THERMODYNAMIQUE

5 – Transferts thermiques

Plan du chapitre

Programme officiel – Premier semestre – **Thème E – énergie : conversion et transfert**

Notions	Capacités exigibles
E.2. Bilan d'énergie pour un système thermodynamique	
Transferts thermiques.	
Modes de transferts thermiques. Transformation adiabatique.	Caractériser qualitativement les trois modes de transfert thermique : conduction, convection et rayonnement.
Flux thermique conductif en géométrie unidimensionnelle ; résistance thermique. Flux thermique conducto-convectif : loi de Newton.	Exploiter la relation entre flux thermique, résistance thermique et écart de température, l'expression de la résistance étant fournie.
Approche descriptive du rayonnement du corps noir. Loi de déplacement de Wien, loi de Stefan-Boltzmann.	Utiliser les expressions fournies des lois de déplacement de Wien et de Stefan-Boltzmann pour expliquer qualitativement l'effet de serre.

1 Forme désordonnée des échanges d'énergie

1.1 Différentes formes de transferts thermiques

Transfert thermique par conduction

La **conduction thermique** est propagation à travers un milieu matériel séparant deux zones de températures différentes.

Transfert thermique par convection

La **convection thermique** est un transfert thermique associé à un transfert de matière dont la température est différente de celle de son environnement.

Transfert thermique par rayonnement

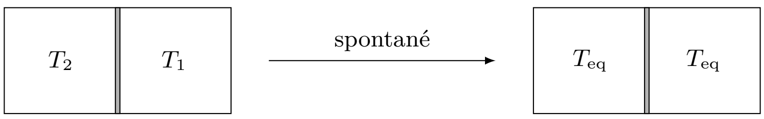
Le rayonnement électromagnétique permet un transfert d'énergie transportée par les photons.

Le transfert thermique est un transfert d'énergie par des **mouvements désordonnés**. C'est un transfert d'énergie difficilement utilisable : c'est une **forme dégradée** de l'énergie.

1.2 Transfert thermique par conduction

1.2.1 Flux thermique sous l'effet d'une différence de température

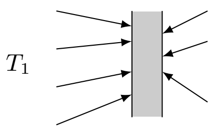
Deux zones de températures T_1 et $T_2 < T_1$ en contact évoluent spontanément de sorte à atteindre une température T_{eq} intermédiaire.

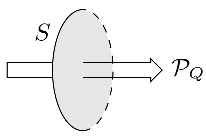


Mise à l'équilibre thermique

La température tend à s'uniformiser au sein d'un système ou entre deux systèmes en contact.

- À l'échelle microscopique (moléculaire), l'uniformisation de température est due à un transfert d'énergie de proche en proche par des chocs (transfert désordonné d'énergie).
- À l'échelle macroscopique, l'uniformisation de température se décrit par l'existence d'un flux d'énergie thermique (flux de chaleur) de la zone chaude vers la zone froide.





Flux thermique

Le flux thermique à travers une surface S est la quantité d'énergie thermique passant par S par unité de temps :

$$\mathcal{P}_Q = \frac{\delta Q}{\mathrm{d}t}$$

Unité du flux thermique

Le transfert thermique entre une date t_1 et une date t_2 s'obtient en sommant tous les termes $\delta Q = \mathcal{P}_Q \times \mathrm{d}t$ sur cet intervalle de temps.

Transfet thermique total à travers S

Le transfert thermique total à travers S entre les dates t_1 et t_2 est :

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \delta Q = \int_{t_1}^{t_2} \mathcal{P}_Q \,\mathrm{d}t$$

Transfert thermique à une puissance thermique constante

Soit un flux thermique constant $\mathcal{P}_Q = 10\,\mathrm{W}$ à travers un mur. Quelle est le transfert thermiqueà travers le mur pendant $1\,\mathrm{h}$?

Transfert thermique à puissance thermique variable

Soit un flux thermique variable avec le temps selon la loi $\mathcal{P}_Q = A\,\mathrm{e}^{-t/\tau}$ à travers un mur. Quel est le transfert thermique à travers le mur entre $t_1 = 0$ et $t_2 = 1\,\mathrm{h}$? Application numérique : $A = 10\,\mathrm{W}$ et $\tau = 3\,\mathrm{h}$. Même question entre $t_1 = 0$ et un temps très long.

Application 1 : transfert thermique à puissance thermique variable

Soit un flux thermique à travers un mur évoluant selon la loi : $\mathcal{P}_Q = A - B \times t$, avec A et B constants. Quelle est le transfert thermique à travers le mur entre t_1 et t_2 ? Faire l'application numérique pour $A = 10\,\mathrm{W}$, $B = 1 \cdot 10^{-2}\,\mathrm{W}\cdot\mathrm{s}^{-1}$, $t_1 = 0$ et $t_2 = 20\,\mathrm{min}$.

Analogie avec l'électricité

transfert thermique	électricité
puissance thermique $\mathcal{P}_Q$	
transfert thermique Q	

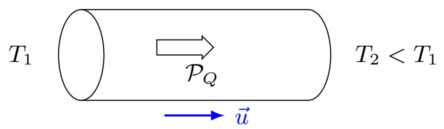
1.2.2 Expression du flux thermique en régime stationnaire

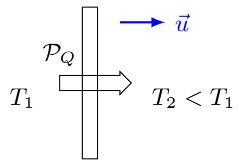
Régime stationnaire

On se trouve en **régime stationnaire** lorsque les grandeurs physiques du problème sont **constantes au cours du temps**.

