Thème III. L'énergie : conversions et transferts (Thermodynamique)

Chapitre n°20 Machines thermiques

Introduction

Vous avez bien dormi dans la maison de vos parents qui est peut être chauffée durant l'hiver par une pompe à chaleur, et refroidie l'été par un climatiseur : comment ces appareils permettent-ils à partir d'énergie électrique réchauffer ou refroidir une pièce ? Ce matin, avant de venir en cours, vous avez bu lors de votre petit déjeuner, du jus d'orange bien frais tout juste sorti de votre réfrigérateur : comment fonctionne cet objet si précieux, qui, branché sur le secteur, permet de refroidir les aliments et ainsi les conserver ? Puis vous êtes monté dans votre voiture pour venir au lycée : qu'est ce qui permet à votre voiture de convertir de l'énergie thermique provenant de la combustion du carburant (dont vous avez bien pensé à faire le plein !) en énergie mécanique et ainsi avancer pour vous permettre d'être à l'heure ?

Moteurs thermiques (de voiture, centrale nucléaire, ...) : permet de convertir le transfert thermique récupéré par la combustion du carburant, en travail mécanique.

Machines frigorifiques (Réfrigérateurs, congélateurs, climatiseur, ...) : permet de prélever du transfert thermique à un milieu pour la rejeter dans un autre milieu pourtant plus chaud. Cela coûte du travail mécanique pour fonctionner : il y a un notamment un compresseur, on l'entend bien quand le frigo fonctionne. Ce travail mécanique a en amont été converti à partir de travail électrique : l'énergie que vous payez à EDF.

Pompe à chaleur : C'est techniquement la même machine que le réfrigérateur/congélateur/climatiseur, mais le but est ici de réchauffer la maison. L'hiver, la pompe à chaleur prélève du transfert thermique à l'extérieur de la maison pour la rejeter dans la maison, pourtant plus chaude que dehors. Là aussi, cela nécessite du travail mécanique pour fonctionner. C'est plus efficace et économique que les radiateurs électriques classiques qui fonctionnent simplement grâce à l'effet Joule

Pré-requis

- PCSI : Thème L'énergie : conversions et transferts
  - Chapitre n°17. Descriptions microscopique et macroscopique d'un système thermodynamique
  - Chapitre n°18. Premier principe.
  - Chapitre n°19. Deuxième principe. Bilans d'entropie

Objectifs du chapitre

— Expliquer le principe de fonctionnement des trois types de machines thermiques.

— Étudier des machines thermiques à l'aide des premier et deuxième principes de la thermodynamique.

Vidéos utiles

- Moteur à 4 temps : https://youtu.be/gn0QsUDgUY0 (au moins de 1'26 à 5'00)
  https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Thermo/Machines/4temps_FJ.php
  https://www.youtube.com/watch?v=7-d2e-RGvL4
- Réfrigérateur : https://youtu.be/5ZzGYvcXwgQ
  https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Thermo/Machines/Frigo_FJ.php
- Pompe à chaleur : https://youtu.be/dZHY7DnotGA

Plan du cours

I Machines thermiques cycliques **3**

II Moteur ditherme **4**
- II.1 Échanges d'énergie 4
- II.2 Rendement 4
- II.3 Rendement maximal 5
- II.4 Cycle de Carnot 5
- II.5 Moteur à explosion 6
  - II.5.a) Présentation du moteur réel . . . 6
  - II.5.b) Modélisation 7
  - II.5.c) Rendement du moteur 8

III Machines dithermes réceptrices **9**
- III.1 Échanges d'énergie 9
- III.2 Machine frigorifique 10
  - III.2.a) Description du fonctionnement . . 10
  - III.2.b) Efficacité 10
  - III.2.c) Efficacité maximale 11
- III.3 Pompe à chaleur 12
  - III.3.a) Fonctionnement 12
  - III.3.b) Efficacité 12
  - III.3.c) Efficacité maximale 12

IV Cogénération **13**

Ai-je bien appris mon cours ?

1 – ☺ – ☹ – Donner le sens des échanges énergétiques pour un moteur thermique ditherme.

2 – ☺ – ☹ – Définir le rendement d'un moteur thermique ditherme et le relier aux énergies échangées au cours d'un cycle. Citer quelques ordres de grandeurs.

3 – ☺ – ☹ – Établir l'expression du rendement maximal d'un moteur ditherme.

4 – ☺ – ☹ – Donner le sens des échanges énergétiques pour un récepteur thermique ditherme.

5 – ☺ – ☹ – Définir l'efficacité d'une machine frigorifique ditherme et la relier aux énergies échangées au cours d'un cycle. Citer quelques ordres de grandeurs.

6 – ☺ – ☹ – Établir l'expression de l'efficacité maximale d'une machine frigorifique ditherme.

7 – ☺ – ☹ – Définir l'efficacité d'une pompe à chaleur ditherme et la relier aux énergies échangées au cours d'un cycle. Citer quelques ordres de grandeurs.

8 – ☺ – ☹ – Établir l'expression de l'efficacité maximale d'une pompe à chaleur ditherme.

9 – ☺ – ☹ – Expliquer le principe de la cogénération.

I Machines thermiques cycliques

Définition : Machine ditherme cyclique

Les machines thermiques sont des dispositifs faisant subir à un fluide une transformation **cyclique** mettent en jeu des transferts thermiques et des travaux mécaniques.
On se restreint aux **machines thermiques dithermes** : qui échangent du transfert thermique avec **deux thermostats** (aussi appelés sources de chaleur) : **une source froide** (de température T_f) **et une source chaude** (de température T_c).

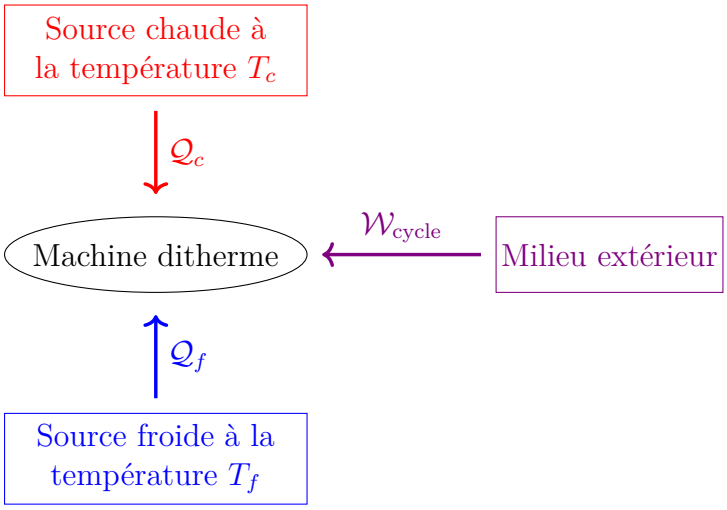
Définition : Moteurs & Machines réceptrices thermiques

On classe les machines thermiques en fonction de leur objectif :

- Les **moteurs thermiques** exploitent un flux thermique d'une source chaude vers une source froide, et en détourne une partie pour le transformer en travail mécanique (la rotation de l'arbre moteur).
  Objectif : production d'un travail
- Les **machines réceptrices thermiques** reçoivent un travail afin de forcer un flux thermique dans le sens non-spontané, c'est-à-dire le forcer de la source froide vers la source chaude.
  Deux catégories :
  - **Machines frigorifiques** (réfrigérateur ou climatiseur) : force le compartiment froid à être davantage froid.
  - **Pompe à chaleur** : force la source chaude (l'intérieur de la maison) à être davantage chaude.

