

THÈME 3

ENERGIE : CONVERSIONS ET TRANSFERTS

Pierre-André LABOLLE

Lycée International des Pontonniers de Strasbourg

Mars 2024

CHAPITRE 3.2 : PREMIER PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE ET BILANS D'ÉNERGIE

I. Premier principe de la thermodynamique

1. Énergie interne
2. Aux frontières du système...
3. Modes de transfert d'énergie

II. Transferts thermiques

1. Variations d'énergie interne d'un système incompressible
2. Mécanisme du transfert thermique
3. Trois modes de transfert thermique

CHAPITRE 2 : PREMIER PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE ET BILANS D'ÉNERGIE

III. Flux thermique

1. Définition
2. Cas d'une paroi plane
3. Résistance thermique

IV. Bilan thermique du système {Terre; atmosphère}

1. Loi de Stefan-Boltzmann
2. Application au système {Terre; atmosphère}
3. Conséquences

CHAPITRE 2 : PREMIER PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE ET BILANS D'ÉNERGIE

V. Évolution temporelle de la température d'un système

1. Notion de transformation élémentaire
2. Loi phénoménologique de Newton
3. Application

EXERCICES CONSEILLÉS :
PP371-385 n°12, 14 et 20

EXERCICES CORRIGÉS EN CLASSE :
PP371-385 n°36, 38, 41, 43 et 44

I. Premier principe de la thermodynamique

1. Énergie interne

- **Définition** : on appelle énergie interne l'ensemble des formes d'énergie microscopiques présentes au sein d'un système. On la note U et son unité est le joule de symbole J .
- L'énergie interne est due, en particulier, aux interactions existant entre les particules qui constituent le système (énergies potentielles microscopiques) et à l'énergie cinétique microscopique des particules qui constituent le système.

$$U = E_{C,\text{micro}} + E_{P,\text{micro}}$$

I. Premier principe de la thermodynamique

1. Énergie interne

- La température est la mesure de l'énergie cinétique moyenne des particules qui constituent un système (agitation thermique). Si la température d'un système augmente, alors l'énergie cinétique microscopique des particules augmente et par conséquent, l'énergie interne U augmente elle aussi.
- Les énergies potentielles microscopiques sont dues aux interactions gravitationnelle, électromagnétique, forte et faible entre les particules constituant le système. On distingue les énergies potentielles microscopiques chimique, électrique, magnétique et nucléaire notamment.

I. Premier principe de la thermodynamique

2. Aux frontières du système...

- Lorsque l'on s'intéresse à un système en thermodynamique, il importe de clairement définir le système étudié et d'en identifier les frontières qui représentent la limite entre le système et le reste de l'Univers, appelé milieu extérieur.
- Le système est dit **isolé** s'il ne peut échanger ni énergie, ni matière avec le milieu extérieur.
- Le système est dit **fermé** s'il peut échanger de l'énergie mais pas de matière avec le milieu extérieur.
- Le système est dit **ouvert** s'il peut échanger de l'énergie et de la matière avec le milieu extérieur.
- Dans le cadre de cours, nous allons nous limiter à des **systèmes fermés dont l'énergie mécanique macroscopique est conservée**.

I. Premier principe de la thermodynamique

3. Modes de transfert d'énergie

- Le travail W et le transfert thermique Q sont deux modes de transfert d'énergie : leur signe dépend du sens du transfert entre le système et l'extérieur.
- La variation d'énergie interne ΔU d'un système est la conséquence d'échange d'énergie avec le milieu extérieur par travail W et/ou transfert thermique Q .
- Si l'énergie mécanique du système est conservée, alors :

$$\Delta U = Q + W$$

- Cette relation constitue le **premier principe de la thermodynamique**
- Si $\Delta U > 0$, alors le système reçoit de l'énergie du milieu extérieur.
- Si $\Delta U < 0$, alors le système fournit de l'énergie au milieu extérieur.