Régime quasi-stationnaire

On se trouve en **régime quasi-stationnaire** lorsque les grandeurs physiques du problème évoluent lentement au cours du temps.





Expression du flux thermique par conduction

Le flux thermique à travers un milieu matériel séparant deux zones de températures T_1 et T_2 en régime stationnaire (T_1 et T_2 constantes) ou quasi-stationnaire (T_1 et T_2 variant très lentement) est :

$$\boxed{\mathcal{P}_Q = \frac{T_1 - T_2}{R_{\text{th}}}}$$

Résistance thermique

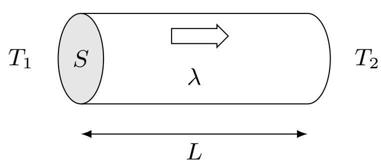
R_{th} est la résistance thermique du milieu. Elle s'exprime en $\text{K} \cdot \text{W}^{-1}$.

Analogie avec l'électricité

transfert thermique	électricité
puissance thermique $\mathcal{P}_Q$	
différence de température $T_1 - T_2$	
résistance thermique R_{th}	
$\mathcal{P}_Q = \dfrac{T_1 - T_2}{R_{\text{th}}}$	

1.2.3 Résistance thermique

Soit un flux thermique traversant un milieu d'épaisseur L (épaisseur traversée par le flux) et de surface S (surface traversée par le flux).



Expression de la résistance thermique

La résistance thermique dépend de l'épaisseur traversée, de la surface traversée et de la conductivité thermique λ du matériau :

$$R_{\mathrm{th}} = \frac{1}{\lambda} \times \frac{L}{S}$$

Unité de la conductivité thermique

Calcul d'une résistance thermique

Soit un box de sauna de largeur $\ell = 2\,\mathrm{m}$, de longueur $L = 2{,}5\,\mathrm{m}$ et de hauteur $2\,\mathrm{m}$ dont les parois et le plafond sont faits de planches de bois ($\lambda = 0{,}15\,\mathrm{W\cdot K^{-1}\cdot m^{-1}}$) d'épaisseur $20\,\mathrm{cm}$. Calculer la résistance thermique des 5 parois.

Calcul d'un flux thermique

Le sauna est maintenu à $35\,°\mathrm{C}$ et l'air extérieur est à $-10\,°\mathrm{C}$. Calculer le flux thermique à travers les 5 parois.

Association de résistances en série

Deux résistances thermiques sont associées en série si le flux thermique les traverse l'une après l'autre.

Résistance équivalente à deux résistances en série

Deux résistances thermiques $R_{\mathrm{th}\,1}$ et $R_{\mathrm{th}\,2}$ en série sont équivalentes à une résistance thermique unique :

Exemple de résistances en série

Une paroi en béton ($\lambda_1 = 0{,}92\,\mathrm{W\cdot K^{-1}\cdot m^{-1}}$) d'épaisseur $30\,\mathrm{cm}$ et de surface $10\,\mathrm{m^2}$ est doublée d'une épaisseur $10\,\mathrm{cm}$ de laine de verre ($\lambda_2 = 0{,}03\,\mathrm{W\cdot K^{-1}\cdot m^{-1}}$). Calculer la résistance thermique totale de la paroi.

Application 2 : double vitrage

Calculer la résistance thermique d'une vitre de $S = 1\,\mathrm{m^2}$ et d'épaisseur $e = 5\,\mathrm{mm}$. Calculer la résistance thermique d'un ensemble de deux vitres d'épaisseur e et de surface S séparées d'une épaisseur $e' = 3\,\mathrm{mm}$ d'air. Conductivités thermiques du verre : $\lambda_v = 1{,}2\,\mathrm{W\cdot K^{-1}\cdot m^{-1}}$, et de l'air : $\lambda_a = 0{,}026\,\mathrm{W\cdot K^{-1}\cdot m^{-1}}$.

Association de résistances en parallèle

Deux résistances thermiques sont associées en parallèle si le flux thermique traverse soit l'une soit l'autre.

Résistance équivalente à deux résistances en parallèle

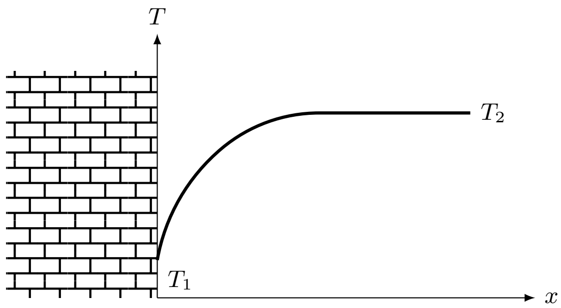
Deux résistances thermiques $R_{\text{th}\,1}$ et $R_{\text{th}\,2}$ en parallèle sont équivalentes à une résistance thermique unique telle que :

Exemple de résistances en parallèle

Dans une paroi en béton ($\lambda_1 = 0{,}92\,\mathrm{W\cdot K^{-1}\cdot m^{-1}}$) d'épaisseur 30 cm et de surface $10\,\mathrm{m^2}$, on perce une fenêtre de $1\,\mathrm{m^2}$ fermée par une vitre en verre ($\lambda_2 = 1{,}2\,\mathrm{W\cdot K^{-1}\cdot m^{-1}}$) d'épaisseur 0,5 cm. Calculer la résistance thermique totale de la paroi.

