

2 notion de quantité de chaleur

principe de l'équivalence

Nous savons que les « machines » prises au sens large sont capables, soit de transformer une certaine forme de l'énergie en travail mécanique (moteur à explosion), soit de transformer un certain travail mécanique en énergie (compresseur). *La Thermodynamique est l'étude des transformations réciproques : chaleur-travail.*

Dans les deux chapitres suivants, nous nous limiterons à une étude simplifiée ne nécessitant pas d'outil mathématique important mais permettant tout de même à un technicien d'avoir une idée suffisante de l'évolution d'un fluide compressible dans une machine et de comprendre les notions essentielles d'échange et de rendement.

1. NOTION DE TEMPÉRATURE

1.1. QU'EST-CE QUE LA TEMPÉRATURE ?

La première notion de température est physiologique et on conçoit aisément que le repérage d'une température ne puisse être laissé à l'appréciation de nos sens. Certaines grandeurs physiques (résistance électrique, volume d'une masse donnée d'un liquide, ...) varient en fonction de la température. On utilise ces variations pour élaborer une échelle des températures. La grandeur physique utilisée est alors appelée grandeur thermométrique.

1.2. ÉCHELLES DE TEMPÉRATURE

Soit x la grandeur thermométrique choisie et θ la température. Toute bijection $x = f(\theta)$ définit une échelle des températures. Pour une raison de simplicité, la relation adoptée est linéaire et on peut écrire :

$$x = a + b\theta \quad (1)$$

a et b sont deux constantes dont la détermination dépend des valeurs θ_1 et θ_2 des deux températures de

référence pour lesquelles x prend les valeurs x_1 et x_2 . En fait, la relation (1) peut être représentée par une droite dont il suffit de connaître deux points.

1.2.1 Echelle Celsius (ou centésimale)

A la pression atmosphérique normale, la température d'équilibre entre la glace et l'eau saturée d'air caractérise l'état d'équilibre $\theta_1 = 0$. Pour $\theta_1 = 0$, la grandeur thermométrique x prend la valeur x_0 (x_0 est par exemple la hauteur atteinte par la colonne de mercure pour $\theta_1 = 0$).

A la pression atmosphérique normale, la température d'équilibre entre l'eau pure et sa vapeur caractérise l'état d'équilibre $\theta_2 = 100$. Pour $\theta_2 = 100$, la grandeur thermométrique x prend la valeur x_{100} (x_{100} est par exemple la hauteur atteinte par la colonne de mercure pour $\theta_2 = 100$) (fig. 2.1).

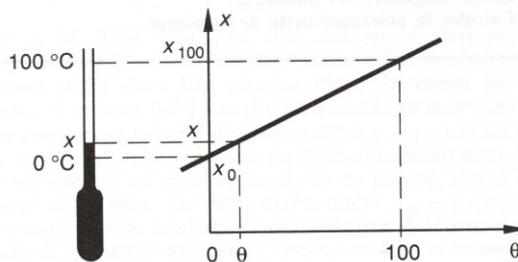


Fig. 2.1.

Autres formes
Calculons a et

pour θ_1
pour θ_2

d'où :

ou

en posant

(α est appelé α)
On peut exprimer

Cette relation est
degré Celsius.

Le degré Celsius qui produit métrique ég obtenue qua

REMARQUE

Notons qu'une repérable me

1.2.2. Ech

Aux pressions possèdent la m fonction de la Quand la pressi tendent vers r **parfait** ». On p parfait comme d'après (3) :

Pour tous les g

C'est cette éch température.

Autres formes de la relation (1)

Calculons a et b :

pour $\theta_1 = 0 \Rightarrow x_0 = a$,

pour $\theta_2 = 100 \Rightarrow x_{100} = a + b \times 100$,

d'où :
$$x = x_0 + \frac{x_{100} - x_0}{100} \theta \quad (2)$$

ou
$$x = x_0(1 + \alpha \theta) \quad (3)$$

en posant
$$\alpha = \frac{x_{100} - x_0}{100 x_0}$$

(α est appelé *coefficient thermométrique*).
On peut exprimer également la température θ :

$$\frac{\theta}{100} = \frac{x - x_0}{x_{100} - x_0} \quad (4)$$

Cette relation (4) permet d'énoncer la définition du degré Celsius.

