

Electrothermie

Enjeu : L'échauffement d'un système électrique peut nuire à son fonctionnement. Dans certains cas il faut prévoir une ventilation.

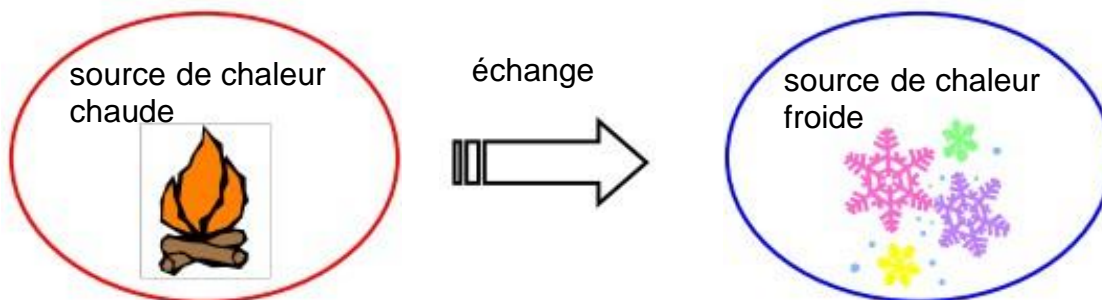
Problématique : Quelles sont les **lois de la physique** qui permettent de quantifier l'échauffement d'un système ?

1. Qu'est-ce que la chaleur ?

La chaleur est une forme d'**énergie** (thermique) qui peut être échangée entre deux corps.

Symboles et unités : **Q en joules [J]**

La calorie [cal] est la chaleur nécessaire pour augmenter d'un °C, un gramme d'eau :
 $1 \text{ calorie} \cong 4,18 \text{ J}$.



Ainsi, si l'on dispose de deux sources de chaleur, l'une froide, l'autre chaude, il se produit un échange de chaleur **de la source chaude vers la source froide**, jusqu'à atteindre l'équilibre des températures.

Cet échange de chaleur (flux de chaleur) dépend essentiellement de la quantité de matière des deux sources, de l'écart de température, de la capacité des sources à absorber ou transmettre la chaleur et de la surface d'échange.

Les échanges thermiques peuvent s'effectuer de 3 manières :

- par conduction** : transmission directe à travers la matière (solide ou liquide).
- par convection** : propagation propre aux fluides, liée au déplacement de matière.
- par rayonnement** : émission d'énergie rayonnante entre deux corps.

Lorsqu'un système reçoit de la chaleur, sa température n'augmente pas systématiquement (par exemple lors des changements d'états).

Chaleur et température sont donc deux grandeurs distinctes.

2. Qu'est-ce que la température ?

Il est difficile de donner une définition exacte de la température, car ce n'est pas une grandeur mesurable directement.

« Ainsi si on ajoute dans un récipient 1 litre d'eau à 30°C et 1 litre d'eau à 20°C, on n'obtient pas un litre d'eau à 50°C. On est donc amené à repérer les températures au moyen d'échelles. On peut la définir de deux façons différentes :

- à l'échelle atomique**, elle est liée à l'énergie cinétique moyenne des constituants de la matière (agitation microscopique).

au niveau macroscopique, certaines propriétés des corps dépendant de la température (volume massique, résistivité électrique, etc.) peuvent être choisies pour construire des échelles empiriques de température.

Quelles sont les échelles de températures les plus utilisées ?

Il existe deux types d'échelles de température, à savoir :

- relative** : basée sur des points particuliers (changement d'état, par exemple). C'est le cas des échelles Celsius et Fahrenheit.
- absolue** : basée sur l'état d'agitation de la matière (échelle Kelvin)

Echelle centésimale ou Celsius :

L'échelle centésimale fut inventée en 1743 par le suédois Anders Celsius (1701-1744) physicien et astronome.

Sur cette échelle, définie sous pression atmosphérique, on fixe arbitrairement :

- la valeur de 0° à la température de congélation de l'eau, de la glace fondante
- la valeur de 100° à la température d'ébullition de l'eau.

L'échelle Celsius est l'échelle de température la plus employée dans la vie courante.

Echelle Fahrenheit :

C'est l'une des plus anciennes échelles élaborée en 1720 par le physicien allemand Gabriel Daniel Fahrenheit (1686-1736) qui consacra ses travaux à la thermométrie.

