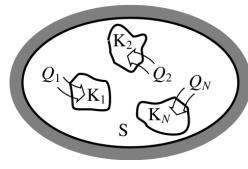




# ► Conservation chaleur 1<sup>ère</sup> loi thermodyn.

Sans échange :

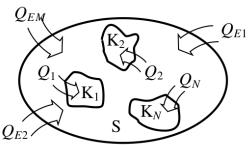
$$\sum_{i=1}^N Q_i = 0$$



$$C_1 m_1 \Delta T + C_2 m_2 \Delta T + \dots = 0$$

Avec échange :

$$\sum_{i=1}^N Q_i = \sum_{i=1}^N Q_{EK}$$



$$C_1 m_1 \Delta T + C_2 m_2 \Delta T + \dots = Q_{EK}$$

$Q_{EK} > 0$  système absorbe chaleur

$Q_{EK} < 0$  système émet chaleur (pertes)

$Q_i > 0$  corps absorbe chaleur

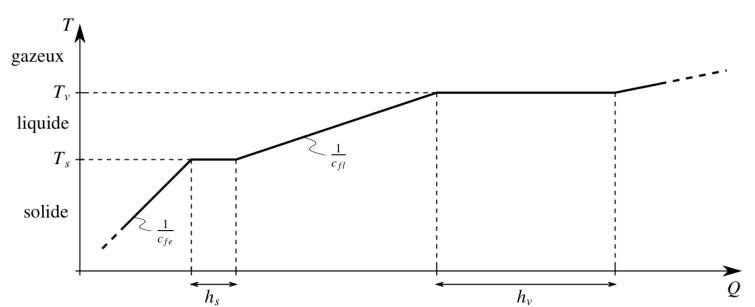
# ► Changement d'état d'agréation

→ énergie solidification

$$h_s = \frac{H_s}{m}$$

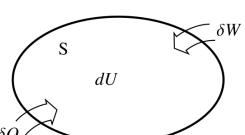
→ vaporisation

$$h_v = \frac{H_v}{m}$$



# ► Energie interne

Un système absorbe de l'énergie de deux manières



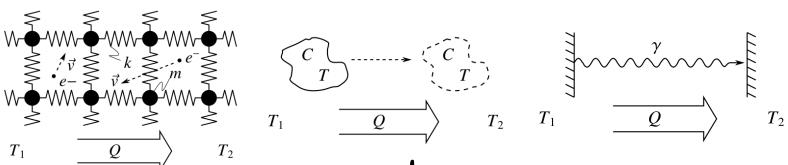
- 1 Absorbe chaleur  $\rightarrow T$  augmente
- 2 Absorbe travail  $\rightarrow$  Volume diminue

Energie interne:  $U_{12} = Q_{12} + W_{12}$  travail

⚠ Gaz: l'échange de chaleur et travail s'influent mutuellement

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

# ► Transfert thermique



Conduction

→ mouvement des particules

Convection

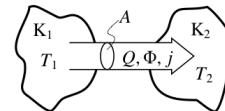
→ échange énergie surface - fluide

Rayonnement

→ champs électromagnétiques

# Flux thermique

$$\Phi = \frac{dQ}{dt}$$



# Densité de flux

$$j = \frac{d\Phi}{dA}$$

Transfert thermique va toujours du corps chaud vers froid (sauf avec travail extérieur)

