Thermodynamique

Problématique : Comment décrire l'état d'un système et prévoir l'évolution de son énergie lors d'échanges avec l'extérieur ?

1- Système thermodynamique

1.1- Définition

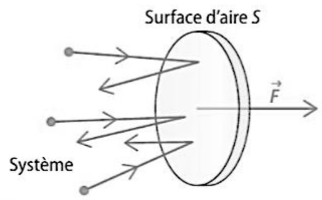
Un système thermodynamique est un ensemble d'entités microscopiques (atomes, ions, molécules). On ne décrit pas chaque entité individuellement : on utilise des grandeurs macroscopiques, qui traduisent un comportement moyen du système.

1.2- Grandeurs d'état

Quelques exemples de grandeurs macroscopique qui décrivent l'état du système :

- La **masse volumique** ρ (en $kg.m^{-3}$) caractérise la « compacité » du système : $\rho = \frac{m}{V}$ où m est la masse m du système et V son volume.
- La **température** T (en kelvins, K) mesure l'agitation thermique des entités.
- La **pression P** (en pascals, Pa) caractérise l'action mécanique exercée sur une surface.

Rappels



- La force pressante exercée sur une surface S vérifie : F = P x S
- Autres unités de la pression :
  - 1 atmosphère = $1{,}013 \times 10^5$ Pa et
  - 1 bar = 10^5 Pa
- T(K) = θ (°C) + 273 (Symboles représentant la grandeur température en thermodynamique : T pour les kelvins et θ pour les degrés Celcius)

Ces grandeurs définissent l'état du système, mais elles ne sont pas indépendantes.

2- Modèle de gaz parfait

Un **gaz parfait** est un modèle simplifié qui repose sur deux hypothèses :

- les entités n'interagissent pas entre elles ;
- leur volume propre est négligeable devant celui du récipient.

Ces hypothèses sont d'autant mieux vérifiées que le gaz est peu dense (faible pression, température élevée).

Dans ce modèle, les grandeurs macroscopiques sont reliées par la relation d'état :

$\boxed{P.V = n.R.T}$ avec
- P : pression en pascals (Pa)
- V : volume en mètres cubes (m^3)
- n : quantité de matière en moles (mol)
- T : température en kelvins (K)
- R : constante des gaz parfaits. R = 8 ,314 $J.mol^{-1}K^{-1}$

Cette relation relie les grandeurs qui définissent l'état du gaz. Autrement dit, si l'on connaît trois de ces grandeurs, la quatrième est imposée. Elle permet donc de déterminer comment évoluent la pression, le volume et la température lorsque le gaz subit une transformation.

Application 1 : modèle de gaz parfait

Allez sur la page concernant les gaz parfait du site PhET

1. Donner deux coups de pompe. Relever les conditions initiales du système : volume V_1, température T_1 et pression P_1.

2. Chauffer le gaz de 300 K à 900 K, puis mesurer la nouvelle pression P_2. Calculer le rapport P_2 / P_1 et le comparer au rapport T_2 / T_1. Que peut-on conclure ?

3. Revenir aux conditions initiales V_1, T_1, P_1. Calculer la quantité de matière n_1 du système.

4. Donner 6 nouveaux coups de pompe. Quelle grandeur fait-on directement varier ? Mesurer la nouvelle pression P_2. Calculer le rapport n_2 / n_1 et le comparer au rapport P_2 / P_1. Que peut-on conclure ?

5. Revenir aux conditions initiales, puis diviser le volume par 2. Mesurer la nouvelle pression P_3. Calculer le rapport V_3 / V_1 et le comparer au rapport P_3 / P_1. Que peut-on conclure ?

6. Les observations précédentes sont-elles conformes à l'équation d'état du gaz parfait : $P V = n R T$?

Application 2 : pression des pneus

Dans le pneu d'une voiture qui a longuement roulé, la température de l'air atteint $\theta_1 = 65$ °C. Le volume de l'air qu'il contient vaut V = 50 L. L'automobiliste mesure la pression $P_1 = 2{,}3$ bar.

a. Calculer la quantité de matière n d'air, assimilé à un gaz parfait, contenu dans le pneu.

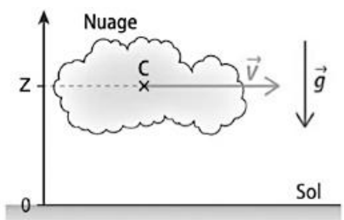
b. Quelle sera la pression P_2 à froid, lorsque la température de l'air vaudra $\theta_2 = 15$ °C ?

On sait maintenant décrire l'état d'un système. On cherche à comprendre comment son énergie évolue.

3- Énergie interne

3.1- Origine microscopique

Un nuage de masse m, situé à une altitude z et se déplaçant à la vitesse v, possède une énergie mécanique **macroscopique** : $E_m = \frac{1}{2} \times m \times V^2 + m \times g \times h$



Cependant, au sein de ce nuage, il existe également des énergies **microscopiques** liées aux constituants du système :

- L'énergie cinétique des molécules (agitation thermique)
- Leur énergie potentielle d'interaction entre les molécules
- Les énergies chimiques de liaison dans les molécules
- Les énergies nucléaires au sein des atomes

3.2- Définition

L'énergie interne U d'un système thermodynamique est la somme de toutes les **énergies microscopiques** de ses constituants. Elle s'exprime en joules (J).

