

# Chapitre 16

## Transferts thermiques et bilans d'énergie

### Paragraphe 1 – Énergie interne d'un système

#### Notion d'énergie interne

Lorsque la température d'un système macroscopique augmente, l'agitation des entités microscopiques (atomes, ions ou molécules) qui le constituent augmente également. Cela se traduit macroscopiquement par une variation de l'énergie interne  $U$  du système, exprimée en joule. L'énergie interne  $U$  d'un système macroscopique résulte des énergies cinétique (liée à l'agitation) et potentielles (liées aux interactions) des entités microscopiques qui le composent.

#### Variation d'énergie interne

Lorsqu'un système incompressible (liquide ou solide) de masse constante  $m$ , constitué d'un seul matériau de capacité thermique massique  $c$ , évolue d'un état initial à un état final, la variation delta majuscule  $U$  ( $\Delta U$ ) de son énergie interne est proportionnelle à la variation de sa température delta majuscule  $T$  majuscule ( $\Delta T$ ) entre l'état initial et l'état final :

$$\Delta U = m \times c \times \Delta T = m \times c \times (T_f - T_i)$$

avec, en utilisant les unités du **Système international** :

delta majuscule  $U$  ( $\Delta U$ ) en joule (J)

m en kilogramme (kg)

c en Joule par kilogramme par kelvin ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}$ )

delta majuscule T majuscule ( $\Delta T$ ),  $T_f$  et  $T_i$  en kelvin (K)

### Unités

Le kelvin (de symbole K) est l'unité de température du **Système international**.

La relation entre la température T majuscule en kelvin et la température théta en degré celsius est :  $T = \theta + 273$ .

## Paragraphe 2 – Premier principe de la thermodynamique

### Vocabulaire

La **thermodynamique** est l'étude des transformations d'un système d'un état d'équilibre initial à un état d'équilibre final dans lesquels la prise en compte du paramètre température est nécessaire.

### Énergie totale d'un système

L'énergie totale E d'un système fermé (qui n'échange pas de matière avec l'extérieur) est la somme de son énergie interne U d'origine microscopique et de son énergie mécanique  $E_m$  d'origine macroscopique :

$$E = U + E_m$$

## Bilan d'énergie

La variation  $\Delta E = E_f - E_i$  de l'énergie d'un système est la conséquence d'échanges d'énergie de ce système avec l'extérieur. On peut démontrer que :

$$\Delta E = \Delta U + \Delta E_m$$

Les échanges d'énergie peuvent être réalisés par :

- un travail  $W$  d'une ou de plusieurs force(s) non conservative(s) ;
- un transfert thermique  $Q$ , c'est-à-dire un transfert d'énergie entre deux systèmes de températures différentes.

### Remarque pour éviter les erreurs

En physique, le terme « chaleur » désigne un transfert d'énergie. Les mots « chaleur » et « température » sont souvent associés à tort.

Pour éviter cette confusion, l'expression « transfert thermique » est utilisée de préférence au mot « chaleur ».

### Premier principe de la thermodynamique :

$$\Delta E = W + Q$$

avec, en utilisant les unités du **Système international** :

$\Delta E$ ,  $W$  et  $Q$  en joule (J)

**Convention** : le travail  $W$  et le transfert thermique  $Q$  sont comptés positivement s'ils s'effectuent du milieu extérieur vers le système, et négativement dans le cas contraire.

#### Remarque

Si le système est macroscopiquement au repos, alors l'énergie mécanique du système n'est pas modifiée et le premier principe de la thermodynamique peut s'écrire :

$$\Delta U = W + Q$$

### Paragraphe 3 – Modes de transfert thermique

Une différence de température entre deux systèmes induit un **transfert thermique spontané** du système le plus chaud vers le système le plus froid.

Ces transferts thermiques peuvent être modélisés, à l'échelle microscopique, suivant trois modes : conduction, convection et rayonnement.

Le transfert thermique par **conduction** se fait de proche en proche, sans déplacement macroscopique de matière. Il est généré par des mouvements microscopiques des entités constituant le matériau.

Le transfert thermique par **convection** est spécifique aux systèmes fluides (gaz ou liquide). Il est généré par les mouvements internes du fluide qui compose le système. Il correspond à un mouvement macroscopique de matière.

Le transfert thermique par **rayonnement** est dû à l'absorption ou à l'émission d'un rayonnement électromagnétique.

### Remarque

La conduction est un mode de transfert thermique qui a lieu dans les solides.

Le rayonnement est le seul mode de transfert thermique possible dans le vide.

## Paragraphe 4 – Flux thermique par conduction et convection

### Définition du flux thermique

Un **flux thermique** phi majuscule ( $\Phi$ ) caractérise la vitesse du transfert thermique Q pendant une durée delta majuscule t ( $\Delta t$ ) au sein d'un système ou entre différents systèmes.

$$\Phi = \frac{Q}{\Delta t}$$

avec, en utilisant les unités du **Système international** :

$\Phi$  en watt (W)

$\Delta t$  en seconde (s)

Q en joule (J)

**Convention** : de même que pour un transfert thermique, un flux thermique est compté positivement s'il s'effectue du milieu extérieur vers le système et négativement dans le cas contraire.

