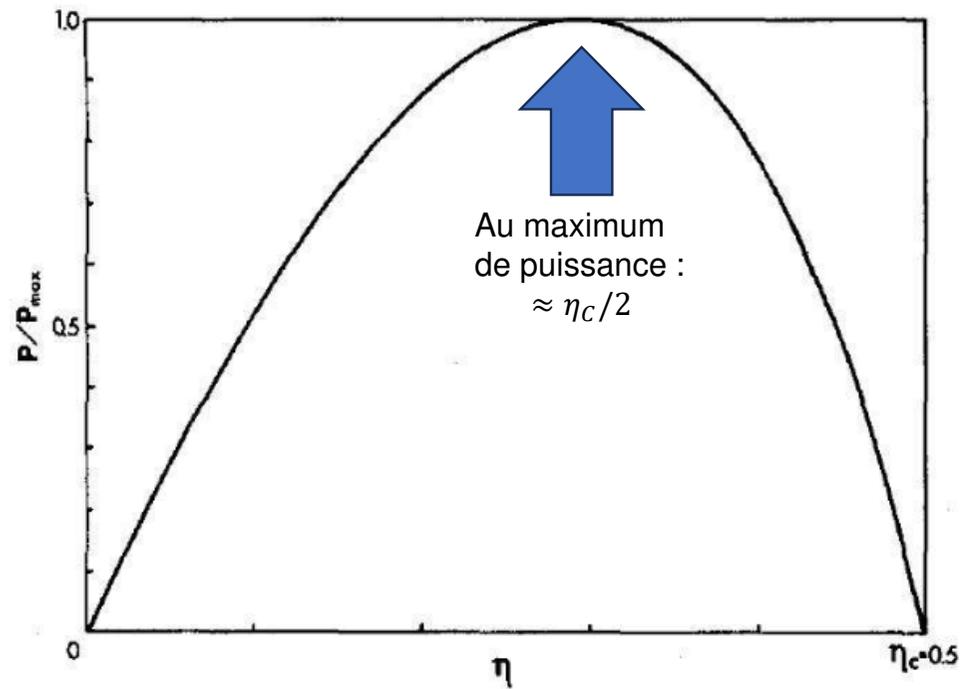
Impossible à faire en vrai !

Meilleure approximation: cycle de Stirling avec régénérateur

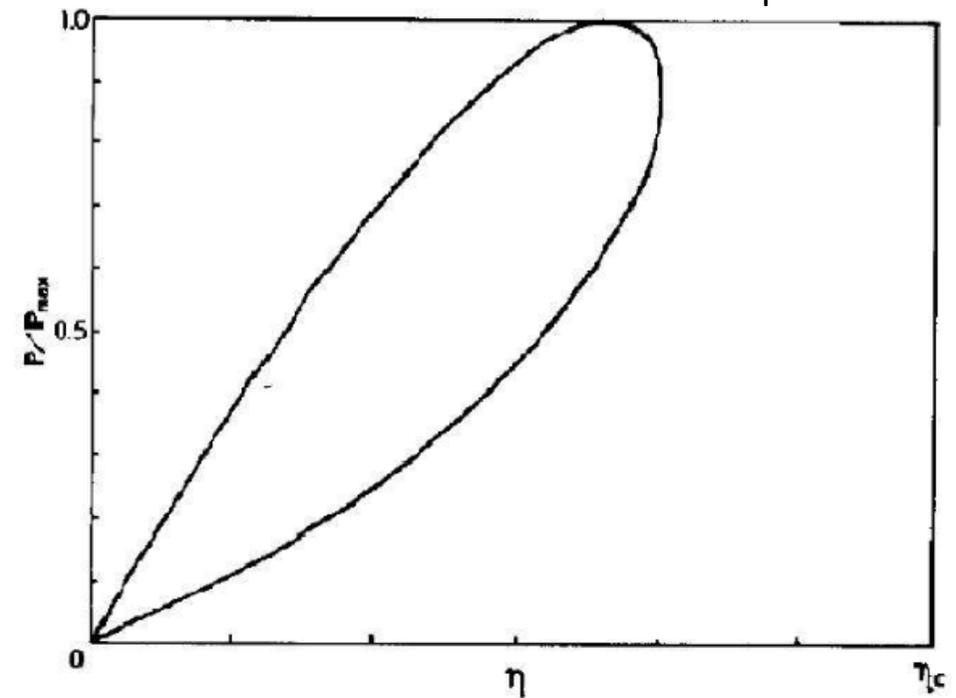


Compromis rendement/puissance

Machine sans « fuites thermiques »



