

## VII - Machines thermiques

Prof. Cécile Hébert

5 avril 2025

## Plan du cours

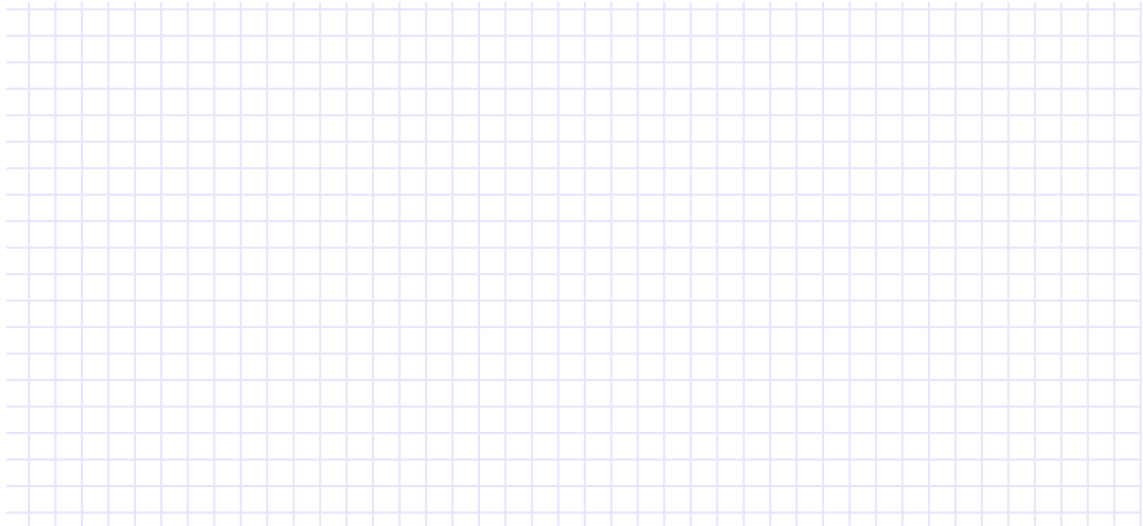
- I - Introduction
- II - Premier principe
- III - Second principe
- IV - Fonctions thermodynamiques et équilibres
- V - Gaz parfait et gaz de van der Waals ; théorie cinétique des gaz
- VI - Changements de phases
- VII - Machines thermiques
- VIII - Thermochimie
- IX - Transport
- X - Physique statistique

1. Introduction, définition
2. Efficacité, rendement
3. Cycle idéal de Carnot
4. Clausius, Kelvin et rendement max.
5. Machine ditherme réelle
6. Cas du cycle pompe à chaleur/ frigo
7. Cycle de Stirling
8. Machines thermiques "exotiques"

## 1. Introduction, définition

Système thermodynamique qui permet de convertir de la chaleur en travail ou d'utiliser du travail pour transférer de la chaleur d'une source froide vers une source chaude, et qui fonctionne selon une succession de cycles.

## Représentation schématique d'une machine thermique ditherme



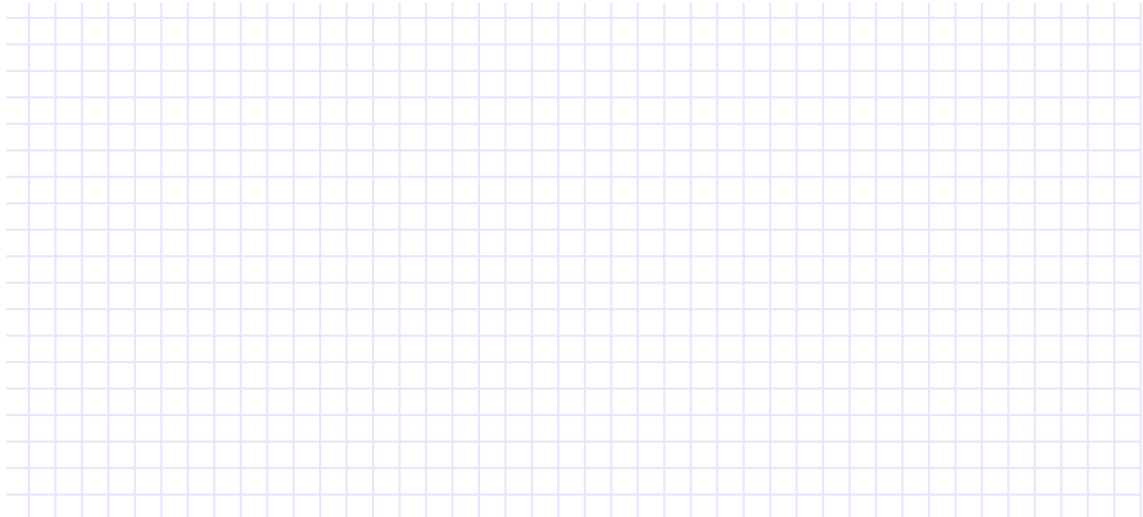
Une machine thermique est un dispositif qui comprend un système thermodynamique opérant selon une succession de cycles. Ce dispositif a la propriété d'échanger avec son environnement et peut soit convertir de l'énergie thermique en travail, soit utiliser du travail pour réaliser un transfert thermique d'un corps froid vers un corps chaud.

Une machine thermique doit être en contact avec un ou plusieurs réservoirs de chaleur appelés thermostats ou bains thermiques. On appelle une machine ditherme une machine qui durant son cycle échange avec deux bains thermique de température différentes.