3.3- Propriétés

Comme la masse volumique ρ, la température T ou la pression P, l'énergie interne U décrit l'état d'un système thermodynamique. C'est un grandeur d'état.

En raison du très grand nombre de particules constituant un système, il est impossible de déterminer directement son énergie interne.

En revanche, il est possible de déterminer sa **variation** ΔU lors d'une transformation du système.

L'énergie interne d'un système évolue uniquement lorsqu'il échange de l'énergie avec son environnement ; il convient donc d'étudier les différents modes de transfert d'énergie.

4- Modes de transfert d'énergie

4.1- Transfert Thermique 🔥

Un transfert thermique correspond à un échange d'énergie entre un système et le milieu extérieur dû uniquement à une **différence de température**, sans action mécanique macroscopique sur les parois du système (pas de déplacement de paroi).

👉 Il s'effectue spontanément :

- **du milieu le plus chaud vers le milieu le plus froid**,
- jusqu'à atteindre l'**équilibre thermique** (même température).

⚡ **Énergie échangée**

L'énergie thermique échangée est notée Q et s'exprime en **joules (J)**.

Par convention :

- $Q > 0$: le système **reçoit** de l'énergie thermique
- $Q < 0$: le système **cède** de l'énergie au milieu extérieur

🌡️ **Effet sur la température**

Un transfert thermique peut entraîner une variation de la température du système (ΔT).

⚠️ Exception importante : changement d'état : lors d'un changement d'état (fusion, vaporisation…), la température **reste constante** malgré l'échange d'énergie. Dans ce cas, l'énergie ne sert pas à augmenter l'agitation thermique, mais à **modifier l'organisation microscopique** (liaisons entre particules).

4.2- Transfert d'énergie par travail d'une force

Un transfert d'énergie par travail correspond à un échange d'énergie entre un système et le milieu extérieur lorsque des forces s'exercent sur le système et provoquent **un déplacement de sa frontière**. En thermodynamique, ce travail est le plus souvent lié aux forces de pression exercées par le milieu extérieur sur les parois du système lors d'une variation de volume.

Ainsi, lors d'une compression, le milieu extérieur exerce une force sur le système : celui-ci reçoit du travail ($W > 0$) et son énergie interne augmente. À l'inverse, lors d'une détente, le système se dilate et fournit du travail au milieu extérieur ($W < 0$), ce qui entraîne une diminution de son énergie interne.

On distingue donc deux modes d'échange d'énergie entre un système et le milieu extérieur : le transfert thermique Q (pas de déplacement de paroi du système) et le travail W (déplacement de paroi du système).

On va établir par la suite un bilan énergétique du système.

5- Premier principe de la thermodynamique

On considère un système :

- fermé : pas d'échange de matière avec l'extérieur du système
- au repos macroscopiquement

Pour un tel système, le premier principe de la thermodynamique s'écrit :

$\boxed{\Delta U = W + Q}$ avec. W : travail (en joules) et Q : transfert thermique (en joules)

👉 Interprétation : ce principe traduit la conservation de l'énergie : la variation d'énergie interne du système correspond à la somme des échanges d'énergie avec le milieu extérieur.

⚠️ Convention de signe (point essentiel)

- W > 0 : le système reçoit du travail (compression)
- W < 0 : le système fournit du travail (détente)
- Q > 0 : le système reçoit de l'énergie thermique
- Q < 0 : le système cède de l'énergie thermique

👉 Conséquence

- si le système reçoit de l'énergie → $\Delta U > 0$
- s'il en perd → $\Delta U < 0$

Exemple : la bouilloire électrique

W_e correspond à l'énergie électrique reçue par la bouilloire, et Q à l'énergie thermique qu'elle transfert à l'eau.

Pour la bouilloire :

- $W_e > 0$ (elle reçoit de l'énergie électrique) ;
- $Q < 0$ (elle cède de l'énergie thermique à l'eau).

🧠 À retenir

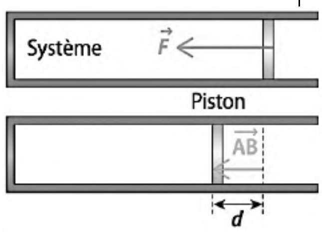
ΔU dépend uniquement de l'état du système, alors que W et Q dépendent de la transformation.

On cherche désormais à relier les échanges d'énergie aux variations de température du système.

Application 3 : gaz dans un piston

Un gaz est placé dans un cylindre, muni d'un piston mobile d'aire $S = 10\ cm^2$.

La force pressante exercée par l'air extérieur, à la pression $P = 1{,}0 \times 10^5$ Pa, est constante.



1. Calculer la variation de l'énergie interne du gaz lorsque le piston se déplace de d = 1,0 cm dans le sens d'une diminution de volume.
2. Est-ce que le système reçoit-il ou cède-t-il de l'énergie ?

6- Capacité thermique

6.1- Définition

La **capacité thermique** C ($J.\ K^{-1}$) d'un système correspond à l'énergie nécessaire pour augmenter sa température de **1 K**.