Cette échelle prend pour références arbitraires, à pression atmosphérique :

- la valeur de 32° pour la température de congélation de l'eau
- la valeur de 212° pour l'ébullition de l'eau.

C'est l'échelle en usage dans les pays anglo-saxons.

Echelle Kelvin :

Inventée par le mathématicien et physicien écossais Sir William Thomson Kelvin (1824-1907) au XIXe siècle, à partir de ses travaux sur la thermodynamique, c'est l'échelle employée en science (S.I.). Cette échelle n'est plus liée à des références arbitraires liées à certaines propriétés d'un corps, mais à un état d'agitation de la matière.

L'origine de cette échelle est appelée « **zéro absolu** ». C'est la température limite basse pour laquelle un gaz parfait occupant un volume donné, verrait sa pression tendre vers zéro.

On ne peut donc pas descendre en dessous de ces zéros.

On passe de l'échelle Kelvin à l'échelle Celsius par la relation : **$T^{\circ}(K) = 273,15 + T^{\circ}(C)$**

Une variation de température de 1°C correspond à une variation de température de 1K.

- Température de congélation de l'eau : $T = 273,15 K$
- Température d'ébullition de l'eau : $T = 373,15 K$

Les conversions les plus utilisées sont réunies dans le tableau suivant :

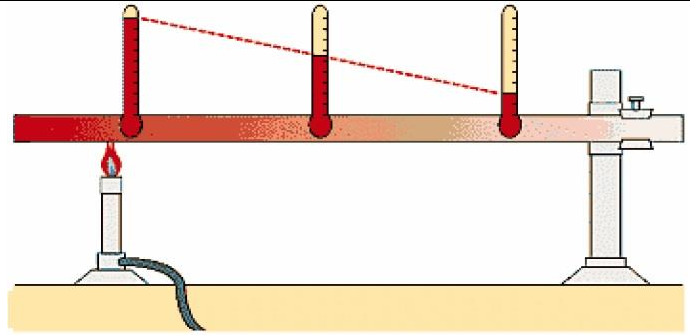
	Kelvin (K)	Celsius (°C)	Fahrenheit (°F)
Kelvin (K)	1	°C + 273,15	
Celsius (°C)	K - 273,15	1	(°F - 32) / 1,8
Fahrenheit (°F)		°C x1,8 + 32	1

3. le transfert thermique par conduction

3.1. Qu'est-ce que la puissance thermique

Φ_{th} (**flux thermique**) :

La puissance thermique P_{th} (également appelée **flux thermique**) est la quantité d'énergie thermique qui traverse une surface S par unité de temps :



$$\Phi_{th} = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Φ_{th} flux thermique en watts [W]
 ΔQ quantité de chaleur échangée en joules [J]
 Δt durée du transfert thermique en secondes [s]

c'est la rapidité avec laquelle la chaleur est échangée

3.2. Qu'est-ce que la densité de puissance thermique ?

Considérons une vitre comportant une surface S conductrice de la chaleur séparant l'extérieur de l'intérieur.

On constate que la puissance thermique transmise est proportionnelle à S .

On introduit alors pour un matériau, la **densité de puissance thermique** (appelée également densité de flux thermique) la grandeur ϕ exprimée en $W.m^{-2}$ telle que :

$$\phi_{th} = \frac{P}{S}$$

ϕ_{th} densité de flux thermique en watts/m² [$W.m^{-2}$]
 P puissance transmise [W]
 S surface [m^2]

3.3. Comment s'effectue la transmission de la chaleur par conduction ?

La conduction est le seul mode de transfert de la chaleur possible dans un solide (sauf pour quelques solides transparents comme le verre qui laissent passer un rayonnement magnétique). C'est un mode de **transfert sans apport de matière**.

La transmission de chaleur entre deux zones de température différente s'effectue de la zone la plus chaude vers la zone la plus froide.

La puissance thermique dépend de :

- la différence de température entre ces deux zones ;
- de la surface à travers laquelle la transmission a lieu ;
- du type de matériau.