Le degré Celsius est la variation de température qui produit une variation de la grandeur thermométrique égale à un centième de la variation obtenue quand la température passe de 0 à 100.

REMARQUE

Notons qu'une telle échelle définit une grandeur repérable mais non mesurable.

1.2.2. Echelle des gaz parfaits

Aux pressions suffisamment basses, tous les gaz possèdent la même loi de variation de la pression en fonction de la température (à volume constant). Quand la pression p tend vers zéro, tous les gaz réels tendent vers un même état limite appelé « **état parfait** ». On peut donc utiliser la pression d'un gaz parfait comme grandeur thermométrique et écrire d'après (3) :

$$p = p_0(1 + \beta_0 \theta) \quad (5)$$

Pour tous les gaz, $\beta_0 = \frac{1}{273,15}$.

C'est cette échelle qui donne la définition légale de la température.

D'après (5) on écrira :

$$\frac{\theta}{100} = \frac{p - p_0}{p_{100} - p_0} \quad (6)$$

Le degré légal est la variation de température qui produit, à volume constant, une variation de la pression d'une masse quelconque de gaz parfait égale à un centième de la variation obtenue quand la température passe de 0 à 100.

1.2.3. Échelle des températures absolues

D'après (5) on peut écrire

$$p = p_0 \beta_0 \left(\frac{1}{\beta_0} + \theta \right)$$

On peut définir alors : $T = \theta + \frac{1}{\beta_0}$

et donc
$$p = p_0 \beta_0 T \quad (7)$$

T est la température absolue, elle est toujours positive. Son zéro : $T = 0$ correspond à la température Celsius de $\theta + \frac{1}{\beta_0} = 0$, soit $\theta = -273,15^\circ\text{C}$.

L'unité de température absolue est le kelvin (K).

2. NOTION DE QUANTITÉ DE CHALEUR

2.1. TEMPÉRATURE ET CHALEUR

Si on plonge un corps chaud dans un bac contenant de l'eau froide ($\theta \neq 0^\circ\text{C}$), on constate que la température de l'eau s'est élevée et que, par contre, la température du corps chaud a diminué. Le système a évolué vers un équilibre thermique et on dit que le corps chaud a cédé de la chaleur au corps froid (ici l'eau).

Si par contre, on plonge le même corps chaud dans un bac contenant un mélange d'eau et de glace à $\theta = 0^\circ\text{C}$, on constate que la température du mélange n'évolue pas ; la température de l'équilibre thermique reste $\theta = 0^\circ\text{C}$, on a seulement provoqué la fusion d'une partie de la glace.

Dans les deux cas, le corps chaud a cédé de la chaleur. Dans le premier cas, cet échange a provoqué une variation de température, mais pas dans le deuxième cas.

Température et chaleur sont deux grandeurs différentes.

2.2. QUANTITÉ DE CHALEUR

Tout comme le travail mécanique, la chaleur est une forme de l'énergie. Un système matériel peut recevoir ou céder de la chaleur comme il peut recevoir ou céder une énergie mécanique.
La chaleur est donc une forme d'énergie et comme telle, elle peut s'exprimer en joules (J).

