

Transferts thermiques

Manon LECONTE - ENS de Lyon

Dernière mise à jour : 2 février 2021

Merci à Joachim Galiana et Thibault Clarté pour leur précieuse aide.

Mots-clé : transfert thermique, rayonnement, convection, conduction, ailettes de refroidissement, transfert conducto-convectif, atmosphère, effet de serre.

Niveau : PC

Pré-requis :

- Thermodynamique : premier et second principes [PCSI]
- Corps noir : définition [secondaire]
- Diffusion de particules [PC]
- Electrocinétique – Circuits linéaires [PCSI]
- Régimes transitoires [PCSI]

Bibliographie :

- Perez, *Thermodynamique* [Niveau : ★★★]
- Guyon, *Hydrodynamique physique* [Niveau : ★★★]
- Donnini, *Dictionnaire de physique expérimentale* Tome II
- Fruchart, *Physique expérimentale* 2016
- Taillet, *Dictionnaire de physique* [Niveau : ★]
- Brébec, *Thermodynamique MP-PC-PSI*, HPrépa [Niveau : ★★]
- Sanz, *Physique tout-en-un PC*, Dunod [Niveau : ★★]

Plan proposé

I - Les différents types de transferts thermiques	3
A/ Rayonnement	3
B/ Conduction	3
C/ Convection	5
II - Refroidissement d'un ordinateur	5
A/ Diffusion thermique dans l'ailette	6
B/ Transferts thermiques avec l'air extérieur	7
III - Effet de serre de l'atmosphère	8
A/ En l'absence d'atmosphère	8
B/ Prise en compte de l'atmosphère	9

Liste de matériel

Diffusion à travers une barre de cuivre calorifugée

- Barre de cuivre calorifugée ;
- Fils banane ;
- Carte d'acquisition Sysam ;
- Ordinateur avec Latispro.

Introduction pédagogique

Les différents types de transferts sont présentés rapidement dans une première partie. En effet, si la conduction thermique est présentée en détail dans le programme de PC, la convection et le rayonnement ne sont présentés que de manière qualitative. Dans une deuxième partie, on étudie un exemple, les barrettes de refroidissement d'ordinateur, qui permettent de réinvestir ce qui a été vu en conduction, en convection et de présenter un dernier type de transfert thermique : le transfert conducto-convectif.

On fait de plus une analogie avec l'électrocinétique pour présenter la notion de résistance thermique.

La dernière partie présente un exemple au programme : l'effet de serre. Il permet d'appliquer les lois du rayonnement qui viennent d'être vues.

Difficultés :

- définitions nombreuses et précises des différents termes de la leçon ;
- élaboration du bilan énergétique pour obtenir l'équation de diffusion ;
- résolution de la sous-partie sur le transfert conducto-convectif.

Exemples de TD : analogies électrocinétiques, rayonnement et diffusion thermique.

Exemples de TP : barre calorifugée (présentée ici), conductiscope, thermoscope, rouleaux de convection.

Introduction

Définition – Premier principe de la thermodynamique : pour un système fermé,

$$\Delta U + \Delta E_m = Q + W \quad (1)$$

avec U l'énergie interne, E_m l'énergie mécanique et W les travaux des forces non conservatives s'appliquant sur le système.

Ce cours s'attache à déterminer l'origine du transfert thermique Q , qui peut être issu du rayonnement, de la conduction ou de la convection.

Définition – Transfert thermique : mode d'échange d'énergie où les degrés de liberté microscopiques sont excités indépendamment et de manière désordonnée, sans influence sur les degrés de liberté macroscopiques. Ce terme est le synonyme de **chaleur**.

 Le transfert thermique est à distinguer de la **température**, grandeur thermodynamique macroscopique décrivant l'agitation thermique (phénomène microscopique) d'un système.

Objectifs – Savoir faire la différence entre les 3 types de transferts thermiques. Se familiariser avec les équations de diffusion.

I - Les différents types de transferts thermiques

A/ Rayonnement

Définition – Rayonnement : transfert thermique à distance ne nécessitant pas de milieu matériel et instantané.

Dans la suite, on fait l'**hypothèse du corps noir** : le système absorbe toute la lumière qu'il reçoit, quelle que soit la longueur d'onde incidente.

Quand on chauffe ce corps, il émet un **flux thermique** (puissance en W) : $\Phi = \phi_s S$, avec ϕ_s la densité surfacique de flux en W/m^2 .