L'énergie reçue pour augmenter sa température de ΔT est donc :

$\boxed{Q = C \times \Delta T}$ avec

- C : capacité thermique ($J \cdot K^{-1}$)
- Q transfert thermique (J)
- ΔT variation de température (K)

6.2- Capacité thermique massique

La capacité thermique d'un système dépend du nombre de constituants et donc de sa masse.

Pour comparer différentes matériaux, on définit la capacité thermique massique, qui correspond à la capacité thermique d'une masse de 1 kg. On a alors $C = m \times c$

On en déduit la relation :

$$\boxed{Q = C \times \Delta T = m \times c \times \Delta T}$$ avec

C : capacité thermique ($J \cdot K^{-1}$)
c : la capacité thermique massique ($J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$)
Q transfert thermique (J)
ΔT variation de température (K)

👉 c caractérise la capacité d'un matériau à stocker de l'énergie

♨ Application 4 : Thermoplongueur

Un récipient possède une capacité thermique $C = 100\ J \cdot K^{-1}$.

On prendra pour l'eau : $c_{eau} = 4{,}18 \times 10^3\ J.K^{-1}.kg^{-1}$

On y verse une masse m = 1,00 kg d'eau. Un dipôle ohmique de résistance R = 1,20 Ω et de capacité thermique $C' = 20\ J \cdot K^{-1}$ est plongé dans l'eau. On place l'ensemble dans une enceinte qui empêche tout transfert thermique avec l'extérieur, et on mesure sa température initiale $\theta_0 = 14{,}5$ °C.

À l'instant initial, on alimente le dipôle ohmique par un générateur de tension U = 48,0 V.

a. Calculer la capacité thermique $C + m\ c_{eau} + C'$ du système formé par le récipient, l'eau et le dipôle.

b. Donner l'expression littérale de l'énergie thermique Q reçue par ce système pendant une durée Δt en admettant qu'elle est égale à l'énergie thermique fournie par effet Joule.

c. Déterminer la valeur de Δt nécessaire à l'entrée en ébullition de l'eau (à 100 °C).

Jusqu'ici, on s'est intéressé à la quantité d'énergie échangée. On cherche désormais à caractériser la vitesse de ces échanges.

7- Flux thermique (puissance thermique)

7.1- Définition

Le flux thermique Φ correspond à la vitesse à laquelle l'énergie thermique est transférée entre le système et l'extérieur. Il est défini par la relation :

$$\boxed{\Phi = \frac{Q}{\Delta t}}$$ avec

Φ : flux thermique **algébrique** associée au transfert thermique entre le système et l'extérieur. ($J \cdot s^{-1}$)
Q : énergie thermique transférée (J)
Δt : durée de transfert (s)

Le flux thermique s'exprime en watts (W), soit en joules transférés par seconde ($J \cdot s^{-1}$). Il représente donc une **puissance thermique**.

7.2- À retenir 🧠

- grand flux thermique → transfert rapide d'énergie
- faible flux thermique → transfert lent

📌 Exemple : une maison bien isolée présente un flux thermique faible : les pertes d'énergie sont limitées.

7.3- Convention de signe

- Φ > 0 : le système reçoit de l'énergie
- Φ < 0 : le système cède de l'énergie

Le flux thermique dépend des propriétés du milieu traversé ; on introduit donc la notion de résistance thermique pour caractériser l'opposition au transfert de chaleur.

8- Résistance thermique

8.1- Définition

La résistance thermique R_{th} caractérise l'opposition d'un matériau au flux thermique Φ . Plus R_{th} est grande, plus le flux thermique est faible.

Le flux thermique Φ entre deux milieux dépend :

- de la différence de température $\Delta T = T_{\text{extérieur}} - T_{\text{système}}$;
- de la résistance thermique R_{th} de la paroi qui les sépare.

$\boxed{\Phi = \frac{\Delta T}{R_{th}}}$ avec

Φ : flux thermique ($J \cdot s^{-1}$)
$\Delta T = T_{\text{extérieur}} - T_{\text{système}}$ (K)
R_{th} : résistance thermique ($K \cdot W^{-1}$)

⚠ Le flux thermique est une **grandeur algébrique**. On se place, par convention, **du point de vue du système** afin d'établir son bilan énergétique.

- si Φ est sortant du système (système pert de l'énergie) $\rightarrow \Phi < 0$
- si Φ est entrant dans le système (système gagne de l'énergie) $\rightarrow \Phi > 0$

⚠ Attention : dans certains ouvrages ou sujets de bac, le flux thermique est défini comme une grandeur positive correspondant au transfert de chaleur du milieu chaud vers le milieu froid :

$$\phi = \frac{T_{\text{chaud}} - T_{\text{froid}}}{R_{th}}$$

Dasn ce cas $\phi > 0$. C'est une définition différente de la définition de flux entre le système et l'extérieur du paragraphe 7. Dans ce cours, nous définissons le flux (ou puissance) thermique comme l'énergie thermique échangée entre le système et l'extérieur par unité de temps :

$$\phi = \frac{T_{ext} - T_{sys}}{R_{th}}$$

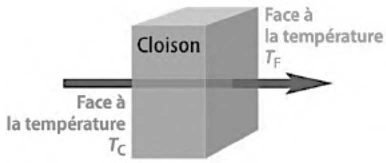
Le signe de Φ indique alors directement si le système reçoit ($\Phi > 0$) ou cède ($\Phi < 0$) de l'énergie thermique.