Sens des cycles dans des diagrammes  $(p, V)$  et  $(T, S)$



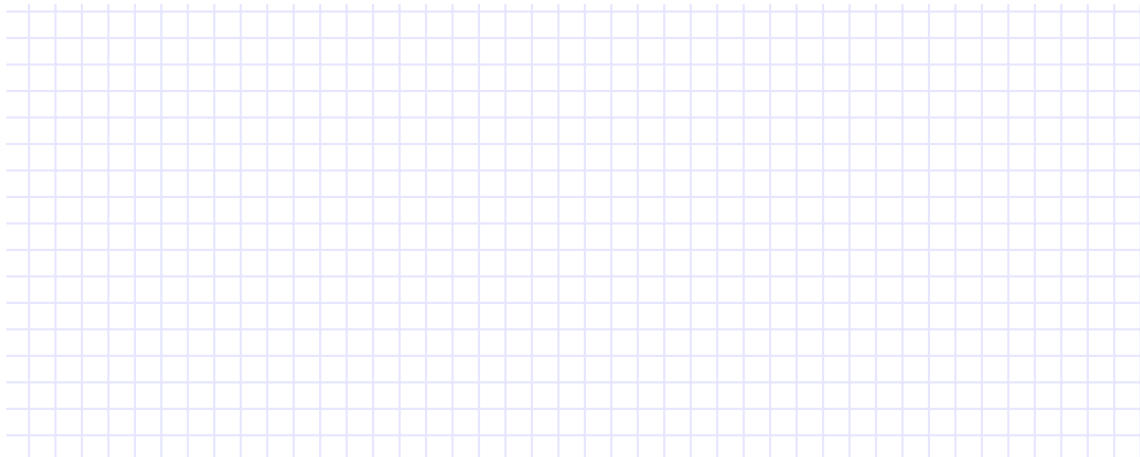
## Sens de fonctionnement d'une machine thermique



