

**COURS n°8 « Modèle du gaz parfait et le premier principe de la thermodynamique »****Les compétences à acquérir...**

- Énergie interne d'un système. Aspects microscopiques.
- Citer les différentes contributions microscopiques à l'énergie interne d'un système.
- Premier principe de la thermodynamique. Transfert thermique, travail.
- 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.
- Capacité thermique d'un système incompressible. Énergie interne d'un système incompressible.
- 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 l'étude énergétique d'un système thermodynamique.
- Modes de transfert thermique. Flux thermique. Résistance thermique.
- Bilan thermique du système Terre-atmosphère. Effet de serre.
- Loi phénoménologique de Newton, modélisation de l'évolution de la température d'un système au contact d'un thermostat.

**I- Gaz parfait**

1- Modèle du gaz parfait: Le **modèle du gaz parfait** est souvent utilisé pour prévoir le comportement de certains gaz lorsqu'on fait varier certains paramètres tels que la pression ou la température.

Ce modèle repose sur les deux hypothèses suivantes :

- Les entités n'ont pas d'interactions entre elles : on considère qu'elles sont suffisamment éloignées les une des autres et **qu'il n'existe pas de forces entre elles**.
- Les entités constituant le gaz ont un volume négligeable devant le volume de l'enceinte qui les contient : elles sont **assimilées à des points matériels**.

2- L'équation d'état du gaz parfait

Pour une quantité de matière n de gaz parfait, la pression P , la température T et le volume V vérifient la relation :

P pression exprimée en	$1,0 \text{ atm} = 1,0 \text{ bar} = \dots\dots\dots \text{ Pa}$ $1013 \text{ hPa} =$
V volume exprimé en	
T température exprimé en	$T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273,15$
n quantité exprimée en	
R constante des gaz parfaits $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	

Exercices:

Calculer la quantité d'hélium n_{He} contenue dans une enceinte de volume $V = 5,0 \text{ L}$ dont la pression est $P_1 = 2,5 \text{ atm}$ et la température est $T_1 = 30^{\circ}\text{C}$

La quantité d'hélium est maintenant égale $n'_{\text{He}} = 1,00 \text{ mol}$, la pression est $P_2 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ et la température est $T_2 = 25^{\circ}\text{C}$.
Calculer le volume V_2 occupé par ce gaz
Comment appelle-t-on ce volume ?

Remarque :

Si la température du système gaz parfait reste (.....), on retrouve **la loi de Boyle Mariotte**, l'équation d'état s'écrit **$P \times V =$**

Exercice : Un gaz est maintenu dans une seringue : la pression est de $P_3 = 1,0 \text{ bar}$ et le volume est de $V_3 = 3,0 \text{ cm}^3$
Le gaz est comprimé lentement (température constante) de façon obtenir une pression $P_4 = 2,5 \text{ bar}$
Quel est le nouveau volume V_4 ?

II- Introduction à la notion d'énergie interne U d'un système :

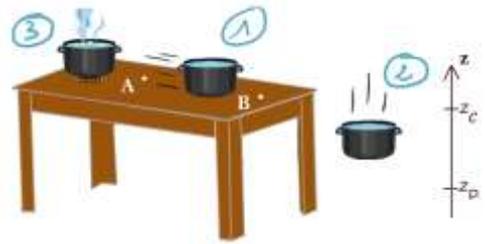
1- Une drôle d'expérience : Considérons comme système d'étude une marmite remplie d'eau {marmite + eau}

① Dans un premier temps, la marmite est posée sur une table et poussée par une main exerçant une force constante \vec{F}_{main} sur tout le trajet AB

Cette marmite remplie d'eau est mise en mouvement : Tant que elle reste sur la table, nous pouvons dire que l'énergie E_{tot} du système s'écrit :

$E_{tot} =$

avec



Le théorème de l'énergie cinétique, nous permet d'écrire aussi que $\Delta E_c =$

On a donc une variation d'énergie totale $\Delta E_{tot} =$

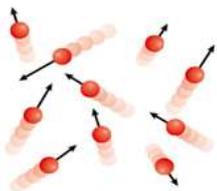
② Considérons maintenant que la marmite est lâchée d'une altitude z_C sans vitesse initiale. La variation d'énergie totale ΔE_{tot} du système s'écrit :

③ La marmite est sur la table et posée sur un réchaud. L'eau bout. La variation d'énergie totale du système s'écrit :

.....