3.4. Quels sont les lois qui sont propres à la conduction ?

□ **La Loi de Fourier :**

Considérons une tige de longueur L de section S. A une extrémité de la tige la température est T_A et à l'autre extrémité T_B . La puissance thermique échangée est alors donnée par la relation

$$P = \frac{\lambda S (T_A - T_B)}{L}$$

P en watts [W]
 $T_A - T_B$ en kelvins [K]
 S surface [m²]
 L longueur [m]
 λ concuctivité thermique du matériau [W.m⁻¹.K⁻¹]

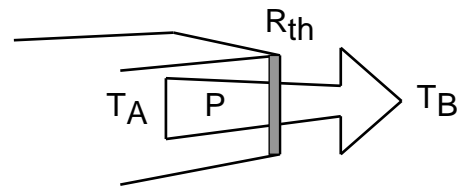
et par analogie avec l'électricité on définit la résistance thermique $R_{th} = \frac{L}{\lambda S}$

□ **La loi d'Ohm thermique :**

la chaleur P se propage de A vers B en traversant une surface

$$T_A - T_B = R_{th} \cdot P$$

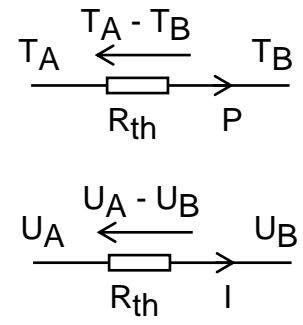
de température $T_A - T_B = \Delta T$ [K]
 P puissance transmise [W]
 R_{th} résistance thermique [K.W⁻¹]



Analogie thermique

électrique

températures T_A et T_B	↔	potentiels V_A et V_B
différence de température $T_A - T_B$	↔	différence de potentiel $V_A - V_B$
résistance thermique R_{th}	↔	résistance électrique R
résistivité thermique ρ_{th} [m.K.W ⁻¹]	↔	résistivité électrique ρ [Ω.m]
flux thermique P	↔	Intensité du courant I



remarque : ($T_A - T_B$) est en K mais on peut faire le calcul en °C !

Quelques valeurs de résistivités thermiques :

Corps	ρ_{th} en m. K W ⁻¹
Cuivre	0,0027
Aluminium	0,0057
Aciers	0,0286
Ferrites	0,156
Quartz	0,69
Verres	0,91
Eau	1,49
Hydrogène	10,00
Hélium	10,00
Mylar	33,30
Air	58,90

4. Comment s'effectue la transmission de la chaleur par convection ?



On dit qu'il y a convection de chaleur lorsqu'il y a **transport de matière**.

Par exemple, dans une installation de **chauffage central**, l'eau chaude se déplace pour aller au contact de l'air froid.

A l'inverse, dans une **centrale électrique**, l'eau froide des circuits de refroidissement se déplace vers la source chaude à refroidir.

Dans la nature la chaleur peut être transférée par les vents, les courants marins, ..

4.1. Quels sont les lois qui sont propres à la convection ?

La densité de flux est donnée par :

$$\varphi = h (T_A - T_B)$$

<p>φ densité de flux [W.m⁻²] h le coefficient de transfert convectif [W.m⁻².K⁻¹] écart de température (T_A - T_B) [K]</p>

T_A est la température des parois et T_B est la température du fluide

Les transferts de chaleur par convection peuvent être étudiés de manière simplifiée en introduisant la notion de résistance thermique avec : $R_{th} = \frac{1}{h S}$

