

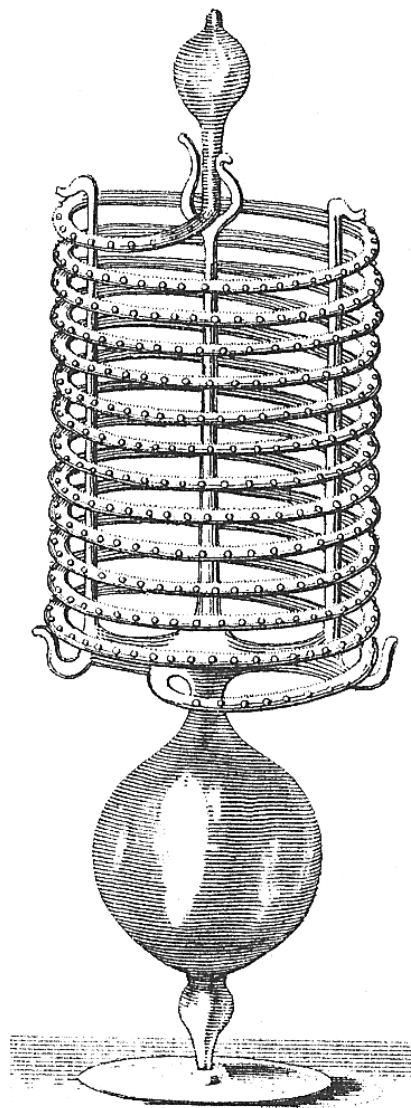
Thermodynamique de l'ingénieur

Cours I

Notions fondamentales

It's only work if someone makes you do it.

CALVIN — Bill Watterson, *The Indispensable Calvin & Hobbes*



v2.0.1

© by-sa Olivier Cleynen

Introduction

Nous abordons dans ce *Cours I : Notions fondamentales* des notions qui ne sont pas nécessairement nouvelles ou très utiles en elles-mêmes ; mais elles nous serviront de multiples fois dans les cours à venir.

1. Énergie et puissance

a) L'énergie

L'énergie est une notion bien trop difficile pour que nous nous risquions ici à la définir ou à en étudier la nature. Nous stipulerons de façon très réductrice que dans le cadre de notre étude de la thermodynamique, elle représente la capacité d'un corps à en mettre un autre en mouvement, soit de façon unifiée (déplacement), soit de façon désordonnée (transmission de chaleur).

Nous mesurons l'énergie en Joules (J).

Un fait important sur lequel nous revenons en fin de cours est qu'elle ne peut être ni créée, ni détruite.

b) La puissance

La puissance représente un débit d'énergie dans le temps. Son unité SI est le Joule par seconde, c'est à dire le *Watt* :

$$1 \text{ Watt} \equiv 1 \text{ J.s}^{-1} \quad (\text{I-1.1})$$

D'autres unités sont souvent utilisées, comme le cheval-vapeur¹ :

$$1 \text{ ch} = 735 \text{ W} \quad (\text{I-1.2})$$

Nous dénoterons les puissances avec un point au dessus du symbole de l'énergie, ainsi on note \dot{E} une puissance (par exemple mécanique) apportant une énergie E chaque seconde.

Dans le langage courant, le terme *puissance* est utilisé pour quantifier *la puissance maximale utile*

¹ Nous devons la création de cette unité à... James Watt. Attention aux différentes définitions du cheval vapeur. Dans le monde automobile, la norme allemande *DIN* est le plus souvent utilisée.

d'un système. Ainsi par exemple, pour une automobile dont le moteur est dit « de puissance 100 chevaux » :

- la puissance mécanique maximale que peut fournir le moteur au véhicule est de 100 ch ;
- la puissance maximale fournie au moteur sous forme de chaleur (par combustion) sera trois fois plus grande environ ;
- la puissance maximale de freinage (transformation d'énergie mécanique en chaleur dans les freins) avoisinera les 600 ch ;
- la puissance moyenne effectivement fournie par le moteur sera d'une vingtaine de chevaux seulement.

Il convient donc de toujours prendre garde à la signification du terme « puissance » dans le domaine de l'ingénierie.

c) Valeurs spécifiques

Dans de nombreuses applications en thermodynamique, il est intéressant de quantifier les transferts énergétiques indépendamment de la quantité de masse à l'intérieur du système.

