

Considérations sur l'évolution du rendement des installations thermiques motrices

J. Martin et P. Wauters, professeurs émérites UCL

joseph.martin@uclouvain.be

pierre.wauters@uclouvain.be

L'énergie motrice était jusqu'au dix-huitième siècle obtenue exclusivement à partir des animaux de trait, du vent ou de l'eau. L'utilisation de la vapeur d'eau avait toutefois été proposée en 1690 par un médecin français, Denis PAPIN, mais il fallut attendre 1712 pour voir apparaître une machine à vapeur construite par un mécanicien britannique, Thomas NEWCOMEN. Cette machine comportait une chaudière, un cylindre et un piston, l'effort moteur étant fourni par la pression atmosphérique. La vapeur était condensée par injection d'eau froide dans le cylindre. La puissance était faible (4 kW) et le fonctionnement n'était pas très économique. C'est l'écossais James WATT qui va améliorer la machine de NEWCOMEN en imaginant d'utiliser un condenseur de vapeur ainsi qu'un tiroir pour distribuer la vapeur de chaque côté du piston de la machine (double effet). La première vraie machine à vapeur industrielle fut installée dans une usine de textiles en 1765. Sa puissance était de 11 kW .

D'autres améliorations furent ensuite effectuées :

- utilisation d'un volant et d'un régulateur de vitesse à boules;
- condensation à pression subatmosphérique ;
- fractionnement de la détente en plusieurs étages avec utilisation de réservoirs intermédiaires (receivers).

A la fin du dix-huitième siècle, le moteur alternatif à combustion externe est devenu d'utilisation courante dans l'industrie textile et dans les charbonnages. Son application s'étend à la propulsion des bateaux fluviaux puis à la traction ferroviaire (apparition de la locomotive à vapeur en 1804), mais le moteur alternatif va être supplanté par le moteur rotatif.

C'est l'ingénieur suédois Gustaf DE LAVAL qui construit en 1883 la première turbine à vapeur, dite à action. Ce type de turbine, dont la puissance allait de 5 à 300 kW, ne comprenait qu'une seule roue qui tournait à grande vitesse (de 30000 à 10000 tr/min), ce qui imposait l'utilisation d'un réducteur de vitesse à engrenages. En 1884, l'anglais sir Charles PARSONS conçoit un autre type de turbine, à savoir la turbine à réaction. Il fractionne la détente de la vapeur en de multiples chutes de pression, assez modestes pour réduire la vitesse de rotation de la machine. Il crée en 1889 la société Parsons pour construire et vendre des turbines à vapeur destinées à la production de force motrice dans l'industrie et/ou d'électricité. A l'époque, il existait des centrales électriques, généralement à courant continu, mettant en oeuvre des machines à pistons de plusieurs centaines de kilowatts. Le rendement énergétique total η_{totaux} était inférieur à 0.10.

La première centrale électrique équipée d'une turbine à vapeur Parsons démarre en 1900 à Eberfeld en Allemagne. Sa puissance est de 1 MW . En 1898, le français Auguste RATEAU,

reprenant l'idée de DE LAVAL, construit une turbine multicellulaire à action permettant aussi d'atteindre la puissance de 1 MW .

Les sociétés Parsons et Rateau se développèrent rapidement. Les puissances des turbines à vapeur dépassèrent vite celles qu'il aurait été possible d'obtenir avec des machines à pistons. On peut considérer qu'au début du vingtième siècle les centrales électriques étaient déjà équipées de groupes turbo-alternateurs à basse pression de condensation, dont la puissance unitaire était de quelques mégawatts ($< 5\text{ MW}$) avec un rendement énergétique total de 0.10 . On continua cependant à utiliser les machines à piston jusque vers 1925 pour la production de force motrice dans de petites industries et la propulsion marine ou fluviale de navires à faible vitesse ainsi qu'en traction ferroviaire, domaine d'utilisation qui n'a d'ailleurs pas encore complètement disparu.

En 1920, la puissance unitaire de la turbine à condensation est de 10 à 20 MW . Les caractéristiques thermodynamiques de la vapeur sont :

$$p_a = \dots 1.5\text{ MPa} \quad , \quad t_a = 300\text{...}320\text{ }^\circ\text{C} \quad , \quad p_e = \dots 5\text{ kPa} \quad ,$$

ce qui, avec un rendement de chaudière de 0.65 donne un rendement énergétique total de 0.14 . La chauffe manuelle (chaudières à grille) disparaît ensuite au profit de la technologie du charbon pulvérisé et les caractéristiques de la vapeur vive sont un peu plus élevées. On atteint alors un rendement énergétique total de 0.16

La première amélioration du cycle thermodynamique de base (RANKINE-HIRN) est l'utilisation de l'artifice du soutirage qui avait déjà été appliqué au réchauffage de l'eau alimentaire par injection de vapeur prélevée à la sortie des cylindres haute pression des machines à piston. Dans les installations à turbine, le réchauffage de l'eau alimentaire se fait dans des échangeurs à surface chauffés par de la vapeur prélevée à la turbine. Cette technique ne commence à être appliquée qu'en 1935 avec l'augmentation de la surchauffe de la vapeur vive ($p_a = 5\text{ MPa}, t_a = 460\text{ }^\circ\text{C}$), ce qui donne un rendement énergétique total égal à 0.22 .