On schématise les échanges effectués par une machine ditherme comme ci-contre.
Le système étudié est le système (fluide) qui décrit le cycle et qui échange avec le milieu extérieur :

- $\mathcal{W}$: travail algébriquement reçu par le système (fluide) qui décrit le cycle depuis le milieu extérieur.
- $\mathcal{Q}_c$: transfert thermique algébriquement reçu par le système (fluide) de la part de la source chaude.
- $\mathcal{Q}_f$: transfert thermique algébriquement reçu par le système (fluide) de la part de la source froide.



Attention

- Il y a **plusieurs systèmes** ici : la machine elle-même, le fluide qui y circule, la source froide, la source chaude. Il **faudra bien préciser le système étudié** lors de l'**application des principes**.
- Les transferts $\mathcal{Q}_f$, $\mathcal{Q}_c$, $\mathcal{W}$ sont **algébriquement reçu par la machine**. S'ils sont positifs c'est que la machine les reçoit effectivement, s'ils sont négatifs c'est qu'en fait le sens réel est de la machine vers l'extérieur ou vers les sources.

II Moteur ditherme

II.1 Échanges d'énergie

Capacité exigible : **Donner le sens des échanges énergétiques pour un moteur ditherme.**

À retenir : Échanges d'énergie dans un moteur ditherme

Le but d'un moteur est de fournir du travail à l'utilisateur pour faire tourner un arbre moteur. Pour cela, le moteur puise de l'énergie dans la source chaude. Sur un cycle, le système {fluide qui décrit le cycle} :

- fournit effectivement du travail à l'extérieur :

$$\mathcal{W}_{\text{cycle}} < 0$$

L'extérieur (l'arbre moteur) reçoit un travail $-\mathcal{W}_{\text{cycle}} > 0$.

- reçoit effectivement du transfert thermique de la part de la source chaude :

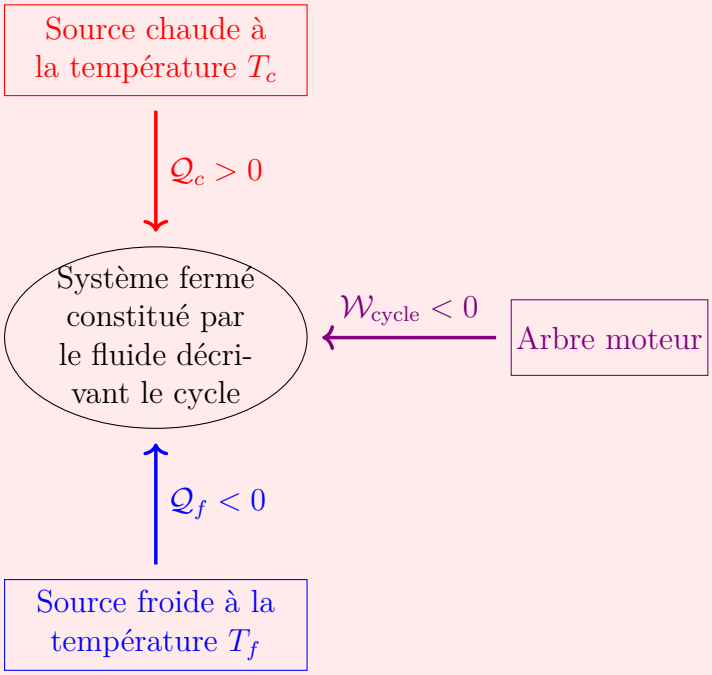
$$\mathcal{Q}_c > 0$$

C'est cette énergie qui le fait tourner.

- fournit effectivement du transfert thermique à la source froide :

$$\mathcal{Q}_f < 0$$

Penser au moteur d'une voiture, qui chauffe et donc cède un transfert thermique vers l'atmosphère.



La **source d'énergie** est une **source chaude** :

— combustion d'un mélange air-carburant pour les moteurs à explosion ou les turboréacteurs,

— chaleur produite par une chaudière alimentée par combustion de matériaux fossiles (gaz, charbon, bois) ou nucléaires, dans les centrales.

La source froide est en général l'atmosphère (pour un moteur de voiture) ou une rivière (cas des centrales nucléaires).

II.2 Rendement

Capacité exigible : **Définir un rendement et le relier aux énergies échangées au cours d'un cycle.**

Définition : rendement (ou efficacité) d'un moteur

On appelle **rendement** du moteur, le rapport de l'énergie échangée utile sur l'énergie échangée coûteuse (celle que l'opérateur est obligé de payer) :

$$r = \frac{\text{énergie échangée utile}}{\text{énergie échangée coûteuse}} = \frac{-\mathcal{W}_{\text{cycle}}}{\mathcal{Q}_c} \in]0,1[$$

- $\mathcal{Q}_f$ n'apparaît pas dans le rendement, car il s'agit de la chaleur rejetée vers l'atmosphère (qui est à la fois utile et qui ne coûte rien).
- On a mis un signe moins devant $\mathcal{W}_{\text{cycle}}$, car $-\mathcal{W}_{\text{cycle}} > 0$ représente le travail fournit par le moteur au milieu extérieur. Cela permet aussi d'avoir un rendement positif (rappel : $\mathcal{W}_{\text{cycle}} < 0$ et $\mathcal{Q}_c > 0$ pour un moteur).

À retenir : Ordre de grandeur de rendements de moteurs

Moteur à essence	Moteur diésel	Centrale nucléaire
$\approx 35\%$	$\approx 45\%$	$\approx 30\%$

II.3 Rendement maximal

Capacité exigible : **Justifier et utiliser le théorème de Carnot.**

Étant donné un moteur fonctionnant entre une source froide à T_f et une source chaude à T_c, fixées, on peut se demander s'il possible d'avoir un rendement qui s'approche autant que possible de 1, ou s'il y a une limite imposée par la physique...

On sent bien que cela va avoir un lien avec l'entropie créée, qui est synonyme d'énergie mal exploitée.

Méthode : Établir le rendement maximal d'un moteur ditherme

But : montrer que le rendement d'un moteur ditherme est nécessairement inférieur à une grandeur ne dépendant que des températures des deux sources de chaleur entre lesquelles il fonctionne.