Par exemple, si l'on souhaite comparer le *fonctionnement* d'un moteur automobile et d'un moteur de camion, il sera judicieux de diviser chacun des transferts énergétiques (compression, combustion, détente, etc) par la quantité d'air présente au sein des cylindres, afin de s'affranchir des effets d'échelle.

À cet effet, on utilise des grandeurs dites *spécifiques*.

L'énergie spécifique (parfois appelée énergie massique), se mesure en joules par kilo (J/kg) :

$$e \equiv \frac{E}{m} \quad (\text{I-1.3})$$

où e est l'énergie spécifique (en J/kg) ,

E l'énergie (J) ,

et m la masse du système que l'on étudie.

Par exemple, on pourra requérir d'un moteur automobile qu'il brûle plus d'essence lorsque la quantité d'air dans les cylindres augmente. Un apport de chaleur fixé à 300 kJ/kg correspond à 150 kJ lorsque la masse d'air est de 0,5 kg, et deux fois plus lorsqu'elle est de 1 kg.

La puissance spécifique (parfois également appelée puissance massique), a la même grandeur : on divise des Watts (Joules par seconde) par un débit de masse (kilos par seconde).

$$e \equiv \frac{\dot{E}}{\dot{m}} \quad (\text{I-1.4})$$

où e est la puissance spécifique (J/kg) ,
 \dot{E} la puissance (W) ,
et \dot{m} le débit de masse traversant le système (kg/s).

Ainsi, une chambre de combustion de laquelle on requiert qu'elle fournisse constamment une puissance spécifique de 300 kJ/kg fournira 300 kW si elle est traversée par un débit de masse de 1 kg/s, et moitié moins si le débit est de 0,5 kg/s.

Il faut noter qu'en pratique l'adjectif « spécifique » est rarement utilisé même si la quantité (ou le débit) de masse est inconnue.

Nous dénoterons les valeurs spécifiques avec des minuscules, mais attention : la plupart des ouvrages ne font pas de telle distinction —c'est le contexte qui permet de déterminer s'il s'agit d'une valeur spécifique.

2. Énergie mécanique

L'étudiant/e n'aura aucun mal à quantifier l'énergie cinétique :

$$E_c = \frac{1}{2} m C^2 \quad (\text{I-2.1})$$

où E_c est l'énergie cinétique (J),
 m la masse du corps (kg),
et C la vitesse (m/s).

On définit bien sûr de façon correspondante l'énergie cinétique spécifique :

$$e_c \equiv \frac{E_c}{m} = \frac{1}{2} C^2 \quad (\text{I-2.2})$$

L'énergie cinétique du fluide moteur est négligeable dans les moteurs à pistons/cylindres et dans la plupart des installations stationnaires ; mais elle joue le rôle principal au sein des turboréacteurs.

L'expression de l'énergie potentielle d'altitude ne devrait pas non plus faire sourciller l'étudiant/e :

$$E_p = m g z \quad (\text{I-2.3})$$

$$e_p \equiv \frac{E_p}{m} = g z \quad (\text{I-2.4})$$

où g est la valeur de l'accélération gravitationnelle (m.s^{-2}),
et z l'altitude par rapport au point de référence (m).

Nous montrerons au cours de quelques exercices de TD que la variation de l'énergie potentielle d'altitude des gaz au sein des machines est toujours négligeable ; et que c'est également parfois le cas pour les liquides/vapeurs.

Énergie cinétique et potentielle d'altitude sont souvent rassemblées ensemble en un seul terme, nommé « énergie mécanique » :

$$e_m \equiv e_c + e_p = \frac{1}{2} C^2 + g z \quad (\text{I-2.5})$$

3. Le travail

Le travail est, en physique, une forme d'énergie. Il y a dépense de travail lorsqu'une force est exercée sur un corps et produit un mouvement sur ce dernier. Nous le notons W et le définissons comme :

$$W \equiv F l \quad (\text{I-3.1})$$

où W est le travail (J),

F la force (N),

et l la distance sur laquelle la force F a été exercée (m).

