

Transferts thermiques

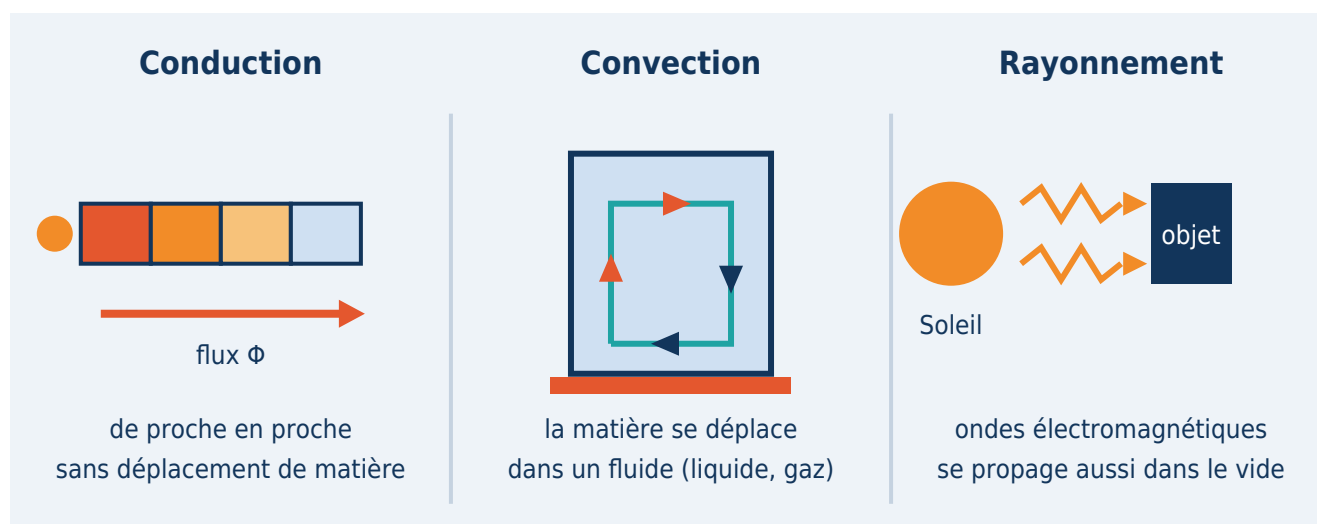
Cours de sciences physiques - niveau Terminale

Une tasse de café posée sur la table finit toujours par refroidir, jamais par chauffer toute seule, et la poignée d'une casserole devient brûlante alors que le feu est plus bas. Ces observations relèvent des **transferts thermiques** : en terminale, on apprend à les classer, à les mesurer par un flux, à prévoir l'évolution d'une température et à écrire un bilan d'énergie rigoureux.

Ce cours est à **télécharger en PDF et à imprimer gratuitement** : le bouton se trouve en bas de la page, sans inscription.

Les transferts thermiques : trois modes

Lorsque deux systèmes n'ont pas la même température, de l'énergie passe spontanément du système le plus chaud vers le plus froid : c'est un **transfert thermique**, noté Q , en joules (J). Il n'a lieu que si les températures sont différentes et cesse à l'équilibre thermique. On distingue trois modes, souvent présents ensemble.



Conduction, convection et rayonnement : les trois modes de transfert thermique.

DÉFINITION

La **conduction** transfère l'énergie de proche en proche par agitation des particules, sans déplacement de matière (surtout dans les solides). La **convection** exige un fluide en mouvement : le fluide chaud, moins dense, monte et le fluide froid descend. Le **rayonnement** transporte l'énergie par ondes électromagnétiques, sans support matériel.