8.2- Expression de la résistance thermique

La résistance thermique d'un matériau dépend de ses caractéristiques physiques ; elle peut être reliée à son épaisseur, à sa surface et à sa conductivité thermique. Pour une paroi plane :

$\boxed{R_{th} = \frac{e}{\lambda \times S}}$ avec

R_{th} : résistance thermique ($K \cdot W^{-1}$)
e : épaisseur (m)
S : surface (m^2)
λ : conductivité thermique ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)

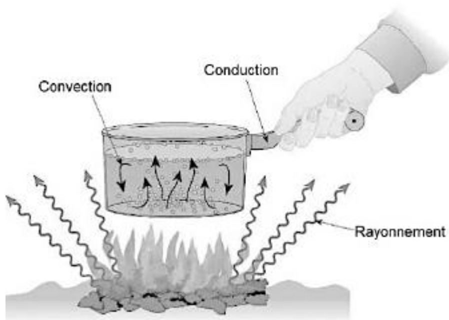


Il est important de comprendre par quels mécanismes physiques les transferts thermiques s'effectuent.

9- Mécanismes physiques de transfert thermique

Le transfert thermique Q peut se réaliser selon différents mécanismes physiques : la conduction, la convection ou le rayonnement.

- **Conduction :** transfert d'énergie par contact direct entre deux milieux
- **Convection** : transfert d'énergie dû au mouvement d'un fluide (liquide ou gaz).
- **Rayonnement** : transfert d'énergie par émission de photons. C'est le seul mécanisme de transfert thermique possible dans le vide.



Application 5 : Bilan thermique d'une veranda

Une véranda est formée d'une pièce dont les portes et fenêtres sont fermées. L'air à l'intérieur de la véranda ne subit que deux transferts thermiques : par rayonnement solaire à travers sa paroi vitrée, apportant une puissance thermique P_s = 300 W, et par transfert conductif à travers la paroi vitrée dont la face extérieure est à la température θ_e = 10 °C et la face intérieure est à la même température θ_i que l'air intérieur. Cette température est inconnue, mais supérieure à θ_e.

1. Dans quel sens le transfert thermique conductif s'opère-t-il à travers la paroi vitrée ?

2. Donner l'expression littérale du flux thermique conductif Φ_{th} traversant cette paroi en fonction de θ_i, θ_e et R_{th}.

3. Le système formé par l'air intérieur est à l'équilibre thermique quand la somme des puissances échangées est nulle. En déduire la valeur de θ_i.

Donnée : résistance thermique de la paroi R_{th} = 0,030 $K.W^{-1}$

Application 6 : Isolation thermique par laine minéral ou double vitrage

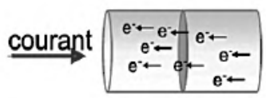
Dans le cas d'une paroi constituée de plusieurs couches de matériaux différents, les résistances thermiques s'additionnent.

Données : Quelques valeurs de conductivité thermique λ

Conductivité thermique λ (W . m^{-1} . K^{-1})	Béton plein	Bois de sapin	Paille	Laine minérale	Plaque de plâtre	Béton armé	Brique pleine
	1,7	0,14	0,050	0,040	0,25	2,2	1,0

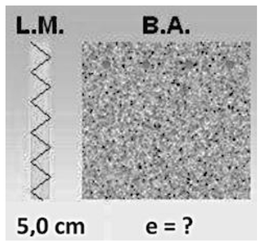
Conductivité thermique λ (W . m^{-1} . K^{-1})	Verre	Air	Polystyrène expansé	Acier	Cuivre
	1,2	0,026	0,036	46	390

1. En faisant l'analogie avec l'électricité, à quelles grandeurs correspondent ϕ et ΔT ? A quel type de circuit électrique correspond une association de plusieurs couches de matériaux différents ?



Rappel : le courant électrique est un flux d'électrons créé par une tension U.

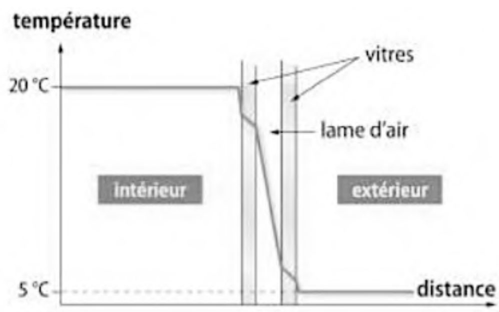
Sur le document ci-contre, e est l'épaisseur nécessaire pour qu'une paroi en béton armé (B.A.) présente les mêmes performances thermiques qu'une paroi de laine minérale (L.M.) d'épaisseur de 5,0 cm.



2. Calculer la valeur de e pour une surface de 1,0 m² puis commenter cette phrase extraite d'une brochure sur l'isolation thermique : « Les matériaux lourds de maçonnerie ne constituent jamais une isolation acceptable. »

Pour réduire le flux thermique au niveau des fenêtres, on utilise du double vitrage. On considère ici un ensemble constitué de { 4,0 mm vitrage + 18 mm d'air + 4,0 mm de vitrage }.