4.2 flux thermique et loi de Newton

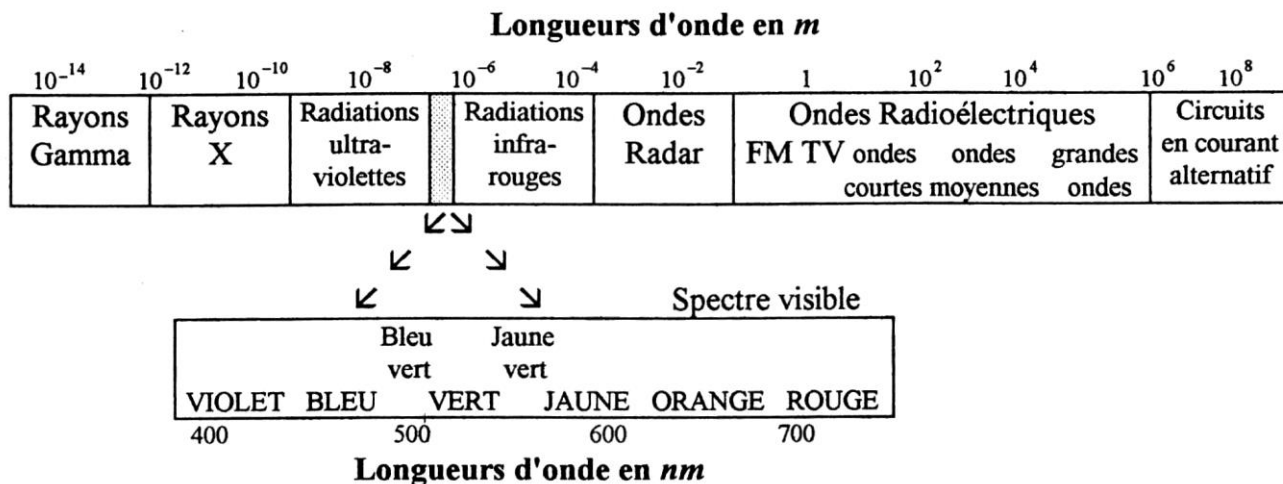
$$\Phi_{th} = h S (T_A - T_B)$$

<p>Φ_{th} le flux thermique [W] h le coefficient de transfert convectif [W.m⁻².K⁻¹] écart de température (T_A - T_B) [K]</p>
--

5. Comment s'effectue la transmission de la chaleur par rayonnement ?

Pour la conduction et la convection, le transfert de chaleur nécessite la présence de matière. Cependant, le Soleil transmet de la chaleur sans présence de matière, en passant **par le vide**. C'est le rayonnement thermique (les ondes électromagnétiques).

Dans le vide, la seule transmission de chaleur possible est donc le rayonnement électromagnétique, spécialement la lumière visible et les infrarouges.



Quels sont les lois qui sont propres au rayonnement ?

Loi de Stefan :

La densité de puissance thermique émise par un corps chaud a pour expression :

$$\varphi = \sigma T^4$$

φ [W.m ⁻²]
la constante de Stephan $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ W.m ⁻² .K ⁻⁴
température T [K] ... pas en °C

6. Comment calculer l'énergie nécessaire à l'élévation de température d'un corps ?

La capacité thermique (ou capacité calorifique) d'un corps est une grandeur permettant de quantifier la possibilité qu'a un corps d'absorber ou restituer de l'énergie par échange thermique au cours d'une transformation pendant laquelle sa température varie.

La capacité thermique est l'énergie qu'il faut apporter à un corps pour augmenter sa température de un Kelvin. Elle s'exprime en Joule / Kelvin.

La notion de capacité thermique (réserve de chaleur) a été introduite par analogie avec la capacité électrique (réserve d'énergie électrique)

Soit **Q la chaleur stockée** par un « condensateur » thermique lors d'un échange thermique pendant lequel ce corps a vu sa **température augmentée de $\Delta T = (T_A - T_B)$** .

La capacité thermique **C_{th}** de ce condensateur est alors défini par :

$$Q = C_{th} \cdot (T_A - T_B)$$

Q la chaleur fournie [J]
 C_{th} la capacité thermique [$J \cdot K^{-1}$]
 écart de température produit ($T_A - T_B$) [K]

ou

$$Q = m c_m \cdot (T_A - T_B)$$

Q la chaleur fournie [J]
 m la masse de l'objet chauffé [kg]
 c_m la chaleur massique [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
 écart de température produit ($T_A - T_B$) [K]

Ordre de grandeur de c_m la chaleur massique :

On constate dans ce tableau que l'hydrogène est très « calories-porteur » car il a une chaleur massique très largement supérieure à celle des autres corps.

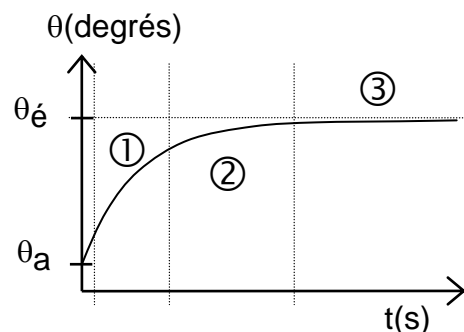
On l'utilise sous pression pour refroidir certains alternateurs.

La température d'équilibre θ_e

Le principe de la **conservation de l'énergie** affirme que toute l'énergie d'un système se transforme ; aucune énergie n'est perdue, ni créée.