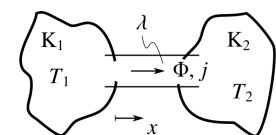
# ► Conduction régime stationnaire

$$j = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}$$

gradient température

$$\text{conductivité therm.} \left[ \frac{W}{m \cdot K} \right]$$

$$\text{Comme "I} = \frac{1}{R} \cdot U"$$



$T_1, T_2$  constants

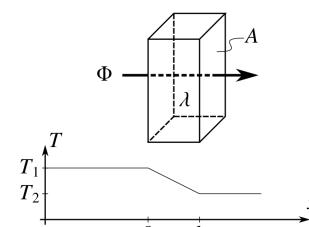
# Equation chaleur unidimensionnelle

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2}$$

# A travers une paroi plate

$$T(x) = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{l} \cdot x$$

$$T_1 - T_2 = \frac{l}{\lambda \cdot A} \cdot \Phi$$



$$R_{th} = \frac{l}{\lambda \cdot A}$$

Résistance thermique de la paroi:

$$T_1 - T_2 = R_{th} \cdot \Phi$$

$$"U = R \cdot I"$$

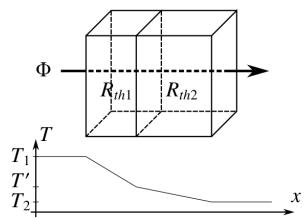
(2)

## ► Conduction régime stationnaire (suite)

### Paroi plate multi-couche

$$R_{\text{tot}} = R_{\text{th},1} + R_{\text{th},2} \dots$$

$$T_1 - T_2 = R_{\text{tot}} \cdot \Phi$$

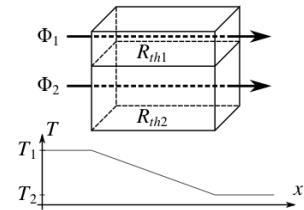


### Parois adjacentes

$$\Phi_{\text{tot}} = \Phi_1 + \Phi_2$$

$$T_1 - T_2 = R_{\text{tot}} \cdot \Phi$$

$$R_{\text{tot}} = \frac{1}{\frac{1}{R_{\text{th},1}} + \frac{1}{R_{\text{th},2}} \dots}$$



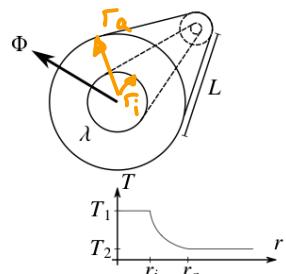
### Paroi cylindrique

Densité flux:

$$j(r) = \frac{\Phi}{2\pi r L}$$

$$T_1 - T_2 = \frac{1}{2\pi L \cdot \lambda} \ln \left( \frac{r_a}{r_i} \right) \cdot \Phi$$

$R_{\text{th}}$



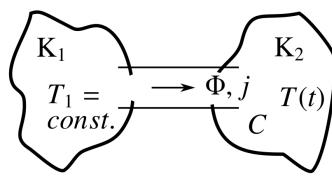
## ► Conduction régime transitoire

$$\Phi(t) = \frac{1}{R_{\text{th}}} (T_1 - T(t))$$

Sol. de l'éq. diff:

$$T(t) = T_1 + (T_0 - T_1) e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\tau = R_{\text{th}} \cdot C \quad C \left[ \frac{J}{K} \right]$$



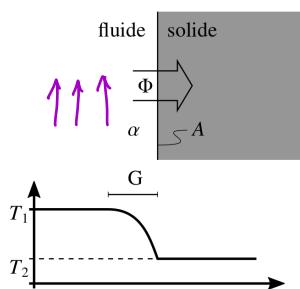
## ► Convection

### Transmission therm.

$$T_1 - T_2 = \frac{1}{\alpha \cdot A} \cdot \Phi$$

$$\alpha = 12\sqrt{v} + 2 \quad \text{dans l'air}$$

$$\alpha = 2100\sqrt{v} + 580 \quad \text{dans l'eau}$$



V. vitesse écoulement en m/s

## ► Convection forcée

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} = C \cdot \dot{m} (T_1 - T_2)$$

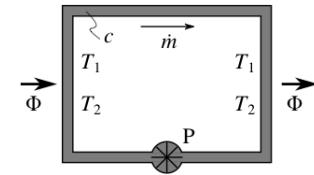
capacité fluide dans circuit

débit pompe

$$T(t) = T_1 + (T_0 - T_1) e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$\tau = \frac{m}{\dot{m}}$