3. Déterminer le flux thermique d'une fenêtre de 1 m² constituée seulement d'un simple vitrage (4,0 mm vitrage) puis d'une fenêtre constituée du double vitrage décrit ci-dessus.
Données : Température intérieure T_{chaude} = 20°C ;
Température extérieure T_{froide} = 5°C.



Le rayonnement thermique étant un mécanisme particulier, on peut le modéliser à l'aide de la loi de Stefan-Boltzmann.

10- Rayonnement thermique - loi de Stefan-Boltzmann

Tout corps dont la température est non nulle émet un rayonnement thermique.

En physique, un corps noir désigne un objet idéal qui absorbe parfaitement toute l'énergie électromagnétique (toute la lumière quelle que soit sa longueur d'onde) qu'il reçoit. Cette absorption se traduit par une agitation thermique qui provoque l'émission d'un rayonnement thermique, dit rayonnement du corps noir.

La loi de Stefan-Boltzmann relie le flux thermique Φ (ou puissance rayonnée) émis par un objet, assimilé à un corps noir, à sa température T et à sa surface S :

La loi de Stefan-Boltzmann définit la relation qui existe entre le flux thermique Φ (ou flux rayonné) d'un objet de surface S et de température T considéré comme un corps noir.

$\boxed{\phi = \sigma T^4 S}$ avec

- Φ : puissance rayonnée (W)
- S : aire de la surface du corps noir (m²)
- T : température de la surface du corps noir (K)
- $\sigma = 5{,}67 \times 10^{-8}$ W.m^{-2}.K^{-4} est la constante de Stefan-Boltzmann.

Application 7 : l'effet de serre (⚠ à savoir refaire : c'est le cours)

Définitions :

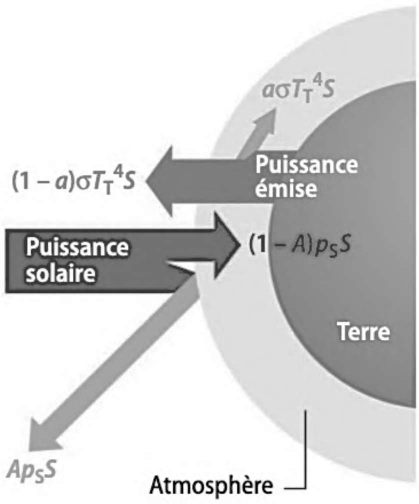
Le **coefficient d'absorption α de l'atmosphère** est la fraction du rayonnement thermique émis par la Terre qui est absorbée par l'atmosphère.

Il s'exprime par :

$\alpha = \dfrac{\text{énergie absorbée par l'atmosphère}}{\text{énergie émise par la Terre}}$

👉 C'est une grandeur sans dimension, comprise entre 0 et 1

À retenir : plus α est élevé, plus l'atmosphère retient l'énergie thermique, ce qui renforce l'effet de serre.



L'**albedo A d'une surface** est la fraction du rayonnement reçu qu'elle réfléchit. Il s'exprime par : $A = \dfrac{\text{énergie réfléchie}}{\text{énergie reçue}}$ (sans unité).

Plus la surface considérée est blanche, plus l'albédo est proche de 1 ; plus elle est sombre, plus il est proche de 0.

On modélise le système {Terre–atmosphère} par une sphère de surface S qui se comporte comme un corps de température de surface T_T

La puissance solaire surfacique moyenne reçue est notée p_s (en W·m^{-2}).

1. Énergie reçue

a. Exprimer la puissance solaire totale reçue par le système en fonction de p_s et S.

b. Une partie du rayonnement est réfléchie. Quelle fraction est absorbée ?

c. En déduire l'expression de la puissance thermique réellement reçue par le système.

2. Énergie émise par la Terre

a. Sous quelle forme la Terre émet-elle de l'énergie ?

b. En utilisant la loi de Stefan-Boltzmann, exprimer la puissance thermique émise par la Terre en fonction de sa température T_T.

3. Rôle de l'atmosphère

a. L'atmosphère absorbe une fraction α du rayonnement terrestre. Quelle fraction est émise vers l'espace ?

b. En déduire l'expression de la puissance thermique perdue par le système Terre–atmosphère.

4. Équilibre thermique

À l'équilibre, la puissance reçue est égale à la puissance perdue.

a. Écrire le bilan énergétique du système.

b. En déduire l'expression de T_T en fonction de A, α, p_s et σ

c. Calculer la valeur de T_T sachant que

- α terrestre moyen : 0,45.
- A terrestre moyen : 0,34.
- $p_s = 340$ W.m^{-2}
- $\sigma = 5{,}67 \times 10^{-8}$ W.m^{-2}.K^{-4}

Dans les situations courantes, les transferts se font aussi par contact avec un fluide.

11- Transfert conducto-convectif – loi de Newton

11.1- Thermostat

Un **thermostat** est un système dont la température reste constante au cours du temps.

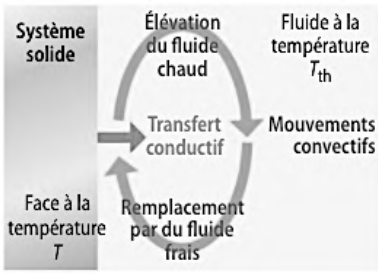
Dans de nombreuses situations, le milieu extérieur (air, eau…) peut être considéré comme un thermostat pour le système étudié.