1. Écrire le premier principe sur un cycle.
2. Écrire le deuxième principe sur un cycle.
   Puis, le traduire sous la forme d'une inégalité (inégalité de Clausius) : $\dfrac{Q_c}{T_c} + \dfrac{Q_f}{T_f} \leq 0$.
3. Combiner les deux principes ainsi écrits pour isoler $r = -\dfrac{W_{\text{cycle}}}{Q_c}$ et justifier que r est nécessairement inférieur à une grandeur dépendant des températures T_c et T_f.

Attention

Cette méthode permet uniquement de répondre aux questions suivantes :

— Montrer que le rendement du moteur est nécessairement inférieur à une certaine grandeur que l'on exprimera en fonction des températures des deux sources de chaleur entre lesquelles il fonctionne.

— Établir l'expression du rendement maximal (de Carnot) du moteur.

Elle ne permet pas d'établir l'expression du rendement d'un moteur (ex §II.5.c)).

Démonstration à maîtriser n°1 – Rendement maximal (=de Carnot) d'un moteur ditherme

Objectif : Montrer que le rendement du moteur vérifie : $r_{\text{moteur}} \leq 1 - \dfrac{T_f}{T_c}$.

Q1. Écrire les deux principes sur le cycle. Traduire le deuxième principe sous la forme d'une inégalité.

Q2. En combinant ces deux équations, justifier que le rendement du moteur est nécessairement inférieur à une grandeur qui ne dépend que des deux températures de la source chaude et de la source froide.

Q3. À quoi correspond le cas d'égalité ?

II.4 Cycle de Carnot

L'efficacité de Carnot est une limite théorique qu'il est impossible de dépasser une fois que les températures des thermostats sont fixées.

Le **cycle de Carnot** est le **cycle réversible associé à l'efficacité maximale**. Pour que le **cycle soit réversible, il faut que chaque étape du cycle soit réversible** :

- Pour que les **échanges de transferts thermiques** entre le système Σ et les thermostats soient **réversibles**, il est nécessaire qu'au cours de ces échanges la température T du système soit égale à la température du thermostat : ces évolutions doivent donc être **isothermes réversibles** (inhomogénéité de température $\Rightarrow$ irréversibilité).
- En dehors de ces deux évolutions, le système Σ ne doit échanger aucun transfert thermique : il évolue alors de manière adiabatique, et de façon réversible.

À retenir : théorème de Carnot

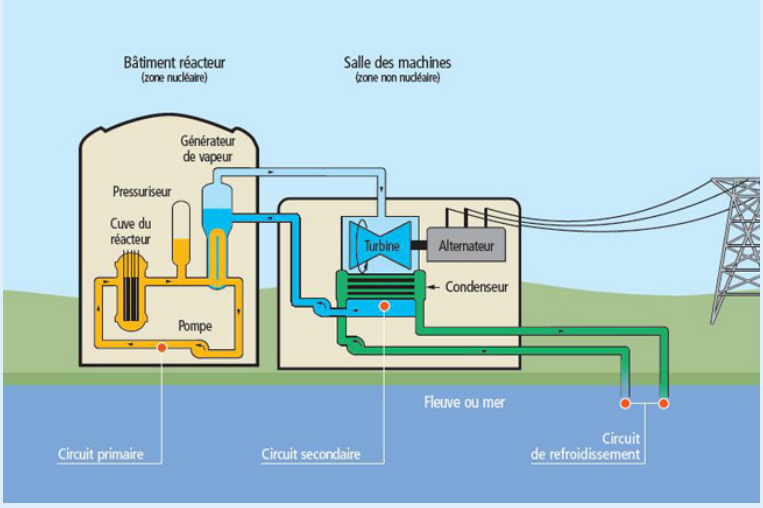
L'efficacité d'une machine ditherme cyclique réelle est toujours inférieure ou égale à l'efficacité de Carnot obtenue dans le cas d'un cycle réversible, qui est maximale et qui ne dépend que de la température des deux sources de chaleur (thermostats).

Le cycle de Carnot est constitué de **deux transformations isothermes réversibles** aux températures T_f de la source froide et T_c de la source chaude, reliées par **deux transformations adiabatiques réversibles** (isentropiques).

Activité n°2 – Rendement de Carnot d'une centrale nucléaire

Q1. Une centrale thermique nucléaire peut être modélisée par un moteur thermique ditherme.
Qui est le système qui décrit le cycle moteur ?
Qui joue le rôle de source chaude ? de source froide ?
Quelle est la forme du travail fourni ? À quel niveau est-il fourni ?

Q2. Calculer le rendement de Carnot pour $T_c = 600$ °C et $T_f = 20$ °C.



II.5 Moteur à explosion

II.5.a) Présentation du moteur réel

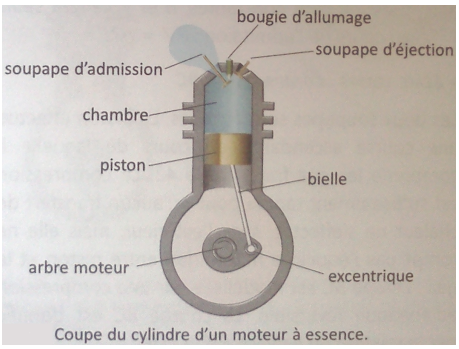
Le moteur à explosion a été proposé par le français Beau de Rochas en 1862, et construit par l'allemand Nikolaus Otto en 1876. Dans un tel moteur, la détonation du mélange air-carburant est provoquée par une étincelle produite par la bougie d'allumage, et ce à chaque fois que le piston atteint le point haut de sa course, ce qui augmente sa température, sa pression, et renvoie la piston en bas, fournissant ainsi de l'énergie cinétique et du travail.

Nous étudions ici le cycle du moteur quatre temps, ainsi appelé car à chaque cycle le piston effectue quatre courses complètes (soit deux aller-retour) au sein du cylindre.

L'essence utilisée par le moteur provient du raffinage du pétrole et contient plusieurs molécules d'hydrocarbures : de l'heptane (fort pouvoir détonnant : indice d'octane 0) et de l'isooctane, c'est-à-dire 2,2,4-triméthylpentane (faible pouvoir détonnant : indice d'octane 100). L'indice d'octane (95 ou 98) indique le pourcentage d'isooctane.

Le mélange { air-essence} est contenu dans un cylindre fermé par un piston. Le moteur contient un ou plusieurs cylindres.
Chaque cylindre contient :

- un piston mobile lié à un système bielle-manivelle qui transforme un mouvement de translation (aller-retour du piston) en un mouvement de rotation.
- deux soupapes : l'une d'admission (aspiration du mélange {air-carburant}) et l'une d'échappement (du mélange après un cycle).



Coupe du cylindre d'un moteur à essence.