2.3. CHALEUR MASSIQUE

Soit un système matériel S (par exemple un solide de masse m). On l'échauffe de θ_1 à θ_2 de telle façon qu'entre ces deux températures n'intervienne aucune réaction chimique. On appelle **chaleur massique moyenne** entre θ_1 et θ_2 la grandeur définie par :

$$C_{1,2} = \frac{1}{m} \cdot \frac{Q}{\theta_2 - \theta_1}$$

(Q est la quantité de chaleur qu'il faut fournir à S pour élever sa température de θ_1 à θ_2).
Si θ_2 tend vers θ_1 , $C_{1,2}$ tend vers une limite appelée **chaleur massique vraie** pour θ_1 :

$$C = \frac{1}{m} \cdot \frac{dQ}{d\theta}$$

relation que l'on retient sous la forme :

$$dQ = Cm d\theta \quad (1)$$

Dans cette relation (1) :
 dQ est en joules (J) ;
 C est en joules par kilogrammes par degré Celsius ($J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$) ;
 m est en kilogrammes (kg) ;
 $d\theta$ est en degrés Celsius (ou en kelvins).

2.4. UNITÉS DE QUANTITÉ DE CHALEUR

Dans le système international d'unités (MKSA) l'unité d'énergie est le joule, l'unité de quantité de chaleur est donc le joule (J).
D'autres unités employées depuis très longtemps sont également utilisées : la calorie et ses multiples, kilocalorie et thermie.
Equivalences :

$$\begin{aligned} 1 \text{ cal} &= 4,18 \text{ J} \\ 1 \text{ kcal} &= 10^3 \text{ cal} \\ 1 \text{ thermie} &= 10^6 \text{ cal} . \end{aligned}$$

3. ÉCHANGES DE CHALEUR

3.1. CONVENTION DE SIGNE

La convention de signe utilisée en thermodynamique est la suivante :

L'énergie reçue par un système matériel (travail mécanique ou chaleur) est positive.
L'énergie fournie par un système au milieu extérieur est négative.

Prenons l'exemple d'un électro-frein : l'électro-frein est le système S .
Il reçoit de l'énergie mécanique du milieu extérieur (sous forme d'énergie cinétique), alors $E_{cin} > 0$.
Il cède une certaine quantité de chaleur au milieu extérieur : $Q < 0$.
Lorsqu'un système S évolue vers un équilibre thermique, il échange de la chaleur avec le milieu extérieur. Le passage de la chaleur des corps chauds vers les corps froids se fait de trois façons :

- conduction,
- convection,
- rayonnement.

3.2. CONDUCTION

Dans un matériau, la chaleur peut se transmettre de proche en proche ; cette transmission s'effectue toujours du point dont la température est la plus élevée vers le point où la température est la plus basse. C'est un phénomène continu. Les matériaux sont plus ou moins propices à ce genre d'échange, on dit qu'ils ont une plus ou moins bonne **conductibilité thermique** λ .
Considérons une paroi plane d'épaisseur l ; soit S la surface de paroi à travers laquelle on considère l'échange. Cette paroi divise le milieu extérieur en deux parties 1 et 2 dont les températures sont différentes $\theta_1 > \theta_2$ (fig. 2.2).

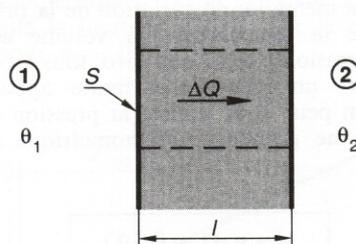


Fig. 2.2.

Notons $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$.
On pourrait écrire aussi en températures absolues :

$$\Delta T = T_1 - T_2$$

(avec $\theta_1 - \theta_2 = T_1 - T_2$).

Pendant un ir de chaleur tra

Avec dans la
 ΔQ = quanti
 Δt = inter
en se
 λ = coeffi
s'expr
 S = surfac
mètre
 $\Delta\theta$ = différen
extéri
kelvin
 l = épais
l'écha

Nota : On
température

Donnons quel
riaux caractéri
de la conducti

Matériau
Cuivre
Aluminium
Fonte
Acier doux
Caoutchouc
Amiante
Bois
Liège

3.3. CON

Lorsqu'un cor (liquide ou gaz proximité du fluide dont la masse volumique ments internes tion ».

