- Exploiter l'équation d'état du gaz parfait pour décrire le comportement d'un gaz.
- Identifier quelques limites du modèle du gaz parfait.
- Citer les différentes contributions microscopiques à l'énergie interne d'un système.
- Prévoir le sens d'un transfert thermique.
- Distinguer, dans un bilan d'énergie, le terme correspondant à la variation de l'énergie du système des termes correspondant à des transferts d'énergie entre le système et l'extérieur
- Exploiter l'expression de la variation d'énergie interne d'un système incompressible en fonction de sa capacité thermique et de la variation de sa température pour effectuer un bilan énergétique.
- Effectuer un bilan d'énergie pour un système incompressible échangeant de l'énergie par un transfert thermique modélisé à l'aide de la loi de Newton fournie. Établir l'expression de la température du système en fonction du temps.
- Effectuer un bilan quantitatif d'énergie pour estimer la température terrestre moyenne, la loi de Stefan-Boltzmann étant donnée.
- Discuter qualitativement de l'influence de l'albédo et de l'effet de serre sur la température terrestre moyenne.
- Effectuer un bilan d'énergie pour un système incompressible échangeant de l'énergie par un transfert thermique modélisé à l'aide de la loi de Newton fournie. Établir l'expression de la température du système en fonction du temps.

**Chapitre 15**

# Etude d'un système thermodynamique et bilans d'energie thermique

## I. Description d'un système thermodynamique

### I.1 Définition

- La matière est constituée d'un nombre trop grand d'entités (atomes, molécules, ions), pour que l'on puisse appliquer les lois physiques à l'échelle microscopique.
- On est donc obligé de décrire le comportement collectif d'un grand nombre d'entités à l'aide de grandeurs physiques macroscopiques, mesurables à l'échelle humaine telles que pression, volume, température.
- La constante d'Avogadro permet de faire le lien entre le microscopique et le macroscopique : La mole , abordée en classe de seconde, est une unité de quantité de matière qui contient autant d'entités qu'il y a d'atomes dans 12 g de carbone 12 , soit comporte $6{,}02.10^{23}$ atomes (constante d'Avogadro).
- Un système macroscopique est une portion d'espace limitée par une surface, contenant un grand nombre d'entités assimilés à des points matériels.

La pression résulte de la résultante F des forces exercées par les chocs des molécules sur la surface S de la paroi.


La pression P correspond à une force par unité de surface :

$$\boxed{P = \frac{F}{S}}$$

F force pressante (N)
S surface ($m^2$)
P pression (Pa)

- La pression P est une donnée macroscopique liée à la masse des molécules et à leur vitesse
- La temperature d'un gaz est liée à l'énergie cinétique des molécules

| Echelle macroscopique : La température | ⟺ | Echelle microscopique : L'agitation des molécules |
|---|---|---|

La température fournit une mesure macroscopique de l'énergie microscopique des particules.

### I.2 Le gaz parfait

Le modèle du gaz parfait repose sur 2 hypothèses :
Les molécules constituant le gaz sont assimilées à des points matériels (on néglige leur volume)
Les interactions à distance entre molécules sont négligées, en dehors des collisions.

Il existe une équation d'état simple qui décrit le modèle du gaz parfait $\boxed{P \times V = n \times R \times T}$

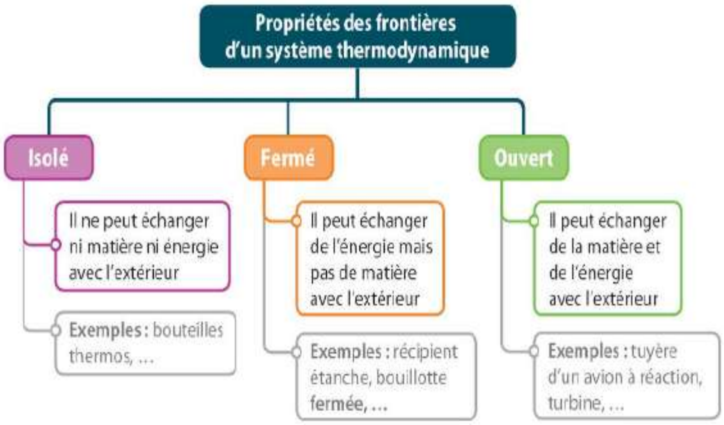
V volume du gaz ($m^3$)
R constante des gaz parfaits R = 8,314 $J.Kg.mol^{-1}$
n quantite de matiere (mol)
P pression du gaz (Pa)
T température du gaz (K)

Remarques : Limites d'application du modèle
- Il s'applique aux gaz à faible pression ( P< 1MPa )
- Il ne s'applique plus quand la température se rapproche de 0 K
- Si un système de gaz parfait évolue à température constante, l'équation d'état s'écrit : P x V = constante : c'est la loi de Mariotte.