1.3 Transfert thermique conducto-convectif

À l'interface entre un solide et un fluide (gaz ou liquide), la température à la surface du solide n'est généralement pas égale à la température du fluide loin de l'interface.



Transfert thermique conducto-convectif

On appelle **transfert thermique conducto-convectif** le transfert thermique entre la surface d'un solide et un fluide environnant de température différente.

Loi de Newton

La puissance thermique transférée de la zone de température T_1 vers la zone de température $T_2 < T_1$ à travers la surface S en régime stationnaire est de la forme :

$$\boxed{\mathcal{P}_Q = h \times S \times (T_1 - T_2)}$$

Coefficient conducto-convectif

h est le **coefficient conducto-convectif** ou **coefficient de transmission thermique**.
Son unité est le $\mathrm{W\cdot m^{-2}\cdot K^{-1}}$

Résistance thermique associée

Le terme $\dfrac{1}{h \times S}$ est homogène à une résistance thermique.
Il peut se combiner à d'autre résistances thermiques selon les lois habituelles.

Le coefficient conducto-convectif dépend :
- de la nature du solide,
- de la nature du fluide,
- des conditions du fluide (au repos, agité, etc).

Évacuation d'énergie thermique d'un cube chauffé

Un cube de fer de 30 cm d'arête et porté à une température de 70 °C est posé sur le sol dans un air environnant à 20 °C. Calculer l'énergie thermique évacuée par le cube en 30 s en supposant que la température du cube n'est pas modifiée durant cet intervalle de temps. Le coefficient conducto-convectif du fer à l'air immobile est $h = 5{,}8\,\mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$.

Application 3 : déperdition d'énergie thermique d'une conduite d'eau

De l'eau chaude circule dans une conduite métallique se trouvant dans l'air. La perte thermique par mètre de tuyau est de $105\,\mathrm{W \cdot m^{-1}}$ pour une différence de température de 60 °C entre l'eau et l'air. Sachant que le diamètre du tuyau est de 40 mm, estimer le coefficient conducto-convectif de ce dispositif.

1.4 Transfert thermique par rayonnement

1.4.1 Puissance totale rayonnée

- Le transfert d'énergie par rayonnement est inévitable dès qu'un corps est à une température non nulle.
- C'est un transfert désordonné : les photons sont émis dans toutes les directions.
- L'étude du transfert thermique par rayonnement est bien théorisée pour des corps idéaux appelés corps noirs.
- On supposera que les systèmes physiques qu'on étudie se comportent comme des corps noirs.

Loi de Stefan-Boltzmann

Soit un corps à une température T. Une surface S de ce corps émet par rayonnement un flux énergétique total donné par la **loi de Stefan-Boltzmann** :

$$\boxed{\Phi = \sigma \times S \times T^4}$$

avec $\sigma = 5{,}6705 \cdot 10^{-8}\,\mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}}$ la constante de Stefan-Boltzmann.

Puissance rayonnée par un filament

Les ampoules à incandescence émettent de la lumière grâce à un filament de tungstène porté à environ 2490 °C. Un filament typique est un cylindre de diamètre 20 µm et de longueur 4 cm. Calculer la puissance émise par rayonnement.

Énergie rayonnée par un filament

Calculer l'énergie rayonnée par le filament précédent pendant 24 h.

Application 4 : rayonnement thermique d'un humain

Estimer le flux thermique émis par un humain par rayonnement. On pourra modéliser un humain par une forme géométrique simple.

1.4.2 Longueur d'onde émise

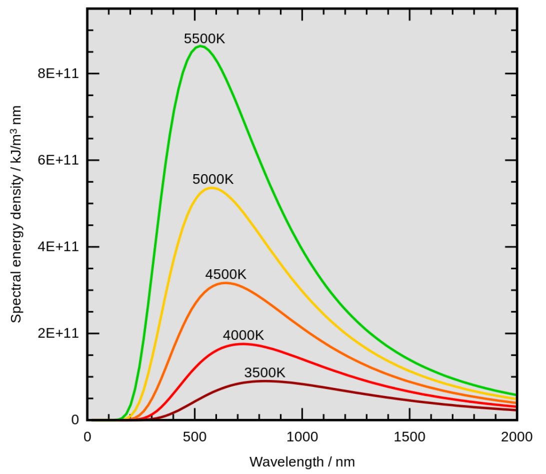
- La loi de Stefan-Boltzmann donne la puissance totale rayonnée.
- Le rayonnement a lieu à toutes les longueurs d'onde.
- Le rayonnement est inégalement réparti sur les différentes longueurs d'onde.