II. Transferts thermiques

1. Variations d'énergie interne d'un système incompressible

- Un système incompressible ne subit pas de variations de volume ; c'est souvent le cas des états condensés de la matière (liquide ou solide).
- Un système incompressible, de par sa nature, ne peut pas échanger d'énergie sous forme de travail avec le milieu extérieur. Pour un tel système, on a donc $\Delta U = Q$
- Lorsqu'un système incompressible évolue d'un état initial vers un état final, la variation de son énergie interne ΔU est proportionnelle à sa variation de température ΔT

II. Transferts thermiques

1. Variations d'énergie interne d'un système incompressible

- On a alors : $\Delta U = C \times \Delta T = C \times (T_f - T_i)$ où

C : capacité thermique du système en $J \cdot K^{-1}$

ΔT : variation de température en K

ΔU : variation d'énergie interne en J

- Parfois on écrit aussi $\Delta U = m \times c \times (T_f - T_i)$ où

c : capacité thermique massique du système en $J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$

m : masse du système en kg

T : température absolue en K

II. Transferts thermiques

2. Mécanisme du transfert thermique

- Lors d'un transfert thermique entre deux systèmes, la température du corps chaud diminue et la température du corps froid augmente.
- Lorsque $T_{\text{corps chaud}} = T_{\text{corps froid}}$, on dit que les deux objets sont à l'équilibre thermique.
- Le transfert spontané d'énergie thermique (chaleur) s'effectue toujours du corps chaud vers le corps froid.
- Les transferts thermiques sont une cause d'irréversibilité : un système évoluant par transfert thermique vers un état final ne puisse pas spontanément revenir à son état initial.

II. Transferts thermiques

3. Trois modes de transfert thermique

a. Conduction

- **Définition** : le transfert thermique par conduction est produit au niveau microscopique par des interactions entre des entités en contact direct. Il s'opère de proche en proche.
- **Exemple** : le manche d'une casserole sur le feu finit par devenir chaud au bout d'un certain temps ; l'agitation thermique se propage de proche en proche dans le métal.

II. Transferts thermiques

3. Trois modes de transfert thermique

b. Convection

- **Définition** : le transfert thermique par convection est généré par un mouvement **global** des entités microscopiques à l'intérieur d'un système. Ce mode de transfert thermique est spécifique des systèmes fluides (gaz ou liquides).
- **Exemple** : dans une pièce équipée d'un chauffage au sol, l'air chaud, moins dense que l'air froid, monte dans la pièce alors que l'air froid descend vers le sol pour s'y réchauffer, ce qui permet de chauffer l'ensemble de la pièce.

II. Transferts thermiques

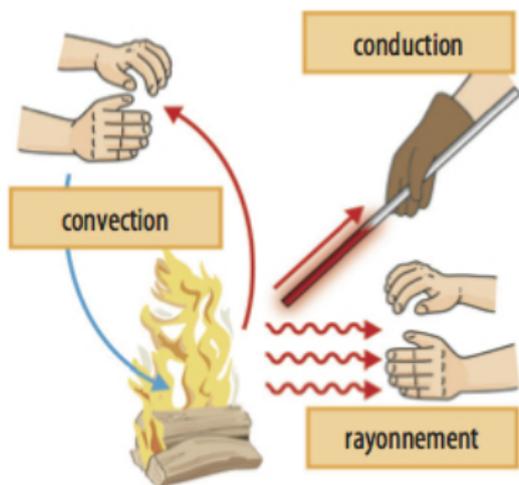
3. Trois modes de transfert thermique

c. Rayonnement

- **Définition** : le transfert thermique par rayonnement est généré par émission ou absorption d'un rayonnement électromagnétique (il n'a donc pas besoin d'un milieu matériel pour se dérouler).
- **Exemple** : les lampes à infrarouges que l'on trouve sur les quais de gare ou sur les terrasses chauffées ou encore dans certains panneaux rayonnants.

II. Transferts thermiques

3. Trois modes de transfert thermique



III. Flux thermique

1. Définition

- Le flux thermique Φ caractérise la vitesse du transfert thermique Q , pendant une durée Δt , au sein d'un système ou entre différents systèmes.

- Il est donné par la relation : $\Phi = \frac{Q}{\Delta t}$ où

Q : énergie thermique échangée en J

Δt : durée du transfert thermique en s

Φ : flux thermique en W

III. Flux thermique

2. Cas d'une paroi plane

- À travers une paroi plane de surface S et d'épaisseur e , constituée d'un matériau de conductivité thermique λ , le flux thermique est proportionnel à l'écart de température entre les deux faces A et B de la paroi.