Les quatre temps du moteur sont :

Premier temps : admission (AB) Partant du cylindre ayant son volume minimal (point A), le piston, entraîné par le vilebrequin, descend progressivement en aspirant le mélange gaz {air-essence} par la soupape d'admission (a). Pendant ce temps la soupape d'échappement (e) reste fermée. Lorsque le piston arrive en bas de course (le cylindre a son volume maximal au point B) la soupape (a) se ferme.

Les soupapes (a) et (e) resteront fermées pendant les deux temps suivants.

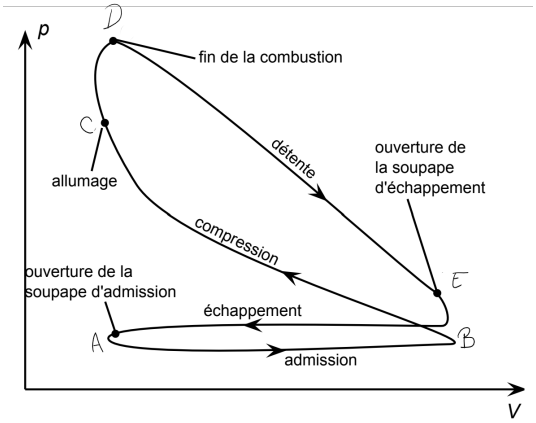
Deuxième temps : compression (BC) Le piston remonte en comprimant le gaz {air-essence} jusqu'à ce que le volume du cylindre soit minimal (point C).

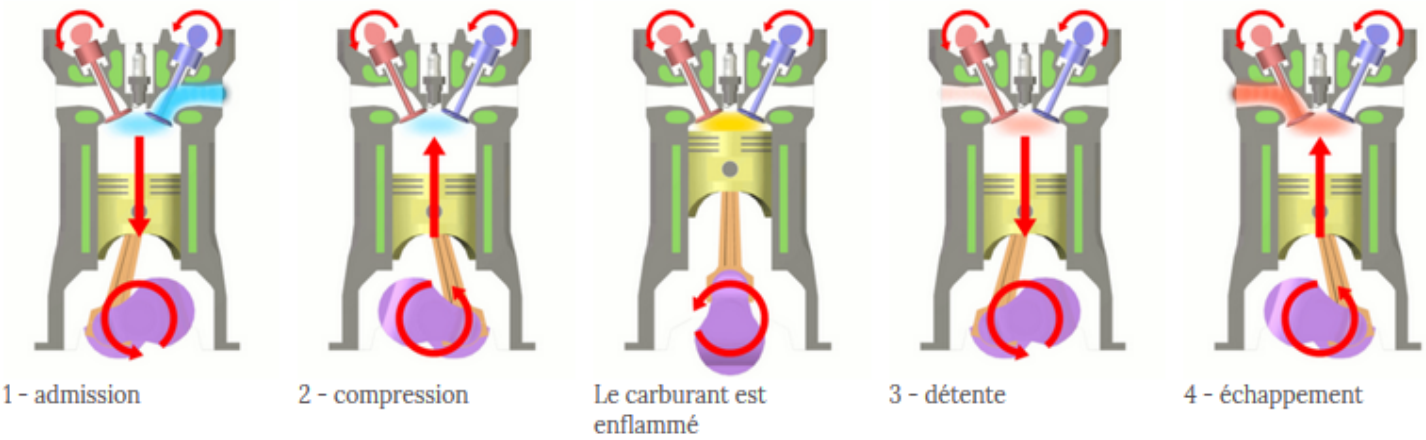
Troisième temps : combustion-détente (CDE) Le troisième temps est constitué de l'explosion du mélange gazeux, qui s'effectue presque instantanément lorsque le piston est en position haute, puis de la détente des gaz brûlés qui repoussent le piston. Au point C, une étincelle à la bougie provoque l'inflammation puis la combustion exoCthermique du mélange. La pression augmente alors fortement jusqu'à atteindre la pression maximale en D. Le piston se trouve ainsi repoussé jusqu'en position basse. Les gaz d'échappement (produits de la combustion) se détendent ensuite, le piston se déplaçant alors jusqu'à ce que le volume du cylindre soit maximal : point E.

Quatrième temps : échappement (EA) La soupape (e) s'ouvre alors, et le piston, en remontant, chasse les gaz brûlés dans l'atmosphère extérieure.

Le vilebrequin fait un demi-tour par temps, donc deux tours pendant le cycle complet. Le cycle peut recommencer.

Le diagramme de Clapeyron représente la pression dans le cylindre en fonction du volume du cylindre.
Sur ces quatre temps, deux sont moteurs (admission et explosion - détente) et deux sont récepteurs (compression et échappement). Pour avoir un système constamment moteur, on couple quatre cylindres décalés d'un temps.





L'animation suivante aide à comprendre le fonctionnement du cycle : https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Thermo/Machines/4temps_FJ.php

II.5.b) Modélisation : cycle de Beau de Rochas

Il est évident que le cycle réellement effectué par le moteur est complexe, et ne peut être étudié qu'au prix d'une modélisation qui implique des hypothèses simplificatrices. Le cycle ci-dessus n'est pas exploitable d'un point de vue théorique, on le modélise par le cycle théorique de Beau de Rochas.

- L'azote est majoritaire dans le mélange gazeux et il ne participe pas à la combustion, ainsi le changement de nature au cours de la combustion n'affecte qu'une faible proportion du mélange.

  Le système { air - essence } puis les gaz d'échappement sont assimilés à un seul **gaz parfait** de propriétés thermodynamiques constantes, de coefficient $\gamma = 1,4$.

- **Premier temps : Admission AB**

  La phase d'admission (AB) est effectuée sous la pression atmosphérique extérieure constante : c'est une transformation isobare. La température reste également constante.

  C'est une transformation en système ouvert.