Machine avec des « fuites thermiques »



Principe de la cogénération :

Savoir-faire 2 – Expliquer le principe de la cogénération.

Un chalet comporte deux installations : une chaudière utilisée pour le chauffage, et un moteur ditherme à combustion externe utilisé pour la production d'électricité. Dans les deux cas, du bois est utilisé comme combustible. Les échanges énergétiques mis en jeu quotidiennement dans les deux installations sont donnés dans le tableau suivant.

Combustible consommé par la chaudière	52 kW.h
Transfert thermique fourni par la chaudière	47 kW.h
Combustible consommé par le moteur dans une enceinte à 400°C	48 kW.h
Travail fourni par le moteur	14 kW.h
Transfert thermique rejeté par le moteur dans l'atmosphère à 10°C	34 kW.h

On suppose dans un premier temps que la chaudière et le moteur sont deux systèmes indépendants.

1. Calculer le rendement du moteur ditherme. Le comparer au rendement maximal qu'il pourrait théoriquement atteindre.
2. Calculer le rendement de l'ensemble {chauffage + moteur}.

Principe de la cogénération :

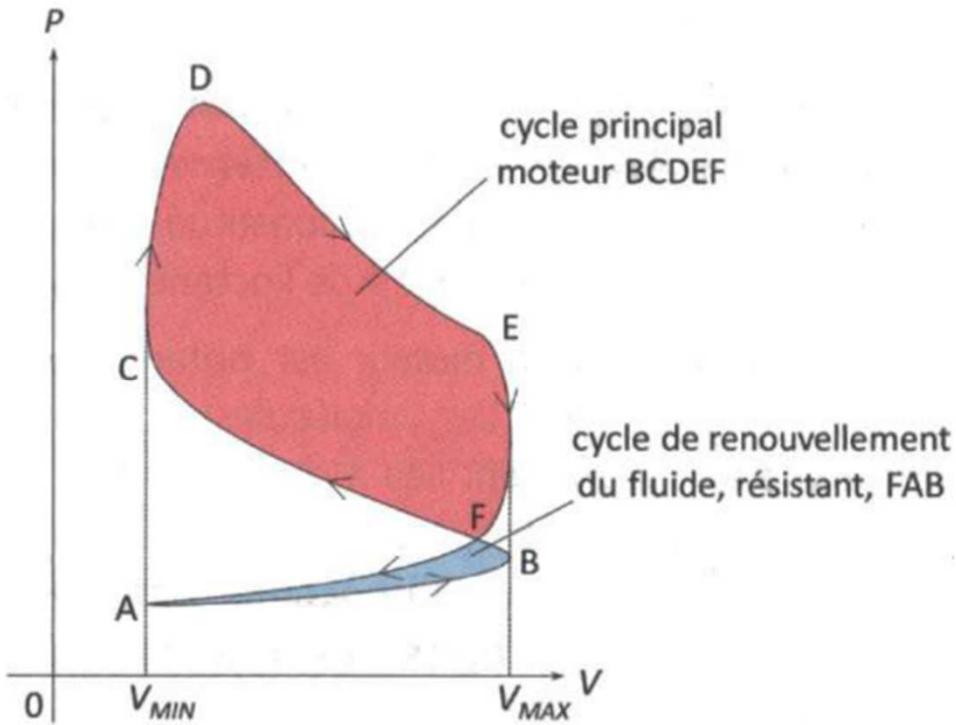
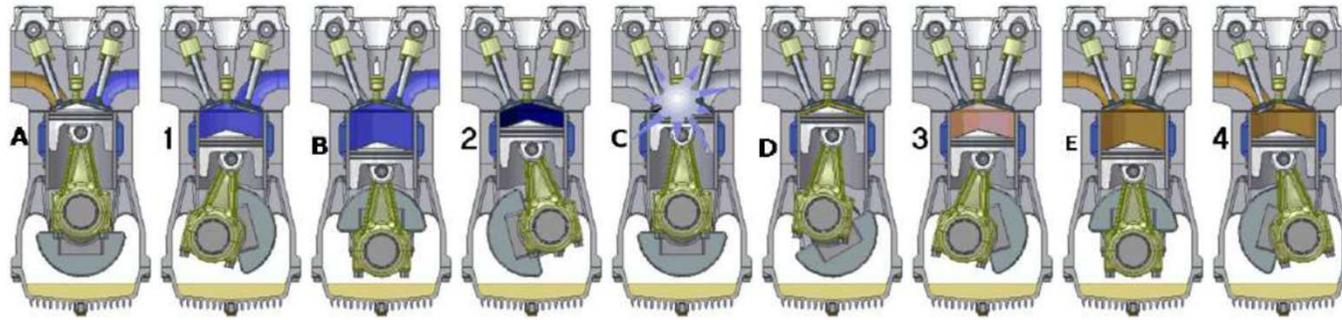
Savoir-faire 2 – Expliquer le principe de la cogénération.