Exemple:
Un ballon de foot contient 5500 $cm^3$ d'air à la pression de 2,0 bars et à 20 °C.
Calculer la quantite de matiere d'air qu'il contient.

## II. Premier principe de la thermodynamique

### II.1 L'energie interne




- Les particules d' un système, quel que soit son état, sont en mouvement désordonné, appelé agitation thermique.
A l'échelle macroscopique, on mesure cette agitation avec la température.
- Cette agitation se traduit par une énergie cinétique microscopique ; qui augmente avec la température.
- Il existe aussi une énergie potentielle microscopique, causée par toutes les interactions entre les entités composant le système.

- On se limitera à des systèmes fermés qui vont donc échanger de l'énergie à travers la frontière mais pas de matière.

L'Energie interne d'un système thermodynamique , notée U, lest la somme des énergies cinétiques potentielles microscopiques des entités constituants le système :

$$\boxed{U = E_{c_{micro}} + E_{p_{micro}}}$$

Remarque : L'énergie totale d'un système est lasomme des ses energies macroscopiques et microscopiques

$$E_{tot} = E_c + E_p + U$$

La variation d'énergie totale d'un système est donc $\boxed{\Delta E_{tot} = \Delta E_m + \Delta U}$

Lorsqu'un système est au repos macroscopique dans le référentiel d'étude, son énergie mécanique est constante.
La variation d'énergie totale du système est alors égale à sa variation d'énergie interne :

$$\Delta E_{tot} = \Delta U$$

### II.2 Formes de transfert d'énergie

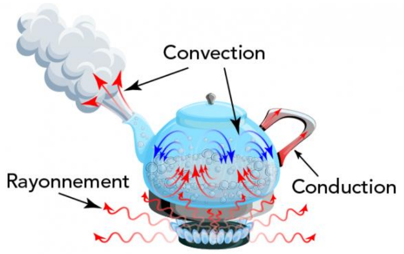
Il existe 2 formes de transfert d'énergie entre un système et l'extérieur :
- Le travail W, il est lié au déplacement du point d'application d'une force s'exerçant sur le système.

- Le transfert thermique noté Q : c'est l 'échange d'énegie à l'échelle microscopique entre un système thermodynamique et lemilieu extérieur, sans aucun déplacement macroscopique de la paroi qui les sépare.
Par convention, L'énergie thermique transférée Q est comptée positive quand le système reçoit de l'énergie, négative quand il en cède à l'extétérieur.

### II.3 Modes de transfert d'énergie

Les échanges d'énergie par transfert thermique peuvent s'effectuer suivant trois modes d'un système à un autre :

- Par **conduction** : C'est un transfert par contact dans un matériau ou à l'interface entre 2 milieux. L'énergie des particules se communique de proche en proche.
  Exemple : la chaleur perçue quand le Soleil nous éclaire




- Par **convection** : C'est un mode de transfert qui se produit au sein des fluides (gaz ou liquide). On parle souvent de transfert conducto-convectif car l'un va rarement sans l'autre.
  Exemple : l'air d'une pièce, réchauffée par un radiateur, qui s'élève car moins dense que l'air froid. Cela crée des mouvements de convection.

- Par **rayonnement** : Le transfert thermique par rayonnement se fait par l'intermédiaire d'une onde électromagnétique. C'est un transfert sans contact physique.
  Exemple : la chaleur perçue quand le Soleil nous éclaire

### II.4 Enoncé du premier principe

Lorsqu'un systeme immobile recoit une energie thermique Q et/ou un travail W, son énergie interne varie de $\Delta U$, $\Delta U = W + Q$

Exemple:
Un système reçoit un travail de 100 joules et cède une énergie thermique de 200 joules.
Calculer la variation de son énergie interne.

Remarque: il est plus facile de déterminer la variation d'énergie interne $\Delta U$ que l'énergie interne U

### II.4 Le flux thermique

Le flux thermique $\Phi$ à travers une surface, est la puissance thermique qui la traverse. Il évalue la vitesse du transfert thermique Q pendant une durée $\Delta t$ . Ce flux va spontanément de la source chaude vers la source froide.