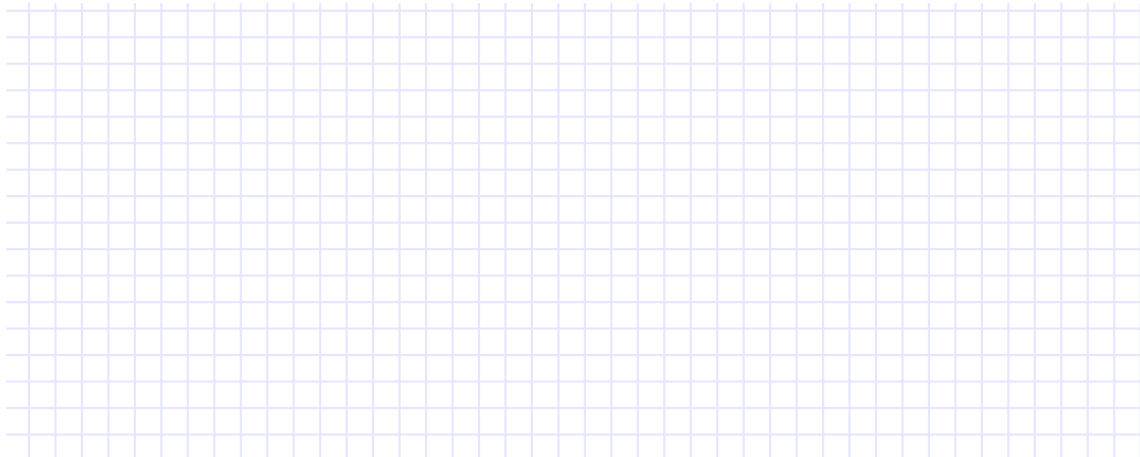


## 2. Efficacité

Définition générale ; cas d'un moteur

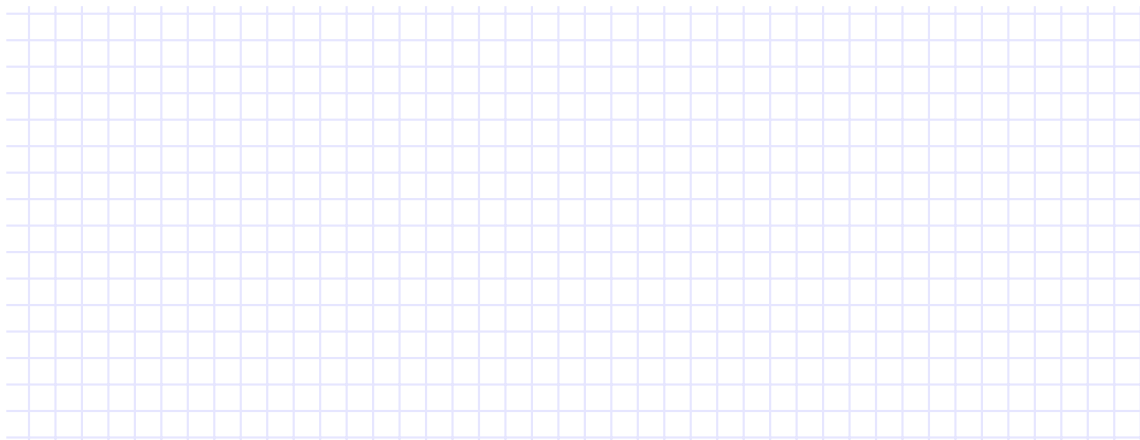


## Pompe à chaleur, frigo

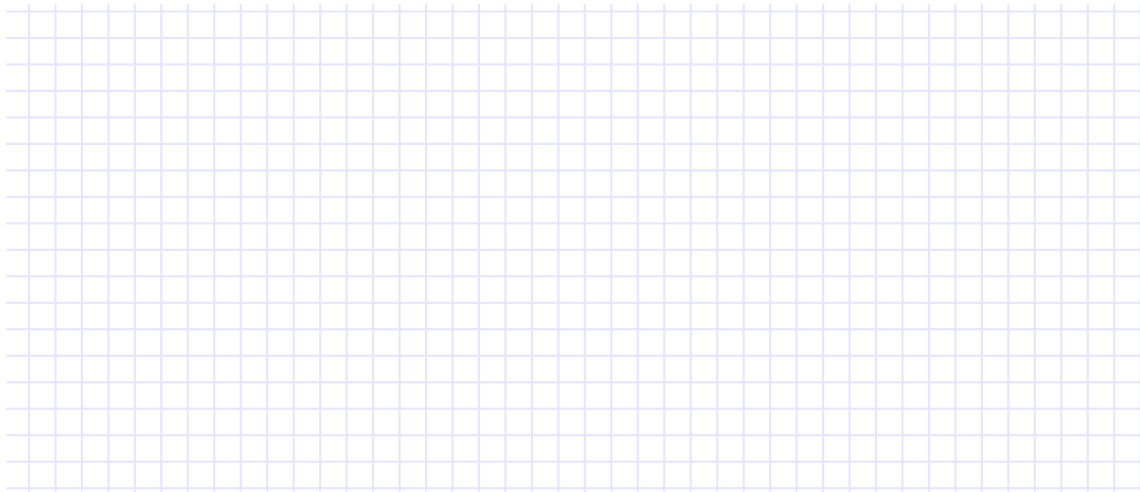


### 3. Cycle idéal de Carnot

Un cycle idéal de Carnot (ou machine idéale de Carnot) est une machine ditherme dont le cycle est réversible et composé de deux adiabatiques et deux isothermes.



## Démonstration de l'égalité entre température absolue et température thermodynamique



## VII - Machines thermiques 3. Cycle idéal de Carnot



Pour un cycle idéal de Carnot, la définition de l'entropie et son application à des transformations réversibles (2. principe) implique

$$\frac{Q_h}{T_h} + \frac{Q_b}{T_b} = 0$$

L'efficacité du moteur de Carnot réversible est

$$\eta_m = 1 - \frac{T_b}{T_h}$$

## Cycle de Carnot en fonctionnement pac/frigo



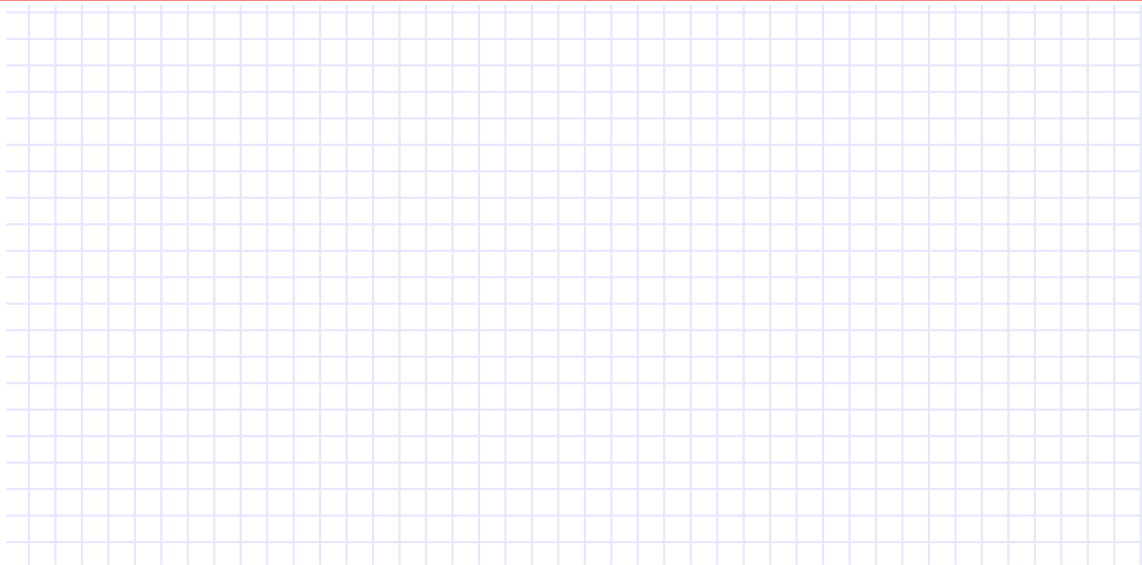
#### 4. Interdit de Clausius, interdit de Kelvin et théorème du rendement maximum

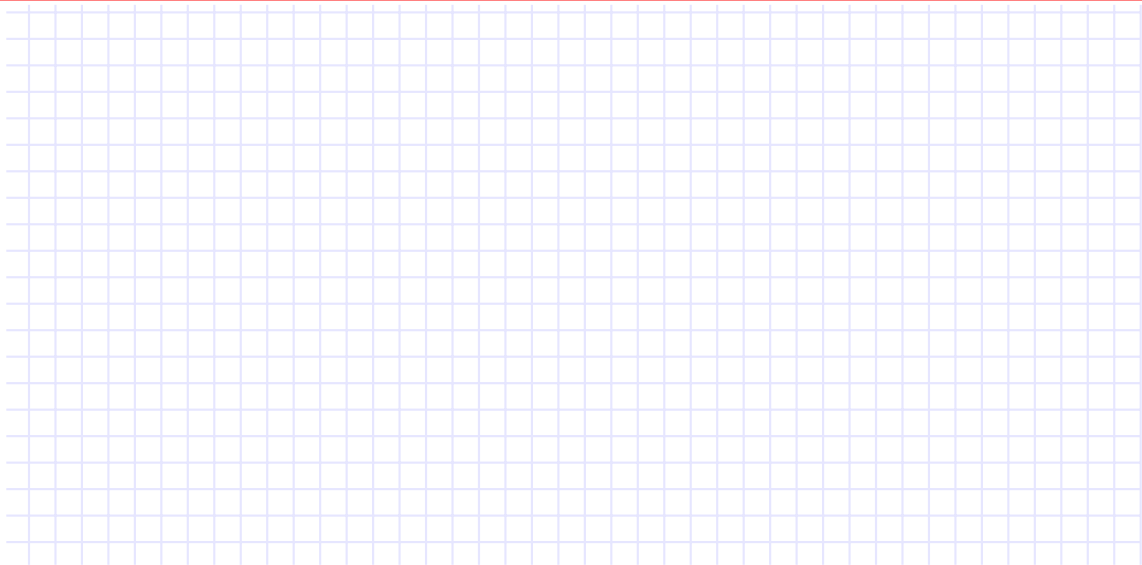
Nous avons vu (chapitre 3) que notre formulation du 2. principe implique que la chaleur va spontanément d'un corps chaud à un corps froid.