L'équation ci-dessus sous-entend que la force F reste constante le long du déplacement l . En pratique, c'est rarement le cas et nous avons alors recours à l'intégrale suivante :

$$W_{A \rightarrow B} = \int_A^B dW$$

$$W_{A \rightarrow B} = \int_A^B F dl \quad (\text{I-3.2})$$

où dW est une quantité de travail infiniment petite (J),

F est la force (N),

dl est la distance infinitésimale sur laquelle la force F est exercée (m).

Sur un graphique représentant la force en fonction de la distance, ce travail $W_{A \rightarrow B}$ est représenté par la surface sous la courbe de A à B. La forme de la courbe, c'est à dire la relation entre F et l au fur et à mesure de l'évolution, déterminera la quantité $W_{A \rightarrow B}$.

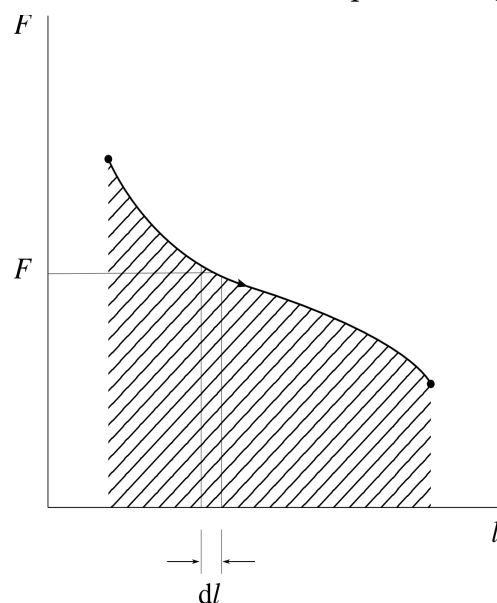


Figure 1.1 : Le travail est représenté par l'aire sous la courbe force-déplacement.

4. Chaleur et température

a) La température

La température d'un corps est une grandeur qui indique son niveau d'excitation interne. Plus ses molécules possèdent d'énergie cinétique de translation, et plus sa température sera grande.

Lorsque les molécules constituant un corps sont parfaitement immobiles les unes par rapport aux autres, le corps n'a plus de vibration interne : cet état définit la température zéro.

À l'inverse, l'échelle de température est ouverte vers l'infini. On ne définit pas de point de température maximale.

La température se mesure en Kelvins (K), sur une échelle créée pour les besoins de la thermodynamique et fort peu modestement qualifiée d'*absolue*.

On ne peut pas mesurer simplement « l'énergie cinétique moyenne des molécules » d'un corps et il suit qu'il est très difficile de définir une échelle de température (par exemple, ce que représente une température « deux fois plus grande »). Nous reviendrons deux fois sur la notion même de température, aux cours IV (*Le gaz parfait*) et VII (*Le second principe*). Nous admettrons, dans cette attente, la validité des valeurs du tableau 1.1 et la synchronisation qui suit.

L'étudiant/e aura probablement l'habitude d'utiliser une échelle en degrés Celsius. Elle prédate l'échelle absolue en Kelvins, mais a été habilement redéfinie et synchronisée avec cette dernière en 1848². Il suffit de soustraire 273,15 à une température absolue (en Kelvins) pour lire une température en degrés Celsius :

$$T(^{\circ}\text{C}) \equiv T(\text{K}) - 273,15$$

$$T(\text{K}) \approx T(^{\circ}\text{C}) + 273 \tag{I-4.1}$$

Les puristes remarqueront que l'unité est nommée *Kelvin* et non « degré Kelvin ».

² Nous aurons l'occasion d'étudier ce magnifique tour de passe-passe au cours VII.