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

$\Phi$ flux thermique (W)
Q énergie thermique (J)
$\Delta t$ durée du transfert thermique (s)

Résistance thermique d'une paroi plane :

- La résistance thermique d'un corps traduit sa capacité à s'opposer au transfert thermique .
- Soit une paroi dont les 2 faces sont à la température $T_1$ et $T_2$ avec $T_1 > T_2$, traversée par un flux thermique $\Phi$, la résistance thermique de cette paroi , $R_{th}$ , est définie par :

$$\boxed{R_{th} = \frac{T_1 - T_2}{\Phi}}$$

$\Phi$ flux thermique (W)
Rth résistance thermique ($K.W^{-1}$)
$T_1$ et $T_2$ températures (K)

• La résistance thermique $R_{th}$, d'une paroi plane, dépend de son épaisseur e, de sa surface S et de sa constitution

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

e epaisseur de la paroi (m)
S surface de la paroi ($m^2$)
λ conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$)

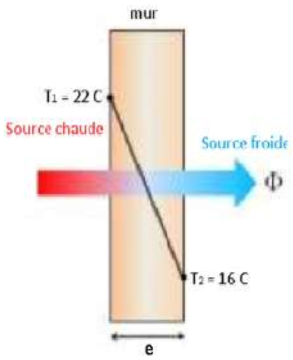
• Lorsque plusieurs parois sont accolées, la résistance thermique de l'ensemble est la somme des résistances thermiques : $R_{th\ TOTAL} = R_{th1} + R_{th2} + R_{th3} + \ldots\ldots$

• Exemples de conductivités :

| matériau ($W.m^{-1}.K^{-1}$) | air | bois | polystyrène | béton | verre | acier | aluminium | Cuivre λ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,0262 | 0,16 | 0,036 | 0,92 | 1,2 | 46 | 250 | 390 |

Plus λ est grand ($R_{th}$ petit ) plus le matériau est conducteur et moins il est isolant.

**Exercice 1 :** Soit le mur ci-dessous, constitué d'une épaisseur e = 25 cm de béton, et de surface




La surface du mur S = 20 m². Les températures $T_1$=22°C et $T_2$=16 °C.

a) Calculez la resistance thermique $R_{th}$ de la paroi

b) Calculez le flux thermique Φ

c) On colle sur la paroi, 10 cm de polystyrène pour l'isoler, calculez la nouvelle valeur du flux thermique Φ

### II.5 Capacité thermique

On s'intéresse ici à un système solide ou liquide, qui n'échange de l'énergie que par transfert thermique, sans changer d'état physique.

Lorsque la température d'une corps de masse m, liquide ou solide, passe de $T_i$ à $T_f$, sa variation d'énergie interne ΔU a pour expression : $\boxed{\Delta U = C. ( T_f - T_i ) = C. \Delta T}$

ΔU en Joules    ΔT en K ou °C

C est appelé capacité thermique du système et s'exprime en $J.K^{-1}$

Remarque : • Selon le signe de ΔT, ΔU sera positive ou négative.
En toute rigueur, **c** dépend de la température , mais on admettra cette valeur constante dans tout le chapitre.
• La capacité thermique massique c est l'énergie à fournir à chaque kg du corps pour augmenter sa température d'un degré. La capacité thermique s'écrira $\boxed{C = m \times c}$ avec m la masse du système.

Exemple :

| Matériau ($J.kg^{-1}.K^{-1}$) | eau | cuivre | éthanol | brique | verre | aluminium C |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 4180 | 385 | 2430 | 840 | 720 | 897 |

Cela signifie que:
• 1 kg d'eau à besoin de 4180 J pour augmenter sa température de 1°

**Exercice 2 :**

Une bouilloire électrique consomme une puissance de 2,0 kW. Léa veut chauffer de l'eau pour préparer une infusion.
Calculer le temps nécessaire pour que la température de l'eau passe de 20 °C à 98 °C.
Le volume d'eau utilisé pour la préparation V = 150 mL.

## III. Evolution temporelle de la température d'un système

Un thermostat est un système capable d'échanger de l'énergie sous forme de transferts thermiques sans que sa température ne soit modifiée.