- **Deuxième temps : compression (BC)**
  Modèle : cette compression est supposée adiabatique et réversible.
  Justifications : La compression est supposée suffisamment rapide pour que l'on puisse considérer que les transferts thermiques n'ont pas le temps de se faire : hypothèse adiabatique. Le mouvement du piston est lent par rapport à la vitesse du son, ce qui fait que la transformation est quasi-statique, et les frottements pas trop importants : hypothèse réversible.
- **Troisième temps : combustion-détente (CDE)** est modélisé en deux étapes :
  - **Combustion (CD)**
    Au point C, la bougie fournit une étincelle qui déclenche l'explosion du mélange. Cette combustion apporte du transfert thermique au gaz. En conséquence, la pression augmente jusqu'au point D.
    Modèle : cette augmentation de pression est supposée isochore.
    Justifications : elle a lieu au point mort haut, et la pression augmente très rapidement par rapport à la variation de volume.
    C'est au cours de cette étape qu'a lieu l'apport de transfert thermique au système (transfert thermique fourni par la « source chaude » dans le modèle des machines dithermes).
  - **Détente (DE)**
    Le piston est éjecté vers l'extérieur à cause de l'augmentation de pression jusqu'à ce qu'il atteigne le point mort bas. Il s'agit donc d'une détente.
    Modèle : on suppose cette détente adiabatique réversible (analogue à la compression (BC))
- **Quatrième temps : Échappement (EFA)**
  La soupape d'échappement (e) s'ouvre lorsque le piston est en position basse, alors que la pression dans le cylindre est supérieure à la pression atmosphérique.
  - **Éjection (EF)**
    Une partie des gaz brûlés est alors éjectée brutalement dans l'atmosphère.
    Modèle : le mélange revient à la pression atmosphérique à cause de l'ouverture de la soupape, de façon isochore jusqu'en F. Dans le modèle, F=B, le mélange reste donc le même, mais il est prêt à brûler à nouveau. On considère que la totalité des gaz contenue dans le cylindre est mise en contact avec l'atmosphère, qui provoque son refroidissement (rapide sans modification du volume) et la diminution de la pression jusqu'à la pression atmosphérique.
    C'est au cours de cette étape que le gaz cède du transfert thermique à la « source froide » dans le modèle des machines dithermes (donc ici à l'atmosphère extérieure).
  - Le refoulement (FA) du gaz alors s'effectue sous la pression atmosphérique constante : c'est une transformation isobare. La température reste également constante.
    C'est une transformation en système ouvert.

Dans le modèle, on ignore l'aller-retour $A \to B$ et $F \to A$.

II.5.c) Rendement du moteur

Activité n°3 – Rendement du moteur à essence

Q1. Représenter le cycle modèle dans le diagramme (P, V) et indiquer la nature de la transformation sur chaque courbe.

On cherche l'expression du rendement du moteur en fonction du taux de compression $a = \dfrac{V_{\max}}{V_{\min}}$.

Q2. Exprimer le transfert thermique Q_{CD} reçu par le système lors de la transformation $C \to D$ en fonction de R, n, γ, T_C et T_D.
Quel est le signe ? Qu'est-ce qui produit ce transfert thermique ?

Q3. Exprimer le transfert thermique Q_{EF} reçu par le système lors de la transformation $E \to F$ en fonction de R, n, γ, T_E et T_F.
Quel est le signe ? Que se passe-t-il ?

Q4. Exprimer le travail reçu par le système lors d'un cycle en fonction de Q_{CD} et Q_{EF}.
Quel doit être le signe de ce travail si l'on veut que le système fournisse effectivement un travail au milieu

extérieur (donc au piston puis au reste de la chaine de transmission) ?
Au cours du cycle, lors de quelles étapes ce travail est-il produit ?

Q5. Définir le rendement thermodynamique η, puis l'exprimer en fonction de Q_{EF} et Q_{CD}.

Q6. Exprimer ce rendement en fonction des quatre températures T_B, T_C, T_D et T_E.

Q7. En utilisant les modélisations adiabatiques réversibles de certaines transformations, déterminer les expressions de T_D et T_C en fonction de T_B, T_E, $a = \dfrac{V_{\max}}{V_{\min}}$ et γ.

Q8. Établir le rendement du moteur en fonction de $a = \dfrac{V_{\max}}{V_{\min}}$ et γ. Quelle est l'influence de a ? Faire l'application numérique pour $a = 10$.

Q9. Les rendements des moteurs réels de ce type varient entre 25 et 30%. Comment peut-on expliquer les différences entre le rendement théorique et le rendement réel ?

III Machines dithermes réceptrices

III.1 Échanges d'énergie

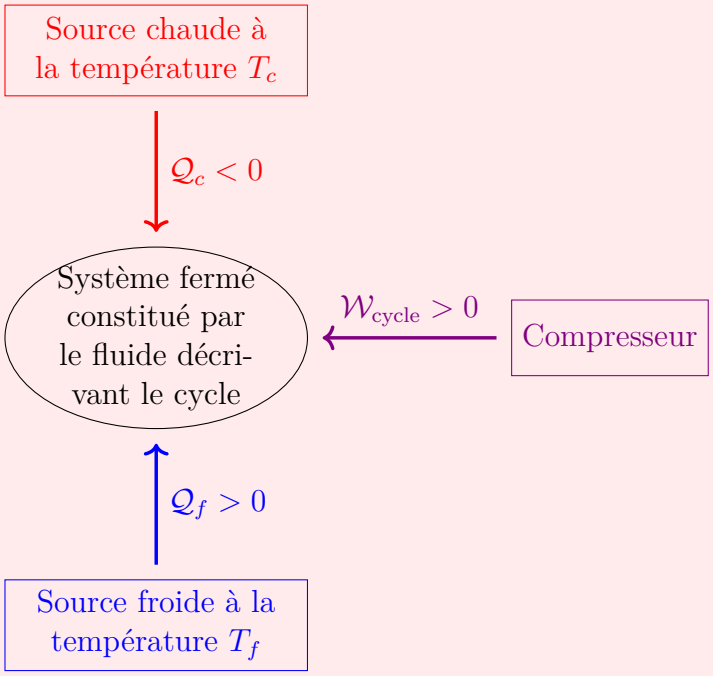
Capacité exigible : **Donner le sens des échanges énergétiques pour un récepteur ditherme.**

À retenir : Échanges d'énergie dans une machine réceptrice

Une **machine frigorifique** et une **pompe à chaleur dithermes** sont des machines thermiques qui, grâce au travail reçu, prélèvent du transfert thermique à la source froide (ils la « refroidissent ») et fournissent du transfert thermique à la source chaude (ils la « réchauffent »).
Ainsi, sur un cycle, le fluide décrivant le cycle :

- reçoit effectivement du travail de la part de l'extérieur :
$$\mathcal{W}_{\text{cycle}} > 0$$
- fournit effectivement du transfert thermique à la source chaude :
$$\mathcal{Q}_c < 0$$
- reçoit effectivement du transfert thermique de la part de la source froide :
$$\mathcal{Q}_f > 0$$

Les trois grandeurs $\mathcal{W}_{\text{cycle}}$, $\mathcal{Q}_c$ et $\mathcal{Q}_f$ sont comptées **algébriquement reçues par le système**.
Le principe physique de fonctionnement de ces deux machines thermiques est le même, mais le but recherché n'est pas le même.