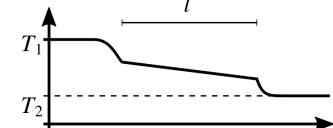
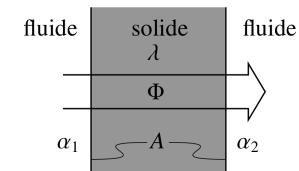
circuit chauffage fermée, masse corps à chauffer



## ► Passage chaleur (conv. + cond.)

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{l}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}$$

$$R_{\text{th}} = \frac{1}{A \cdot k} = \frac{1}{A} \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{l}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right)$$



## ► Combinaison de plusieurs flux

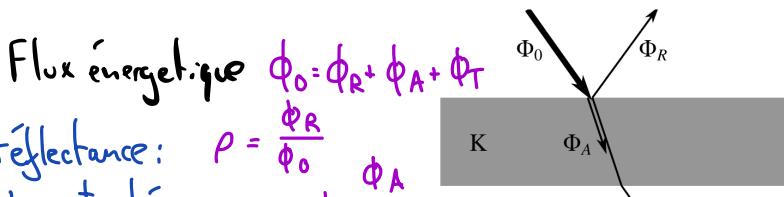
exemple: composant sur PCB

⇒ Etablir système d'équations

## ► Rayonnement thermique

Mouvement particules crée ondes électromagnétiques. Majorité du rayonnement est transmis par onde IR.

→ aussi: dans le vide (vacuum)



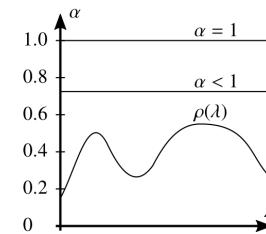
$$\text{Flux énergétique } \Phi_0 = \Phi_R + \Phi_A + \Phi_T$$

$$\text{réflectance: } \rho = \frac{\Phi_R}{\Phi_0}$$

$$\text{absorptivité: } \alpha = \frac{\Phi_A}{\Phi_0}$$

$$\text{transmittance: } \tau = \frac{\Phi_T}{\Phi_0}$$

$$\rho + \alpha + \tau = 1$$



(3)

# Existence spectrale (corps noir)

Flux énergétique émis par unité de surface d'un corps

$$M(\lambda, T) = \frac{2 \cdot h \cdot c_0^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h \cdot c_0}{\lambda \cdot k_B \cdot T}} - 1} \quad \left[ \frac{W}{m^2 \cdot m} \right]$$

$$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$$

$$k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1} \quad T \text{ [K]}$$

longueur onde:  $\lambda \text{ [m]}$   $c_0$ : v. lumière

## Puissance rayonnée totale

$$\phi(T) = A \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (\text{corps noir})$$

$\hookrightarrow \text{Stefan-Boltzmann} = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$

Corps quelconque:

$$\phi(T) = \epsilon \cdot A \cdot \sigma \cdot T^4$$

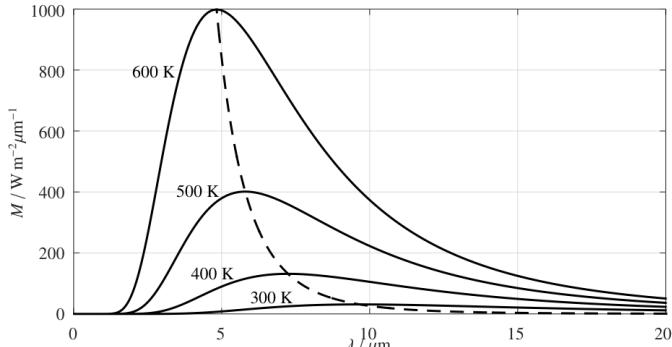
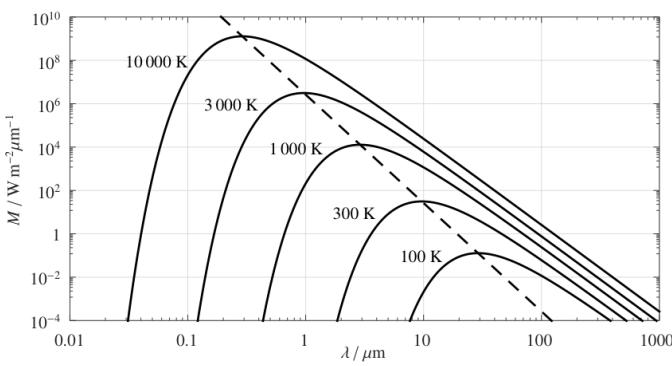
$\hookrightarrow \text{émissivité (rapport entre corps noir et corps en question)}$

## Puissance rayonnée réelle

(Le corps absorbe aussi le rayonnement)

$$\phi(T) = A \cdot \sigma \cdot \epsilon (T^4 - T_u^4)$$

$\text{Umgebung} \leftarrow$



## ► Principes thermodynamique

### ► Loi gaz parfaits

$$\langle V^2 \rangle_{\text{moyenne}} = \frac{3 k_B \cdot T}{m} \quad F_{\text{particule sur paroi}} = \frac{k_B \cdot T}{b \cdot \text{largeur paroi}}$$

$$p \cdot V = N \cdot k_B \cdot T$$

$\hookrightarrow \text{nombre particules}$

$$R_S = \frac{N \cdot k_B}{m}$$

Equation état gaz parfait  
→ valable en tout temps

$$p \cdot V = m R_S \cdot T$$

$R_S$  dépend gaz  $\frac{g}{kg \cdot K}$

### ► Système thermodynamique

Portion de l'univers que l'on isole par la pensée. On le caractérise par:

① Les grandeurs fournies ou dissipées à ses frontières

- $\delta Q$ : chaleur fournie/dissipée
- $\delta W$ : travail des forces
- $\delta m$ : échange de masse

② Les variables d'état mesurables

- $p$  [Pa],  $T$  [K],  $V$  [ $m^3$ ]

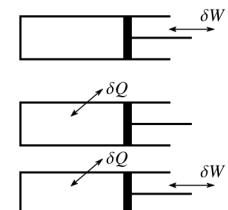
③ Les variables énergétiques

Energie interne  $U$  [J]

Enthalpie  $H$  [J]

Entropie  $E$  [J K<sup>-1</sup>]

| système                             | échange            | exemples                                  |
|-------------------------------------|--------------------|---|
| adiabatique (thermiquement étanche) | travail            | gonfler un pneu, Föhn (vent)              |
| imperméable au travail              | chaleur            | chauffer ou refroidir une bonbonne de gaz |
| sans restriction                    | travail et chaleur | réfrigérateur, pompe à chaleur            |



La convention de signe suivante s'applique

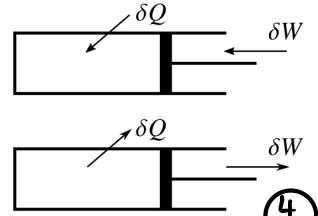
$\delta W > 0$  Le système absorbe du travail.

$\delta Q > 0$  Le système absorbe de la chaleur.

$\delta W < 0$  Le système dissipe du travail.