### Remarque

Un flux thermique peut aussi s'exprimer par unité de surface. On parle alors de flux thermique surfacique, noté phi minuscule ( $\varphi$ ), en watt par mètre carré ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ).

### Analyse dimensionnelle

Un flux thermique phi majuscule ( $\Phi$ ) a la dimension d'une énergie divisée par une durée. Sa dimension est celle d'une puissance.

Son unité est le watt.

### Résistance thermique

Soit deux surfaces de températures respectives  $T_A$  et  $T_B < T_A$  constantes. Ces surfaces sont séparées par un milieu, dans lequel un transfert thermique s'effectue par convection et/ou conduction. Le flux thermique phi majuscule ( $\Phi$ ) à travers le milieu entre ces surfaces est proportionnel à leur différence de température, et il dépend également de certaines caractéristiques du milieu.

La **résistance thermique**  $R_{\text{th}}$  du milieu est définie par :

$$R_{\text{th}} = \frac{T_A - T_B}{\Phi}$$

avec, en utilisant les unités du **Système international** :

$\Phi$  en watt (W)

T majuscule en kelvin (K)

$R_{th}$  en kelvin par watt ( $K \cdot W^{-1}$ )

La résistance thermique représente l'aptitude du milieu à s'opposer au flux thermique. Pour une même différence de température entre les deux surfaces, le transfert thermique est d'autant plus faible que la résistance thermique est importante.

## Évolution temporelle de la température d'un système

### Notion de transformation élémentaire

La variation d'une grandeur  $X$  lors d'une transformation de durée  $\Delta t$  se note  $\Delta X$ . Cette transformation peut être décomposée en une somme de transformations dites **élémentaires** correspondant à des variations infinitésimales  $dt$  minuscule du temps. Pour exprimer la variation de  $X$  lors d'une transformation élémentaire, la notation  $\Delta X$  est remplacée par  $dX$ .

#### Point maths

$dX$  et  $dt$  sont des notations mathématiques. Elles n'ont pas de valeurs numériques.

Il est ainsi possible de réécrire les relations précédemment énoncées pour une transformation élémentaire :

Notation élémentaire de la **variation d'énergie interne d'un système incompressible** :

$$dU = mcdT$$

Notation élémentaire du **premier principe de la thermodynamique** :

$$dU = dQ + dW$$

Notation élémentaire du **transfert thermique** :

$$\Phi dt = dQ$$

#### **Remarque afin d'éviter les erreurs**

Les échanges d'énergie par travail  $W$  ou transfert thermique  $Q$  correspondent à des quantités d'énergie échangées et non à des variations d'énergie : les notations  $\Delta Q$  ou  $\Delta W$  ne sont donc pas utilisées lors d'une transformation.

Pour signifier que la valeur d'un transfert d'énergie est infinitésimale lors d'une transformation élémentaire, le symbole delta minuscule ( $\delta$ ) est utilisé.

#### **Position du problème et méthode de résolution**

Soit un système  $\Sigma$  incompressible, de masse  $m$ , de capacité thermique massique  $c$ , de température initiale  $T_0$ . Ce système est en contact sur une surface d'aire  $S$  avec un fluide de température  $T_{\text{ext}} < T_0$ . Un transfert thermique  $Q$  s'effectue par conduction/convection du système étudié au fluide.

La loi **phénoménologique de Newton** modélise le flux thermique  $\Phi(t)$  à la date  $t$  minuscule :

$$\Phi(t) = h \times S \times (T(t) - T_{\text{ext}})$$



avec T majuscule la température du système  $\Sigma$  et h un coefficient d'échange.

Pour établir l'évolution temporelle de la température T majuscule à la date t minuscule (T(t)) du système, notée T majuscule dans la suite de cette étude, la méthode ci-après peut être suivie.

### Raisonnement à retenir

Premièrement : **Bilan d'énergie**

– système : Sigma majuscule  $\Sigma$  ;

– transferts d'énergie : W et Q

#### Remarque afin d'éviter les erreurs

Une définition précise du système étudié est indispensable pour déterminer correctement les signes des transferts.

Deuxièmement : **Application du premier principe de la thermodynamique** au système pour une transformation élémentaire de durée dt :

$$dU = \delta Q + \delta W$$

Pour un système incompressible, on peut montrer que  $\delta W = 0$  et donc :

$$dU = \delta Q$$

Troisièmement : **variation de l'énergie interne du système** : lors de cette transformation, la température T majuscule du système varie d'une valeur élémentaire dT majuscule. Son énergie varie donc de :

$$dU = mc dT$$

Quatrièmement : **définition du transfert thermique** :

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

Le transfert thermique s'effectue du système vers l'extérieur, il est donc négatif par rapport au système.