11.2- Mécanisme conducto-convectif

Lorsqu'un système échange de l'énergie thermique avec un fluide (air ou liquide), le transfert se fait généralement :

- par conduction au voisinage de la surface ;
- par convection dans le fluide.

On parle alors de transfert conducto-convectif, modélisé par la loi de refroidissement de Newton.



11.3- Loi de Newton

Newton a montré qu'un objet se refroidit d'autant plus rapidement que la différence de température avec le milieu extérieur (thermsotat)est grande.

Le flux thermique échangé entre un système de température T et un milieu extérieur, assimilé à un thermostat de température constante T_{th}, s'écrit :

$\boxed{\Phi = h \times S \times (T_{th} - T)}$ avec

- Φ : flux thermique (en W)
- h : **coefficient de transfert conducto-convectif** (en W·m^{-2}·K^{-1})
- S : surface d'échange (en m²)
- T : température du système (en K)
- T_{th} : température du thermostat (en K)

Application 8 : Dépense en kilocalories

Une nageuse parcourt 1 500 m en une heure dans l'eau d'une piscine à la température $\theta_h = 28$ °C. La température de sa peau est égale à $\theta_p = 33$ °C.

La puissance thermique transférée de son corps vers l'eau est donnée par la loi de Newton : $P_{th} = h\, S\, (\theta_h - \theta_p)$

où le coefficient conducto-convectif vaut h = 10 kW·K^{-1}·m^{-2} et l'aire de la surface de la peau de la nageuse S = 1,9 m².

a. Calculer l'énergie thermique Q cédée par la nageuse à l'eau pendant sa séance de natation.

b. Les dépenses énergétiques du corps humain sont globalement compensées par l'alimentation. L'unité énergétique des diététiciens est la kilocalorie, égale à 4,18 MJ. Exprimer Q dans cette unité.

c. La dépense énergétique associée aux mouvements de brasse sur une distance de 1 500 m est estimée à 600 kilocalories. Une banane apporte 89 kilocalories. Combien de bananes la nageuse peut-elle manger pour reconstituer ses réserves ?

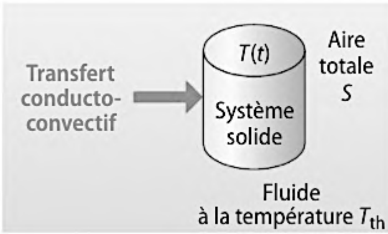
Indiquer la part imputable aux mouvements de brasse et celle imputable aux transferts thermiques.

d. Reprendre le calcul précédent si la nageuse s'entraîne dans un lac dont l'eau est à 18 °C.

Application 9 : Évolution de la température d'un système au contact d'un thermostat (Loi de Newton) (à savoir refaire : c'est le cours)

On considère un solide de température T(t), de capacité thermique C, en contact avec un thermostat de température constante T_{th}.

La surface d'échange est S et le coefficient conducto-convectif vaut h.



1. Bilan énergétique

Pendant une durée Δt, la température passe de T(t) à T(t + Δt). Exprimer l'énergie thermique échangée Q en fonction de C et de la variation de température.

2. Passage à la puissance

Diviser l'expression précédente par Δt. Identifier la grandeur Q/Δt.

3. Loi de Newton

Donner l'expression du flux thermique Φ en fonction de h, S, T_{th} et T.

4. Mise en équation

a. En combinant les résultats précédents, établir une relation entre C, $\frac{T(t+\Delta t)-T(t)}{\Delta t}$, h, S, T_{th} et T.

b. Faire tendre Δt vers 0 pour faire apparaître une dérivée.

5. Équation différentielle

Mettre l'équation sous la forme : $\frac{dT}{dt} = aT + b$. Identifier les constantes a et b.

6. Solution

On admet que la solution est de la forme : $T(t) = A\,e^{-t/\tau} + T_{th}$

Vérifier que cette expression est solution pour une expression de τ en fonction de C, h et S.

7. Condition initiale et résultat final

a. On note $T(0) = T_0$. Déterminer la constante A.

b. Donner l'expression de T(t) en fonction de T_{th} , T_0 et τ

8. Allure de T(t)

Donner l'allure de la courbe T(t) dans les deux cas suivants :