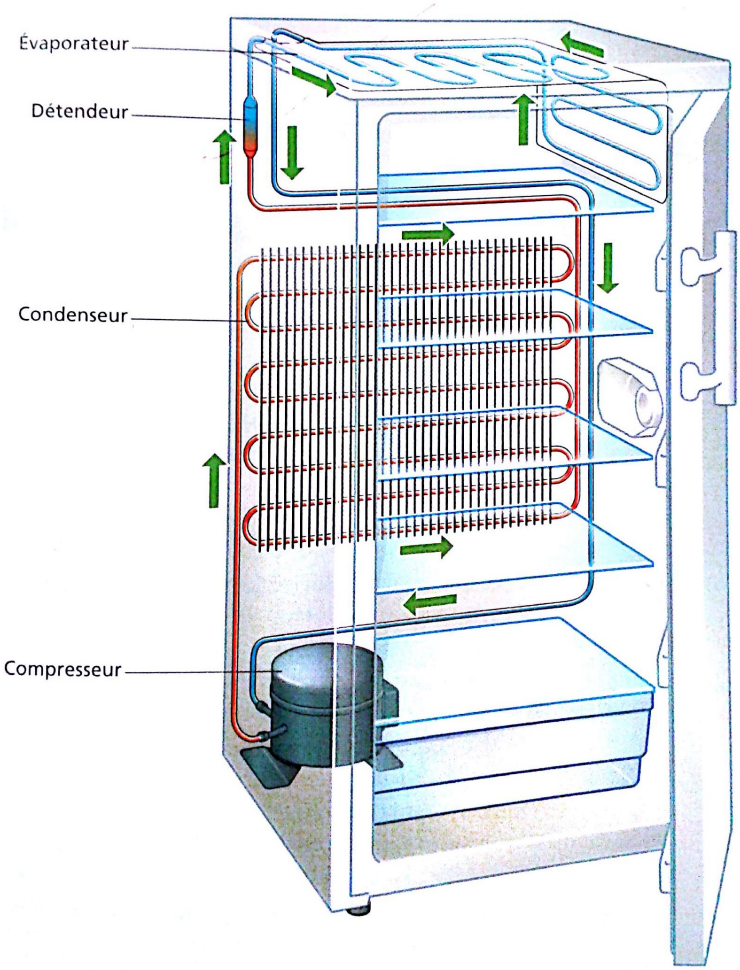
Lors du fonctionnement d'une machine réceptrice, la source chaude ne « réchauffe » pas le fluide de la machine, elle le refroidit ($Q_c < 0$) ; de même la source froide ne « refroidit » pas le fluide, elle le réchauffe ($Q_f > 0$).
Une machine frigorifique est utilisée pour refroidir la source froide et accessoirement elle réchauffe la source chaude. Une pompe à chaleur est utilisée pour réchauffer la source chaude et accessoirement elle refroidit la source froide.

III.2 Machine frigorifique

III.2.a) Description du fonctionnement

Le mélange liquide-gaz froid traverse l'**évaporateur** (qui est dans la doublure interne du réfrigérateur) où il absorbe le transfert thermique de l'intérieur du réfrigérateur ($\mathcal{Q}_f > 0$) pour subir un second changement d'état : le liquide se vaporise. On obtient alors un gaz froid et à basse pression.

$\Longrightarrow$



Le liquide passe ensuite à travers un **détendeur** qui abaisse sa pression et sa température (à une température inférieure à celle du compartiment à refroidir : $T \approx -10$ °C pour un réfrigérateur sans congélateur).

$\Uparrow$

Le gaz chaud et à haute pression circule dans un échangeur appelé **condenseur** (car le fluide se condense : c'est la grille noire à l'arrière du réfrigérateur), où il cède du transfert thermique vers la cuisine ($\mathcal{Q}_c < 0$) et subit un changement d'état : le gaz se transforme en un liquide chaud sous haute pression.

$\Uparrow$

Le **compresseur** comprime le fluide réfrigérant, alors froid et sous forme gazeuse, ce qui augmente sa température (au-delà de celle de la source chaude, jusqu'à ≈ 45 °C et sa pression. Il fonctionne à l'aide d'un moteur et consomme donc de l'énergie sous forme électrique. À la sortie du compresseur, le fluide est donc chaud et à haute pression.

L'étude détaillée de ce type de cycle ne peut pas se faire cette année, car les différents éléments (compresseur, échangeurs, détendeur) sont des systèmes ouverts où le fluide s'écoule en permanence. Or le 1er et le 2e principe ne s'appliquent que pour des systèmes fermés. Vous verrez l'an prochain les versions « système ouvert » de ces principes.

III.2.b) Efficacité

<u>Capacité exigible</u> : **Définir une efficacité et le relier aux énergies échangées au cours d'un cycle.**

Pour les machines réceptrices (réfrigérantes ou pompe à chaleur), on ne parle pas de rendement mais d'efficacité, ou de façon synonyme de coefficient de performance (COP). La définition est toutefois la même.

Définition : efficacité thermodynamique d'une machine frigorifique

On appelle **efficacité thermodynamique** d'une machine frigorifique, le rapport de l'énergie échangée utile sur l'énergie échangée coûteuse (celle que l'opérateur est obligé de payer) :

$$e_{\text{frigo}} = \frac{\text{énergie échangée utile}}{\text{énergie échangée qui coûte}} = \frac{\mathcal{Q}_f}{\mathcal{W}_{\text{cycle}}}$$

$e_{\text{frigo}} \in]0, +\infty[$

$\mathcal{Q}_c$ n'apparaît pas dans l'efficacité, car il s'agit du transfert thermique rejeté vers la pièce.

III.2.c) Efficacité maximale

Capacité exigible : **Justifier et utiliser le théorème de Carnot.**

Même question que pour le moteur : étant donné un réfrigérateur fonctionnant entre une source froide à T_f et une source chaude à T_c, fixées (par exemple 4 °C pour un frigo, et 25 °C dans la cuisine), est-il possible d'avoir une efficacité aussi élevée que l'on souhaite, ou y a-t-il une limite imposée par la physique.

Démonstration à maîtriser n°4 – Efficacité maximale (=de Carnot) d'une machine frigorifique

Objectif : Montrer que l'efficacité d'une machine frigorifique vérifie : $e_{\text{frigo}} \leq \dfrac{T_f}{T_c - T_f}$.

Q1. Écrire les deux principes sur un cycle.

Q2. Établir que l'efficacité de la machine frigorifique est inférieure à une grandeur ne dépendant que des deux températures.

Q3. À quoi correspond le cas d'égalité ? Comment doit-être le cycle pour l'efficacité du réfrigérateur soit maximale ? Décrire ce cycle.

Q4. Proposer des valeurs typiques pour T_f et T_c. En déduire l'efficacité de Carnot d'un tel réfrigérateur.

Activité n°5 – Efficacité d'un réfrigérateur

Soit un réfrigérateur d'efficacité maximale e_C (source froide à 5 °C, et source chaude à 25 °C). Pour fonctionner normalement il doit extraire $Q_f = 300$ J du compartiment froid chaque seconde.

Q1. Déterminer la puissance mécanique reçu par le fluide au niveau du compresseur.

Q2. Déterminer la puissance thermique reçue par le fluide de la part de la source chaude.

Q3. Reprendre pour le cas d'un réfrigérateur réel d'efficacité 1,5. Commenter.