Ceci a été formulé par Clausius sous la forme de "l'interdit de Clausius".

Il n'existe pas de processus dont l'unique action est de transférer de la chaleur d'un corps froid vers un corps chaud.







## Résumé :

### Clausius (1822-1888)

Il n'existe pas de processus, dont l'unique action est de transporter de la chaleur d'un thermostat de basse température à un thermostat de haute température.

### Kelvin (1824-1907) ou Carnot (1796-1832)

Il n'existe pas de moteur en contact avec un seul thermostat, dont l'unique action serait de transformer de la chaleur en travail

### Théorème du rendement maximum

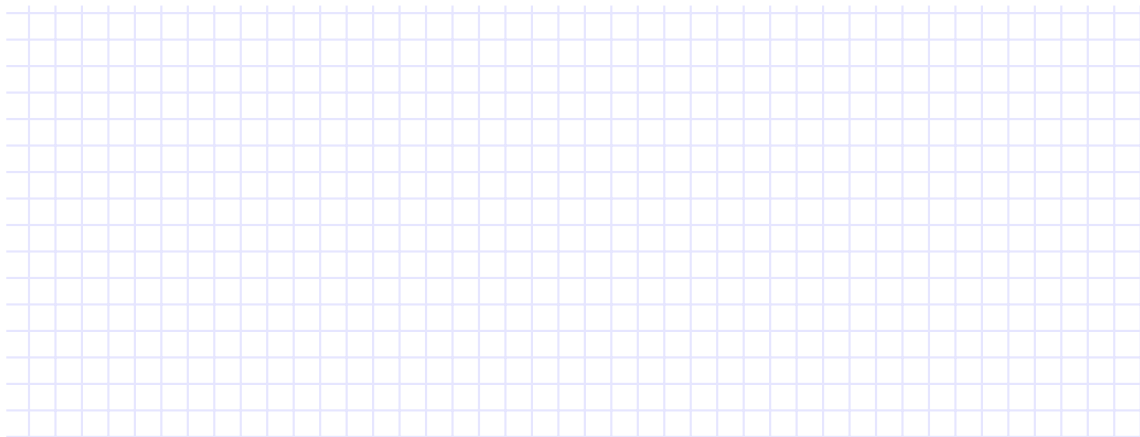
L'efficacité maximum d'un moteur thermique ditherme est celle d'une machine de Carnot réversible,  $1 - T_b / T_h$ .

sont des formulations historiques du 2. principe. Nous les avons démontrées à partir de notre formulation du 2. principe qui inclut la définition de l'entropie. Il est aussi possible de construire la fonction entropie à partir de ces formulations historiques.

### Corrolaire au théorème du rendement maximal

Un moteur ditherme et réversible a forcément l'efficacité de Carnot idéal,

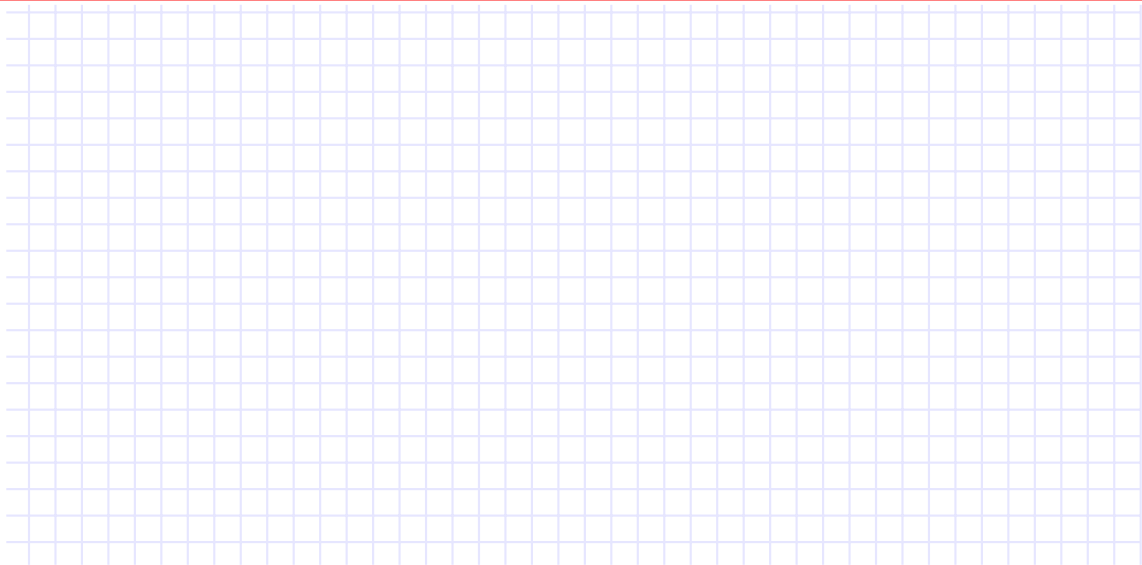
$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - T_b / T_h.$$