Loi du déplacement de Wien

La **loi du déplacement de Wien** donne la longueur d'onde à laquelle la puissance rayonnée par un corps de température T est maximale :

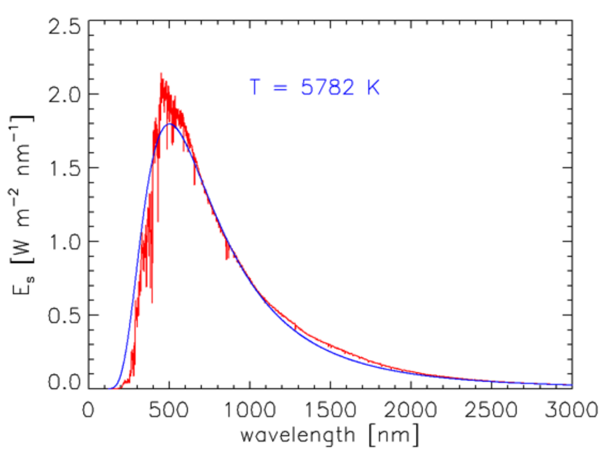
$$\boxed{\lambda_{\text{max}} = \frac{b}{T}}$$

où $b = 2{,}8978 \cdot 10^{-3}\ \text{m} \cdot \text{K}$ est la constante de Wien.



Loi de Wien

https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1017820



Spectre solaire et modèle du corps noir

Longueur d'onde émise par un humain

Calculer la longueur d'onde à laquelle le rayonnement d'un humain est maximal. Application ?

Application 5 : température d'une flamme

Dans une flamme sortant d'un brûleur à gaz, la couleur évolue du bleu au centre au rouge sur les bords. Estimer les températures au centre et sur les bords de la flamme. Commenter les valeurs obtenues.

1.5 Transformation adiabatique

Il peut être intéressant d'éviter les transferts thermiques :
- pour confiner l'énergie à l'intérieur d'un système (isolation d'un logement),
- pour maximiser les transferts ordonnés d'énergie.

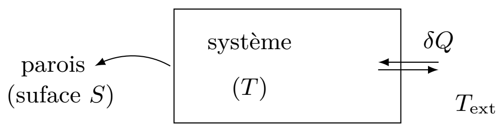
Transformation adiabatique

Une transformation telle qu'aucun transfert n'ait lieu entre le système et le milieu extérieur est appelée une **transformation adiabatique**.

Pour réaliser une transformation adiabatique, il faut éliminer toutes les causes de transfert thermique.
- Le transfert par convection est nul si on enferme le système avec des parois.
- Le transfert par rayonnement est quasiment impossible à éliminer complètement (au mieux il est minimisé avec des parois intérieures réfléchissantes).
- Il faut limiter le transfert thermique par conduction à travers les parois du système.

Puissance thermique reçue par conduction par le système pendant la durée dt à travers une paroi de résistance thermique R_{th} :

$$\mathcal{P}_{Q\,\text{reçue}} = \frac{\delta Q_{\text{reçue}}}{\mathrm{d}t} = \frac{T_{\text{ext}} - T}{R_{\text{th}}}$$



Parois athermanes et diathermanes

Une paroi est dite **diathermane** si elle permet un transfert thermique.
Une paroi est dite **athermane** ou **calorifugée** si elle empêche un transfert thermique.

Conditions pratiques pour réaliser une transformation adiabatique

Il est possible de réaliser une transformation adiabatique :
- soit en travaillant dans une enceinte calorifugée (parois athermanes),
- soit en opérant très rapidement.

1.6 Transformation isotherme ; thermostat

Transformation isotherme

Une transformation telle que la **température du système reste constante** est une **transformation isotherme**.

Pour réaliser une transformation isotherme, il faut que le système :
- évacue de l'énergie thermique s'il a tendance à s'échauffer,
- reçoive de l'énergie thermique s'il a tendance à se refroidir.

Il faut que le système soit au contact d'un « réservoir d'énergie ».

Thermostat

Un **thermostat** est un dispositif capable en théorie de céder ou absorber une quantité infinie d'énergie, sans que sa température ne soit modifiée.

En pratique, un thermostat peut être :
- un dispositif très grand devant la taille du système (atmosphère, océan, lac, sous-sol...) ,
- un fluide constamment renouvelé (circuit de refroidissement).

Les transferts thermiques avec le thermostat se font par conduction. Les conditions sont exactement inverses de celles d'une transformation adiabatique.

Réalisation d'une transformation isotherme

Il est possible de réaliser une transformation isotherme en opérant lentement dans une enceinte aux parois diathermanes au contact avec un thermostat de température constante.

2 Bilans de puissance

2.1 Bilans d'énergie et d'enthalpie en puissance

Écriture du premier principe en puissance

Énoncé du premier principe en terme de puissance (en particulier pour obtenir l'évolution de T au cours du temps), en notant $\mathrm{P}_W = \delta W/\,\mathrm{d}t$ et $\mathrm{P}_Q = \delta Q/ddt$:

$$\boxed{\frac{\mathrm{d}E_c}{\mathrm{d}t} + \frac{\mathrm{d}E_p}{\mathrm{d}t} + \frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}t} = \mathcal{P}_{W_p\,\text{reçu}} + \mathcal{P}_{W^*\,\text{reçu}} + \mathcal{P}_{Q\,\text{reçue}}}$$

Bilan enthalpique

Soit une **transformation monobare** telle que l'équilibre de pression avec l'extérieur soit réalisé à l'état initial et à l'état final

Énoncé du bilan enthalpique en terme de puissance (en particulier pour obtenir l'évolution de T au cours du temps), en notant $\mathrm{P}_{W^*} = \delta W^*/\,\mathrm{d}t$ et $\mathrm{P}_Q = \delta Q/ddt$:

$$\boxed{\frac{\mathrm{d}E_c}{\mathrm{d}t} + \frac{\mathrm{d}E_p}{\mathrm{d}t} + \frac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}t} = \mathcal{P}_{W^*\,\text{reçu}} + \mathcal{P}_{Q\,\text{reçue}}}$$