Pendant un intervalle de temps donné Δt , la quantité de chaleur transmise de 1 à 2 s'exprime par :

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \lambda S \frac{\Delta \theta}{l} \quad (1)$$

Avec dans la relation (1) :

- ΔQ = quantité de chaleur échangée en joules (J).
- Δt = intervalle de temps ou « durée de l'échange » en secondes (s).
- λ = coefficient de conductibilité thermique, il s'exprime en $J.m^{-1}.s^{-1}.^{\circ}C^{-1}$.
- S = surface de paroi concernée par l'échange en mètres carrés (m^2).
- $\Delta \theta$ = différence de température entre les milieux extérieurs 1 et 2 en degrés Celsius (ou en kelvins).
- l = épaisseur de la paroi à travers laquelle se fait l'échange en mètres (m).

Nota : On désigne souvent $\frac{\Delta \theta}{l}$ par « gradient de température » en degrés Celsius par mètre.

Donnons quelques valeurs de λ pour quelques matériaux caractéristiques classés par valeur décroissante de la conductibilité thermique.

Matériau	λ ($J.m^{-1}.s^{-1}.^{\circ}C^{-1}$)	Observation
Cuivre	380	Bons conducteurs thermiques
Aluminium	210	
Fonte	60	Moyens conducteurs thermiques
Acier doux	55	
Caoutchouc	0,18	Isolants thermiques
Amiante	0,18	
Bois	0,10	
Liège	0,04	

3.3. CONVECTION

Lorsqu'un corps chaud est placé dans un fluide (liquide ou gaz), les particules de ce fluide situées à proximité du corps chaud s'échauffent. Dans un fluide dont la température n'est pas uniforme, la masse volumique est variable, il s'ensuit des mouvements internes au fluide appelés « courants de convection ».

La quantité de chaleur ΔQ échangée par convection pendant un intervalle de temps donné Δt est proportionnelle à la surface d'échange S et sensiblement proportionnelle à la différence des températures $\Delta \theta$ des deux corps :

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = K \cdot S \cdot \Delta \theta \quad (2)$$

avec dans la relation (2) :

- ΔQ = quantité de chaleur échangée en joules (J).
- Δt = intervalle de temps ou « durée de l'échange » en secondes (s).
- K = coefficient de convection en $J.m^{-2}.s^{-1}.^{\circ}C^{-1}$. Ce coefficient dépend de la nature et des propriétés du fluide (conductibilité thermique λ , viscosité, chaleur massique...).
- S = surface d'échange en mètres carrés (m^2).
- $\Delta \theta$ = différence de température entre le corps chaud et le fluide en degrés Celsius ($^{\circ}C$) ou en kelvins (K).

Par exemple, dans l'air calme, à la pression atmosphérique normale (10^5 Pa), $\Delta \theta$ étant faible, on peut prendre pour coefficient de convection :

$$K \approx 4,2 J.m^{-2}.s^{-1}.^{\circ}C^{-1}$$

3.4. RAYONNEMENT

Le rayonnement est un échange de chaleur par émission de radiations. Soit S_1 la surface du corps 1 qui émet la chaleur et soit T_1 sa température absolue en K. Soit ΔQ_1 la quantité de chaleur émise par 1 pendant le temps Δt :

$$\frac{\Delta Q_1}{\Delta t} = a_1 S_1 T_1^4 \quad (3)$$

avec dans la relation (3) :

- ΔQ_1 = quantité de chaleur émise par rayonnement du corps 1 en joules (J).
- Δt = intervalle de temps pendant lequel le rayonnement est pris en compte en secondes (s).
- a_1 = coefficient d'émission du corps 1. Celui-ci dépend de la nature, de la couleur, de l'état de surface du corps 1. En $J.m^{-2}.s^{-1}.T^{-4}$.
- S_1 = surface rayonnante de 1 en mètres carrés (m^2).
- T_1 = température absolue en kelvins (K).