Flux thermique et résistance thermique

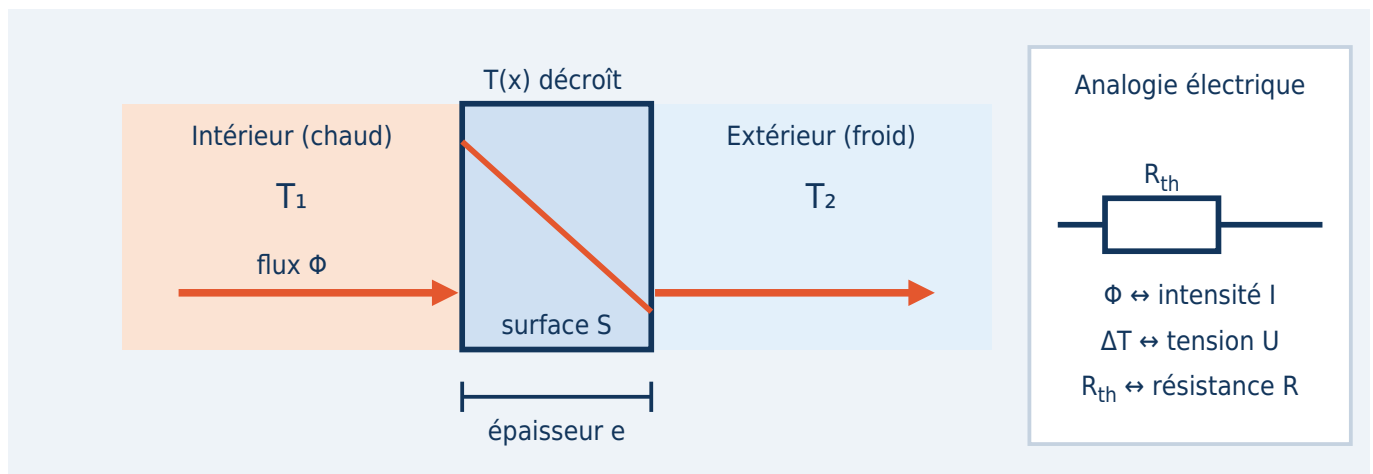
Pour comparer des transferts de durées différentes, on utilise le **flux thermique** Φ : c'est l'énergie transférée par unité de temps à travers une surface.

FORMULE À RETENIR

$$\Phi = Q \div \Delta t$$

Φ en watts (W), Q en joules (J), Δt en secondes (s). Le flux est toujours orienté du chaud vers le froid.

Dans une **paroi plane** d'épaisseur e , de surface S et de conductivité thermique λ , en régime permanent, la température varie linéairement entre les deux faces et le flux est proportionnel à l'écart de température.



Paroi plane en régime permanent : la température décroît linéairement et le flux va du chaud vers le froid.

LOI

La **résistance thermique** d'une paroi est $R_{th} = e \div (\lambda \times S)$, en $K \cdot W^{-1}$. Le flux à travers la paroi vérifie $\Phi = (T_1 - T_2) \div R_{th}$. Plus la résistance thermique est grande, plus la paroi isole. La conductivité λ s'exprime en $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$: environ 0,040 pour une laine de verre, 0,026 pour l'air immobile, 0,80 pour une brique, 1,0 pour le verre et 400 pour le cuivre.

APPLICATION NUMÉRIQUE

Un mur de brique de surface $S = 20 \text{ m}^2$, d'épaisseur $e = 0,20 \text{ m}$ ($\lambda = 0,80 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), sépare un intérieur à $19 \text{ }^\circ\text{C}$ d'un extérieur à $5 \text{ }^\circ\text{C}$. $R_{th} = 0,20 \div (0,80 \times 20) = 1,25 \times 10^{-2} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$. Le flux vaut $\Phi = (19 - 5) \div 1,25 \times 10^{-2} = 1,1 \times 10^3 \text{ W}$.

Associer des parois et isoler

Lorsque le flux traverse successivement plusieurs parois de même surface, les résistances thermiques **s'ajoutent** comme des résistances électriques en série : $R_{\text{tot}} = R_1 + R_2 + \dots$. Le flux est le même dans toutes les couches et la chute de température dans chacune vaut $\Delta T_i = \Phi \times R_i$: elle est la plus grande dans la couche la plus isolante.

EXEMPLE

On ajoute au mur précédent 10 cm de laine de verre ($\lambda = 0,040 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). $R_{\text{isol}} = 0,10 \div (0,040 \times 20) = 0,125 \text{ K}\cdot\text{W}^{-1}$, donc $R_{\text{tot}} = 0,0125 + 0,125 = 0,1375 \text{ K}\cdot\text{W}^{-1}$ et $\Phi = 14 \div 0,1375 \approx \mathbf{1,0 \times 10^2 \text{ W}}$. Les pertes sont divisées par environ onze : une couche mince d'un bon isolant pèse bien plus que la brique.

