

THERMODYNAMIQUE

2^e année – Semestre 4/4x

EC 04 02 SB 0104

Karl DELBÉ
Karl.Delbe@enit.fr

Jean-Yves PARIS
Jean-Yves.Paris@enit.fr

Lecture № 1

MACHINES THERMIQUES

I. INTRODUCTION AUX MACHINES THERMIQUES

I.1. Les conversions d'énergie	1
I.2. Brefs repères historiques	2

I INTRODUCTION AUX MACHINES THERMIQUES

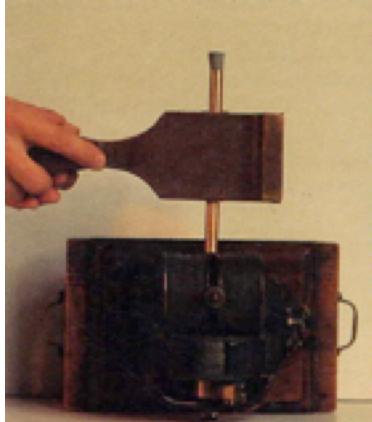
I.1 Les conversions d'énergie

a) Machines purement mécaniques

Une machine est un système qui réalise une conversion d'énergie.

- conversion de l'énergie fournie par un homme ou un animal en énergie potentielle : un levier, une poulie, un plan incliné permettent de soulever un objet ;
- production de travail à partir de l'énergie cinétique du vent ou de l'eau : moulin.

b) Machines thermiques



Expérience de Tyndall

La dégradation d'énergie mécanique par les frottements est spontanée et intégrale : il y a transfert par chaleur aux différentes parties en contact et à l'environnement (expériences de Tyndall¹ et de Joule).

En revanche, l'opération inverse c'est-à-dire *la conversion d'une énergie transférée par chaleur en énergie ou travail mécanique n'est jamais intégrale et nécessite l'utilisation de machines élaborées : les machines thermiques.*

Les machines thermiques constituent des convertisseurs d'énergie mettant en jeu des transferts de chaleur avec des sources de chaleur².

¹ On place de l'éther liquide dans un tube en laiton fermé par un bouchon et fixé à un moteur électrique qui le met en mouvement à grande vitesse. On coupe alors l'alimentation du moteur et l'on freine l'ensemble en serrant fortement le tube à l'aide d'une pince en bois. Les frottements permettant l'immobilisation engendrent des effets thermiques qui portent l'éther à ébullition ; la pression de l'éther gazeux sur le bouchon devient suffisante pour l'expulser

² Une **source de chaleur** (masse d'eau, atmosphère d'un local, ...) est un système fermé qui n'échange de l'énergie que par transfert thermique : la température d'une source de chaleur est susceptible de changer au cours de l'évolution. Un **thermostat** est une source de chaleur dont la température reste constante : tout mélange solide–liquide ou liquide–gazeux en équilibre (glace fondante ou eau bouillante) constitue aussi une source thermique. Le milieu ambiant (atmosphère) est souvent considéré comme un thermostat (en raison de sa grande inertie thermique).

c) Différentes sortes de machines thermiques

– *Les machines à vapeur à combustion externe.* La chaleur dégagée par la combustion d'un combustible (charbon, produits pétroliers...) sert à produire de la vapeur d'eau qui actionne un organe mécanique : un piston dans une machine à vapeur à piston ou une turbine dans une turbine à vapeur.

– *Les moteurs à combustion interne* (moteur à explosion, moteur Diesel, turbine à gaz). La chaleur produite par une réaction de combustion permet l'entraînement direct d'un organe mécanique.

– *Les récepteurs thermiques.* Ces machines réalisent un transfert de chaleur d'un milieu à basse température vers un milieu à température plus élevée : pompes à chaleur, machines frigorifiques.

I.2 Brefs repères historiques

a) Établissement des lois de la thermodynamique

La **thermodynamique** est une discipline relativement récente, née au début du XIX^e siècle du besoin de comprendre le fonctionnement des machines thermiques et d'améliorer leurs performances.

C'est en étudiant ces machines que les théoriciens du XIX^e siècle, Carnot³, puis Joule⁴, Kelvin⁵ et Clausius⁶, sont arrivés à définir l'énergie, les échanges énergétiques, l'entropie et à énoncer les principes de la thermodynamique.