Combustible consommé par la chaudière	52 kW.h
Transfert thermique fourni par la chaudière	47 kW.h
Combustible consommé par le moteur dans une enceinte à 400°C	48 kW.h
Travail fourni par le moteur	14 kW.h
Transfert thermique rejeté par le moteur dans l'atmosphère à 10°C	34 kW.h

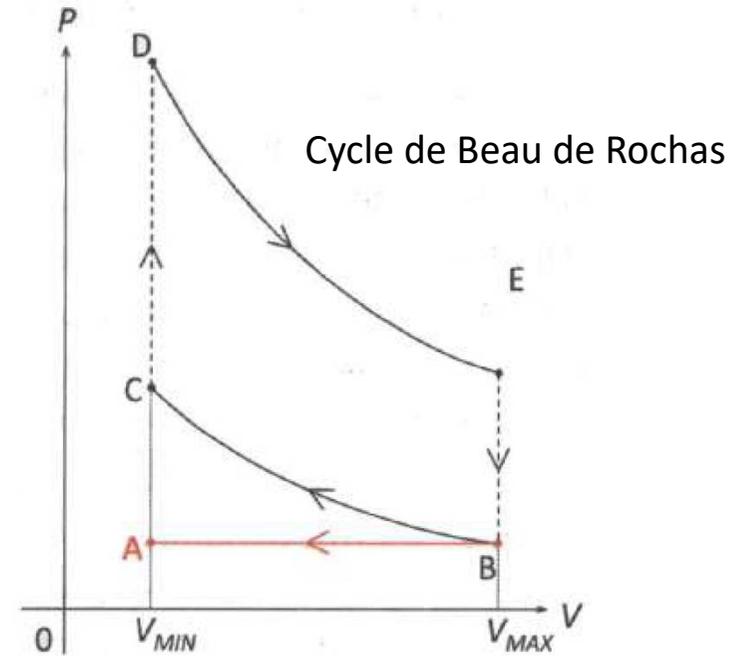
Pour améliorer le rendement global, l'énergie consommée par la chaudière est augmentée, et cette dernière est alors utilisée à la fois pour le chauffage et pour l'alimentation du moteur (principe de la cogénération). Un dispositif permet en outre de récupérer 80 % du transfert thermique rejeté dans l'atmosphère par le moteur pour le réinjecter dans le réseau de chauffage. Les besoins en chauffage et en électricité restent les mêmes que précédemment.