2.2 Évolution de la température en fonction du temps

2.2.1 Temps de mise en chauffe d'un sauna

On considère une cabine de sauna contenant de l'air initialement à la température $T_1 = 20\,°\mathrm{C}$. On met en marche un radiateur delivrant puissance thermique constante $\mathcal{P} = 10\,\mathrm{kW}$, jusqu'à atteindre la température $T_2 = 80\,°\mathrm{C}$. On suppose que le système est fermé et que la capacité thermique totale à pression constante de la cabine de sauna et de l'air intérieur est $C = 80\,\mathrm{kJ \cdot K^{-1}}$. On cherche à estimer le temps de chauffe en supposant que les pertes thermiques à travers les parois sont négligeables.

2.2.2 Refroissement à travers des parois : régime transitoire du premier ordre

On considère une pièce, dont la capacité thermique à pression constante totale (air et l'ensemble des objets qui s'y trouvent) est noté $C = 40\,\mathrm{kJ \cdot K^{-1}}$. La température intérieure de la pièce est initialement $T_{\text{ini}} = 20\,°\mathrm{C}$. La pièce est séparée de l'atmosphère extérieure $T_{\text{ext}} = -5\,°\mathrm{C}$ par des parois dont la résistance thermique totale est $R_{\text{th}} = 3{,}0 \cdot 10^{-1}\,\mathrm{K \cdot W^{-1}}$.

La pression de la pièce reste égale à la presson atmosphérique durant tout le processus. On cherche la loi d'évolution en fonction du temps de la différence de température $F = T_{(t)} - T_{\text{ext}}$ entre la pièce et l'extérieur, en supposant qu'elle varie suffisamment lentement pour qu'on puisse faire l'hypothèse d'un régime quasi-stationnaire.

Calculer la température aux dates τ, 5τ et 7τ. Conclure.

Régime transitoire du premier ordre

Soit un système dont la variable (ici T) obéit à une équation différentielle du premier ordre :

$$\tau \times \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} + T = K$$

La grandeur τ est la **constante de temps** du phénomène (en seconde).

Résolution

La solution est la somme de deux termes : la solution particulière T_p et la solution homogène T_h.

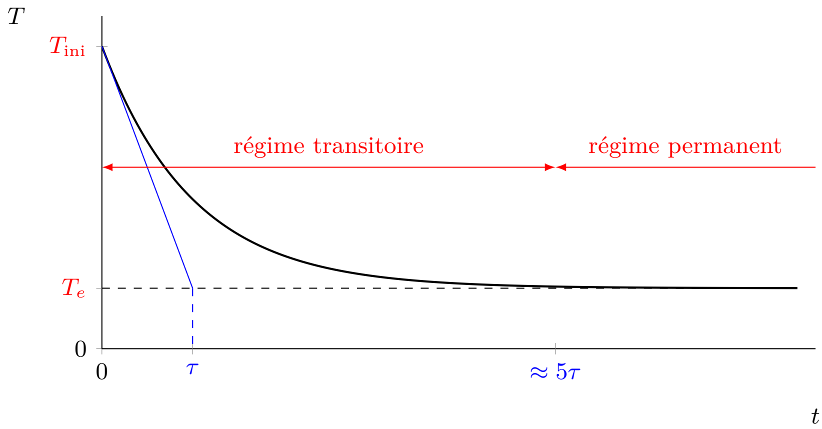
- La solution particulière est de la même forme que le second membre. Si le second membre est constant, alors T_p est une fonction constante, et $\mathrm{d}T_p \,/\, \mathrm{d}t = 0$, soit $T_p = K$.
- La solution de l'équation homogène $\tau \times \mathrm{d}T \,/\, \mathrm{d}t + T = 0$ est de la forme $T_h = A\,\mathrm{e}^{-t/\tau}$, avec A une constante à déterminer.

La solution complète est $T_{(t)} = T_p + T_h = K + A\mathrm{e}^{-t/\tau}$. La constante A s'obtient par une condition à la limite ; par exemple, on sait qu'à $t = 0$, $T_{(t=0)} = T_{\text{ini}}$.

Loi d'évolution

La grandeur étudiée varie selon une loi exponentielle et tend vers K (valeur correspondant à la solution particulière) après un temps très long :

- au début, la variation est importante, c'est le **régime transitoire** ;
- au bout d'environ 5τ, la grandeur est très proche de sa valeur finale et reste constante, c'est le **régime permanent** ou **régime établi** ;
- après un temps très long, la grandeur étudiée est égale à la solution particulière de l'équation différentielle.



2.3 Température d'équilibre d'une planète ; effet de serre

2.3.1 Température d'équilibre de la Terre sans atmosphère

Le Soleil et la Terre se comportent comme des corps noirs. Le Soleil, de rayon $R_{\mathrm{S}} = 7{,}0 \cdot 10^8\,\mathrm{m}$ a une température de surface de $T_{\mathrm{S}} = 5785\,\mathrm{K}$. La Terre, de rayon $R_{\mathrm{p}} = 6{,}4 \cdot 10^6\,\mathrm{m}$ se trouve à une distance $D = 1{,}5 \cdot 10^{11}\,\mathrm{m}$ du Soleil. Des mesures satellitaires montrent que la Terre réfléchit une partie du rayonnement solaire ; la fraction réfléchie s'appelle l'albedo et vaut $A = 0,34$ pour la Terre.