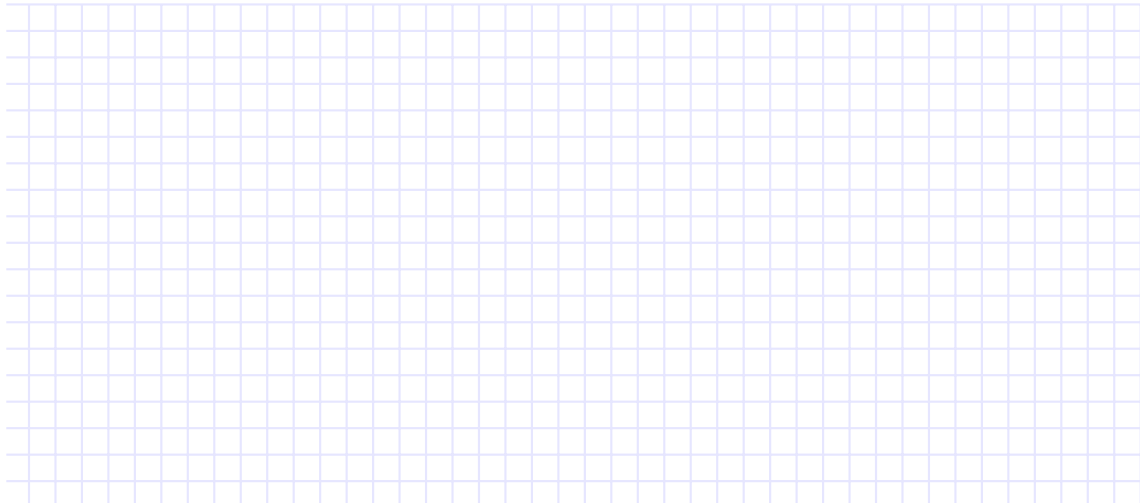
## 5. Machine ditherme réelle

Pour une machine ditherme réelle (irréversible)

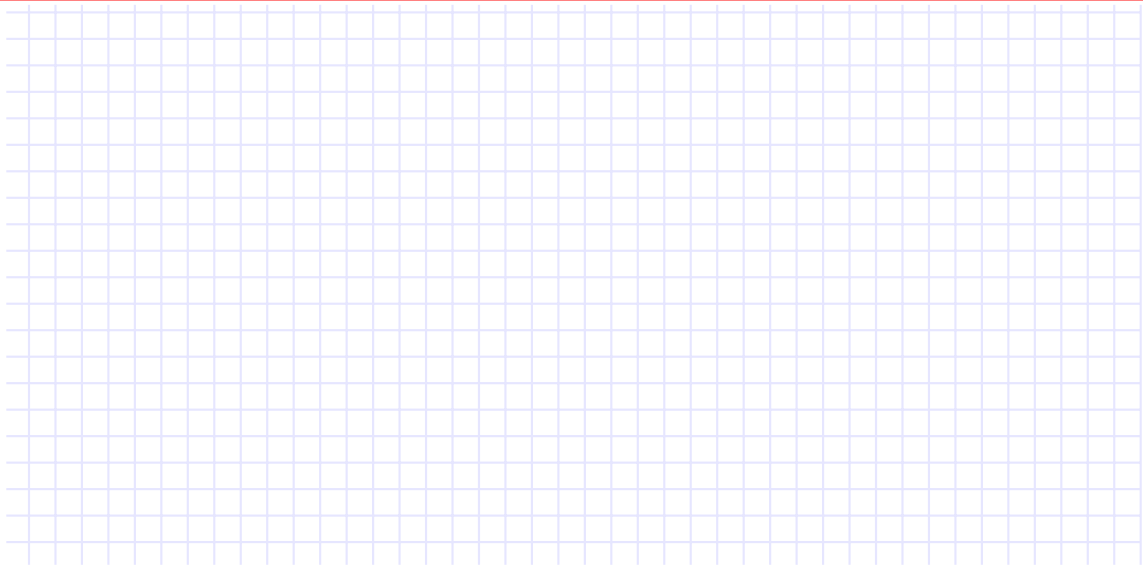
$$\frac{Q_h}{T_h} + \frac{Q_b}{T_b} < 0$$



## 6. Cas du cycle pompe à chaleur/ frigo



## VII - Machines thermiques 6. Cas du cycle pompe à chaleur/ frigo





## Résumé

Dans tous les cas (moteur, frigo, p.a.c.) : inégalité de Clausius

$$\frac{Q_b}{T_b} + \frac{Q_h}{T_h} \leq 0$$

Efficacité moteur :

$$\eta_m = 1 + \frac{Q_b}{Q_h} \leq 1 - \frac{T_b}{T_h} = \eta_m^{\text{rev}}$$

Efficacité pompe à chaleur :