$\delta Q < 0$  Le système émet de la chaleur.

ici:  $\delta m = 0$



4

## ► Energie interne 1<sup>er</sup> principe de thermodyn.

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

Energie interne  $\simeq$  énergie cin des molécules

Pour 1 molécule mono-atomique :  $U = \frac{3}{2} m R_s \cdot T$

Dans les gaz parfaits  $U$  dépend seulement de  $T$

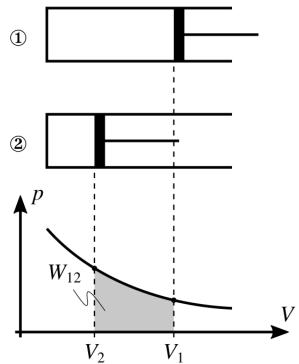
Changement d'énergie du gaz parfait d'un état 1  $\rightarrow$  2  $U_{12} = m C_V (T_2 - T_1)$

$C_V$  : capacité therm. spécifique à  $V$  const.

## ► Travail des forces

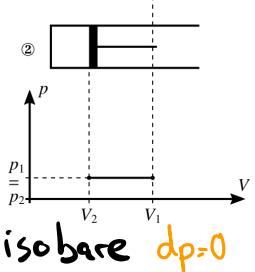
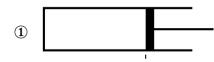
Le travail des forces, pour un changement de volume donné, correspond à l'air contenu sous la courbe du diagramme  $pV$ . On obtient, à nouveau

$W_{12} > 0$  Compression, le système absorbe de l'énergie.  
 $W_{12} < 0$  Expansion, le système dissipe de l'énergie.

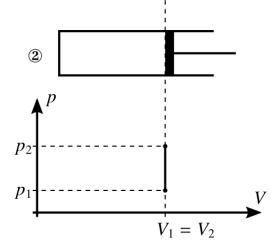
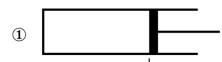


## ► Processus de transformation des gaz

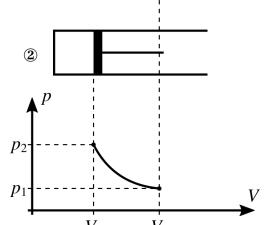
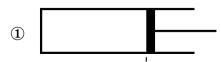
Le gaz passe d'un état 1  $\rightarrow$  2.



isobare  $dp=0$



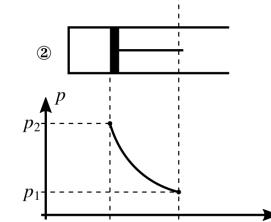
isochore  $dV=0$



isotherme  $dT=0$

idéalisation d'un processus extrêmement lent  $dU=0$

L'énergie gagné par travail est dissipée en chaleur !



adiabatique  $\delta Q=0$

pas de transfert de chaleur à la frontière  
 Processus extrêmement rapide !

| Processus                       | $Q_{12}$  | $W_{12}$            | $U_{12}$            | $p, T, V$  |
|---------------------------------|---|---------------------|---------------------|--|
| isochore<br>$V = \text{const}$  | $m C_V (T_2 - T_1)$   | 0                   | $m C_V (T_2 - T_1)$ | $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$  |
| isobare<br>$p = \text{const}$   | $m C_p (T_2 - T_1) - p (V_2 - V_1)$                         | $Q_{12} + W_{12}$   | $Q_{12} + W_{12}$   | $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$  |
| isotherme<br>$T = \text{const}$ | $p_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} - p_2 V_2 \ln \frac{V_2}{V_1}$ | 0                   | $p_1 V_1 = p_2 V_2$ |  |
| adiabatique<br>$\delta Q=0$     | 0   | $m C_V (T_2 - T_1)$ | $m C_V (T_2 - T_1)$ | $\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\kappa}$<br>$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\kappa-1} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{\kappa}}$ |

$$R_S = C_p - C_V \quad \frac{1}{\kappa} = \frac{C_p}{C_V} \Rightarrow C_p = R_S \frac{\kappa}{\kappa-1}$$

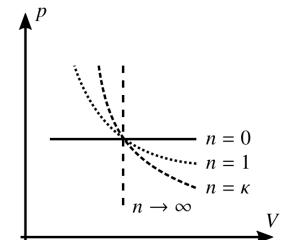
$p$  [Pa]    $T$  [K]    $V$  [m<sup>3</sup>]