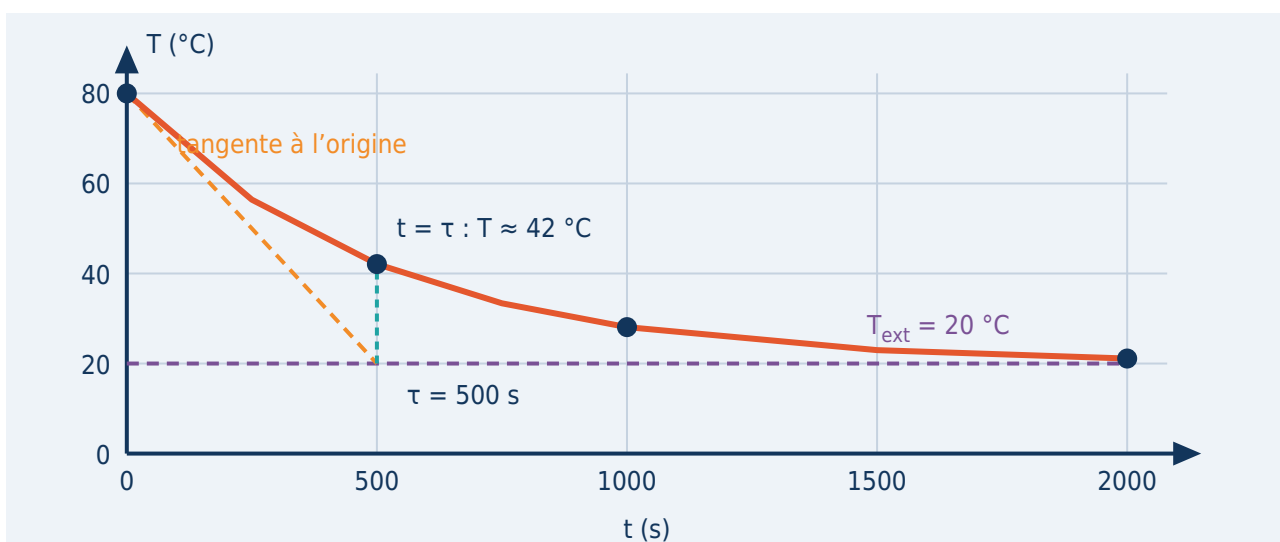
Loi de Newton et évolution de la température

Un objet de température T placé dans un milieu extérieur à la température constante T_{ext} échange de l'énergie avec lui. Quand les échanges se font surtout par conduction et convection à la surface, la **loi phénoménologique de Newton** donne le flux reçu par l'objet : $\Phi = h \times S \times (T_{\text{ext}} - T)$, où h est le coefficient de transfert surfacique ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$) et S l'aire de la surface d'échange.

Appliquons le bilan d'énergie à l'objet, de capacité thermique C (en $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$), qui ne reçoit aucun travail : pendant dt , la variation d'énergie interne est $dU = C dT = \Phi dt$. On obtient l'équation différentielle du premier ordre :

$$dT/dt + T/\tau = T_{\text{ext}}/\tau \quad \text{avec} \quad \tau = C \div (h S)$$

La solution qui vérifie $T(0) = T_0$ est $\mathbf{T(t) = T_{\text{ext}} + (T_0 - T_{\text{ext}}) e^{-t/\tau}}$. La grandeur τ , homogène à une durée ($\text{J}\cdot\text{K}^{-1} \div \text{W}\cdot\text{K}^{-1} = \text{s}$), est la **constante de temps** : plus la capacité est grande et plus l'isolation est bonne (hS petit), plus le système est lent à évoluer.