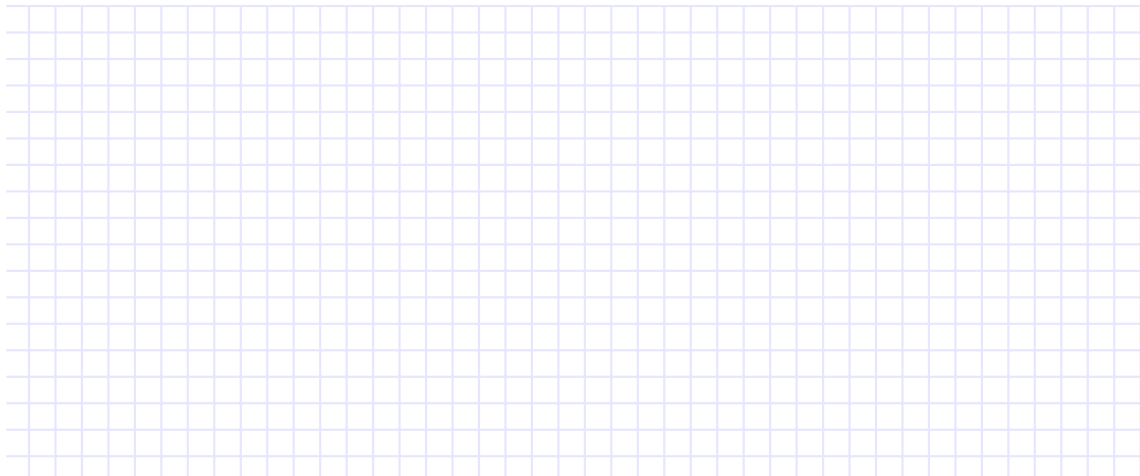
$$\eta_{\text{pac}} = \frac{1}{1 + \frac{Q_b}{Q_h}} \leq \frac{1}{1 - \frac{T_b}{T_h}} = \eta_{\text{pac}}^{\text{rev}}$$

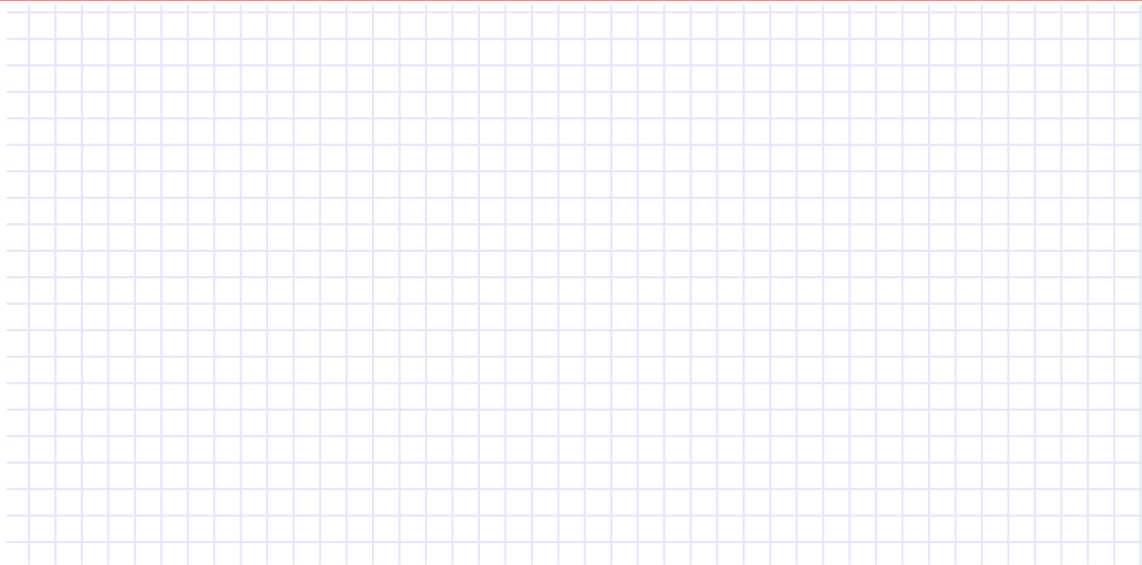
Efficacité frigo :

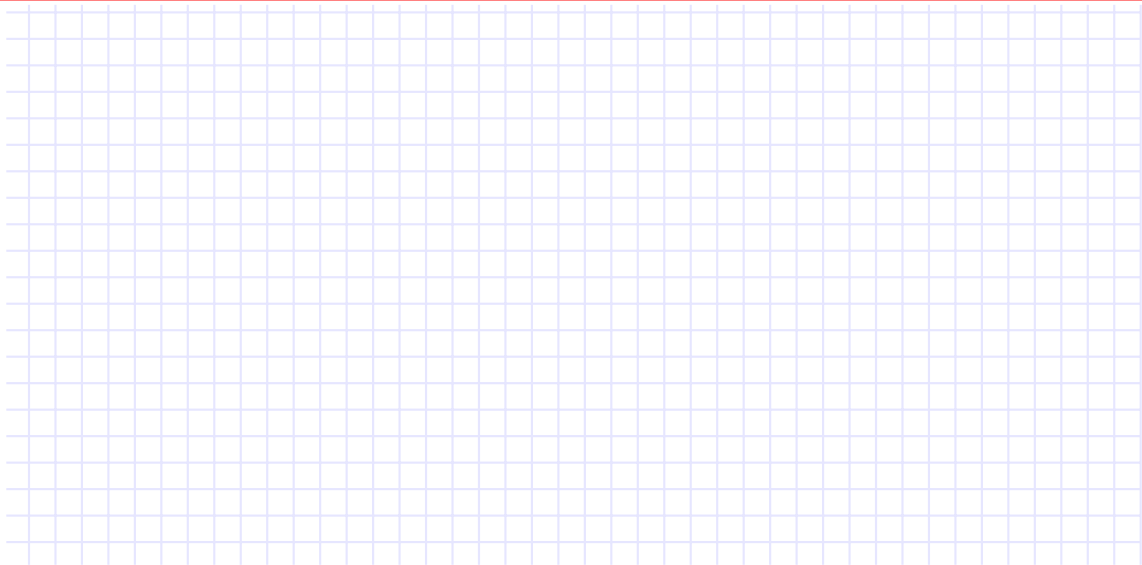
$$\eta_f = \frac{1}{-\frac{Q_h}{Q_b} - 1} \leq \frac{1}{\frac{T_h}{T_b} - 1} = \eta_f^{\text{rev}}$$