3. Quel doit être le transfert thermique quotidien fourni directement par la chaudière au chalet ?
4. En déduire l'énergie consommée quotidiennement par la chaudière.
5. Calculer le rendement de l'association de cogénération {chauffage + moteur} et commenter le résultat obtenu.
6. La combustion du bois libère dans la chaudière un transfert thermique massique égal à 14 MJ.kg^{-1} . Quelle masse de bois doit-on brûler quotidiennement pour faire fonctionner l'association {chaudière + moteur} ?

Un mot sur les cycles à combustion interne

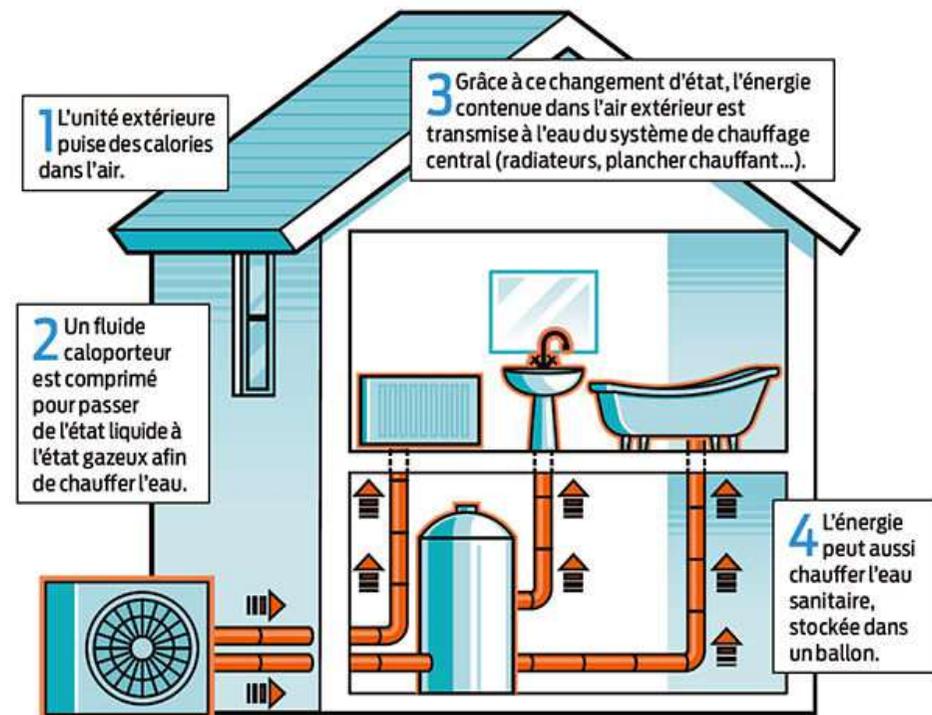
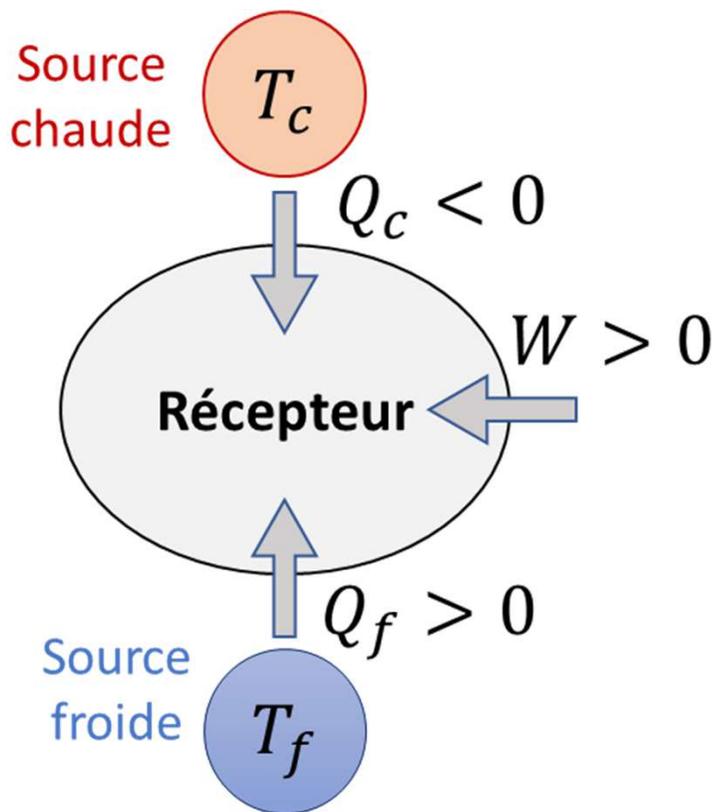