Définition – Loi de Stefan-Boltzmann : à l'équilibre,

$$\phi_s = \sigma T^4 \quad (2)$$

avec $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$ la **constante de Stefan-Boltzmann** et T la **température de surface** du corps noir.

Définition – Loi du déplacement de Wien : pour un rayonnement d'équilibre d'un corps noir,

$$\lambda_m T \simeq 2,90 \times 10^{-3} m K \quad (3)$$

Remarque : La loi de Planck donne une expression plus complète de ϕ_s , notamment sa répartition spectrale.

Exemple – Rayonnement d'un être humain – Application 3, HPrépa, Thermodynamique MP-PC-PSI (p. 90)

B/ Conduction

Définition – Conduction : l'énergie thermique se transmet de proche en proche dans un milieu matériel. Ce transfert thermique est un phénomène de **diffusion**.

Par analogie avec la diffusion particulaire (diffusion du plus au moins concentré), on peut intuitivement que le transfert thermique a lieu de la température la plus élevée vers la température la plus basse, de proche en proche.

Définition – Loi de Fourier :

$$\vec{j}_{th} = -\lambda \overrightarrow{grad} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4)$$

avec j_{th} la **densité surfacique de flux thermique** en W/m^2 et λ la **conductivité** en $W/m/K$.

λ caractérise la conductivité d'un matériau, elle peut valoir de 0,1 W/m/K pour l'air à 400 W/m/K pour le cuivre.

La loi de Fourier est une loi expérimentale. Elle n'est valable que dans certaines conditions :

- gradient de température pas trop important ;
- milieu homogène et isotrope.

Cette équation est cohérente avec les résultats obtenus pour la diffusion : \vec{j}_{th} est dans le sens opposé du transfert thermique.

Considérons un cylindre homogène de section S suivant la direction x , de masse volumique ρ , de conductivité thermique λ et de capacité thermique massique c tous constants dans le domaine de températures étudié. On suppose que la température ne dépend que de x et de t et qu'il n'y a pas d'autres types de transfert thermique que la conduction. On fait un bilan d'énergie entre t et $t + dt$ sur le système $\{dm = \rho S dx\}$.

On obtient l'équation de la chaleur :

$$\frac{\lambda}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial T}{\partial t} \tag{5}$$

Généralisation en 3 dimensions :

$$\frac{\lambda}{\rho c} \Delta T = \frac{\partial T}{\partial t} \tag{6}$$

| **Démonstration** – HPrépa, *Thermodynamique MP-PC-PSI* (p. 37).

| **Remarque** – Ce phénomène est **irréversible** : si on fait la transformation $t \rightarrow -t$, on obtient l'opposé de cette équation.

Analogie électrique

Diffusion thermique	Electricité
Température T	Potentiel V
Différence de température ΔT	Tension U
Flux thermique Φ	Courant I
Résistance thermique $R_{th} = \frac{\Delta T}{\Phi}$	Loi d'Ohm : $R = \frac{U}{I}$
<i>Dans un cylindre de longueur l et de section S</i>	
$R = \frac{l}{\lambda S}$	$R = \frac{l}{\sigma S}$

C/ Convection

Définition – Convection : transport d'une quantité physique (ici du transfert thermique) qui accompagne le mouvement macroscopique d'un fluide.

On parle de convection **naturelle** quand elle est due à une instabilité.

I Vidéo – Convection naturelle.

Ce phénomène est dû à la différence de température entre le haut et le bas du béccher, qui induit une différence de masse volumique.

Remarque – On observe le mouvement des particules mais c'est bien le fluide qui se déplace.

Le mouvement de convection naturelle finit par être atténué par la diffusion, qui homogénéise la température, et la viscosité du fluide qui s'oppose à sa mise en mouvement.

On parle de convection **forcée** lorsque la cause est extérieure.

Exemple – Agitation mécanique.

La convection est annulée par la diffusion thermique et la viscosité du fluide. On le verra plus tard dans un cours de mécanique des fluides.

II - Refroidissement d'un ordinateur

⇒ Pourquoi a-t-on besoin de refroidir un ordinateur ?

Le processeur chauffe lors de son utilisation (par effet Joule) et si on ne le refroidit pas, il perd énormément en puissance.

On utilise pour cela des ailettes de refroidissement (figure 1).