- $T_0 < T_{th}$
- $T_0 > T_{th}$

Plan de travail

QCM : http://www.hatier-clic.fr/pct441

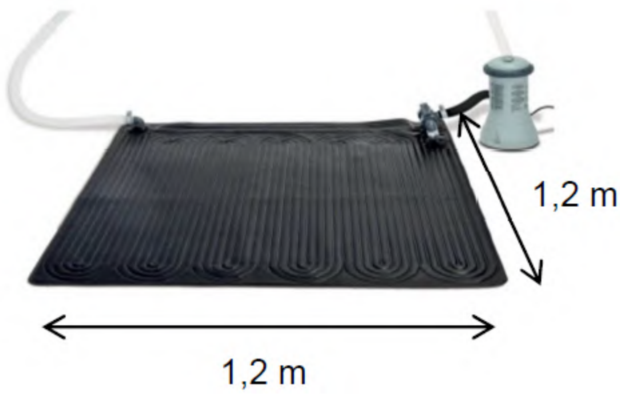
Exigences et capacités exigibles du Chapitre 14 : Thermodynamique	Exercices Applications et TP	Exercices Hatier
Décrire un système thermodynamique : exemple du modèle du gaz parfait. Équation d'état du gaz parfait.	Applications 1 et 2	11 et 12 du QCM p.441 23 p.444-445
Premier principe de la thermodynamique. Transfert thermique, travail.	Application 3 et 4	13 et 14 du QCM p.441 21 p.442
Capacité thermique d'un système incompressible. Énergie interne d'un système incompressible Bilan énergétique	Applications 5, 6 et 7 Exercice 1	15 et 16 du QCM p.441 43 p.448 60 p.454
Loi de refroidissement de Newton Modes de transfert thermique. Flux thermique. Résistance thermique.	Applications 5, 8 et 9 Exercice 2	17, 18 et 20 du QCM p.441 21 p.442 ; 22 p.443 ; 23 p.444-445 ; 49 p.449 ; 55 p.451 ; 58 p.453

Exercice 1 : Solarisation d'une piscine hors sol *Bac 2022 Nouvelle Calédonie*

Un particulier désire élever de quelques degrés la température de sa petite piscine hors sol à l'aide d'un dispositif simple, peu coûteux et écologique. Dans un guide de piscines, il trouve la documentation suivante :

« Le tapis solaire est un moyen écologique et économique de chauffer sa piscine. Le tapis solaire se compose de tuyaux souples en PVC de couleur noire assemblés.

Le principe est simple : les tuyaux emmagasinent l'énergie provenant des rayons du soleil. L'eau de la piscine est aspirée via une pompe et elle passe par les tuyaux où elle est chauffée. Elle repart ensuite dans le bassin. »



Le tapis solaire est doté de connecteurs qui permettent de relier entre eux jusqu'à 6 tapis en série, en fonction du volume d'eau de la piscine à chauffer.

Volume V d'eau dans la piscine en m^3	$0,9 \leq V \leq 5$	$5 \leq V \leq 8$	$8 \leq V \leq 12$	$12 \leq V \leq 16$	$16 \leq V \leq 20$	$20 \leq V \leq 25$
Nombre de tapis recommandé	1	2	3	4	5	6

Un tapis est un carré de 1,2 m de côté.

Données :

· Masse volumique de l'eau : $\rho_{eau} = 1000$ kg·m^{-3} ;

· Capacité thermique massique de l'eau : $c_{eau} = 4180$ J·kg^{-1}·K^{-1} ;

· Relation liant la température absolue T en kelvin (K) et la température θ en degré Celsius (°C) : $T(K) = \theta(°C) + 273,15$

· Le rendement η d'un capteur solaire est défini par le rapport de la puissance utile fournie par le capteur sur la puissance thermique incidente du rayonnement solaire arrivant sur la surface du capteur, c'est-à-dire

$\eta = \frac{P_u}{P_i}$ et le rendement d'un tapis solaire a pour valeur $\eta = 0{,}21$;

· 1 kWh = $3{,}6\times10^6$ J ;

· Coût d'un kWh : 0,16 euro ;

· Les caractéristiques de la piscine sont les suivantes :

- Hauteur d'eau dans la piscine $h = 1{,}3$ m ;
- Surface du bassin de la piscine $S = 8{,}0$ m^2.

Pendant le jour, les rayons du soleil parviennent à la surface de l'eau qui se réchauffe. On admet que l'eau de la piscine reçoit, au cours de la journée, une puissance thermique surfacique moyenne $P_{S1} = 170$ W·m^{-2} pendant une durée de 12 h.

Partie A : Bilan énergétique moyen sur une journée en l'absence de tapis solaires

A.1. Montrer que la valeur du transfert thermique Q_1 reçu par l'eau de la piscine pendant ces 12 h est proche de 6×10^7 J.

A.2. Énoncer le premier principe de la thermodynamique.

A.3. À l'aide de ce principe, déterminer la valeur de l'augmentation $\Delta\theta_1$ de la température de l'eau de la piscine.

A.4. En fin de journée, l'eau de la piscine a une température qui se situe autour de 24 °C.

Pendant la nuit, on considère que la température de l'air ambiant chute autour de 15 °C.

Justifier que l'eau de piscine va se refroidir au cours de la nuit.

A.5. Proposer une solution simple pour éviter les déperditions thermiques.

Partie B : Chauffage de la piscine à l'aide de tapis solaires

Pour élever de quelques degrés la température de l'eau de la piscine à un faible coût, le particulier décide de l'équiper de tapis solaires qu'il raccorde à la pompe lui permettant de filtrer l'eau.

B.1. Identifier le mode de transfert thermique qui explique :

- que le matériau des tapis se réchauffe ;
- que l'eau qui circule dans les tapis se réchauffe.

B.2. Déterminer la valeur de la puissance thermique incidente P_i du rayonnement solaire qui arrive sur un seul tapis.

B.3. Déterminer la valeur de la puissance thermique P_u fournie par ce tapis à l'eau.

B.4. On suppose que la saison dure 3 mois à raison de 12 h de chauffage solaire par jour.

Sachant qu'un tapis coûte 20 euros, indiquer si le coût d'investissement pour l'achat des tapis recommandés pour réchauffer la piscine sera amorti en fin de saison si on le compare au coût de la consommation d'un chauffage électrique.