Hypothèses simplificatrices

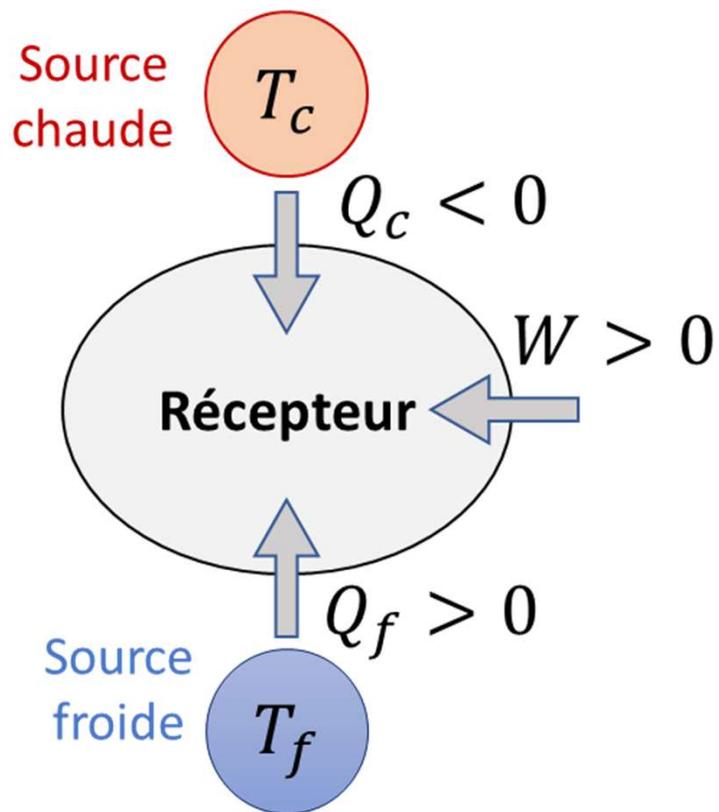


Fonctionnement en récepteur thermique

Si notre intérêt est de chauffer la source chaude :
pompe à chaleur



Fonctionnement en récepteur thermique

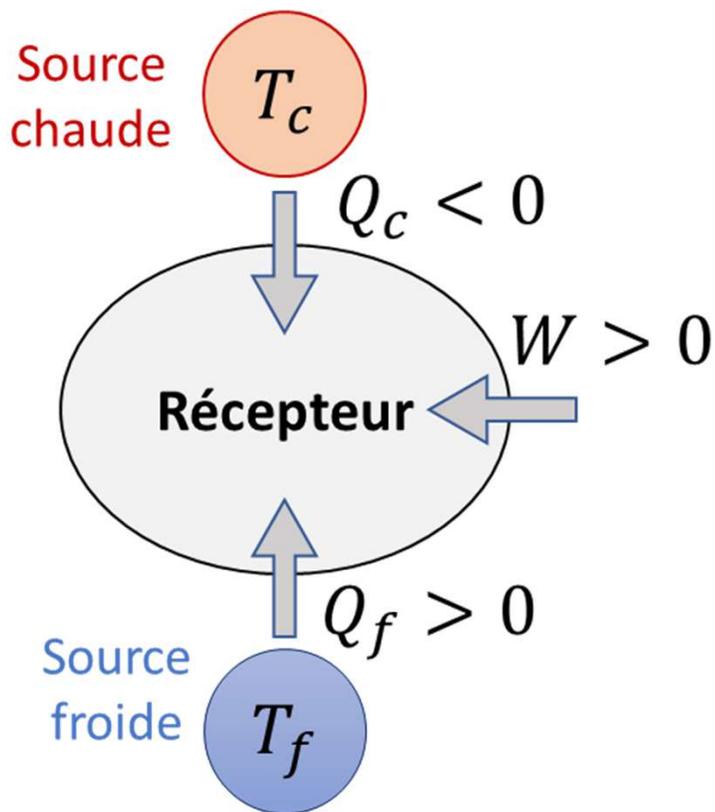


Si notre intérêt est de refroidir la source froide :