Il est nécessaire d'introduire une

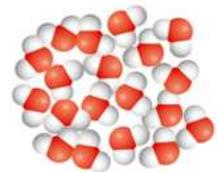
2- Energie interne d'un système U :



L'énergie interne U d'un système correspond à sa Elle correspond à la qui existent à l'intérieur de ce système, au niveau du fait de ses constituants (atomes, molécules, ions)

- Du fait de l'agitation thermique, chaque constituant possède une énergie cinétique

Cette agitation augmente lors d'une augmentation de



- Les énergies potentielles d'interaction sont liées aux interactions entre les constituants qui constituent le système.

Elles peuvent être des

Nous définissons ainsi une énergie interne $U =$

Il est quasiment impossible de mesurer toutes ces énergies, c'est pourquoi nous nous intéresserons

3- La variation d'énergie totale d'un système

La variation d'énergie totale ΔE_{tot} d'un système physique se décompose en :

- en une variation d'énergies, au niveau, (ΔE_m) : telle que $\Delta E_m =$

- en une variation d'énergie interne, au niveau, ΔU

ainsi la variation de l'énergie totale d'un système, en thermodynamique, est s'écrit :

$\Delta E_{tot} =$

Dans cette partie du programme enterrminale, nous n'étudierons que des systèmes **au repos à l'échelle macroscopique:**



III- Le premier principe de la thermodynamique :

1- Énoncé du principe:

Le **premier principe de la thermodynamique** énonce que la variation d'énergie interne ΔU d'un système, qui est au repos macroscopique $\Delta E_m = \dots$, qui n'échange pas de matière avec l'extérieur (système) et qui évolue d'un état initial à un état final est égale à la somme des énergies échangées par le système avec l'extérieur, sous forme de et / ou sous forme

$$\Delta U_{i \rightarrow f} =$$

- W travail exprimé en
- Q énergie thermique transférée exprimé en
- $\Delta U_{i \rightarrow f}$ variation d'énergie interne exprimée en



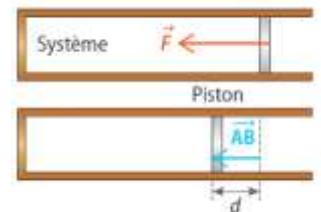
Remarque importante :

Par convention, W et Q sont comptés quand le système reçoit cette énergie et quand il cède à l'extérieur.

2- Le travail W

Exercice :

Un gaz, dit compressible, est placé dans un cylindre, muni d'un piston mobile.
 Une force pressante \vec{F} constante est exercée sur le piston
 Le piston se déplace de d dans le sens de la diminution de volume du gaz.
 Exprimer le travail reçu par le système {piston-gaz}



Le travail W est reçu par le système. Il est donc

Dans de nombreux exercices, le système sera dit
 Ce qui entraîne que le travail $W = \dots$

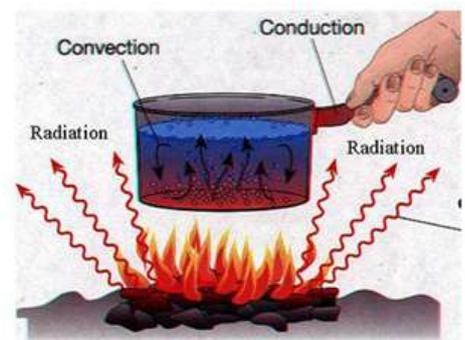
La variation d'énergie interne $\Delta U = W + Q$ ne sera due, dans ce cas de système incompressible, qu'à un transfert thermique :

$$\Delta U =$$

IV- Les trois modes de transfert :

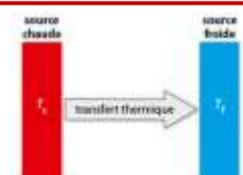
1- Mode de transfert : Un transfert thermique (la chaleur) peut se propager de 3 façons différentes

- Par (l'agitation thermique, l'agitation des molécules ou atomes se transmet de proche en proche dans la matière, mais sans transport global de matière ; ce mode de transfert a principalement lieu dans les solides ;
- Par (l'agitation thermique se transmet de proche en proche dans la matière et avec déplacement d'ensemble de celle-ci) ; ce mode de transfert a lieu dans les fluides (liquides et gaz)
- Par (l'absorption ou l'émission d'ondes électromagnétiques modifie l'agitation thermique) ; ce mode de transfert a lieu quel que soit l'état, et se fait même au travers du vide.



2- Sens de transfert thermique :

Le sens du transfert thermique ne peut se faire que d'un milieu qui a la température (la source) vers un milieu qui a la température (la source), jusqu'à ce que leurs températures soient



3- Définition flux thermique :

Les transferts thermiques entre 2 systèmes (Une source chaude T_C et une source froide T_F) ne sont pas instantanés, ils évoluent en fonction du temps.