- On a alors la relation :
$$\Phi = \frac{\lambda \times S}{e} \cdot (T_A - T_B)$$
 où

Φ : flux thermique en W

S : surface de la paroi en m^2

e : épaisseur de la paroi en m

T_A et T_B : températures de chaque côté de la paroi en K

λ : conductivité thermique de la paroi en $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

III. Flux thermique

3. Résistance thermique

- **Définition** : on appelle résistance thermique, notée R_{th} , la grandeur

définie par : $R_{th} = \frac{e}{\lambda \times S}$ où

R_{th} : résistance thermique en $\text{K} \cdot \text{W}^{-1}$

e : épaisseur de la paroi en m

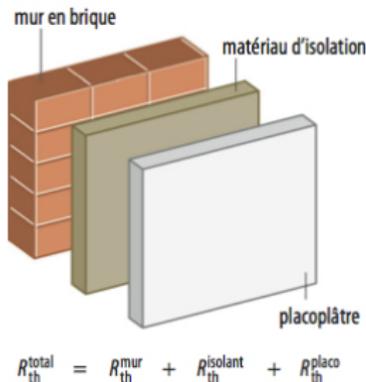
S : surface de la paroi en m^2

λ : conductivité thermique de la paroi en $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

III. Flux thermique

3. Résistance thermique

- On obtient alors la relation suivante : $(T_A - T_B) = R_{th} \times \Phi$
- La résistance thermique de plusieurs parois planes accolées (en série) est égale à la somme des résistances thermiques de chaque paroi.



IV. Bilan thermique du système {Terre ; atmosphère}

1. Loi de Stefan-Boltzmann

- En toute rigueur, cette loi n'est valable que pour le corps noir, objet immatériel
- Tout corps porté à la température T émet un rayonnement électromagnétique dont le flux thermique surfacique ϕ_E vérifie la loi suivante : $\phi_E = \sigma \times T^4$
où

ϕ_E : flux thermique surfacique en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$

σ : constante de Stefan-Boltzmann en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$

T : température absolue en K

IV. Bilan thermique du système {Terre ; atmosphère}

2. Application au système {Terre ; atmosphère}

- La Terre reçoit du Soleil un rayonnement dont le flux surfacique ϕ_S est de l'ordre de $340 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.
- Si la Terre se comportait comme un corps noir à l'équilibre radiatif, alors on aurait une température moyenne à la surface de la Terre telle que :

$$T_{\text{Terre}} = \left(\frac{\phi_E}{\sigma} \right)^{1/4} = \left(\frac{340}{5,67 \cdot 10^{-8}} \right)^{1/4} = 278 \text{ K} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$$

- Cela ne tient pas compte de l'albédo terrestre moyen qui est de l'ordre de 30%, ni de l'absorption par l'atmosphère d'une partie du flux thermique rayonné par la Terre, encore appelé effet de serre (environ 75%).
- Ces deux points expliquent pourquoi la température de surface moyenne de la Terre est de $15 \text{ }^\circ\text{C}$.
- NB : L'**albédo** A est une grandeur qui indique le pourcentage d'énergie lumineuse réfléchiée par un corps par rapport à l'énergie lumineuse incidente.

IV. Bilan thermique du système {Terre ; atmosphère}

3. Conséquences

- Si l'effet de serre augmente, par exemple en raison de l'accumulation de polluants atmosphériques, alors la température de surface de la Terre augmente car davantage d'énergie est absorbée par l'atmosphère au lieu d'être rayonnée vers l'espace.
- Si l'albédo moyen terrestre diminue, par exemple en raison de la fonte des calottes glaciaires, alors moins d'énergie est réfléchiée par la surface de la Terre et sa température de surface augmentera.
- Ces deux facteurs sont de nature à rompre l'équilibre radiatif terrestre tel que nous le connaissons et à engendrer une augmentation de la température à la surface de la Terre.

V. Évolution temporelle de la température d'un système

1. Notion de transformation élémentaire

- Afin d'obtenir des informations sur les valeurs instantanées des grandeurs physiques telles que l'énergie interne par exemple, on ne peut se contenter de s'intéresser aux seules variations ΔU pendant une grande durée Δt .
- La durée Δt peut être décomposée en une infinité de durée infiniment petites, notées dt . Au cours de cet intervalle de temps **infinitésimal** dt , l'énergie interne aura varié, elle aussi, d'une manière infinitésimale. Sa variation sera donc notée dU .
- Ainsi, au cours d'une durée dt , un système incompressible verra son énergie interne varier de $dU = m \times c \times dT$.
- NB : pour des raisons mathématiques, les notations pour des quantités élémentaires de travail et de chaleur sont δW et δQ .