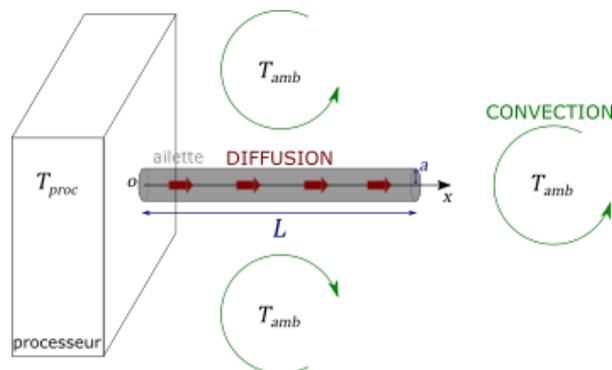


Figure 1 – Schéma d'une ailette de refroidissement.

A/ Diffusion thermique dans l'ailette

Dans un premier temps, modélisons les transferts thermiques au sein de l'ailette, majoritairement dus à la conduction thermique.

1) Régime stationnaire

Hypothèse : l'ordinateur est allumé depuis longtemps. On se place donc au régime stationnaire. L'équation de la chaleur s'exprime :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

La température est donc un fonction affine de la position x . **Conditions aux limites** : $T(0) = T_{proc}$ et $T(L) = T_{amb}$. On en déduit l'expression de la température :

$$T(x) = T_{proc} + \frac{T_{amb} - T_{proc}}{L} x \quad (8)$$

On veut vérifier ce phénomène avec une expérience (figure 2).

Expérience – Diffusion thermique à travers une barre de cuivre calorifugée. Une résistance thermique chauffe un des côtés de la barre de cuivre. L'autre côté est au contact de l'air ambiant. Des capteurs sont régulièrement placés selon l'axe x . On acquiert la variation de température au cours du temps sur un temps long (120 min).

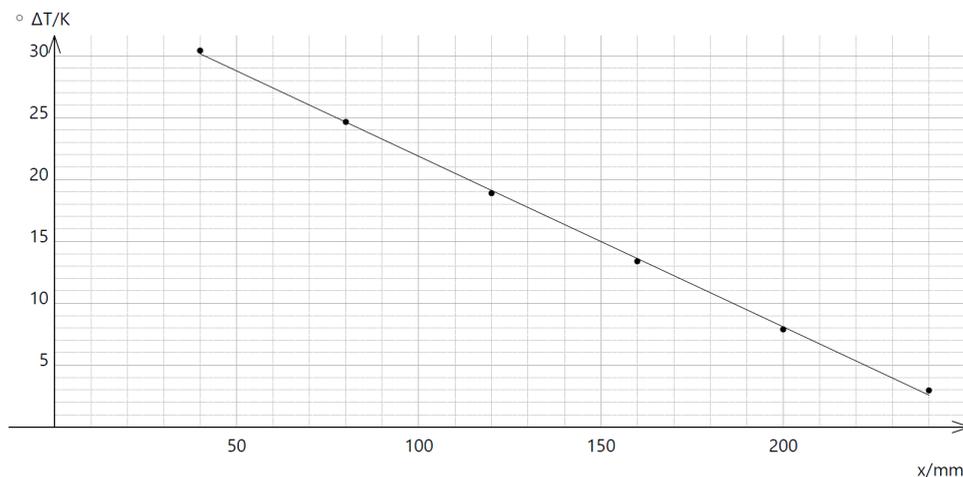


Figure 2 – Evolution de la température le long de l'axe (Ox) au régime permanent.

2) Régime transitoire

L'expression de la température au régime transitoire est :

$$T(x, t) = T_f(x) - T_0 a(x) \exp(-t/\tau) \quad (9)$$

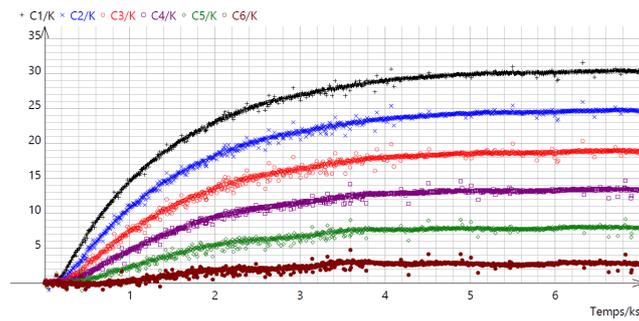


Figure 3 – Evolution de la température au cours du temps pour les 6 capteurs (C_i) au régime transitoire.

On trace le logarithme de la différence de température. On s'attend à trouver la même pente pour tous les capteurs (figure 4).

