

Cycles thermodynamiques

Consommation d'énergie et émissions - Logements
Consommation d'énergie et émissions - Transports et déplacements
Comment l'électricité est produite - Centrales thermiques à combustion

Ce texte est conçu comme un document compagnon du livre « L'électricité, au cœur de notre futur bas-carbone ». Il n'est pas conçu comme un document indépendant. Il complète les chapitres mentionnés ci-dessus.

Cycles thermodynamiques : chaleur et mouvement

Sauf s'il est au zéro absolu (-273 °C), un corps contient de la chaleur. Même en hiver, quand l'air est « froid » dehors, il contient donc de la chaleur, ce qui donne envie de la récupérer. Faire entrer l'air extérieur n'est clairement pas la solution ! De là l'idée de faire circuler un fluide qui va prendre la chaleur de l'air à l'extérieur et la donner à l'intérieur. Dit autrement, peut-on récupérer de la chaleur en mettant un fluide en mouvement ? Réciproquement, comment de la chaleur peut-elle créer du mouvement ? Les pompes à chaleur (PAC) permettent de répondre oui à la première question, les turbines des centrales thermiques mais aussi les moteurs à combustion interne de nos voitures oui à la seconde.

Léonard Sadi Carnot, scientifique et ingénieur français, aborda ces deux questions en 1824, créant ainsi la « thermodynamique », branche de la physique, dont le nom illustre les deux questions précédentes et qui a de multiples applications.

Pour obtenir des transformations énergétiques, de mouvement en chaleur et réciproquement, on réalise des « cycles » au cours desquels un fluide subit une suite de transformations avant de revenir dans son état initial. Ces cycles peuvent être avec ou sans changements de phase ; ils peuvent être avec ou sans combustion interne. Certaines des transformations peuvent être :

- Isothermes i.e. à température constante.
- Isobares i.e. à pression constante.
- Isovolumes, dites aussi isochores, i.e. à volume constant.
- Adiabatiques, i.e. sans échange de chaleur.

Carnot a montré que, parmi tous les cycles reliant une source chaude et une source froide, le cycle qui porte maintenant son nom est celui qui a le meilleur rendement possible, le rendement étant le rapport entre l'énergie récupérée et l'énergie fournie. Les hypothèses requises pour ce cycle ne peuvent pas être réalisées dans la pratique. On réalise donc d'autres cycles, plus ou moins proches, ayant des rendements plus faibles, souvent nommés en fonction de leur inventeur.

Le cycle des pompes à chaleur : le cycle de Rankine¹.

Il comporte deux changements de phase, comme indiqué sur la Figure 5 du chapitre 5 représentant une pompe à chaleur (PAC). Le cycle est représenté ici sur la Figure ci-après dans le plan température-pression. Il est décrit dans le sens contraire des aiguilles d'une montre :

- Le segment 1-2 du cycle est celui de la vaporisation isobare à l'extérieur ;
- Le segment 2-3 celui de la compression adiabatique (le passage dans le compresseur est rapide donc des échanges de chaleur significatifs n'ont pas le temps d'avoir lieu) ;
- Le segment 3-4 celui de la liquéfaction isobare quand le fluide donne sa chaleur au système de chauffage à l'intérieur ;
- Le segment 4-1 est celui de la détente adiabatique (le passage dans le détendeur est rapide, donc des échanges de chaleur significatifs n'ont pas le temps d'avoir lieu).

Ce cycle est utilisé pour les pompes à chaleur, notamment les climatiseurs, ainsi que pour les systèmes de refroidissement de centrales thermiques, à combustion et nucléaires.