Loi phénoménologique de Newton :

◆La puissance thermique ou le flux conducto-convective transférée à travers la surface d'aire *S* du système vaut :

$$\boxed{\Phi(t) = h.S.(T_{exe} - T(t))}$$

◆Cette loi permet de caractériser les échanges thermiques élémentaires dQ d'une phase condensée (c'est-àdire un solide ou un liquide) en contact avec un thermostat pendant une durée infinitésimale dt :

$$\boxed{\mathbf{Q}\ (t) = h \times S \times (T_e - T(t)) \times \Delta t}$$

h : coefficient d'échange conducto-convectif ($W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}$.)
S : surface de contact entre le systeme et l'éxterieur S ($m^2$)
T : température du système
$T_e$: température du thermostat

D'après le premier principe appliqué au système étudié
ΔU=W+Q   Or W= 0 car le système n'échange pas de travail avec l'extérieur.

$\Delta U = Q = m \times c \times \Delta T$   Or $\phi(t) = \dfrac{Q}{\Delta t}$

$\phi(t) = \dfrac{m \times c \times \Delta T}{\Delta t}$   et $\Phi(t) = h.S.(T_e - T(t))$

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{h.\ S.(T_e - T(t))}{m \times c}$$

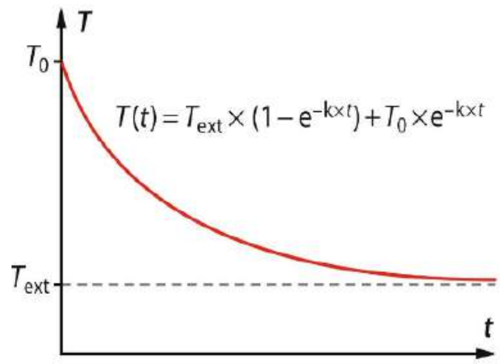
quand $\Delta t \to$ vers 0   $\dfrac{\Delta T}{\Delta t} = \dfrac{dT}{dt}$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{h \times S}{m \times c} \times (T_e - T(t))$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{h \times S}{m \times c} \times T_e - \frac{h \times S}{m \times c} \times T(t)$$

$$\boxed{\frac{dT}{dt} + \frac{h \times S}{m \times c} \times T(t) = \frac{h \times S}{m_{air} \times c_{air}} \times T_e}$$

équation différentielle




La solution de cette équation est $\boldsymbol{T(t) = T_{ext} + (T_0 - T_{ext}) \times e^{-k \times t}}$

**Exercice 3 :**

Malik a oublié sur la table de sa cuisine, après un appel intempestif, le café qu'il vient de préparer à une température de 80 °C.

Le volume délivré par la machine est de $V = 25$ mL.

La température de la pièce est de $T_{ext} = 20$ °C.

Données : Capacité thermique massique du café : $c = 4{,}18\ J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}$

Masse volumique de l'eau : $\rho = 1{,}0\ g \cdot mL^{-1}$

**1.** Déterminer la capacité thermique *C* du café.

**2.** Quel est le signe de d*Q* au cours du refroidissement du café ? Justifier.

**3.** Vers quelle valeur va tendre la température du café ? Expliquer le processus de refroidissement en présentant les types de transferts que va connaître le café.

**4.** Montrer en appliquant le premier principe de la thermodynamique au café que sa température *T*(*t*) obéit à l'équation différentielle suivante : $\dfrac{dT(t)}{dt} + k \times T(t) = k \times T_{ext}$

Exprimer la constante k en fonction de *h, S et C.*

**5.** Montrer que la solution de l'équation ci-dessus est de la forme $T(t) = T_{ext} + A \times e^{-k \times t}$. Donner l'expression puis calculer A.

**6.** Représenter la fonction donnant l'évolution de la température au cours du temps. Justifier la cohérence du tracé.

**7.** Pour espérer le boire plus chaud au bout d'un même temps vaut-il mieux le garder dans une tasse de plus grande ou plus petite largeur ? Justifier.