## 7. Cycle de Stirling

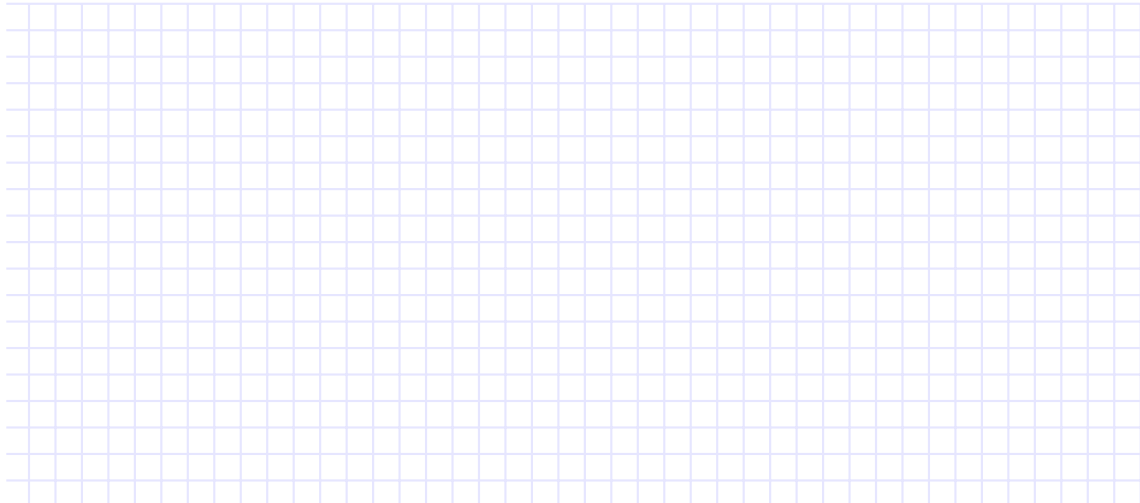
Cycle de Stirling moteur avec régénérateur : échanges et efficacité



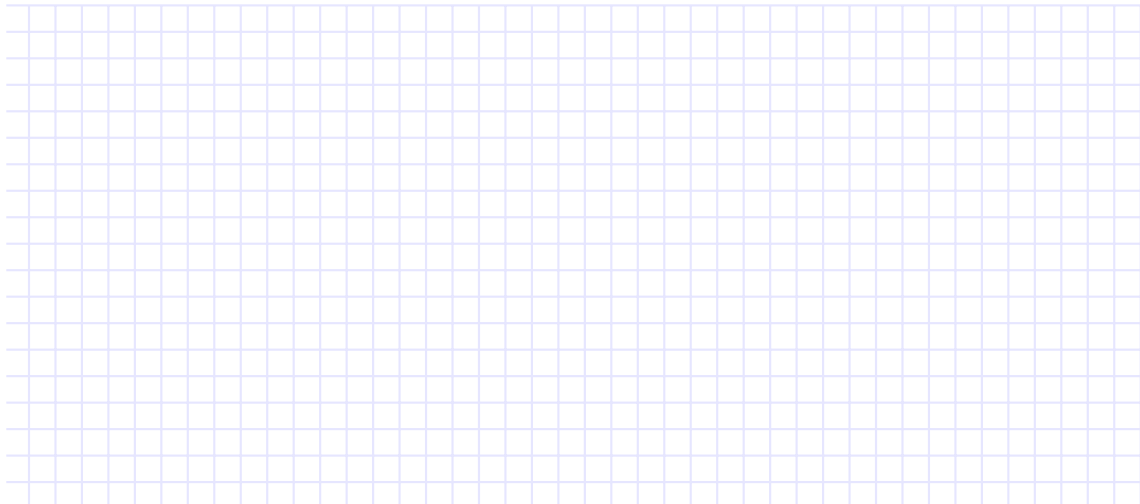




Cycle de Stirling moteur sans régénérateur.



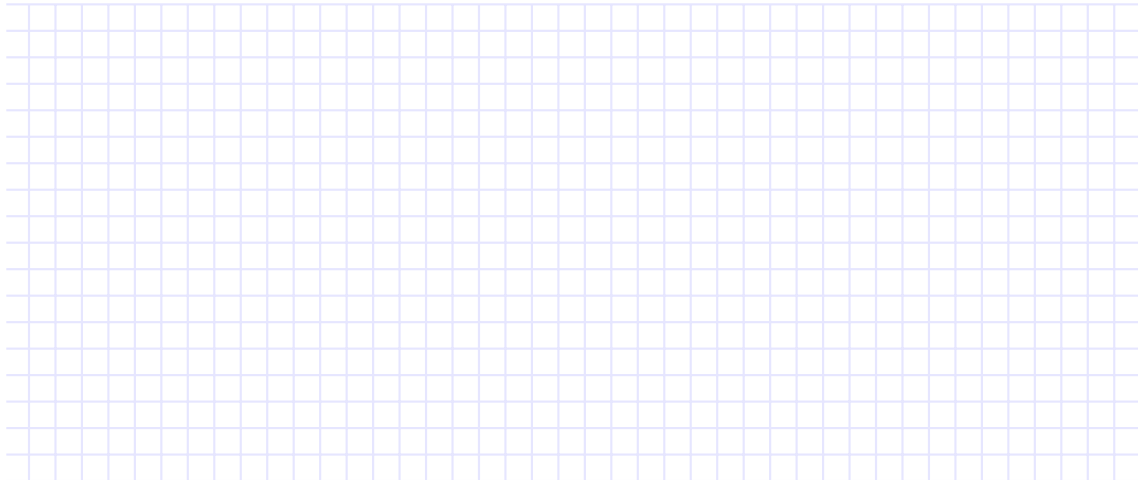
Cycle de Stirling pac / frigo.