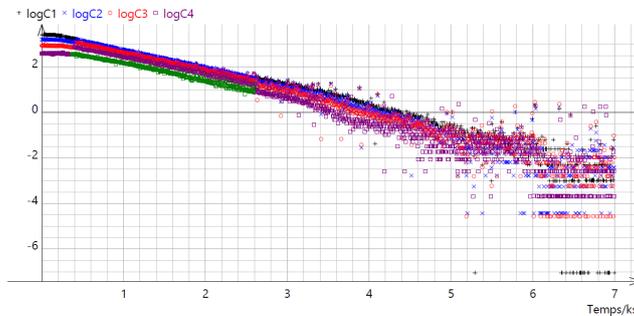


Figure 4 – Evolution du logarithme de la différence de température en fonction du temps pour les 6 capteurs.

On mesure $\tau = 1\,310 \pm 20$ s. Cette manipulation prend effectivement beaucoup de temps : il faut atteindre plusieurs τ pour atteindre le régime permanent.

B/ Transferts thermiques avec l'air extérieur

L'expérience qu'on a menée ne correspond pas à la réalité de l'ailette : la barre de cuivre est ici calorifugée. Il faut compléter le modèle.

1) Transfert conducto-convectif

Définition – Transfert conducto-convectif : transfert aux interfaces entre un solide et un fluide.

Il y a diffusion au niveau du solide et convection au niveau du fluide (figure 1). Ce transfert thermique est défini par la loi de Newton :

$$\Phi_{sol \rightarrow flu} = hS(T_{sol} - T_{flu}) \tag{10}$$

avec h de l'ordre de 1 à 100 W/m/K.

On l'intègre à l'équation de la chaleur au régime stationnaire lors de la mise en équation, au niveau du bilan des flux entrants et sortants, ce qui donne :

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \frac{1}{X^2}(T(x) - T_{amb}) = 0, \text{ où } X = \sqrt{\frac{a\lambda}{2h}}.$$

On obtient une expression de la température :

$$T(x) = T_{air} + (T_{proc} - T_{air})e^{-x/X} \quad (11)$$

Remarque – Calcul de l'efficacité de l'ailette dans HPrépa, *Thermodynamique MP-PC-PSI* (p. 56).

2) Transfert convectif

Pour refroidir l'air au voisinage de l'ordinateur et maintenir la température autour de l'ailette à T_{air} , on a recourt à des ventilateurs qui génèrent de la convection forcée.

III - Effet de serre de l'atmosphère

Source – HPrépa, *Thermodynamique* (p. 98) et *Physique tout-en-un PC* (p. 167).

On fait l'hypothèse que la Terre, l'atmosphère et le Soleil sont des corps noirs.

Données

- température du Soleil : $T_S = 5\,600\text{ K}$;
- rayon du Soleil : $R_S = 6,97 \times 10^5\text{ km}$;
- distance Terre-Soleil : $d = 1,44 \times 10^8\text{ km}$;
- rayon terrestre : $r_T = 6\,400\text{ km}$;
- albedo terrestre : $A = 0,31$;
- albedo de l'atmosphère : $\alpha = 0,33$;
- épaisseur de l'atmosphère : $e = 30\text{ km}$.

A/ En l'absence d'atmosphère

On utilise la loi de Stefan-Boltzmann pour déterminer la température de la Terre :

$$\phi_S = \sigma T_S^4 \quad (12)$$

la puissance surfacique rayonnée par le Soleil. On en déduit la valeur de la puissance totale rayonnée par le Soleil (c'est cette grandeur qui se conserve) :

$$\mathcal{P}_S = \sigma T_S^4 \times 4\pi R_S^2 \quad (13)$$

Lorsque le rayonnement atteint la Terre, il couvre une sphère de rayon d . La puissance surfacique reçue par la Terre vaut donc :

$$\phi_T = \sigma T_S^4 \times \frac{R_S^2}{d^2} \quad (14)$$

On en déduit la puissance totale reçue par la Terre, dont la surface apparente est un disque de rayon r_T :

$$\mathcal{P}_{S/T} = \sigma T_S^4 \times \frac{R_S^2}{d^2} \times \pi r_T^2 \quad (15)$$

En outre, la Terre possède un **albedo** A : elle réfléchit une part A du rayonnement reçu et absorbe le reste. Le bilan thermique de la Terre est donc :

$$(1 - A)\mathcal{P}_{S/T} = (1 - A)\sigma T_S^4 \pi \frac{R_S^2 r_T^2}{d^2} = \sigma T_T^4 \times 4\pi r_T^2 \quad (16)$$

On en déduit l'expression de la température de la Terre sans atmosphère :

$$T_T = T_S \sqrt[4]{\frac{(1 - A)R_S^2}{4d^2}} \quad (17)$$

| Application numérique – $T_T = 250 \text{ K} = -22^\circ \text{C}$.