On définit pour suivre cette évolution **le flux thermique Φ** qui caractérise la vitesse d'un transfert thermique entre 2 systèmes, c'est l'énergie échangé par unité de temps,

Le flux thermique Φ (phi) traduit la vitesse de transfert thermique

$\Phi =$

Φ en watt (W)
 Δt en seconde (s)
 Q en joule (J)

Le flux thermique correspond à une

Rappels :

$P =$

E énergie en J
 P puissance en W
 Δt durée en s

V- Les exemples à connaître :

1- Cas n°1 d'un système fermé et incompressible :

Dans le cas d'un système fermé, incompressible et en l'absence de changement d'état, la variation d'énergie interne d'un système est **proportionnelle** à la variation de température

$\Delta U =$

Avec $\Delta T = T_{\text{finale}} - T_{\text{initiale}}$

Si $C = m \times c$ alors

$\Delta U =$

m : masse en kilogramme (kg)

ΔT : variation de température avec T en kelvin (K)

Avec $T(K) = T(^{\circ}C) + 273,15$

Donc $\Delta T(K) = \Delta T(^{\circ}C)$

ΔU : Variation d'énergie interne en joule (J)

c : capacité thermique massique en joule par kelvin par kilogramme ($J.K^{-1}.kg^{-1}$)

C : capacité thermique en joule par kelvin ($J.K^{-1}$)

Remarque : Que signifie une capacité thermique massique de l'eau $c_{\text{eau}} = 4,18.10^3 J .kg^{-1}.K^{-1}$?

Exercice : Calculer la variation d'énergie interne ΔU de la marmite en fonte de masse $m_f = 10$ kg remplie d'un volume d'eau $V_{\text{eau}} = 150$ mL que l'on chauffe sans la « déplacer ». La température du système {marmite + eau} passe d'une température $T_i = 20^{\circ}C$ à une température $T_f = 95^{\circ}C$.

Données : capacité massique de l'eau et de la fonte : $c_{\text{eau}} = 4,18.10^3 J .kg^{-1}.K^{-1}$ et $C_{\text{fonte}} = 4,70.10^3 J .K^{-1}$

2- Etude du flux thermique à travers une paroi plane :

Pour une paroi plane, dont deux faces sont à des températures différentes T_1 et T_2 , en fonction du matériau constituant la paroi, l'énergie Q est transférée plus ou moins rapidement de la source vers la source

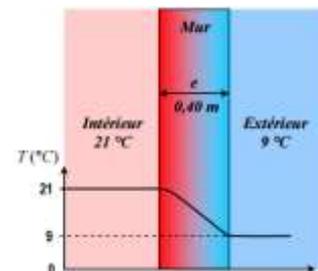
Définition de la résistance thermique :

La résistance thermique R_{th} d'un corps traduit sa capacité à au flux thermique.

Pour une paroi plane dont les deux faces sont à la température T_C et T_F avec $T_C > T_F$, traversée par un flux thermique Φ , la résistance thermique R_{th} est définie par :

$\Phi =$

Φ en W
 T en K ou $^{\circ}C$
 R_{th} en



Pour une paroi plane, la résistance thermique dépend de son épaisseur e , sa surface S et de la conductivité thermique λ du matériau

Ainsi

$$R_{th} =$$

- e en m
- S en m^2
- λ en $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
- R_{th} en $K \cdot W^{-1}$

Matériau	λ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
Air	0,026
Polystyrène	0,036
Bois	0,16
Béton	0,92
Verre	1,2
Acier	46
Aluminium	250
Cuivre	390

On peut donc exprimer le flux thermique Φ de 2 façons :

Remarques :

- Plus la résistance thermique est importante plus le flux thermique est
- Un matériau possédant une résistance thermique élevée est un bon
- Plus la conductivité thermique est faible plus le matériau est de chaleur
Cas de l'air :
- D'après le tableau précédent, le meilleur isolant est (double
- Si plusieurs parois sont superposées leurs résistances thermiques

Exercice: La résistance thermique d'une vitre est $R_{th} = 5,0 \times 10^{-3} K \cdot W^{-1}$; la température de la pièce est $T_c = 21^\circ C$, la température extérieure est $T_f = 9^\circ C$. Calculer le flux thermique et la chaleur perdue en 1h.