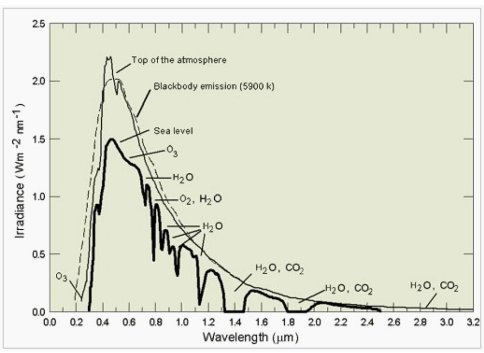
On rappelle que la puissance émise par une surface S d'un corps noir de température T est : $\mathcal{P} = \sigma \times S \times T^4$, avec $\sigma = 5{,}7 \cdot 10^{-8}\,\mathrm{W} \cdot \mathrm{m}^{-2} \cdot \mathrm{K}^4$.

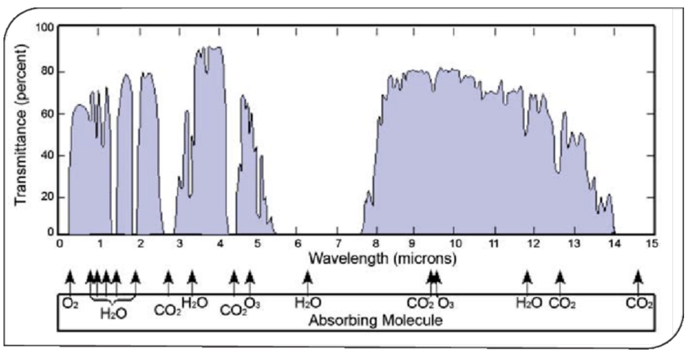
Montrer que la température T_{p} de la surface de la Terre, en supposant qu'on se trouve en régime quasi-stationnaire, est :

$$T_{\mathrm{p}} = T_{\mathrm{S}} \times \left[\frac{R_{\mathrm{S}}^2(1-A)}{4D^2}\right]^{1/4}$$

2.3.2 Effet de serre

- Le Soleil envoie principalement de la lumière dans le domaine UV-visible, dont environ 15% sont arrêtés par l'atmosphère.
- La Terre émet principalement dans l'infra-rouge, dont une majorité est absorbé par les molécules présentes dans l'atmosphère terrestre [1].





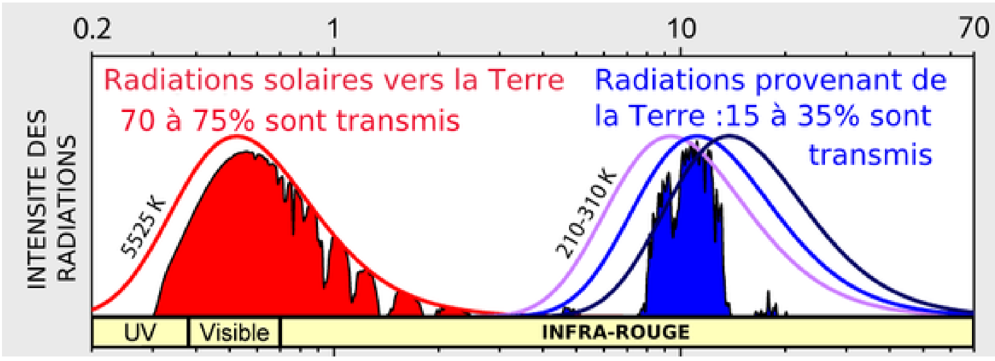
1. Le spectre ci-dessous provient de Michael Radunsky : https://www.researchgate.net/figure/Spectre-de-transmission-de-latmosphere-du-visible-a-linfrarouge-avec-les-principales_fig3_275168262

Effet de serre atmosphérique

On appelle effet de serre atmosphérique l'absorption différente par l'atmosphère terrestre des rayonnements UV-visible émis par le Soleil et des rayonnements infrarouge émis par la Terre :

- l'atmosphère terrestre est largement transparente au rayonnement solaire,
- l'atmosphère terrestre est largement opaque au rayonnement terrestre.

De ce fait, l'atmosphère « piège » une partie de l'énergie émise par la Terre, ce qui a pour effet d'augmenter la température d'équilibre de la surface.



Robert A. Rohde
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Radiation_transmise.png

2.3.3 Température d'équilibre de la Terre avec atmosphère

On considère maintenant que la Terre est entourée d'une atmosphère. Sa composition est telle qu'elle absorbe différemment le rayonnement solaire (visible et ultraviolet) et le rayonnement terrestre (infra-rouge). On fait les hypothèses suivantes.

- Le Soleil, la Terre et l'atmosphère se comportent comme des corps noirs de températures T_S, T_p et T_a.
- L'atmosphère est suffisamment fine pour qu'on puisse assimiler sa surface à celle de la Terre.
- La Terre et son atmosphère réfléchissent une partie du rayonnement solaire. La fraction totale réfléchie est l'albedo $A = 0,34$.
- L'atmosphère absorbe une fraction $\alpha = 0,33$ du rayonnement solaire non réfléchi et absorbe complètement le rayonnement terrestre.
- La Terre absorbe la fraction $1 - \alpha$ du rayonnement solaire non réfléchi.