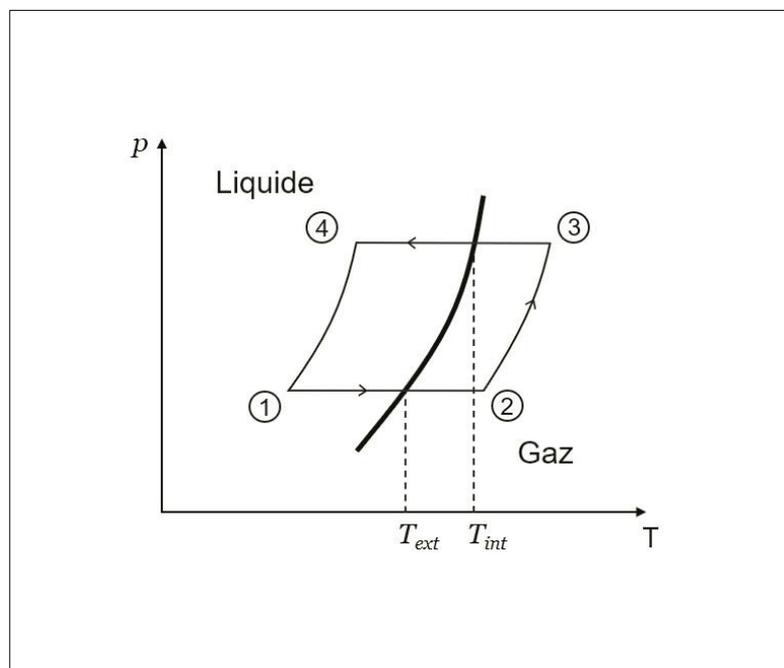


Fig. Cycle de Rankine / © YB et HBP

Coefficient de performance (COP) maximum d'une pompe à chaleur

On admet² que le rendement du cycle de Carnot, donc le COP maximum possible, est donné par la formule :

$$\text{COP}_{\max} = T_i / (T_i - T_e)$$

Où :

- T_i est la température intérieure absolue, en Kelvin
- T_e est la température extérieure absolue, en Kelvin.

Par exemple :

¹ Appelé ainsi d'après **John William Rankine**, physicien et ingénieur écossais, 1820–1872.

² L'objet de cet ouvrage n'est pas une présentation détaillée de la thermodynamique.

- Pour $T_e = 10\text{ °C}$ et $T_i = 50\text{ °C}$, $\text{COP}_{\text{max}} = 323/40 \approx 8,1$
- Pour $T_e = -15\text{ °C}$ et $T_i = 50\text{ °C}$, $\text{COP}_{\text{max}} = 333/75 \approx 5,0$

La formule précédente montre que le COP maximum est toujours supérieur à 1 et que plus T_e se rapproche de T_i , plus le COP maximum augmente. Elle montre aussi que si à température T_i donnée T_e diminue, le COP maximum baisse. Ce n'est pas ce qu'on souhaiterait, car il serait préférable que, quand il fait plus froid, on puisse bénéficier d'un meilleur rendement, mais, en même temps, c'est « naturel » en ce sens que, plus il fait froid, plus il est difficile de récupérer une même quantité de chaleur.

Le cycle de Rankine étant « proche » du cycle de Carnot, les variations du COP maximum décrites ci-dessus sont observées sur les pompes à chaleur réelles.

Les fluides réfrigérants

Les fluides réfrigérants (dits aussi frigorigènes ou caloporteurs) sont d'abord recherchés pour leurs caractéristiques thermiques. Utilisés dans des centaines de millions de systèmes dans le monde (ne serait-ce que les réfrigérateurs et les systèmes d'air conditionné), il est inévitable que certains circuits fuient. Outre les dangers locaux éventuels pour les utilisateurs (s'ils sont toxiques ou inflammables), l'impact des réfrigérants sur le réchauffement climatique est de plus en plus pris en compte par les réglementations, ce qui conduit à en interdire progressivement certains.

Le cycle des turbines à gaz : cycle³ de Brayton

Développé initialement pour les moteurs à pistons, le cycle de Brayton peut être utilisé pour décrire le cycle de fonctionnement d'une turbine à gaz. C'est un cycle ouvert car le fluide traverse la turbine. C'est un cycle sans changement de phase mais avec une combustion, celle du gaz. Il est composé des temps suivants :

- Une compression adiabatique de l'air dans la tubulure d'admission et le compresseur.
- Une combustion isobare dans la chambre de combustion.
- Une expansion adiabatique dans la turbine. L'énergie résultante est utilisée à la fois
 - pour faire tourner le compresseur (et donc aspirer l'air)
 - surtout, pour faire tourner la génératrice dans le cas des turbines des centrales électriques, ou pour créer la poussée dans le cas des turbines aéronautiques.
- Un refroidissement isobare de l'air qui le ramène à sa température et sa pression initiales (mais non à l'entrée de la turbine : le circuit est ouvert !)

³ Nommé d'après l'ingénieur américain **George Brayton** (1830-1892).