Machine réfrigérante



Fonctionnement en récepteur thermique



Définition : Efficacité d'un récepteur thermique

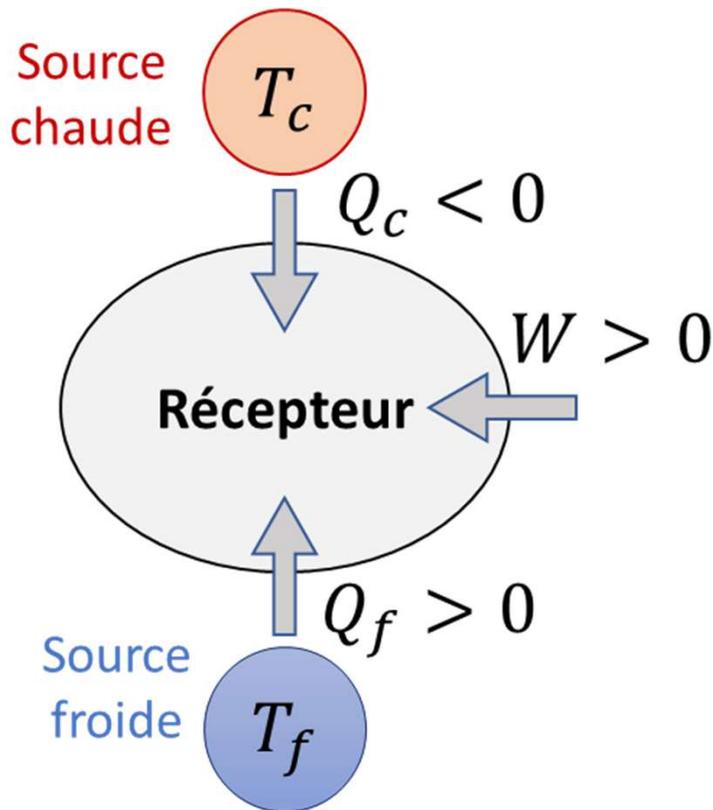
- L'**efficacité** d'un récepteur thermique fonctionnant en **réfrigérateur** est le rapport du transfert thermique Q_f prélevé à la source froide sur le travail W fourni à la machine :

$$e = \frac{Q_f}{W}$$

- L'**efficacité** d'un récepteur thermique fonctionnant en **pompe à chaleur** est le rapport du transfert thermique $-Q_c$ apporté à la source chaude sur le travail W fourni à la machine :

$$e = \frac{-Q_c}{W}$$

Fonctionnement en récepteur thermique



Théorème : Théorème de Carnot

L'efficacité d'un récepteur thermique ditherme est inférieure à une valeur limite, appelée **efficacité de Carnot**, fonction de la température des deux sources :

$$e_{frigo} \leq \frac{T_f}{T_c - T_f} \quad \text{et} \quad e_{PAC} \leq \frac{T_c}{T_c - T_f}$$

L'efficacité **de Carnot** est obtenue pour le cas limite du **cycle récepteur réversible**.

Savoir-faire 3 – Savoir décrire le fonctionnement d'un récepteur thermique.

1. Proposer un schéma de principe pour un réfrigérateur ditherme.
2. Etablir l'expression de l'efficacité frigorifique de Carnot pour un réfrigérateur ditherme. Proposer une valeur numérique typique.
3. Proposer un schéma de principe pour une pompe à chaleur ditherme.
4. Etablir l'expression de l'efficacité thermique de Carnot pour une pompe à chaleur ditherme. Proposer une valeur numérique typique.

Cycle thermodynamique caché dans un réfrigérateur