Après la seconde guerre mondiale, la Belgique est contrainte d'importer d'Allemagne une grande part de son électricité. La restauration des centrales électriques s'opère en mettant en œuvre des groupes monoblocs. Le premier de ceux-ci démarre à Monceau en 1949, avec une vapeur vive à 8 MPa et $510\text{ }^\circ\text{C}$. Son rendement énergétique total est de 0.31 .

La deuxième amélioration du cycle thermodynamique a été en 1957 l'utilisation de la resurchauffe, technique qui consiste à effectuer une première partie de la détente de la vapeur dans le corps haute pression de la turbine, à resurchauffer cette vapeur dans un faisceau adéquat de tubes de la chaudière pour achever la détente dans les corps basse pression de la turbine. Cette technique est évidemment combinée à celle des soutirages multiples. En 1965, les caractéristiques typiques d'une unité de $115\text{...}125\text{ MW}$ sont les suivantes :

$$p_a = 12.5\text{ MPa} \quad , \quad t_a = 540\text{ }^\circ\text{C} \quad , \quad p_{re} = 3\text{ MPa} \quad , \quad t_{re} = 540\text{ }^\circ\text{C} \quad , \quad \text{sept soutirages} \quad , \quad \eta_{\text{toten}} = 0.37 \quad .$$

On pousse ensuite les caractéristiques thermodynamiques de la vapeur vive ainsi que la puissance :

$$p_a = 18 \text{ MPa}, t_a = 565^\circ \text{C}, p_{re} = 4 \text{ MPa}, t_{re} = 565^\circ \text{C}, \eta_{\text{toten}} = 0.42,$$

jusqu'à atteindre, à la fin du vingtième siècle, les valeurs suivantes :

$$p_a = 30 \text{ MPa}, t_a = 600^\circ \text{C}, p_{re} = 8 \text{ MPa}, t_{re} = 610^\circ \text{C}, \eta_{\text{toten}} = 0.46,$$

avec une puissance de 600 à 900 MW. On utilise même dans certaines unités la double resurchauffe pour augmenter encore un peu le rendement.

Mais entretemps la combinaison de la turbine à gaz avec la turbine à vapeur (TGV, technique qui avait déjà été utilisée pour de petites installations dans les années 1960) connaît un nouvel essor suite à la pénétration du marché de l'énergie par le gaz naturel. Avec ce type d'installation à cycles combinés, on dépasse la valeur de 0.50 pour le rendement énergétique total au début des années 1990 et on atteint 0.60 en 2011. Cette dernière valeur est proche de la limite qu'imposent les lois de la physique, car la thermodynamique nous apprend qu'il ne sera jamais possible d'atteindre avec une installation à combustion un rendement énergétique total supérieur à 0.70, étant donné l'irréversibilité thermodynamique intrinsèque du processus même de combustion.

On a tracé à la figure 1 une courbe représentative de l'évolution du rendement énergétique total moyen des installations thermiques motrices à vapeur depuis le début du vingtième siècle jusqu'à nos jours. L'allure asymptotique de cette courbe illustre bien l'existence d'une limite.

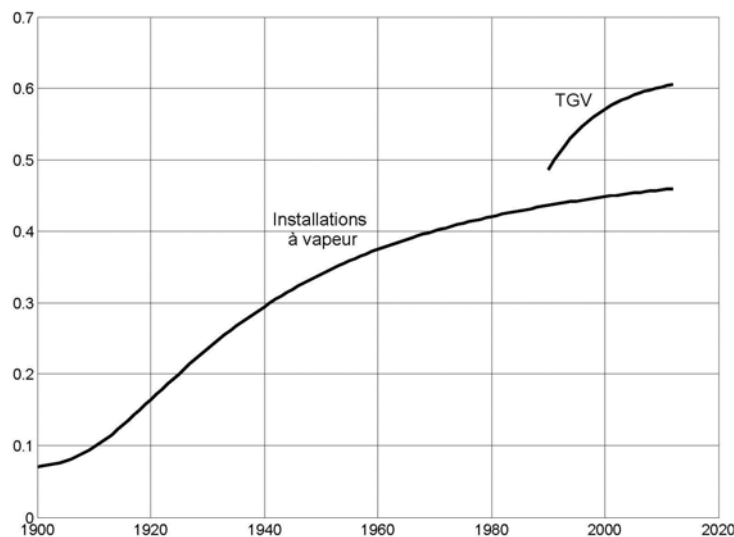


Figure 1

L'augmentation du rendement des centrales électriques due à la mise en œuvre des cycles gaz-vapeur à la fin du vingtième siècle, pour spectaculaire qu'elle soit, ne remet pas en cause l'existence de la limite thermodynamique, comme le fait apparaître le tronçon de courbe relatif aux centrales TGV.