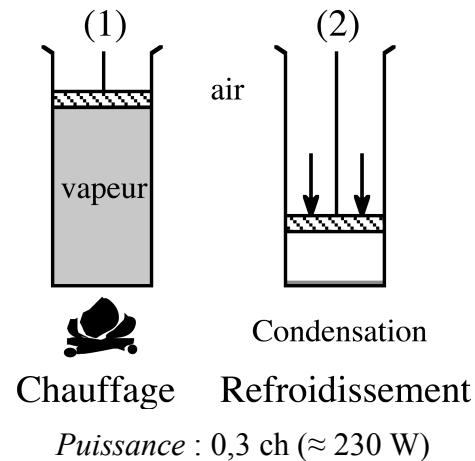
³ Nicolas Sadi **Carnot** (1796-1832) physicien français, est considéré comme le fondateur de la thermodynamique avec la publication de ses « *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* » en 1824 (à l'âge de 27 ans). Carnot pensait, par erreur, que la chaleur était une sorte de fluide dépourvu de masse et qui se conservait lors du fonctionnement d'une machine à vapeur.

⁴ James Prescott **Joule** (1818-1889), physicien anglais, établit par des expériences minutieuses, l'équivalence du travail et de la chaleur. Il formula le principe de conservation de l'énergie en 1843 (à l'âge de 25 ans).

⁵ William **Thomson** (1824-1907) physicien anglais, anobli sous le nom de Lord **Kelvin** (1892), réconcilia les points de vue contradictoire de Carnot et Joule en publant « *On the Dynamical Theory of Heat* » (1851) où il propose l'existence de deux principes.

⁶ Rudolf **Clausius** (1822-1888), physicien prussien, publia « *Abhandlungen über die Mechanische Wärmetheorie* » (1854) où il introduit l'entropie.

b) Applications et développements de la thermodynamique



➤ Les machines à vapeur à combustion externe⁷

Machines thermiques à piston basées sur la condensation de la vapeur d'eau pour vider un cylindre.

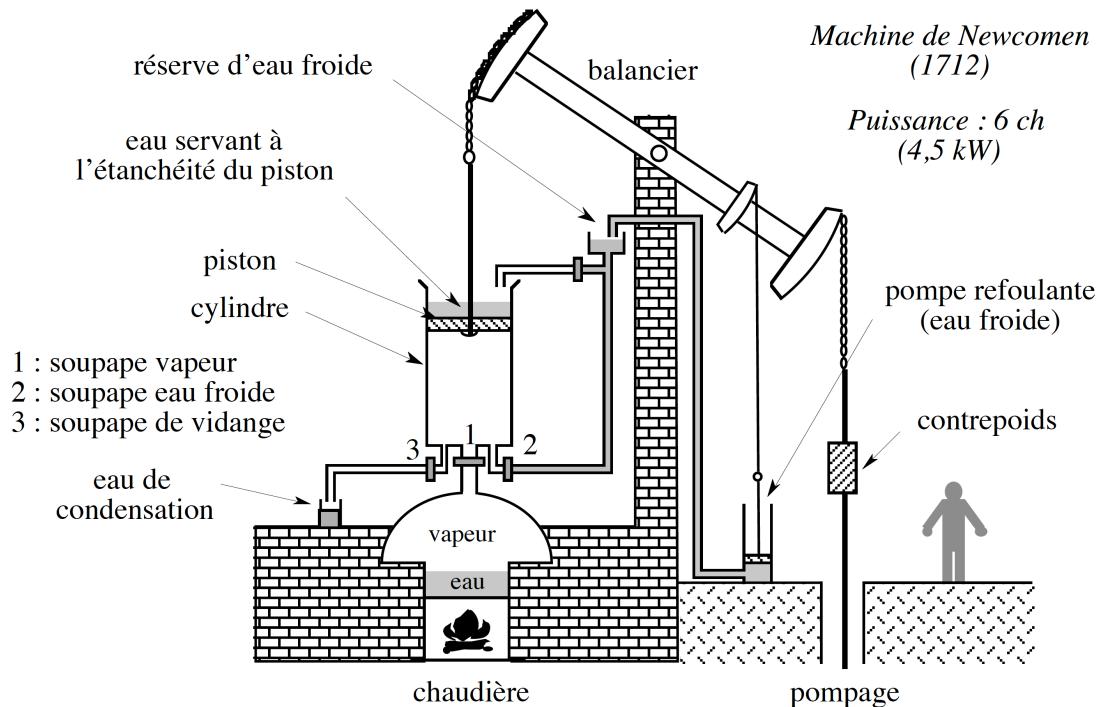
– Machine de Papin⁸ (1690)

(1) Chauffage d'un cylindre rempli d'un peu d'eau : vaporisation de l'eau.

(2) Refroidissement naturel du cylindre : la condensation de la vapeur crée un vide⁹ et le piston est entraîné vers le bas par la pression atmosphérique.