## Transformations polytropes

$$p V^n = \text{const}$$

En choisissant l'exposant polytrope  $n$  on obtient la transformation suivante :

- $n = 0$  : isobare
- $n = 1$  : isotherme
- $n = \kappa$  : adiabatique
- $n \rightarrow \infty$  : isochore



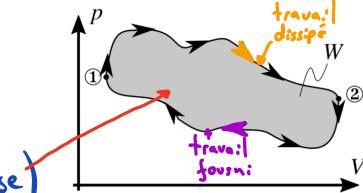
## ► Cycle

Un système subit une suite de processus.

ici : travail dissipé :  $W = - \oint pdV$  (aire grise)

a) travail dissipé (moteur)

b) travail fourni (frigo)



## Cycle de Carnot

$2 \rightarrow 3 \} \text{ adiabatique}$

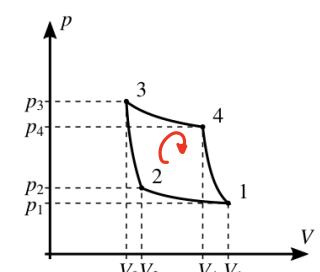
$4 \rightarrow 1 \} \text{ adiabatique}$

$1 \rightarrow 2 \} \text{ isotherme}$

$3 \rightarrow 4 \} \text{ isotherme}$

efficacité :  $\eta_{\text{th}} = \frac{W}{Q_{\text{fournit}}}$

$$\eta_{\text{carnet}} = 1 - \frac{T_1}{T_3}$$

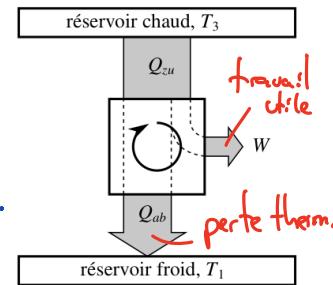


Le cycle de Carnot est le cycle le plus efficace. (5)

# Machine thermique

On donne de l'énergie thermique et on exploite le travail fourni par le gaz.

efficacité:  $\eta = \frac{W}{Q_{\text{fournit}}}$



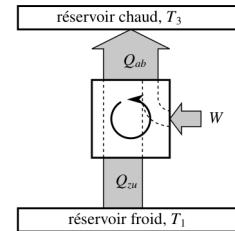
# Machine frigorifique

On fournit un travail pour compresser le gaz et exploiter la chaleur créée

$$\varepsilon_{\text{frigp}} = \frac{Q_{20}}{W}$$

$$\varepsilon = \frac{Q_{ab}}{W}$$

↑ pompe chaleur



coeff. de performance

## ► Deuxième principe de thermodyn.

Le deuxième principe de thermodynamique détermine le sens dans lequel un processus a lieu. Il décrit l'irréversibilité.

## ► Constantes

### A.1 Constantes physiques

| constante  | symbole         | valeur   |
|--|-----------------|--|
| vitesse de la lumière                              | $c_0$           | $299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$                                 |
| constante gravitationnelle                         | $G$             | $6.67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ |
| constante de Planck                                | $h$             | $6.62 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$                                 |
| constante de Boltzmann                             | $k_B$           | $1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$                           |
| constante de Stefan-Boltzmann                      | $\sigma$        | $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$             |
| charge élémentaire                                 | $e$             | $1.60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$                                  |
| masse de l'électron                                | $m_e$           | $9.11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$                                 |
| constante électrique                               | $\varepsilon_0$ | $8.85 \cdot 10^{-12} \text{ As V}^{-1} \text{ m}^{-1}$           |
| constante magnétique                               | $\mu_0$         | $\pi \cdot 10^{-12} \text{ V m A}^{-1} \text{ s}^{-1}$           |
| masse de la Terre                                  | $m_{\oplus}$    | $5.97 \cdot 10^{24} \text{ kg}$                                  |
| rayon moyen de la Terre                            | $r_{\oplus}$    | $6.37 \cdot 10^6 \text{ km}$                                     |
| accélération gravitationnelle moyenne              | $g$             | $9.81 \text{ m s}^{-2}$  |
| pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer | $b_0$           | $101325 \text{ Pa}$  |