2- Cas n°2 : Etude du bilan radiatif de la Terre : Transfert thermique par rayonnement

Le transfert thermique par **rayonnement** est l'échange de photons, par émission et absorption, entre deux corps. C'est le seul mode de transfert thermique possible dans le c'est-à-dire entre le et la

a- Rayonnement et température :

Du fait de sa température T , tout corps émet un **rayonnement électromagnétique**, de flux thermique φ_E vérifiant la loi de Stefan-Boltzmann

$$\varphi_E =$$

- φ_E en watt par mètre carré (W)
- T en kelvin (K)
- S en mètre carré (m^2)

σ est la constante de Stefan-Boltzmann
Quelle est son unité ?



$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \dots\dots\dots$$

Remarque : Le flux thermique φ_E peut être défini comme une puissance : On parle alors d'une

HISTOIRE DES SCIENCES

Le physicien et philosophe autrichien **Ludwig Boltzmann** (1844-1906) est l'un des pères fondateurs de la thermodynamique moderne. Il est l'auteur des principes de base concernant l'irréversibilité.

Exercice :

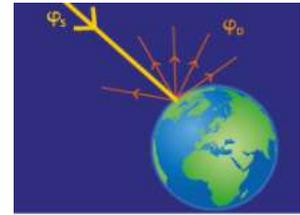
Le Soleil est de forme sphérique de rayon $R = 6,96 \times 10^8$ m, de surface $S = \dots\dots\dots$ et de température de surface $T_s = 5\,778$ K.
Calculer le flux thermique du Soleil:



2- Le cas de la terre : Albédo et effet de serre :

Après avoir atteint la terre et son atmosphère, une partie du rayonnement solaire $\varphi_{S-reçu/T}$, est réfléchi et diffusé vers l'espace : $\varphi_{diff/T}$. Le reste est absorbé par la terre (continents, océans, ...) et par son atmosphère. L'albédo noté A du système {Terre, atmosphère} permet de quantifier ce phénomène !

$$A =$$



Quelques valeurs d'albédo :

- Mer : $0,05 < A < 0,15$

Forêt : $0,05 < A < 0,20$

- Sable : $0,25 < A < 0,45$

Neige : 0,8

Application : La fonte des pôles et les gaz à effet de serre dans l'atmosphère sont souvent utilisés pour expliquer le réchauffement climatique.

Pour comprendre ce phénomène, effectuons un bilan dit bilan radiatif sur le système {Terre ; atmosphère}. Il s'agit d'étudier les flux entrant et sortant du système.



1 : Une partie du flux thermique émis par le soleil est reçu par la terre. Il sera noté

2 : Une partie de ce flux est diffusé par l'atmosphère dans l'espace

$$A = \quad \text{donc } \varphi_{diff/T} =$$

3 : L'autre partie $\varphi_{abs/T}$ est absorbée par la terre

$$\varphi_{absorbé/T} =$$

$$\text{donc } \varphi_{absorbé/T} =$$

4 : La Terre est un corps possédant une température T_T , celle-ci émet un flux thermique qui, d'après la loi de Stefan-Boltzmann, s'écrit

$$\varphi_{émis/T} =$$

5 : Une partie de ce flux est renvoyé dans l'espace

6 : L'autre partie est absorbée par l'atmosphère puis une partie est renvoyé vers la terre et absorbée. C'est ce que l'on appelle l'effet de serre.

$$\text{avec } \varphi'_{absorbé/T} = \quad \text{avec } \alpha \text{ (alpha)} = 0,75$$

Effectuons un bilan radiatif du système

La 1^{ère} loi de la thermodynamique nous permet d'écrire que : $\Delta U =$

Il n'y a pas de variation d'énergie interne du système car

$$\text{Donc } \Delta U =$$

De plus, le système étant incompressible $W = 0$

Donc $Q =$ mais avec $Q =$

$$\text{ou } Q_{reçu} - Q_{émis} = 0$$

Donc

On parle **d'équilibre radiatif** :

La somme des flux reçus $Q_{reçu}$ est égale à la somme des flux émis $Q_{émis}$

Conclusion :

$T_T^4 =$

- La température T_T dépend bien sur de la température du soleil et donc du flux émis par celui-ci.
- Si l'albédo A diminue alors $(1 - A)$ et T_T
C'est le cas si les pôles
 $A_{\text{neige}} \quad A_{\text{sol}}$
- Si α augmente alors le dénominateur diminue donc T_T
C'est le cas lorsque

Calculez la température moyenne T_T sur Terre avec cette étude simplifiée.