– Machine de Newcomen¹⁰ (1712)

Première machine industrielle automatisée¹¹.



Le principe de la machine de Newcomen est de forcer la condensation de la vapeur d'eau par injection d'eau froide dans le cylindre.

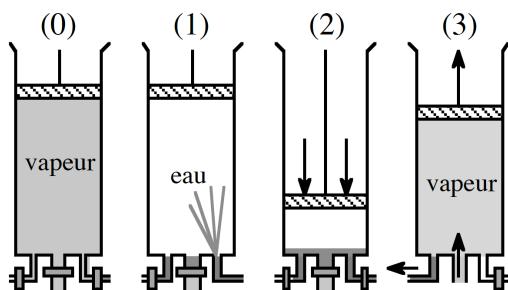
⁷ Ces machines sont qualifiées de **moteurs atmosphériques** car c'est l'action de la pression atmosphérique qui assure leur fonctionnement.

⁸ Denis Papin (1647-1714), inventeur français, inventa la première machine à vapeur basée sur l'expansion de la vapeur d'eau qu'il n'arriva pas à passer à un stade industriel car ni économique, ni continue (cylindre constamment chauffé et refroidi). Il inventa également un autoclave destiné à la cuisson des aliments (marmite de Papin) muni d'une soupape de sécurité.

⁹ Un volume d'eau liquide est de l'ordre de 2000 fois plus petit que celui de sa vapeur à la pression atmosphérique.

¹⁰ Thomas Newcomen (1663-1729) mécanicien anglais réalisa en association avec Thomas Savery (1650-1715) la première machine à vapeur réellement industrielle (1705) destinée au pompage des eaux d'infiltration (pompe d'exhaure) dans les mines (mise en service en 1712).

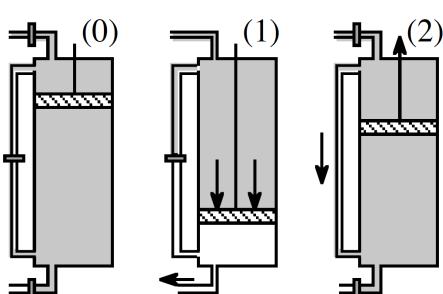
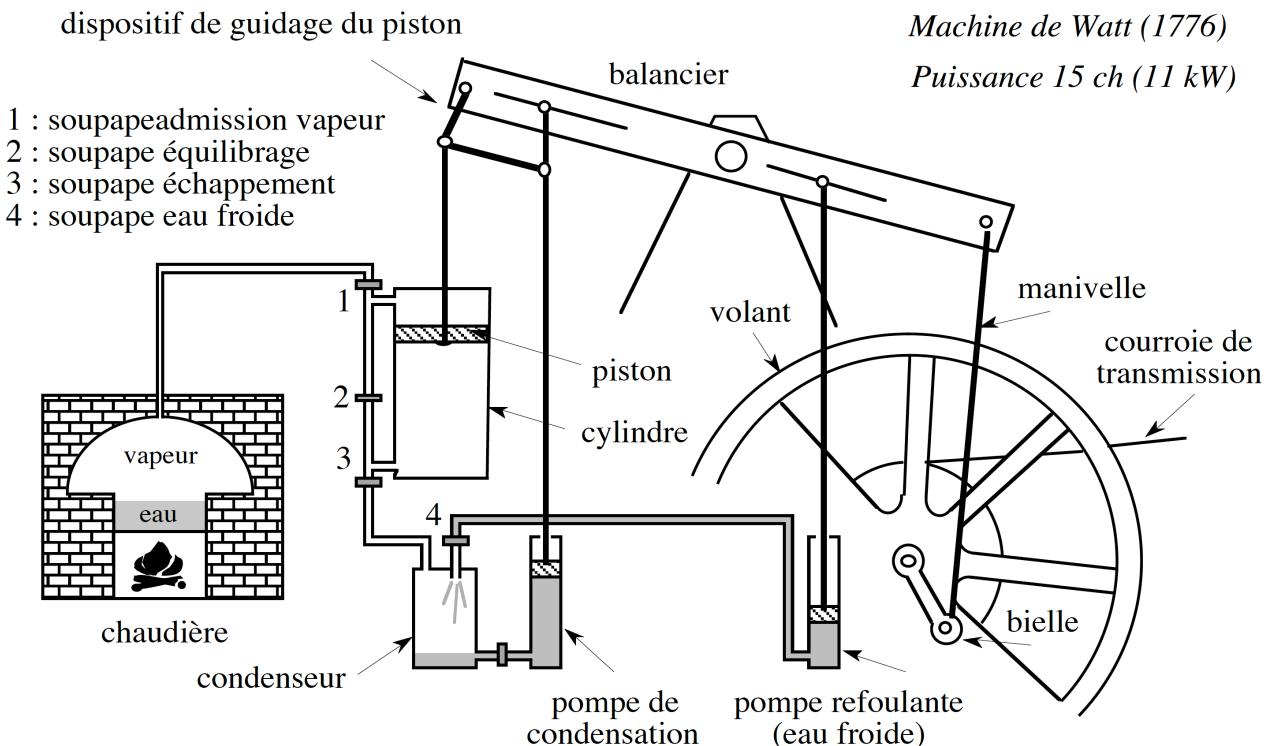
¹¹ Automatisation de la manœuvre des soupapes par une tige reliée au balancier.