Donc, si un résistor R reçoit de l'énergie sous forme électrique $W = R i^2 t$,

Corps	c_p en $J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$
Cuivre	385
Aluminium	900
Laiton	377
Argent	236
Fer	444
Huile (liquide)	2 000
Bois	420
Béton	880
Eau vapeur	1 850
Eau liquide	4 180
Eau solide (0 °C)	2 060
Hydrogène (gaz)	14 300
Oxygène	920
Air	1 005



- dans une première étape notée ①, elle servira à faire augmenter la température du composant :

$$R i^2 t = m c \Delta\theta.$$

- au bout d'un certain temps, dans l'étape ②, la chaleur produite, tout en continuant d'augmenter la température, commence à se dissiper dans le milieu extérieur

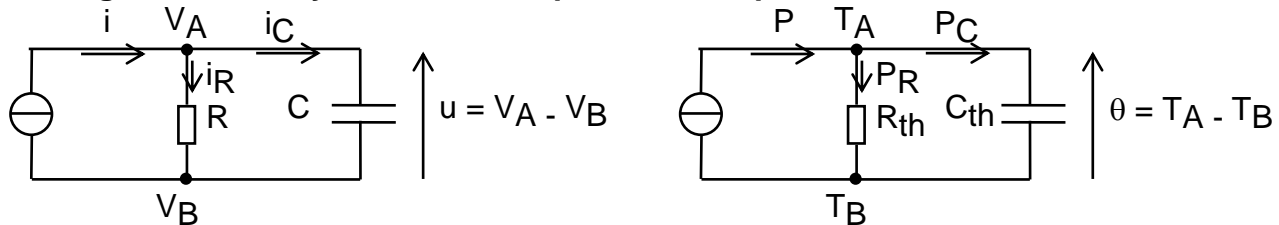
$$R i^2 t = m c \Delta\theta + W_{diss}.$$

- dans l'étape ③, la température n'augmente plus ($\Delta\theta = 0$),
le composant a atteint sa **température d'équilibre** θ_e . Toute la chaleur est dissipée et
 $R i^2 t = W_{\text{diss}}$. Les pertes désignent la puissance dissipée $R i^2 = P_{\text{diss}}$.

C'est elles qui doivent être augmentée avec un **dissipateur thermique (radiateur)** pour diminuer la température d'équilibre.

7. Modélisation d'un système thermique

Analogie entre les systèmes électrique et thermique



Par exemple, soit un moteur électrique de puissance P .

Il dissipe $P \cdot dt$, la chaleur produite par effet Joule pendant un temps très court dt .

Appelons $\theta = T_A - T_B$ l'écart de température ; T_A étant la température du moteur et T_B étant la température ambiante . Cet écart varie de $d\theta$.

La chaleur élevant la température du moteur est alors $C_{th} \cdot d\theta = m \cdot c_m \cdot d\theta$,

et la chaleur dissipée est $\frac{\theta}{R_{th}} \cdot dt$.

On en déduit que $P \cdot dt = m \cdot c_m \cdot d\theta + \frac{\theta}{R_{th}} \cdot dt$ puis $P = m \cdot c_m \cdot \frac{d\theta}{dt} + \frac{\theta}{R_{th}}$

on obtient **l'équation différentielle** suivante : $P \cdot R_{th} = R_{th} \cdot m \cdot c_m \cdot \frac{d\theta}{dt} + \theta$

→ la solution est exponentielle $\theta(t) = \theta_f + (\theta_i - \theta_f) \exp - \frac{t}{\tau}$

où $\theta_i = T_B$ et $\theta_f = P \cdot R_{th}$ et τ est la constante de temps qui vaut $\tau = R_{th} \cdot m \cdot c_m$.

application numérique : un moteur de 10 kg est en rotation dans un atelier à 25 °C. Les pertes par effet Joule, frottement et fer sont de $P = 400$ W. La résistance thermique du moteur est de $R_{th} = 0,15$ K.W⁻¹ et la chaleur massique des matériaux qui constituent le moteur est de $c_m = 400$ J.kg⁻¹.K⁻¹.

a) Calculer la constante de temps de chauffe du moteur :

b) Calculer la température d'équilibre :

c) Représenter la température du moteur T_{moteur} en fonction du temps si on le met en marche à l'instant $t = 0$ s.