Calculer les températures de l'atmosphère et de la surface de la Terre en régime quasi-stationnaire.

Exercices

Application directe du cours

Exercice 1 : évaluation d'une dépense énergétique

On considère une casemate en béton dont les parois ont une surface totale de $50\,\mathrm{m}^2$ et une épaisseur de $20\,\mathrm{cm}$. La conductivité thermique du béton est $\lambda = 1{,}5\,\mathrm{W}\cdot\mathrm{K}^{-1}\cdot\mathrm{m}^{-1}$. L'air extérieur est à la température constante $T_{\mathrm{ext}} = 0\,°\mathrm{C}$ et l'intérieur de la casemate est maintenu à la température $T = 20\,°\mathrm{C}$ grâce à un chauffage électrique. Le prix de l'électricité est d'environ $0,08$ € le $\mathrm{kW}\cdot\mathrm{h}$.

1. Déterminer l'énergie thermique perdue pendant une journée.
2. Quelle grandeur physique le $\mathrm{kW}\cdot\mathrm{h}$ mesure-t-il ? Estimer le coût de chauffage journalier.

Exercice 2 : Conversion de travail en énergie thermique

On considère une pièce dont l'air est agité par un ventilateur de puissance mécanique constante $\mathcal{P} = 100\,\mathrm{W}$, qui a été mis en marche depuis longtemps. La pièce contient $100\,\mathrm{mol}$ d'un gaz parfait de capacité thermique molaire à pression constante $C_{pm} = 7R/2$. On suppose qu'il n'y a pas d'échange de matière avec l'extérieur.

Quel est le transfert thermique évacuée par les parois par unité de temps si la température reste constante ?

Entrainement

Exercice 3 : principe d'un double vitrage

On étudie le flux thermique à travers une fenêtre de $50\,\mathrm{cm}$ de largeur et de $50\,\mathrm{cm}$ de hauteur, séparant un milieu intérieur de température constante $T = 20\,°\mathrm{C}$ et un milieu extérieur de température constante $T_{\mathrm{ext}} = 5\,°\mathrm{C}$.

1. La fenêtre est constituée d'une vitre d'épaisseur $e = 5\,\mathrm{mm}$. La conductivité thermique du verre est $\rho_v = 1{,}0\,\mathrm{W}\cdot\mathrm{m}^{-1}\cdot\mathrm{K}^{-1}$. Calculer la puissance thermique qui traverse la vitre.
2. On remplace la fenêtre par un double vitrage, constitué de deux vitres identiques à la précédente, mais séparées d'une épaisseur e d'air. La conductivité thermique de l'air vaut $\rho_a = 0{,}025\,\mathrm{W}\cdot\mathrm{m}^{-1}\cdot\mathrm{K}^{-1}$. Calculer la valeur de la puissance thermique à travers la vitre. Conclure.
3. Calculer l'épaisseur d'un simple vitrage permettant d'avoir les mêmes performance que le double vitrage.

Exercice 4 : estimation de la température du Soleil

On cherche à estimer la température de surface du Soleil, en assimilant celui-ci à un corps noir, c'est-à-dire qu'on considère qu'il obéit aux lois de Stefan-Boltzmann et du déplacement de Wien. On considère que le Soleil émet de la lumière de façon isotrope, c'est-à-dire identiquement dans toutes les directions.

La puissance rayonnée par le Soleil présente un maximum à la longueur d'onde $\lambda = 0{,}504\,\mu\mathrm{m}$, correspondant au domaine du vert.

1. Estimer la température de la surface du Soleil.

Des satellites en orbite autour de la Terre ont mesuré que le flux solaire arrivant sur une surface de $1\,\mathrm{m}^2$ est de $1361\,\mathrm{W}$.

2. Calculer le flux solaire total émis par la surface du Soleil. Indice 1 [2]. Indice 2 [3].
3. En déduire la température de surface du Soleil.

Rayon moyen du Soleil : $696\,342\,\mathrm{km}$
Rayon moyen de l'orbite terrestre : $150\cdot 10^6\,\mathrm{km}$

2. Le m^2 considéré est une partie d'une sphère par laquelle passe la totalité du rayonnement émis par le Soleil. Quelle est cette sphère ?
3. Négliger toute absorption de la lumière entre le Soleil et la Terre.

Constante de Wien : $b = 2{,}90 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{m \cdot K}$
Constante de Stefan-Boltzmann : $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}\,\mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}}$

Exercice 5 : temps de mise à l'équilibre thermique d'un solide

Soit une masse m d'un solide de capacité thermique massique c, initialement à la température T_{ini}. La surface extérieure du solide, d'aire S, est au contact de l'atmosphère de température T_0. On laisse l'ensemble évoluer jusqu'à l'équilibre.

1. Quelle est la température finale du solide ?
2. Exprimer le transfert thermique reçu pendant l'intervalle de temps $\mathrm{d}t$ en fonction de T, T_0, S et du coefficient conducto-convectif h. On fera l'hypothèse, à justifier, qu'on se trouve en régime quasi-stationnaire.
3. Établir l'équation différentielle vérifiée par la température T au cours de la transformation. En déduire la loi de variation de la température T du solide en fonction du temps.