Cette température est bien trop faible car elle ne permet pas la présence d'eau liquide et donc de vie sur Terre. Il faut absolument prendre en compte le rôle de l'atmosphère dans le calcul.

B/ Prise en compte de l'atmosphère

Pour prendre en compte le rôle de l'atmosphère, on va raisonner sur deux systèmes. On suppose les températures de l'atmosphère T_{atm} et à la surface de la Terre T_S uniformes.

Tout d'abord, on considère le système {atmosphère + Terre}. Il reçoit une puissance $(1 - \alpha)\mathcal{P}_{S/atm}$ de la part du Soleil, où α est l'albedo du Soleil. Le bilan thermique de l'atmosphère est donc :

$$(1 - \alpha)\mathcal{P}_{S/atm} = \sigma T_{atm}^4 \times 4\pi r_{atm}^2 \simeq \sigma T_{atm}^4 \times 4\pi r_T^2 \quad (18)$$

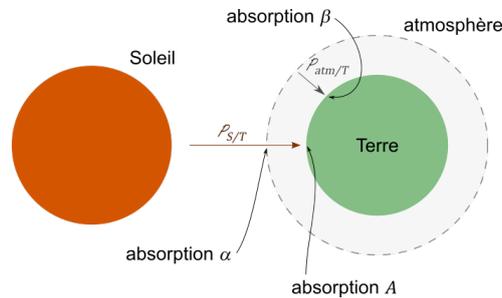
la différence entre les rayons de la Terre et de l'atmosphère étant négligeable devant la distance Terre-Soleil.

On en déduit la valeur de la température de l'atmosphère :

$$T_{atm} = T_S \sqrt[4]{\frac{(1 - \alpha)R_S^2}{4d^2}} \quad (19)$$

| Application numérique – $T_{atm} = 250 \text{ K} = -24^\circ \text{C}$.

On considère maintenant le second système {Terre}. On peut représenter les transferts thermiques entre le Soleil, l'atmosphère et la Terre à l'aide du schéma suivant :



Le bilan thermique de la Terre est le suivant :

$$(1 - \alpha)(1 - A)\mathcal{P}_{S/atm} + \beta\sigma T_{atm}^4 \times 4\pi(r_T + e)^2 = \sigma T_T^4 \times 4\pi r_T^2 \quad (20)$$

On trouve un terme en plus correspondant à la puissance rayonnée par l'atmosphère. La Terre en absorbe une partie $\beta = 0,9$. On peut faire la simplification $e + r_T \simeq r_T$, l'épaisseur de la l'atmosphère e étant très petite devant le rayon de la Terre r_T .

On en déduit la température à la surface de la Terre :

$$T_T = \sqrt[4]{T_S^4 \frac{(1 - \alpha)(1 - A)R_S^2}{4d^2} + T_{atm}^4 \beta} \quad (21)$$

| Application numérique – $T_T = 280 \text{ K} = 7,0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Cette température est plus acceptable car elle permet la présence d'eau liquide sur Terre.

Limites du modèle

- Le traitement ci-dessus ne prend pas en compte les longueurs d'onde des rayonnements. Or, la Terre tout comme l'atmosphère n'absorbent pas de la même manière chaque longueur d'onde du rayonnement du Soleil ;
- L'hypothèse du corps noir est assez abusive, en particulier pour l'atmosphère et pour la Terre : l'énergie qu'elles absorbent n'est pas totalement retransmise en rayonnement. La Terre rend notamment une partie de cette énergie pour permettre l'évaporation des océans.

Conclusion

Le transfert thermique peut se faire par trois modes : par conduction, par convection et par rayonnement. Les équations de diffusion vues dans le cas de la conduction thermique sont réexploitables dans de nombreux domaines de la physique

On a vu que pour le système de refroidissement d'un ordinateur, trois modes de transferts thermiques étaient mis en jeu. Il existe également d'autres manières de refroidir un ordinateur (*water pooling*).

On a également compris l'intérêt de l'atmosphère dans la présence d'eau liquide sur Terre, ce qui a permis l'installation de la vie. Sans atmosphère, la Terre aurait été trop froide.