APPLICATION NUMÉRIQUE

Une boisson de capacité thermique $C = 1,0 \times 10^3 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ est servie à 80°C dans une pièce à 20°C ; on prend $hS = 2,0 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}$. Alors $\tau = 1,0 \times 10^3 \div 2,0 = \mathbf{5,0 \times 10^2 \text{ s}}$ et $T(t) = 20 + 60 e^{-t/500}$. À $t = \tau$, $T = 20 + 60 \times e^{-1} \approx \mathbf{42^\circ\text{C}}$: le système a parcouru 63 % de l'écart. À $t = 5\tau$, il reste moins de 1 % de l'écart initial : $T \approx 20,4^\circ\text{C}$. La température atteint 40°C quand $60 e^{-t/\tau} = 20$, soit $t = \tau \ln 3 \approx \mathbf{5,5 \times 10^2 \text{ s}}$.

Rayonnement thermique et bilan de la Terre

Tout corps émet un rayonnement qui dépend de sa température. Pour un corps noir (émetteur idéal), le flux surfacique émis est donné par la **loi de Stefan-Boltzmann**, et la longueur d'onde du maximum d'émission par la **loi de Wien**.

FORMULES À RETENIR

$$\varphi = \sigma T^4 \quad \text{et} \quad \lambda_{\text{max}} \times T = 2,90 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$$

φ en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, T en kelvins ($T = \theta + 273,15$), $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$, λ_{max} en mètres.

EXEMPLES

La surface du Soleil ($T \approx 5\,800 \text{ K}$) a un maximum d'émission à $\lambda_{\text{max}} = 2,90 \times 10^{-3} \div 5\,800 = \mathbf{5,0 \times 10^{-7} \text{ m} = 500 \text{ nm}}$, en plein visible. Un corps humain (310 K) émet autour de $2,90 \times 10^{-3} \div 310 \approx \mathbf{9,4 \mu\text{m}}$, dans l'infrarouge, avec $\varphi = \sigma \times 310^4 \approx \mathbf{5,2 \times 10^2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}}$.

La Terre reçoit du Soleil le flux surfacique $S_0 = 1\,361 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ sur un disque, soit en moyenne $S_0 \div 4 \approx 340 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ sur toute sa surface. Une part $A = 0,30$ (l'**albédo**) est réfléchi. À l'équilibre radiatif, la puissance absorbée est égale à la puissance émise : $(1 - A) \times S_0 \div 4 = \sigma T^4$, donc $(0,70 \times 1\,361 \div 4) = 238 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ et $T = (238 \div 5,67 \times 10^{-8})^{1/4} \approx \mathbf{255 \text{ K} (-18^\circ\text{C})}$. La température moyenne observée est de $288 \text{ K} (15^\circ\text{C})$: l'écart d'environ 33 K est dû à l'**effet de serre**, car les gaz de l'atmosphère absorbent une partie du rayonnement infrarouge émis par le sol et en renvoient une partie vers lui.

ERREUR FRÉQUENTE

Il ne faut pas confondre **chaleur** et **température** : la température est une grandeur d'état en kelvins ou en degrés Celsius, le transfert thermique Q est une énergie en joules. Autres pièges : oublier de convertir en kelvins dans σT^4 , confondre λ (conductivité) et la longueur d'onde, et croire que la température d'un système qui refroidit atteint exactement T_{ext} en un temps fini.

L'essentiel à retenir

- Trois modes : conduction, convection, rayonnement ; le transfert va spontanément du chaud vers le froid.
- Flux thermique : $\Phi = Q \div \Delta t$, en watts.
- Paroi plane : $R_{th} = e \div (\lambda S)$ et $\Phi = \Delta T \div R_{th}$; en série, les résistances s'ajoutent.
- Loi de Newton : $\Phi = h S (T_{ext} - T)$; avec $C dT = \Phi dt$, on obtient $T(t) = T_{ext} + (T_0 - T_{ext}) e^{-t/\tau}$ avec $\tau = C \div (h S)$.
- Après une durée τ , 63 % de l'écart est parcouru ; après 5τ , plus de 99 %.
- Stefan-Boltzmann : $\varphi = \sigma T^4$; Wien : $\lambda_{max} T = 2,90 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$.
- Équilibre radiatif de la Terre : $(1 - A) S_0 \div 4 = \sigma T^4$; l'effet de serre relève la température moyenne.