0 K	-273,15°C	Zéro absolu (par définition)
100 pK	-273.1499999999 °C	Température la plus basse jamais atteinte (quelques particules uniquement)
4,22 K	-268,93 °C	Ébullition de l'hélium à pression atmosphérique
44 K	-229 °C	Température moyenne de la surface de Pluton*
184 K	-89,4 °C	Température atmosphérique minimale enregistrée sur Terre*
273,15 K	0 °C	Fonte de l'eau à pression atmosphérique
327 K	54 °C	Température atmosphérique maximale enregistrée sur Terre*
373,15 K	100 °C	Ébullition de l'eau à pression atmosphérique
400 K	127 °C	Température du nez d'un Concorde en croisière*
483 K	200 °C	Four domestique usuel*
485 K	210 °C	Auto-inflammation du carburant diesel*
753 K	480 °C	Température des bords d'attaque d'un SR-71 en croisière*
1100 K	830 °C	Feu de bois*
1900 K	1600 °C	Température du bouclier d'une navette spatiale en ré-entrée atmosphérique*
2500 K		Filament d'une lampe à incandescence
5000 K		Fonte du diamant (à 12GPa)
5800 K		Surface du soleil
16 MK		Centre du soleil
350 MK		Au sein de la déflagration d'une arme nucléaire
3 GK		Cœur d'une grosse étoile à son dernier jour
1 TK		Particules en collision au sein du RHIC
1.417×10^{32} K		L'univers $5,391 \times 10^{-44}$ s après le Big Bang

*Tableau 1.1 : Quelques exemples de températures.
Les astérisques dénotent une conversion approximative (liée à la précision des valeurs)*

b) La chaleur

Lorsque l'on met deux corps de températures différentes en contact, leurs températures ont tendance à s'égaliser au cours d'un transfert spontané d'énergie. Nous appelons cette forme d'énergie *chaleur*.

La chaleur, notée Q , est **une forme d'énergie** (mesurée en Joules). Elle *est créée* et est observable au sein de plusieurs phénomènes, dont les plus pertinents pour l'ingénieur sont :

- la transformation d'un travail, par frottement ;
- la perte d'énergie interne d'un corps, par mise en contact avec un corps de plus basse température ;
- la disparition de masse au sein d'une réaction nucléaire ;
- la transformation d'énergie potentielle entre atomes, par réaction chimique (de combustion par exemple).

De même que l'on note Q la chaleur (J) on note q la chaleur spécifique (J/kg).

La notion de chaleur est extrêmement difficile à appréhender.

À l'échelle macroscopique, on l'a longtemps crue être un fluide (le *calorique*) de densité très faible, capable d'imprégner tous les matériaux. Cette théorie a été abandonnée au milieu du XX^{ème} siècle, lorsque l'on a mis en évidence que *la chaleur n'est pas conservée*, c'est à dire qu'elle a une capacité à disparaître ou apparaître. Par exemple, un moteur en marche reçoit de la chaleur (par combustion) mais il en rejette moins qu'il n'en a reçu. Il en transforme une partie en travail, que l'on utilise par exemple pour propulser un véhicule.

À l'échelle microscopique (lorsque l'on considère le mouvement individuel des particules) les concepts sont plus difficiles encore à définir ; nous ne y risquerons pas pour l'instant.

c) La capacité thermique (ou capacité calorifique)

Lorsque l'on fournit la même quantité de chaleur à deux corps différents, leur température peut augmenter de différente façon (par exemple, il faut moins de chaleur pour augmenter de 1°C la température d'un kilo de bois que d'un kilo d'acier). Cette propension de la température à augmenter est nommée *capacité thermique*.

On définit la capacité thermique massique d'un corps comme étant la quantité d'énergie nécessaire pour augmenter d'un Kelvin la température d'un kilo de ce corps :

$$c \equiv \frac{dq}{dT} \quad (\text{I-4.2})$$

où q est la capacité calorifique massique du corps considéré (en $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)

dq est une quantité spécifique infinitésimale de chaleur (en J/kg)

dT est une variation infinitésimale de température (en K ou $^{\circ}\text{C}$).

La capacité calorifique massique d'un solide ne varie quasiment pas. Les choses sont en revanche beaucoup plus compliquées pour les liquides et les gaz, que nous utiliserons à profusion dans l'ensemble de notre étude de la thermodynamique :

- En faisant travailler un gaz (c'est à dire en le laissant pousser sur une paroi mobile), on augmente nettement sa capacité calorifique massique. Nous quantifierons ces propriétés au cours IV (*le gaz parfait*) ;
- Les liquides et vapeurs portent leur capacité calorifique massique à une valeur infinie (!) sur une plage de propriétés donnée, et hors de cette plage, la font surnoisement varier en fonction de la température. Nous décrirons quantitativement ces comportements au cours V (*liquides et vapeurs*).

d) L'énergie interne

Lorsque l'on fournit l'énergie à un corps (sous forme de travail, de chaleur ou autre) et qu'il ne la retransmet pas à l'extérieur, il l'emmagasine en lui-même. Nous nommerons de façon assez prude cette énergie stockée « *énergie interne* ».