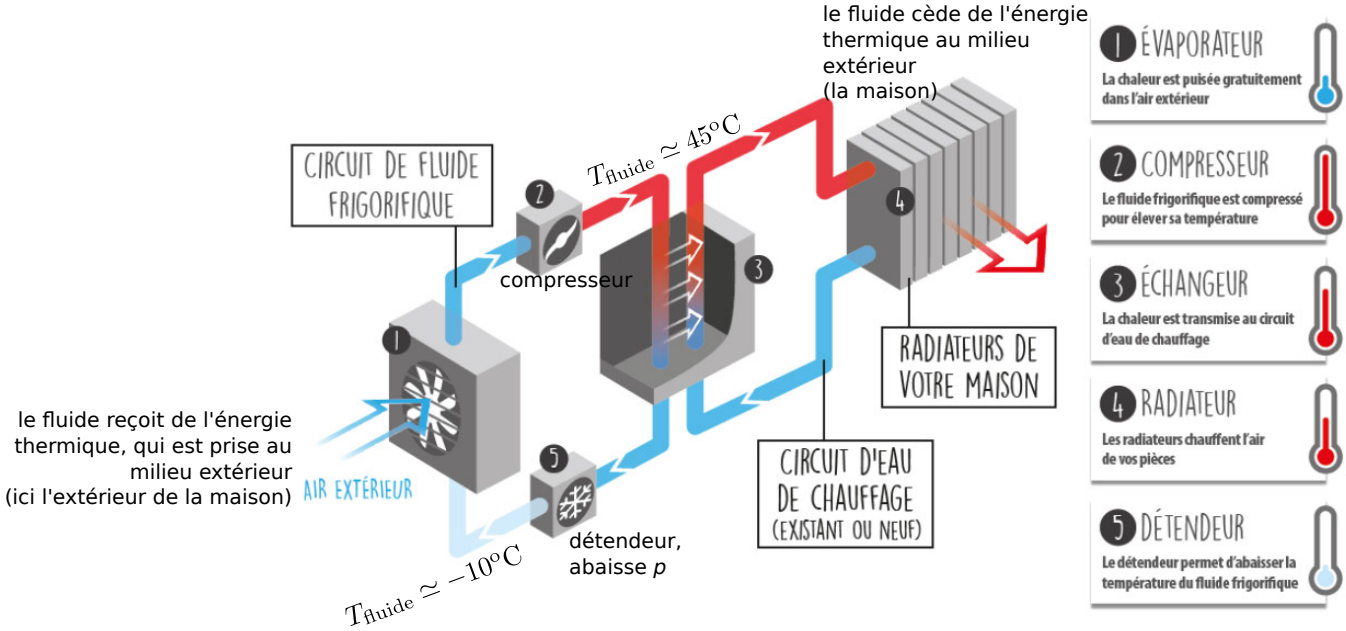
REMARQUES

On peut donc avoir des efficacités supérieures à 1 ! Attention à ne pas croire trop vite que « c'est magique ». La conservation de l'énergie est toujours là : le premier principe est toujours respecté. Une efficacité de 5,7, cela signifie simplement que : $Q_f = 5,7 \times W$, c'est-à-dire qu'en consommant $W = 100$ J de travail mécanique (pour faire fonctionner le compresseur), on arrive à prélever $Q_f = 570$ J de transfert thermique à la source froide pour la rejeter dans la source chaude.

III.3 Pompe à chaleur

III.3.a) Fonctionnement

L'idée globale du fonctionnement est identique à celle du réfrigérateur. Le fluide circule en circuit fermé, et s'écoule dans les différents organes de la machine.



Lorsqu'il passe côté extérieur, le fluide est plus froid que l'air ambiant. Il reçoit donc un transfert thermique $\mathcal{Q}_f > 0$. C'est cette énergie, prélevée à l'extérieur, qui sera ensuite réinjectée côté chaud dans la pièce à chauffer

III.3.b) Efficacité

<u>Capacité exigible</u> : Définir une efficacité et le relier aux énergies échangées au cours d'un cycle.

Définition : efficacité d'une pompe à chaleur

On appelle **efficacité** d'une pompe à chaleur, le rapport de l'énergie échangée utile sur l'énergie échangée coûteuse (celle que l'opérateur est obligé de payer) :

$$e_{\text{PAC}} = \frac{\text{énergie échangée utile}}{\text{énergie échangée qui coûte}} = \frac{-\mathcal{Q}_c}{\mathcal{W}_{\text{cycle}}}$$

$e_{\text{PAC}} \in]0, +\infty[$.

- $\mathcal{Q}_f$ n'apparaît pas dans l'efficacité, car il s'agit du transfert thermique prélevé à l'extérieur de la maison : elle ne coûte rien.
- Signe moins devant $\mathcal{Q}_c$ car il est négatif.

III.3.c) Efficacité maximale

<u>Capacité exigible</u> : Justifier et utiliser le théorème de Carnot.

Démonstration à maîtriser n°6 – Efficacité maximale (=de Carnot) d'une pompe à chaleur

Q1. En suivant la même méthode que précédemment, montrer que l'efficacité d'une pompe à chaleur vérifie l'inégalité : $e_{\text{PAC}} \leq \dfrac{T_c}{T_c - T_f}$.

Q2. Comment doit-être le cycle pour l'efficacité d'une pompe à chaleur soit maximale ? Décrire ce cycle.

Q3. Une pompe à chaleur (air/eau), utilisée pour chauffer une maison en hiver, travaille avec l'eau de circuit de chauffage pour source chaude et l'air à l'extérieur de la maison pour source froide. Calculer l'efficacité de Carnot pour $T_c = 35$ °C et $T_f = 7$ °C.

REMARQUES

- Il faut comparer cette efficacité avec celle d'un chauffage électrique classique (tout bêtement une résistance parcourue par un courant, et qui chauffe par effet Joule). Il s'agit là directement d'une conversion de l'énergie électrique (travail électrique) $|W|$ consommée, en transfert thermique $|Q_c|$. Le rendement est de 100 %, c'est-à-dire que l'énergie $|W|$ fournie par le générateur électrique est intégralement dissipée par effet Joule (faire un bilan d'énergie dans un circuit : générateur→résistance) : $|Q_c| = |W|$.
- Or, avec une pompe à chaleur, on peut avoir jusqu'à $|Q_c| = 10 \times |W|$!!! On comprend l'intérêt de remplacer ses vieux radiateurs électriques par des pompes à chaleur ...
  Là encore, la remarque précédente s'impose : ce n'est pas « magique », il y a bien toujours conservation de l'énergie. Si $e = 10$, par exemple, ça ne signifie PAS que 1 joule de travail ont été convertis en 10 joules de transfert thermique. Cela signifie qu'il a fallu payer 1 joule de travail mécanique, pour transférer 10 joules de transfert thermique dans la maison, en les prélevant à l'extérieur de la maison.

À retenir : Efficacité des machines réceptrices réelles

Réfrigérateur	Pompe à chaleur
$e_R \approx 3$	$e_{\text{PAC}} \approx 3$ à 5

La pompe à chaleur est de classe A selon les normes européennes si l'efficacité est supérieure à 3,65.