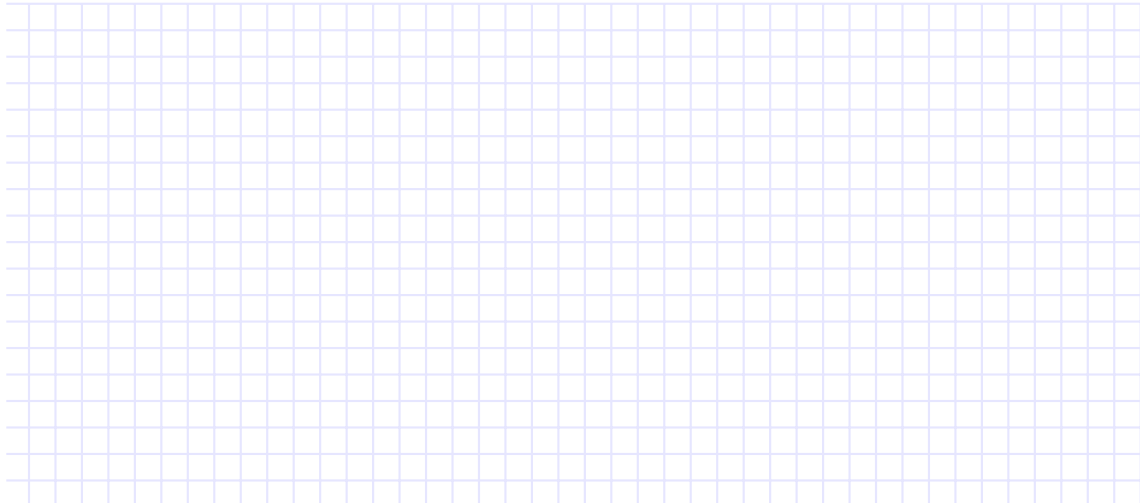
## 8. Machines thermiques "exotiques"

Oiseau buveur

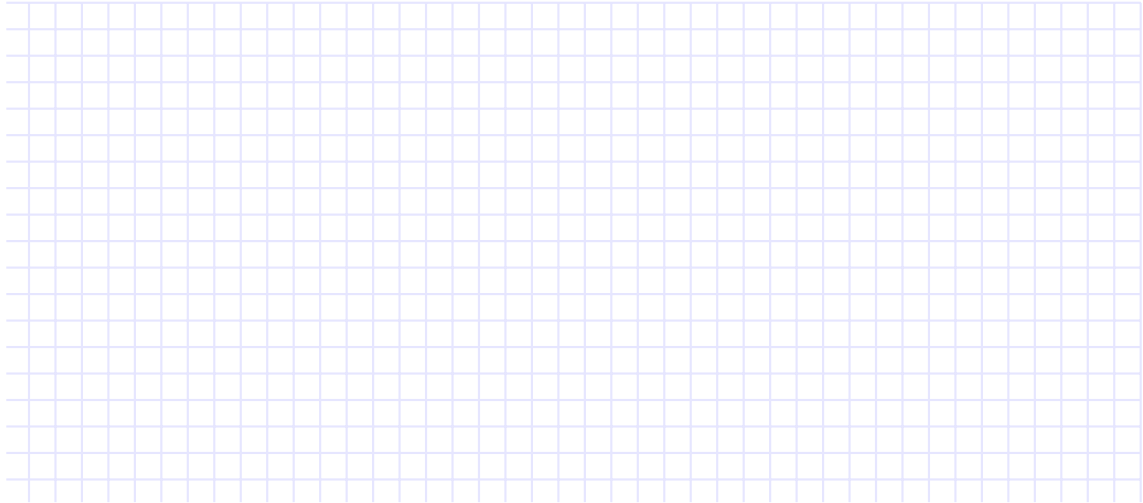




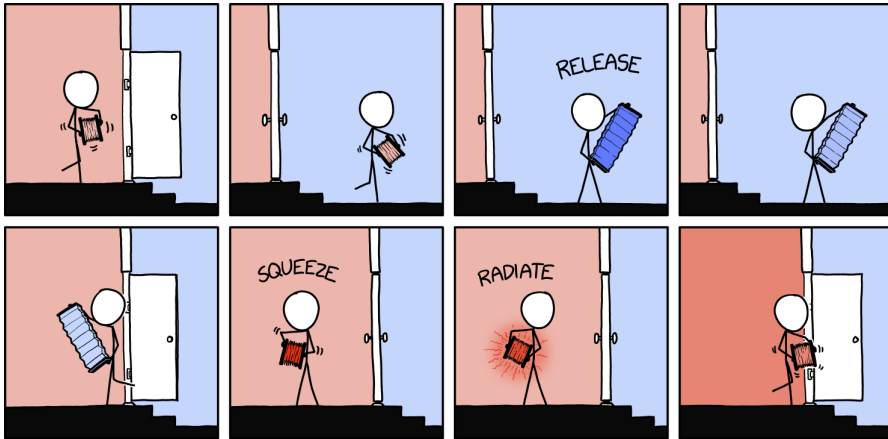
## Frigo solaire



cyclone



Manual heat pump, de xkcd : <https://xkcd.com/2790/>



MANUAL HEAT PUMPS ARE SUCH A PAIN.