La température est très liée à l'énergie interne³ mais elle représente le potentiel d'un corps à céder de la chaleur, et non simplement la quantité d'énergie stockée.

Nous noterons U l'énergie interne (mesurée en Joules) et u l'énergie interne spécifique (en J/kg).

³ Nous verrons au cours IV que pour les gaz parfaits, l'énergie interne est strictement proportionnelle à la température. Pour les liquides/vapeurs, il en est autrement même si la tendance est la même.

e) Dans le langage courant

Au risque de reléguer plus encore les thermodynamiciens au rang des scientifiques insociables confinés aux bouts de table, nous toucherons deux mots du vocabulaire courant :

- *La chaleur*

Il est très important pour l'étudiant/e de faire la distinction entre chaleur et température ; nous ferons très attention à ne pas faire d'amalgame. Les expressions « il fait chaud », « les grandes chaleurs », « un corps chaud » font toutes en réalité allusion à la température.

- *Chauffer*

On peut « chauffer » un corps pendant qu'il nous semble « se refroidir », c'est à dire que sa température chute⁴. On peut également faire augmenter la température d'un corps sans lui apporter de chaleur⁵.

Nous n'utiliserons le verbe « chauffer » que pour signifier « apporter de la chaleur » ; et nous aurons toujours soin de différencier « chauffer » de « augmenter la température ». Ce sont souvent des objectifs très différents⁶.

- *Le froid*

Nous ne considérerons pas « le froid » comme étant quelque chose que l'on peut fabriquer (« le froid industriel ») ni mesurer. Nous dirons plutôt que nous prélevons de la chaleur d'un corps (par exemple d'un aliment dans un réfrigérateur).

4 Par exemple au sein d'une soupape de détente dans un réfrigérateur.

5 Par exemple au sein d'un compresseur de turboréacteur.

6 Nous verrons au cours VI (Cycles thermodynamiques) que ces objectifs très différents expliquent la complexité considérable des moteurs les plus ordinaires.

5. Le premier principe de la thermodynamique

L'étudiant/e devrait appréhender sans difficulté le premier principe de la thermodynamique, qui stipule simplement :

L'énergie est indestructible.

On dit aussi parfois que *l'énergie est conservée*. Autrement dit, lorsqu'un système reçoit un Joule d'énergie, il peut soit l'emmagasiner, soit le re-fournir à l'extérieur ; mais en aucun cas il ne peut le détruire.

Cette affirmation s'applique à tous les systèmes que nous connaissons. Elle tient de l'évidence pour nombre d'entre nous aujourd'hui, mais il est important de comprendre le poids de cette phrase dans le contexte de l'étude de l'univers. Ses implications sont énormes et elle est le fruit d'un travail intellectuel profond et laborieux, long de plusieurs siècles. Il est aussi amusant de constater qu'un pilier fondamental de la physique est né de l'étude (de surcroît peu fructueuse) des lourds et pâteux moteurs à vapeur du XIX^{ème} siècle.

Dans notre travail au sein de ces dix cours, nous étudions l'évolution des fluides (gaz et liquides/vapeur) dont nous faisons varier et au sein desquels nous transformons *l'énergie*.

Nous nous intéresserons à quatre formes d'énergie (notées ici sous leur forme « spécifique ») :

- Le travail w ;
- La chaleur q ;
- L'énergie mécanique e_m (potentielle d'altitude et cinétique) ;
- L'énergie interne u (liée à la température).

En comptabilisant tous les transferts énergétiques qui ont lieu vers et depuis n'importe quel système arbitraire, nous allons pouvoir les quantifier les uns par rapport aux autres. Par exemple, nous allons pouvoir :

- quantifier les rejets de chaleur d'un moteur en soustrayant le travail qu'il fournit de la quantité de chaleur qu'il reçoit ;
- prédire la vitesse que peut atteindre un gaz comprimé en se détendant ;

- quantifier l'énergie restant à l'intérieur d'un gaz dans un réservoir après pompage et refroidissement.

Nous allons exprimer quantitativement le premier principe de deux façons différentes, l'une pour un système fermé (au cours II) et l'autre pour un système ouvert (au cours III).