### A.2 Coefficient de dilatation linéaire $\alpha$

Les valeurs sont indicatives et s'appliquent à des conditions normales (25°C).

| substance (de) | substance (fr)          | symbole chim. | $\alpha / \text{K}^{-1}$ |
|----------------|-------------------------|---------------|--------------------------|
| Stahl (Invar)  | acier (invar)           |               | $1.70 \cdot 10^{-6}$     |
| Stahl (Bau-)   | acier (de construction) |               | $11.8 \cdot 10^{-6}$     |
| Eisen          | fer                     | Fe            | $11.8 \cdot 10^{-6}$     |
| Kupfer         | cuivre                  | Cu            | $16.5 \cdot 10^{-6}$     |
| Aluminium      | aluminium               | Al            | $23.1 \cdot 10^{-6}$     |
| Zink           | zinc                    | Zn            | $30.2 \cdot 10^{-6}$     |

### A.3 Coefficient de dilatation volumique $\beta$

Les valeurs sont indicatives et s'appliquent à des conditions normales (18°C).

| substance (de) | substance (fr) | symbole chim.                    | $\beta / \text{K}^{-1}$ |
|----------------|----------------|----------------------------------|-------------------------|
| Quecksilber    | mercure        | Hg                               | $1.80 \cdot 10^{-4}$    |
| Wasser         | eau            | H <sub>2</sub> O                 | $2.07 \cdot 10^{-4}$    |
| Ethanol        | éthanol        | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH | $11.0 \cdot 10^{-4}$    |

### A.4 Masse volumique $\rho$

Toutes les valeurs sont indicatives et s'appliquent à des conditions normales (101 325 Pa, 25°C).

| substance (de) | substance (fr) | symbole chim.    | $\rho / \text{kg m}^{-3}$ |
|----------------|----------------|------------------|---------------------------|
| Quecksilber    | mercure        | Hg               | 13 550                    |
| Blei           | plomb          | Pb               | 11 340                    |
| Kupfer         | cuivre         | Cu               | 8 940                     |
| Eisen, Stahl   | fer, acier     | Fe               | 7 870                     |
| Zink           | zinc           | Zn               | 7 140                     |
| Wasser (4°C)   | eau (4°C)      | H <sub>2</sub> O | 1 000                     |
| Eis (0°C)      | glace (0°C)    | H <sub>2</sub> O | 917                       |
| Erdöl          | mazout         |                  | 830                       |
| Luft           | air            |                  | 1.18                      |

### A.5 Module d'élasticité $E$ et module de cisaillement $G$

Les valeurs sont indicatives et s'appliquent à des conditions normales (25°C).

| substance (de) | substance (fr) | symbole chim. | $E / \text{Pa}$  | $G / \text{Pa}$ |
|----------------|----------------|---------------|------------------|-----------------|
| Aluminium      | aluminium      | Al            | $70 \cdot 10^9$  | $26 \cdot 10^9$ |
| Zink           | zinc           | Zn            | $83 \cdot 10^9$  | $43 \cdot 10^9$ |
| Kupfer         | cuivre         | Cu            | $110 \cdot 10^9$ | $48 \cdot 10^9$ |
| Eisen          | fer            | Fe            | $211 \cdot 10^9$ | $82 \cdot 10^9$ |
| Stahl          | acier          |               | $200 \cdot 10^9$ | $79 \cdot 10^9$ |

### A.6 Capacité thermique spécifique $c$

Les valeurs sont indicatives et s'appliquent à des conditions normales (101 325 Pa).