La combinaison des relations précédentes donne :

$$mc dT = -h \times S \times (T - T_{\text{ext}}) dt$$

Relation qui peut être réécrite sous la forme :

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

Avec

$$\tau = \frac{mc}{hS}$$

Cette équation est une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants avec un second membre constant, dont la solution est donnée dans le Point Maths 5 page 533 du manuel :

$$T(t) = (T_0 - T_{\text{ext}}) e^{-\frac{t}{\tau}} + T_{\text{ext}}$$

Avec

$$\tau = \frac{mc}{hS}$$

## Paragraphe 5 – Flux thermique par rayonnement

### Rayonnement et température

Du fait de sa température  $T$  majuscule, tout corps émet un rayonnement électromagnétique, de flux thermique surfacique phi minuscule indice E ( $\varphi_E$ ), vérifiant la **loi de Stefan-Boltzmann** :

$$\varphi_E = k \times T^4$$

avec, en utilisant les unités du **Système international** :

$\varphi_E$  en watt par mètre carré ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )

$T$  majuscule en kelvin (K)

$k$  en watt par mètre carré par kelvin puissance 4 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^4$ )

#### Remarque

$k$  est un facteur qui dépend du corps considéré. Si le corps est un corps noir, c'est-à-dire un objet théorique qui absorbe intégralement le rayonnement électromagnétique qu'il reçoit, le facteur  $k$  est égal à la constante de Stefan-Boltzmann :

$$k = \sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^4$$

## Histoire des sciences

Le physicien et philosophe autrichien **Ludwig Boltzmann** (né 1844, mort en 1906) est l'un des pères fondateurs de la thermodynamique moderne. Il est l'auteur des principes de base concernant l'irréversibilité.

## Bilan thermique du système {Terre ; atmosphère}

Un bilan simplifié des flux thermiques surfaciques liés au système {Terre ; atmosphère}, à l'équilibre radiatif, permet de déterminer le flux thermique surfacique  $\varphi_E$  rayonné par la surface terrestre.

### Remarque concernant le vocabulaire

Un système en **équilibre radiatif** reçoit au total un flux thermique moyen égal à celui qu'il réémet.

$$\varphi_E = \frac{2 \times (1 - A)}{(2 - \alpha)} \varphi_S$$

en utilisant les unités du **Système international** :

$\varphi_E$  en watt par mètre carré ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )

A, l'albédo du système {Terre ; atmosphère}, sans unité

$\alpha$ , la proportion du flux thermique surfacique rayonné par la Terre et absorbé par l'atmosphère, sans unité

$\varphi_S$ , le flux thermique reçu du Soleil par le système {Terre ; atmosphère}, en watt par mètre carré ( $W \cdot m^{-2}$ ).

### Rappel

Après avoir atteint la Terre et son atmosphère, une partie du rayonnement solaire, de flux  $\varphi_D$ , est réfléchi et diffusé vers l'espace. Le reste est absorbé par la Terre continents, océans, etc. et par son atmosphère.

L'**albédo A** du système {Terre ; atmosphère} permet de quantifier ce phénomène :

$$A = \frac{\varphi_D}{\varphi_S}$$

L'albédo de la mer vaut entre 0,05 et 0,15.

L'albédo d'une forêt vaut entre 0,05 et 0,20.

L'albédo du sable vaut entre 0,25 et 0,45.

L'albédo de la neige vaut 0,8.

La loi de Stefan-Boltzmann permet de donner une expression de la température moyenne  $T_t$  de la surface terrestre :

$$T_t = \left( \frac{2 \times (1 - A)}{(2 - \alpha)k} \varphi_S \right)^{\frac{1}{4}}$$

**Influence de l'effet de serre** : si les concentrations dans l'atmosphère des gaz à effet de serre augmentent, la proportion alpha du flux thermique surfacique rayonné par la surface terrestre et absorbé par l'atmosphère augmente et la température moyenne  $T_t$  de la surface terrestre augmente.

**Influence de l'albédo** : si l'albédo du système {Terre ; atmosphère}  $A$  diminue, c'est-à-dire si le quotient du flux thermique surfacique  $\varphi_D$  du rayonnement réfléchi et diffusé par le système {Terre ; atmosphère} par le flux thermique surfacique  $\varphi_S$  reçu du Soleil par la Terre diminue, la température moyenne  $T_t$  de la surface terrestre augmente.

En 2020 :

- la proportion du flux thermique surfacique rayonné par la surface terrestre et absorbé par l'atmosphère est environ égale à :  $\alpha = 0,75$  ;
- l'albédo du système {Terre ; atmosphère} est environ égal à :  $A = 0,3$  ;
- la température moyenne de la surface terrestre est égale à :  $T = 15$  °C.

Les experts du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) prévoient, à l'horizon 2100, une augmentation de la température moyenne de la surface terrestre de 3 à 4 °C.

#### **Remarque**

L'albédo de la neige vaut 0,8 contre environ 0,1 pour la mer. Un réchauffement climatique entraîne une augmentation de la fonte des neiges, qui entraîne une baisse de l'albédo et donc de nouveau une augmentation de la température, etc. On parle de « rétroaction positive climatique ».