- (0) Cylindre rempli de vapeur d'eau
 (1) Injection d'eau froide.
 (2) Condensation de la vapeur (création d'un vide sous le piston) : la pression atmosphérique pousse le piston qui entraîne le balancier et la pompe.
 (3) Aspiration de la vapeur d'eau par remontée du piston sous le poids de la pompe et évacuation de l'eau de condensation par la soupape de purge.

– Machine de Watt¹² (1776)

Une amélioration majeure du rendement fut de dissocier la phase de condensation hors du cylindre et utiliser la pression de la vapeur.



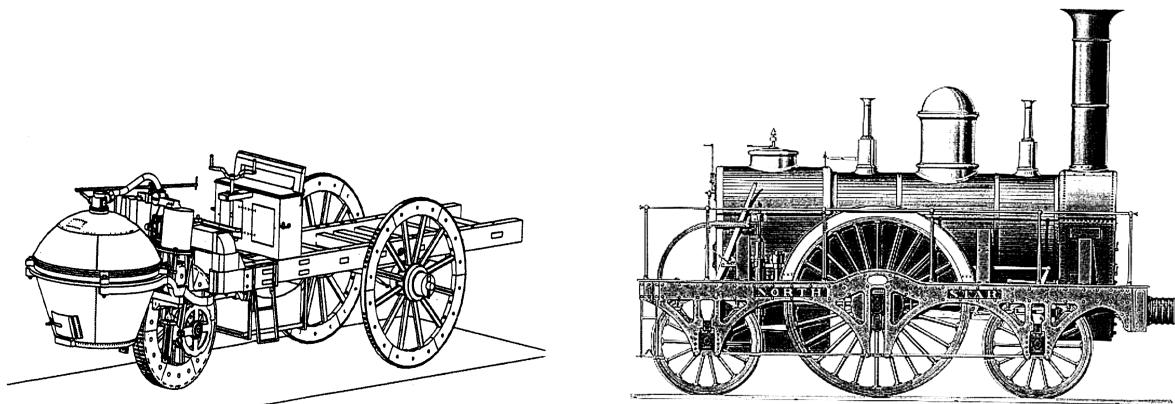
- (0) Compartiment inférieur rempli de vapeur.
 (1) Ouverture simultanée des soupapes d'admission (en haut) et d'échappement (en bas). La vapeur du compartiment inférieur se précipite vers le condenseur : le piston est entraîné vers le bas, aspire la vapeur dans le compartiment supérieur et entraîne le balancier.

¹² James Watt (1736-1819) mécanicien et ingénieur écossais.

(2) Ouverture de la soupape d'équilibrage (au centre) et fermeture des soupapes d'admission et d'échappement : le piston est tiré vers le haut par le poids du système.

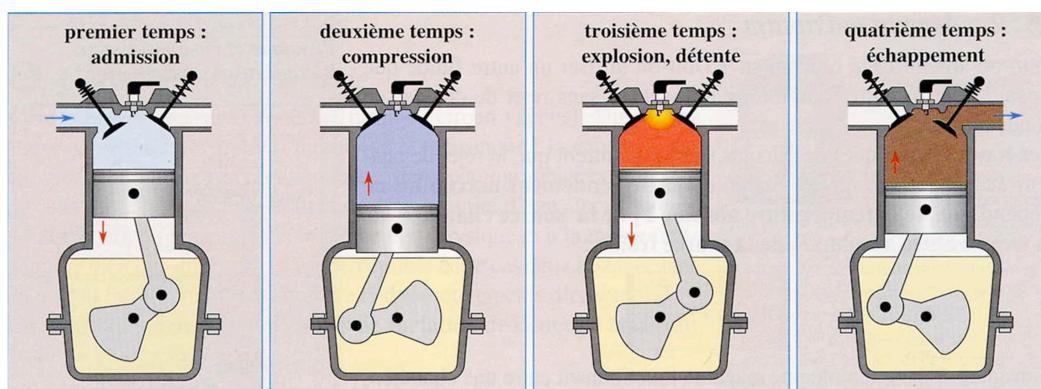
– Machines propulsives à vapeur

Fardier de Cugnot¹³ (1769), locomotive de Stephenson¹⁴ (1814)...