V. Évolution temporelle de la température d'un système

2. Loi phénoménologique de Newton

- Soit un système incompressible de masse m , de capacité thermique massique c et de température initiale T_0 .
- Ce système est en contact avec un réservoir extérieur de température $T_{\text{ext}} < T_0$ et le contact se fait sur une surface S .
- Le système est le siège d'un transfert thermique Q par conduction et/ou convection du système vers le réservoir extérieur.
- Dans ces conditions, le flux thermique $\Phi(t)$ à la date t est modélisé par la loi phénoménologique de Newton :

$$\Phi = -h \times S \times (T(t) - T_{\text{ext}}) \quad \text{où } h \text{ est un coefficient d'échange}$$

V. Évolution temporelle de la température d'un système

3. Application

- Pour un système incompressible subissant une transformation élémentaire, le premier principe de la thermodynamique nous apprend que la variation d'énergie interne est $dU = \delta Q + \delta W$.
- Le système étant incompressible, il n'échange par d'énergie par travail donc $\delta W = 0$ et donc $dU = \delta Q$.
- Nous savons par ailleurs que la variation d'énergie thermique au cours de cette transformation élémentaire est $\delta Q = m \times c \times dT$ où dT est la variation élémentaire de température.
- En outre, pour cette transformation élémentaire, la définition du flux thermique nous donne $\delta Q = \Phi \times dt$.

V. Évolution temporelle de la température d'un système

3. Application

- Pour finir, la loi phénoménologique de Newton nous donne l'expression du flux thermique $\Phi = -h \times S \times (T(t) - T_{\text{ext}})$ donc nous obtenons

$$\delta Q = -h \times S \times (T(t) - T_{\text{ext}}) \times dt \text{ ou encore}$$

$$m \times c \times dT = -h \times S \times (T(t) - T_{\text{ext}}) \times dt \text{ d'où}$$

$$-\frac{h \times S}{m \times c} \times T(t) + \frac{h \times S}{m \times c} \times T_{\text{ext}} = \frac{dT}{dt} \text{ soit}$$

$$\frac{dT}{dt} + \frac{h \times S}{m \times c} \times T(t) = \frac{h \times S}{m \times c} \times T_{\text{ext}}$$

On pose $\tau = \frac{m \times c}{h \times S}$ et on obtient l'équation différentielle suivante :

$$\boxed{\frac{dT}{dt} + \frac{1}{\tau} \times T = \frac{T_{\text{ext}}}{\tau}}$$

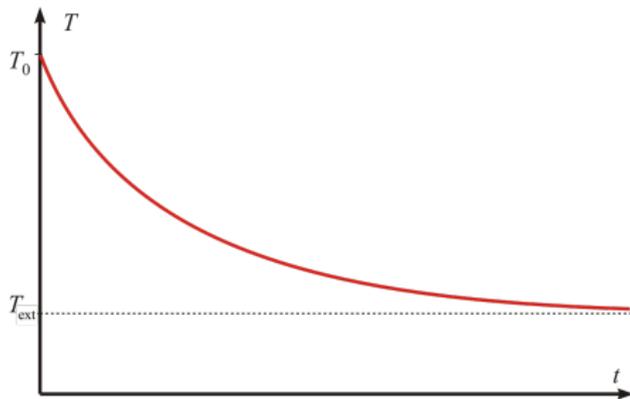
V. Évolution temporelle de la température d'un système

3. Application

- Cette équation est une **équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants et second membre constant**.

- Elle a pour solution la **fonction** : $T(t) = (T_0 - T_{\text{ext}}) \times e^{-\frac{t}{\tau}} + T_{\text{ext}}$
avec $\tau = \frac{m \times c}{h \times S}$

- Cette fonction est représentée par la courbe suivante :



EXERCICES

EXERCICES CONSEILLÉS :
PP371-385 n°12, 14 et 20

EXERCICES CORRIGÉS EN CLASSE :
PP371-385 n°36, 38, 41, 43 et 44