## IV. Flux thermique par rayonnement

### II.1 Rayonnement et température

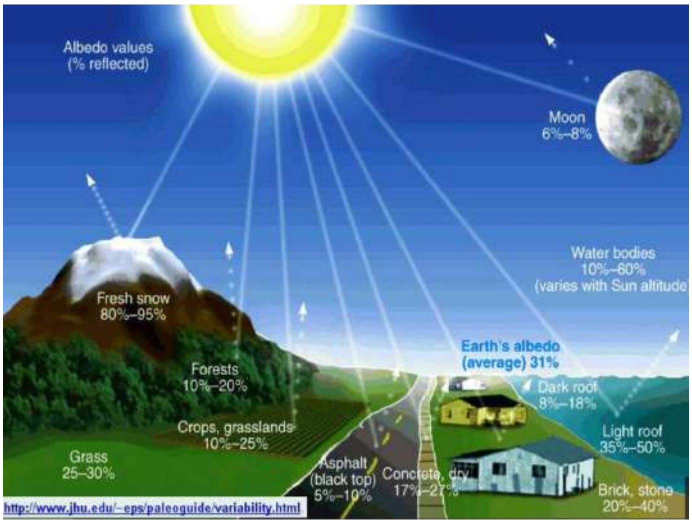
**Loi de Stefan**

La puissance Ps rayonnée par mètre carré par un corps chaud appelé corps noir à la température T est donnée par la loi : $\boxed{Ps = \sigma.\ T^4}$

où $\sigma = 5{,}67 \times 10^{-8}$ W·m$^{-2}$ K$^{-4}$ est la constante de Stefan-Boltzmann ; P (W.m$^{-2}$) ; T (K).

### II.2 Bilan thermique du système Terre-atmosphère

La Terre reçoit du Soleil un rayonnement dont le flux par mètre carré est de 340 W·m$^{-2}$ puis elle réémet un rayonnement dans le domaine infrarouge de longueur d'onde environ 10 µm. En l'absence d'atmosphère, qui est à l'origine d'un albédo et d'un effet de serre, la température estimée de la Terre à partir de la loi de Stefan serait de 253 K. La température moyenne du globe est d'environ 15 °C.




L'albédo du système Terre-atmosphère est la fraction de l'énergie solaire qui est réfléchi vers l'espace. Sa valeur est comprise entre 0 et 1. Plus une surface est réfléchissante, plus son albédo est élevé. Les éléments qui contribuent le plus à l'albédo de la Terre sont les nuages, les surfaces de neige et de glace.

L'albédo total de la surface terrestre est de 30,13.

L'effet de serre est le nom donné au phénomène expliquant que tous les rayonnements dus à la Terre ne repartent pas dans l'espace mais une partie est absorbée par l'atmosphère.

**Exercice 4:**

Les joueurs de tennis utilisent les poches de leur short pour y loger les balles et les casquettes pour protéger leur front et leurs yeux du Soleil.

Données

- Loi de Stefan-Boltzmann : la puissance rayonnée par une paroi de température thermodynamique T, d'aire S vaut $P_{ext,ray} = \sigma.T^4.S$ avec $\sigma = 5{,}67 \times 10^{-8}$ W·m$^{-2}$·K$^{-4}$.
- Puissance du transfert thermique conducto-convectif entre une paroi d'aire S à la température T et un fluide à la température $T_{ext}$ loin de la paroi : $P_{ext,cc} = h.S.(T - T_{ext})$
- Coefficient de transfert conducto-convectif de l'air : h = 5,0 W·K$^{-1}$·m$^{-2}$
- Front humain : rectangle d'aire $S_{front}$ = 80 cm$^2$

**1.** Un joueur de tennis est tête nue face au Soleil.
Par quel mode de transfert son front reçoit-il de l'énergie thermique de la part du Soleil ?
Pourquoi la visière de la casquette limite-t-elle ce transfert ?

**2.** Ce joueur finit sa partie sans casquette et est victime d'une insolation, provoquant une fièvre qui fait monter la température de surface de son front à $T_{front}$ = 39 °C.
Calculer la puissance thermique rayonnée par son front.
Calculer l'énergie thermique $Q_{ray}$ perdue par le joueur en une nuit de 7 heures.

3. Le lendemain, le joueur, guéri, s'entraîne tête nue, alors que la température de l'air vaut $T_{ext}$ = 12 °C. La température de son front vaut $T_{front}$ = 33 °C. Calculer la puissance thermique cédée par son front à l'air ambiant par transfert conducto-convectif et l'énergie thermique $Q_{cc}$ dépensée en 4 heures d'entraînement.

4. À la date t = 0 s, une balle d'aire $S_{balle}$ = 137 cm$^2$ et de capacité thermique C = 80 J·K$^{-1}$ tombe de sa poche où elle était à la température $T_0$ = 31 °C.
Sa température à la date t vaut : $T(t) = T_{ext} + (T_0 - T_{ext})e^{-t/\tau}$ avec $\tau = \dfrac{C}{hS_{balle}}$

À quelle date la température de la balle vaut-elle $T_1$ = 15 °C ?