➤ Les moteurs à combustion interne

Les premiers moteurs à combustion internes ont été développés à partir de 1805 par le Valaisan Isaac de **Rivaz** puis en 1826 par Samuel **Brown**. Ensuite viendront les contributions d'Otto¹⁵ 1876, Daimler¹⁶ 1887, Diesel¹⁷ 1893...



Les quatre temps d'un moteur à explosion

¹³ Joseph **Cugnot** (1725-1804), ingénieur français qui inventa le premier engin automobile (à trois roues) capable de déplacer de lourds fardeaux.

¹⁴ George **Stephenson** (1781-1848), ingénieur anglais, inventa la traction à vapeur sur voie ferrée en construisant une locomotive capable d'entraîner plusieurs wagons (démonstration le 25 juillet 1814).

¹⁵ Nikolaus **Otto** (1832-1891), ingénieur allemand, a mis au point le moteur à quatre temps consommant un mélange carburé air-essence enflammé en vase clos dont la théorie avait été établie par Alphonse **Beau de Rochas** (1815-1893).

¹⁶ Gottlieb **Daimler** (1834-1900) ingénieur allemand, perfectionne le moteur d'Otto et l'applique à l'automobile.

¹⁷ Rudolf **Diesel** (1858-1913) ingénieur allemand, imagine un moteur utilisant les sous produits lourds du pétrole.

➤ Récepteurs thermiques

La recherche de la production du froid, pour la conservation des denrées périssables, est à l'origine des premiers récepteurs thermiques : citons la machine manuelle à absorption de **Leslies**¹⁸ (1810), celle à détente de **Dulong et Petit** (1828), enfin celles à compression de **Perkins** (1834) et à détente d'air de **Gorrie** (1844).

La première machine à absorption industrielle est due à **Carré**¹⁹ en 1859, et permit la production de glace à l'échelle industrielle pour les entrepôts frigorifiques (États-Unis, 1860 ; Europe, 1865). Les premiers transports frigorifiques par voie ferrée eurent lieu aux États-Unis en 1870, alors que les premiers navires frigorifiques relièrent la France à l'Angleterre en 1876.²⁰

En 1876, **Linde**²¹ mit au point la première machine de réfrigération à compression, utilisant l'ammoniac comme fluide frigorigène, qui reste le modèle d'un grand nombre d'installations actuelles²².

La première **climatisation de locaux** publics date de 1867, à l'exposition universelle de Paris (machine de Kirk et Mondésir)²³.

¹⁸ Sir **John Leslie** (1766-1832), physicien et mathématicien écossais.

¹⁹ **Ferdinand Carré** (1824-1900), ingénieur français à qui l'on doit la première machine frigorifique à compression (1857), l'emploi de l'ammoniac comme fluide frigorigène (1863). Il préconisa le transport des viandes à longue distance à l'état congelé, et le *Paraguay*, navire équipé suivant ses conceptions, ramena en 1875, de Buenos Aires au Havre, 80 tonnes de viande congelée, conservée à -30 °C.

²⁰ En 1876, **Charles Tellier** (1828-1913), ingénieur français, aménage spécialement un navire (le *Frigorifique*) et démontre de façon spectaculaire les possibilités du froid artificiel en transportant des carcasses de viande fraîche de Rouen à Buenos Aires.

²¹ **Carl von Linde** (1842-1934), inventeur et industriel allemand. Il est l'inventeur de l'échangeur de température, et son nom est resté lié aux recherches fondamentales sur les très basses températures, capables de permettre la liquéfaction de l'air et la séparation industrielle de l'azote d'avec l'oxygène et les gaz rares. En 1895, il liquéfia l'air par compression et détente avec refroidissement intermédiaire, et prépara de l'oxygène liquide ainsi que de l'azote gazeux presque purs.

²² Le premier réfrigérateur domestique apparut aux Etats-Unis en 1913.

²³ Lors d'une visite au président américain F. Roosevelt pendant la deuxième guerre mondiale, W. Churchill fut logé dans la seule pièce climatisée de la Maison Blanche à Washington.