| substance (de) | substance (fr) | symbole chim.    | $c / \text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ |
|----------------|----------------|------------------|---------------------------------------|
| Blei           | plomb          | Pb               | 129                                   |
| Gold           | or             | Au               | 129                                   |
| Kupfer         | cuivre         | Cu               | 385                                   |
| Eisen          | fer            | Fe               | 449                                   |
| Silizium       | silicium       | Si               | 703                                   |
| Aluminium      | aluminium      | Al               | 897                                   |
| Erdöl          | mazout         |                  | 2 070                                 |
| Eis            | glace          | H <sub>2</sub> O | 2 090                                 |
| Wasser         | eau            | H <sub>2</sub> O | 4 187                                 |

### A.7 Chaleur latente de fusion spécifique $h_s$ et température de fusion $T_s$

Les valeurs sont indicatives et s'appliquent à des conditions normales (101 325 Pa).

| substance (de) | substance (fr) | symbole chim.    | $h_s / \text{kJ kg}^{-1}$ | $T_s / ^\circ\text{C}$ |
|----------------|----------------|------------------|---------------------------|------------------------|
| Blei           | plomb          | Pb               | 23                        | 327                    |
| Gold           | or             | Au               | 66                        | 1 064                  |
| Kupfer         | cuivre         | Cu               | 205                       | 1 083                  |
| Eisen          | fer            | Fe               | 277                       | 1 535                  |
| Wasser         | eau            | H <sub>2</sub> O | 334                       | 0                      |
| Aluminium      | aluminium      | Al               | 397                       | 660                    |

### A.8 Chaleur latente de vaporisation spécifique $h_v$ et température de vaporisation $T_v$

Les valeurs sont indicatives et s'appliquent à des conditions normales (101 325 Pa).

| substance (de) | substance (fr) | symbole chim.                    | $h_v / \text{kJ kg}^{-1}$ | $T_v / ^\circ\text{C}$ |
|----------------|----------------|----------------------------------|---------------------------|------------------------|
| Ethanol        | éthanol        | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH | 108                       | 78                     |
| Wasser         | eau            | H <sub>2</sub> O                 | 2 265                     | 100                    |

### A.9 Conduction thermique $\lambda$

Les valeurs sont indicatives et s'appliquent à des conditions normales (27°C).

| substance (de)     | substance (fr)       | symbole chim. | $\lambda / \text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ |
|--------------------|----------------------|---------------|--|
| Kupfer             | cuivre               | Cu            | 401  |
| Aluminium          | aluminium            | Al            | 237  |
| Eisen              | fer                  | Fe            | 80   |
| Stahl              | acier                |               | 48   |
| Blei               | plomb                | Pb            | 35   |
| Glas               | verre                |               | 0.8  |
| Polystyrol         | polystyrole          |               | 0.032                                      |
| Luft               | air                  |               | 0.026                                      |
| Vakuum-Dämmplatten | calorifugeage à vide |               | 0.004                                      |

### A.10 Constante spécifique du gaz $R_s$ et indice adiabatique $\kappa$

Les valeurs sont indicatives et s'appliquent à des conditions normales (20°C).

| substance (de) | substance (fr)     | symbole chim.   | $R_s / \text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ | $\kappa / 1$ |
|----------------|--------------------|-----------------|---|--------------|
| Kohlendioxid   | dioxyde de carbone | CO <sub>2</sub> | 189                                     | 1.29         |
| Argon          | argon              | Ar              | 208                                     | 1.67         |
| Sauerstoff     | oxygène            | O <sub>2</sub>  | 260                                     | 1.40         |
| Luft           | air                |                 | 287                                     | 1.40         |
| Stickstoff     | azote              | N <sub>2</sub>  | 297                                     | 1.40         |
| Wasserstoff    | hydrogène          | H <sub>2</sub>  | 4 124                                   | 1.41         |