Exercice 6 : refroidissement de l'intérieur d'une bouteille thermos

Une bouteille thermos est un système de faible capacité thermique conçu pour isoler thermiquement son contenu du monde extérieur. Le but de l'exercice est de déterminer les caractéristiques thermiques de la bouteille et sa capacité à garder chaud un liquide, et de calculer les proportions optimales que doit avoir la bouteille [4].

On place une masse $m = 580\,\mathrm{g}$ d'eau liquide dans la bouteille thermos et on attend l'équilibre thermique ; on mesure $T_1 = 20\,°\mathrm{C}$. On ajoute ensuite dans la bouteille une autre masse $m = 580\,\mathrm{g}$ d'eau liquide préalablement portée à la température $T_2 = 80\,°\mathrm{C}$. L'équilibre thermique étant atteint, on mesure $T_{\text{eq}} = 49\,°\mathrm{C}$. Les manipulations sont réalisées suffisamment rapidement pour que les pertes thermiques puissent être négligées.

1. Calculer la valeur de la capacité thermique de la bouteille thermos, notée C_T.
2. On appelle valeur en eau d'un calorimètre la masse d'eau liquide qui a la même capacité thermique que le calorimètre. Calculer la valeur en eau de la bouteille thermos utilisée. La capacité thermique massique de l'eau liquide est $c_e = 4{,}18\,\mathrm{J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}}$.

Au cours du temps, on constate que la température du contenu de la bouteille thermos varie avec le temps. On interprète cette variation par l'existence de pertes thermiques à travers les parois de la bouteille. L'extérieur de la bouteille est l'atmosphère, de température constante $T_{\text{ext}} = 20\,°\mathrm{C}$. On suppose que le contenu de la bouteille est homogène et on note C sa capacité thermique totale.

3. Rappeler l'expression de la puissance thermique perdue à travers les parois. Commenter son signe.
4. Établir la loi d'évolution de la température du contenu de la bouteille thermos au cours du temps.
5. On mesure une variation de température de $-1\,°\mathrm{C}$ au bout de $10\,\mathrm{min}$. En déduire la constante de temps du phénomène.

La bouteille thermos est de forme cylindrique, de hauteur H et de rayon R. On cherche à déterminer le rayon optimal à choisir pour un volume V de la bouteille.

6. Exprimer le volume V et la surface S de la bouteille en fonction de H et R.
7. Montrer qu'à volume fixé, il existe une valeur R_0 du rayon qui minimise la valeur de S. Quel est l'intérêt de construire une bouteille qui respecte ces proportions ?

4. Cet exercice est largement inspiré du concours Agro-Véto 2010 (filière TB). L'énoncé original est plus détaillé et les questions sont plus guidées. La calculatrice n'était pas autorisée.

Travaux dirigés

Exercice 1 : isolation d'une paroi

On considère une paroi de longueur $L = 4{,}0\,\text{m}$, de hauteur $H = 2{,}5\,\text{m}$ et d'épaisseur $d = 30\,\text{cm}$, faite en béton. Il est percé d'une fenêtre de surface $S = 2{,}0\,\text{m}^2$, et constitué d'une vitre d'épaisseur $e = 2{,}0\,\text{mm}$. La paroi sépare l'intérieur d'une pièce maintenue à la température $T_i = 19\,°\text{C}$ de l'extérieur où la température est $T_e = -1\,°\text{C}$.

1. Calculer la puissance thermique dissipée à travers la paroi, puis l'énergie perdue en 24 h.

Des travaux d'isolation sont réalisés, consistant en :
- la pose d'une couche d'isolant d'épaisseur d au-dessus du béton, de sorte à diviser par 10 le flux thermique à travers le béton,
- le remplacement de la vitre par une fenêtre à double vitrage, constituée de deux vitres d'épaisseur e séparées par une couche d'air d'épaisseur $e' = 5{,}0\,\text{mm}$.

2. Quelle doit être la conductivité thermique de l'isolant posé contre le béton ?
3. Calculer la puissance thermique dissipée à travers la paroi, puis l'économie d'énergie réalisée chaque jour.
4. Calculer la température aux interfaces entre l'air intérieur au double vitrage et chacune des deux vitres. Représenter le profil de température, c'est-à-dire la variation de T à travers le double vitrage.

matériau	air	verre	béton
λ (Wm/K)	$0,025$	$0,80$	$2,0$

Exercice 2 : pertes thermiques d'un congélateur (G2E 2013)

On considère un congélateur domestique placé dans une cuisine où la température ambiante $T_\text{C} = 298\,\text{K}$ est constante. Pour étudier les transferts thermiques entre l'extérieur et l'intérieur du congélateur, on débranche ce dernier alors que la température intérieure est $T_\text{F} = 268\,\text{K}$. Au bout d'une durée $\Delta t = 6\,\text{h}$, la température intérieure vaut $T'_\text{F} = 273\,\text{K}$. On admet que la puissance reçue de l'extérieur est de la forme :

$$\Phi_{(t)} = -aC\left(T_{(t)} - T_\text{C}\right)$$

où $T_{(t)}$ est la température intérieure à la date t, $C = 500\,\text{kJ}\cdot\text{K}^{-1}$ la capacité thermique du congélateur et a une constante.

1. Préciser le signe et l'unité de a. Que représente le terme aC ?
2. Établir l'équation différentielle vérifiée par la température intérieure.
3. En déduire la loi de variation de la température intérieure en fonction du temps.
4. Exprimer puis calculer la valeur de a.