Le candidat est invité à prendre des initiatives ; toute démarche même incomplète sera valorisée.

Exercice 2 : refroidissement d'un fer à cheval *Métropole 2022*

Le maréchal-ferrant est un artisan spécialisé dans le ferrage des chevaux ; il pose un fer sous chaque sabot du cheval afin de les protéger.

Un fer à cheval doit être parfaitement adapté à la morphologie du sabot du cheval pour que celui-ci ne se blesse pas. Cela nécessite un ensemble d'opérations réalisées lors de la pose du fer par le maréchal-ferrant : le fer est chauffé à une température d'environ 900 °C dans une forge pour être malléable. À l'aide d'un marteau, il est ensuite déformé pour s'ajuster à la forme du sabot.

Données :

- température du fer à la sortie de la forge : $\theta_0 = 900$ °C ;
- volume du fer à cheval : $V_{FER} = 104$ cm^3 ;
- masse volumique du fer, supposée indépendante de la température : $\rho_{FER} = 7{,}87$ g·cm^{-3} ;
- surface extérieure du fer à cheval : S = 293 cm^2 ;
- température ambiante extérieure : $\theta_{Ext} = 15$ °C ;
- capacité thermique massique du fer supposée indépendante de la température : $c_{Fer} = 440$ J·kg^{-1}·K^{-1} ;
- loi de Newton donnant l'expression du flux thermique reçu par le système {fer à cheval}, de température θ en provenance de l'air extérieur, de température θ_{Ext} : $\Phi = h \cdot S \cdot (\theta_{Ext} - \theta)$ avec h le coefficient de transfert thermique surfacique et S la surface d'échange :
  - dans l'air : $h_{air} = 14$ W·m^{-2}·K^{-1} ;
  - dans l'eau froide : $h_{eau} = 360$ W·m^{-2}·K^{-1}.

I. Chauffage du fer

Lors du chauffage du fer à cheval pour le rendre plus malléable, sa température passe de la température ambiante $\theta_{Ext} = 15$ °C à $\theta_0 = 900$ °C.

Q1. Déterminer la valeur de la masse m_{Fer} du fer à cheval.

Q2. Calculer la variation d'énergie interne ΔU du fer à cheval lors de cette étape.

Q3. Interpréter au niveau microscopique la variation d'énergie interne ΔU du fer à cheval.

II. Refroidissement du fer

Lorsque le fer est à la température souhaitée de 900 °C, le maréchal-ferrant le sort de la forge et le façonne à l'aide d'un marteau pendant une minute environ. Il s'installe ensuite près du cheval et il s'écoule à nouveau environ une minute.

Le fer, encore chaud, est alors posé quelques secondes sur la face inférieure du sabot, ce qui est sans douleur pour l'animal, mais brûle la corne en laissant une trace. Cela permet au maréchal-ferrant de juger si la forme est satisfaisante. Si c'est le cas, il refroidit rapidement le fer en le trempant dans l'eau puis le fixe définitivement sur le sabot à l'aide de clous.

II.1) Refroidissement à l'air libre

On considère que les transferts thermiques entre le fer à cheval et le milieu extérieur suivent la loi de Newton. Le système étudié est le fer à cheval.

Q4. Le maréchal-ferrant martèle le fer à cheval dans l'air. Appliquer le premier principe de la thermodynamique pour le système étudié entre les instants t et t + Δt ; la durée Δt étant supposée faible devant une durée caractéristique d'évolution de la température et la température variant de θ(t) à θ(t + Δt).

En déduire que l'équation différentielle régissant l'évolution de la température du fer à cheval peut s'écrire sous la forme : $\frac{d\theta}{dt} + \frac{\theta}{\tau} = \frac{\theta_{Ext}}{\tau}$ avec $\tau = \frac{m_{Fer} \cdot c_{Fer}}{h_{air} \cdot S}$

Dans ces conditions $\tau = 880$ s.

L'équation différentielle précédente admet pour solution la fonction :

$$\theta(t) = (\theta_0 - \theta_{Ext}) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + \theta_{Ext}$$

Q5. Vérifier que la fonction proposée θ(t) est bien solution de l'équation différentielle précédente.

Q6. Calculer la valeur de la température du fer au moment où le maréchal-ferrant le pose sur la face inférieure du sabot du cheval. Commenter.

II.2) Refroidissement dans l'eau avant la pose.

Pour accélérer le refroidissement du fer afin de le poser rapidement sur le sabot, le maréchal-ferrant plonge le fer encore chaud à la température de 600 °C dans un récipient contenant de l'eau à température ambiante de 15 °C que l'on considère comme constante.

Q7. En adaptant la solution obtenue dans le cadre du modèle précédent, estimer la valeur de la durée nécessaire pour que le fer soit refroidi à une température θ_{finale} = 40 °C à laquelle l'artisan pourra poser le fer à l'aide de clous sur le sabot du cheval.

Le candidat est invité à prendre des initiatives et à présenter la démarche suivie, même si elle n'a pas abouti. La démarche est évaluée et nécessite d'être correctement présentée.

Q8. Dans la réalité, 20 secondes suffisent pour refroidir le fer dans de l'eau à 15 °C. Commenter.