$A = 0,30 \quad \alpha = 0,75$
Rayon de la Terre $R_T = 6400 \text{ km}$
et $\varphi_{S\text{-reçu}/T} = 1,8 \cdot 10^{17} \text{ W}$

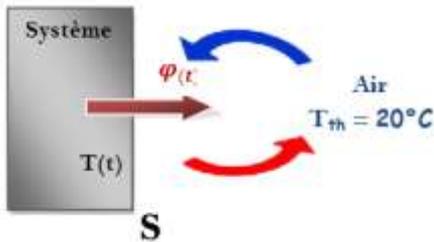
3- Etude de transfert par convection : Loi de Newton



Question existentielle ?

Un café est servi à une température $T_0 = 70^\circ\text{C}$. Au bout de combien de temps vais-je pouvoir le boire à une température de $T = 40^\circ\text{C}$ si celui-ci est posé dans une salle à température $T_{th} = 20^\circ\text{C}$?

a- Modélisation du système et du milieu extérieur :



- Le système étudié est le système dont la température initiale est $T_0 =$
- Le système est et reste au repos
- Le transfert thermique $\varphi(t)$ se fait du système (source) vers l'extérieur (source) par et a lieu sur la
- Un thermostat est un objet dont la température reste Ici le thermostat est

b- Loi de Newton : Elle n'est pas à connaître par cœur, elle vous sera donnée.

Le flux thermique $\varphi(t)$, échangé entre un système et un thermostat par convection, est proportionnel à la variation de température $\Delta T = T(t) - T_{Th}$

$\varphi(t) = -h \times S \times [T(t) - T_{Th}]$

S correspond à la surface entre le système et le thermostat
 h est un coefficient de surface / de proportionnalité
Le signe – traduit bien le fait que le système de l'énergie en se refroidissant.

c-Interprétation du phénomène :

- Le premier principe de la thermodynamique : $\Delta U =$
Le système étant incompressible alors $W =$ et la variation d'énergie interne du système ΔU n'est dû qu'à un échange de chaleur $\Delta U =$
- la variation d'énergie interne du système incompressible est proportionnelle à la variation de température $\Delta U =$
- Le flux thermique entre le système et le thermostat est : $\varphi(t) =$ (Ici le flux thermique est

Combinons maintenant ces 3 relations et la loi de Newton afin d'écrire une équation traduisant le phénomène :

Afin d'étudier l'évolution de la température $T(t)$ en fonction du temps, nous n'allons pas prendre des grands intervalles de temps Δt mais des « petits » intervalles de temps dt

Qu'est qu'une équation différentielle du premier ordre ? C'est une relation qui relie une fonction (ici $T(t)$) et sa dérivée par rapport au temps.

d- Résolution de l'équation différentielle :

Identifions a et b

$$\frac{dT(t)}{dt} = -\frac{1}{\tau} \times T(t) + \frac{T_{th}}{\tau}$$

ou

$$\frac{dT(t)}{dt} + \frac{1}{\tau} \times T(t) = \frac{T_{th}}{\tau}$$

Par identification, $a =$ et $b =$

La solution est donc

Mathématiquement

Une équation linéaire du premier ordre avec un second membre s'écrit

$$y'(x) + a \cdot y(x) = b$$

La solution est :

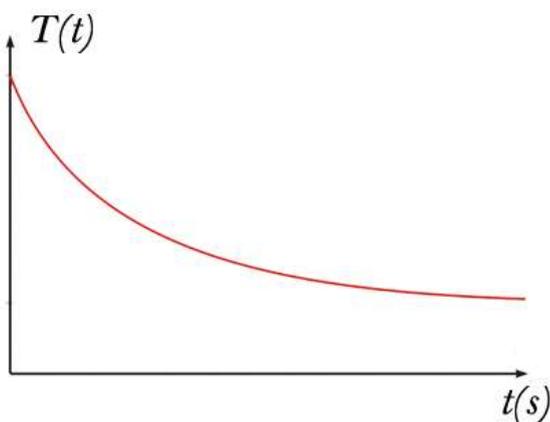
$$y(x) = A \times e^{ax} + B$$

e^x étant la fonction exponentielle

$$e^0 = \quad \text{et} \quad \lim_{x \rightarrow \infty} e^x =$$

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} e^{-x} =$$

e- Interprétation de la courbe $T(t)=f(t)$



f- Réponse à la question ?

Question existentielle ?

Un café est servi à une température $T_0 = 70^\circ\text{C}$. Au bout de combien de temps vais-je pouvoir le boire à une température de $T=40^\circ\text{C}$ si celui-ci est posé dans une salle à température $T_{\text{th}} = 20^\circ\text{C}$?