IV Cogénération

<u>Capacité exigible</u> : **Expliquer le principe de la cogénération.**

Comme nous l'avons vu dans le fonctionnement d'un moteur ditherme, de l'énergie thermique est fournie à la source froide. Or cette source froide est le plus souvent l'atmosphère (pour un moteur de voiture) ou encore l'eau d'un fleuve ou de la mer (pour une centrale électrique). On peut donc dire dans ce cas que cette énergie est perdue. En général on valorise les fluides du circuit de refroidissement pour les utiliser dans un réseau urbain de chauffage. On retrouve également ce principe lorsqu'on allume le chauffage de sa voiture (à moteur thermique) l'hiver.

D'après https://fr.wikipedia.org/wiki/Cogeneration et https://direns.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/cogeneration.html

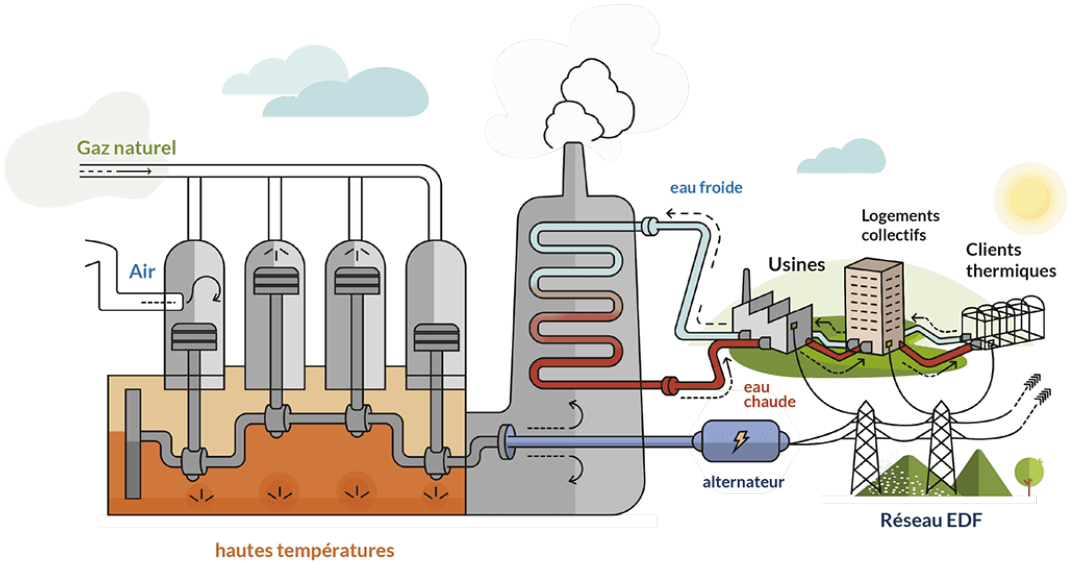
On appelle cogénération la **production combinée d'énergie thermique et d'énergie mécanique ou d'électricité**. Le cas le plus fréquent est la production simultanée d'électricité et de transfert thermique utile par des moteurs thermiques ou des turbines à gaz.

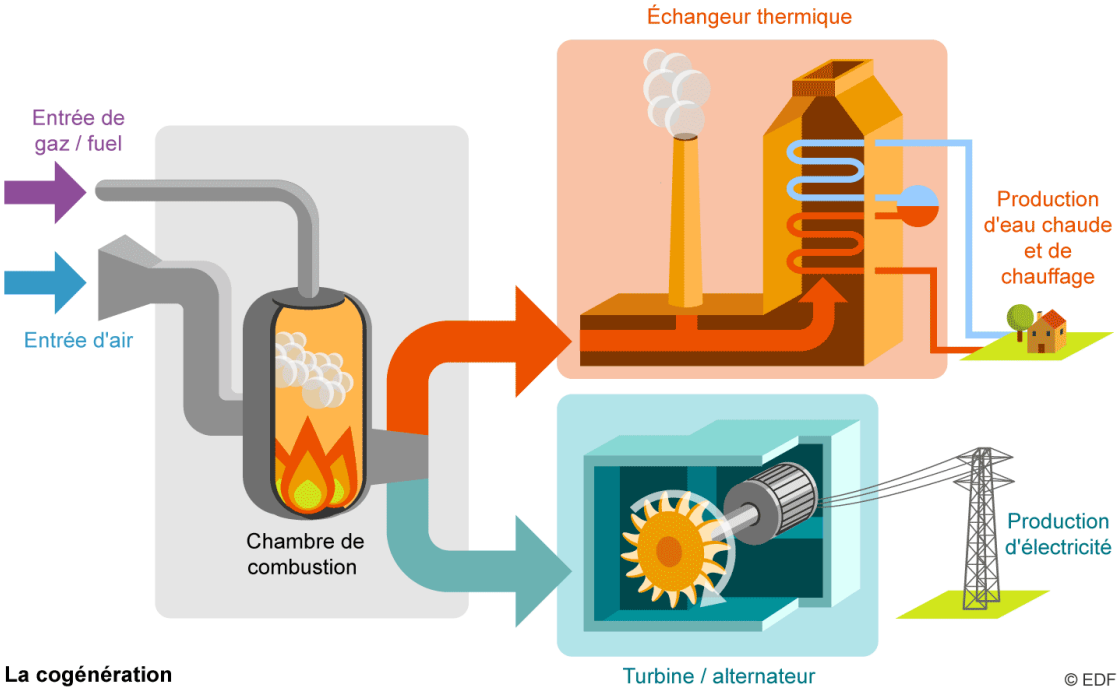
L'idée de base de la cogénération est que les combustions se déroulent toutes à des températures très élevées (supérieures à 1000°C), alors que les besoins de chaleur dans l'industrie ou pour le chauffage se manifestent à des températures plus basses, généralement entre 80°C et 300°C.

Dans ces conditions, il est tout à fait possible, lorsqu'on a recours à la combustion pour satisfaire des besoins en chaleur, de tirer parti de cet écart de température pour produire de l'électricité par l'intermédiaire d'un cycle moteur. Il suffit pour cela que la source chaude du cycle moteur soit la chaudière ou la chambre de combustion, et la source froide les besoins de chaleur.

Il serait aussi théoriquement possible de produire de la chaleur à haute température sur les lieux de production de l'électricité, mais cette solution se révèle généralement mauvaise car la chaleur se transporte beaucoup moins bien que l'électricité.

L'intérêt principal des cycles de cogénération est qu'ils sont **parmi les plus performants** sur le plan énergétique. Généralement, les objectifs poursuivis par la cogénération sont doubles : d'une part réaliser des économies d'exploitation, et d'autre part garantir la sécurité d'approvisionnement en électricité d'une partie au moins des unités.





La cogénération