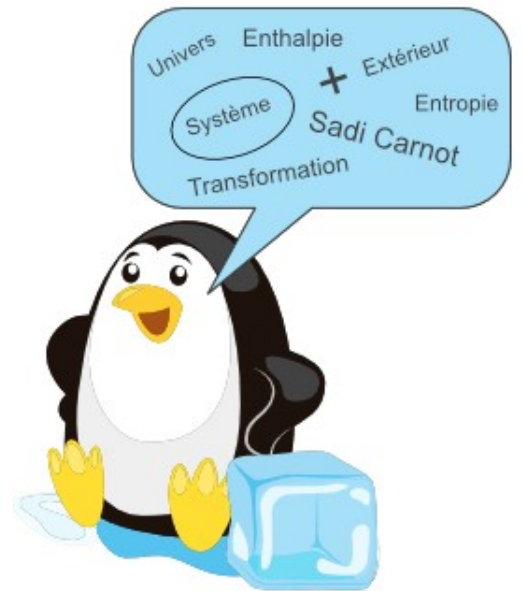


T2: énergie échangée par un système au cours d'une transformation



Notions et contenu	Capacités exigibles
Énergie échangée par un système au	cours d'une transformation.
Transformation thermodynamique subie par un système. Évolutions isochore, monotherme, isotherme, monobare, isobare.	Définir un système adapté à une problématique donnée.
Travail des forces de pression. Transformations isochore, monobare.	Évaluer le travail des forces de pression par découpage en travaux élémentaires et sommation sur un chemin donné dans le cas d'une seule variable. Interpréter géométriquement le travail des forces de pression dans un diagramme de Clapeyron.
Transfert thermique. Transformation adiabatique. Thermostat, transformations monotherme et isotherme.	Distinguer qualitativement les trois types de transferts thermiques : conduction, convection et rayonnement. Identifier dans une situation expérimentale le ou les systèmes modélisables par un thermostat. Proposer de manière argumentée le modèle limite le mieux adapté à une situation réelle entre une transformation adiabatique et une transformation isotherme.

I TRANSFORMATION THERMODYNAMIQUE SUBIE PAR UN SYSTEME

I-1 Transformation

Le système:

très souvent, pour simplifier, nous utiliserons un modèle.

- Le modèle du gaz parfait

Définition : les particules du gaz parfait sont ponctuelles et sans interaction à distance, entre elles.

L'équation d'état est alors : $PV = nRT$

- Le modèle de la phase condensée idéale

Une phase condensée idéale (liquide ou solide) est strictement incompressible et indilatable.

L'équation d'état est alors : $V = \text{constante}$

En thermodynamique, nous étudierons l'évolution d'un système fermé d'un état d'équilibre (1) vers un état d'équilibre (2). Le système subit alors une transformation.

En pratique, la transformation est initiée par une **modification de l'extérieur** du système qui entraîne une modification d'une de ses variables d'état. À l'état initial, le système n'est donc plus en équilibre avec l'extérieur, ce qui l'amène à évoluer spontanément vers un nouvel état d'équilibre. Pour que la transformation se produise, il faut donc modifier un paramètre afin que le système quitte son état d'équilibre initial jusqu'à en atteindre un autre.

On appelle **transformation** d'un système thermodynamique, son passage d'un état d'équilibre initial à un nouvel état d'équilibre final. Au moins une des variables d'état du système varie lors d'une transformation.

Notation : on notera par la lettre Δ les variations de toute variable d'état entre l'état initial (1) et l'état final (2).

variation de volume: $\Delta V = V_2 - V_1$; variation de pression: $\Delta P = P_2 - P_1$.

De manière générale, si F est une fonction d'état alors $\Delta F = F_2 - F_1$.

On remarque que la variation de F ne dépend que de l'état initial et de l'état final et pas de la nature de la transformation ayant amené le système de l'état (1) à l'état (2).

Si la transformation est cyclique (état final = état initial) alors $\Delta F = 0$.

Au cours d'une transformation cyclique la variation de toute fonction d'état du système est nulle.

L'état initial du système est toujours connu, la première des choses à faire lorsque l'on étudie une transformation est généralement de déterminer son état final. Il est souvent utile pour cela de spécifier les **caractéristiques de la transformation**.

I-2 - Vocabulaire de description des transformations

Le préfixe « **iso** » qualifie toujours une propriété *du système*, sans s'occuper de ce qui se passe à l'extérieur.

Une transformation est dite **iso - quelque chose** quand une grandeur d'état du système est constante tout au long de la transformation.

Le préfixe « **mono** » qualifie toujours une propriété *de l'extérieur*, sans s'occuper de ce qui se passe dans le système.

Une transformation est dite **mono - quelque chose** quand un paramètre extérieur est constant tout au long de la transformation.

Transformation isochore

Une transformation est isochore lorsque le volume du système reste constant tout au long de la transformation : $V = \text{constante}$.

Transformation monobare/isobare

Une transformation est monobare lorsque la pression extérieure reste constante : $P_{\text{ext}} = \text{constante}$.
Une transformation est isobare lorsque la pression du système est toujours définie et reste constante : $P_{\text{sys}} = \text{constante}$.

Transformation monotherme / isotherme

Une transformation est monotherme lorsque la température extérieure reste constante : $T_{\text{ext}} = \text{constante}$.

Une transformation est isotherme lorsque la température du système est toujours définie et reste constante : $T_{\text{sys}} = \text{constante}$.

Remarques :

Si la paroi du système permet les transferts thermiques, alors une transformation isotherme est forcément monotherme avec équilibre thermique dans les états (1) et (2).

Si la paroi du système peut se déformer, alors une transformation isobare est forcément monobare avec équilibre mécanique dans les états (1) et (2).

Attention, la réciproque n'a aucune raison d'être vraie.

I-3 – Les différents types d'échanges d'énergie

Un système thermodynamique fermé non isolé échange de l'énergie avec l'extérieur. Cet échange peut s'effectuer de deux manières : "travail" ou "transfert thermique".

Convention thermodynamique

En thermodynamique (comme en mécanique) on compte positivement l'énergie reçue par le système.

Travail

Un travail correspond à un transfert d'énergie associé par exemple, au travail d'une force s'exerçant sur le système. (ex : le travail des forces de pression qui s'exercent à la surface d'un système).

On peut aussi définir le travail électrique.

Exemple :

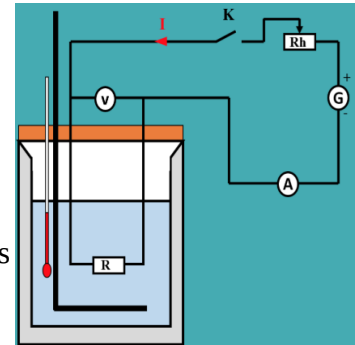
On fait circuler un courant dans une résistance chauffante (par exemple pour chauffer de l'eau). Si on connaît la tension aux bornes de la résistance et l'intensité du courant qui la traverse, l'énergie reçue entre l'instant t_1 et l'instant t_2 par le système {résistance + contenu du calorimètre} vaut:

$$W = \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} u(t) i(t) dt$$

$P = u(t) i(t) = Ri(t)^2$ correspond à la puissance reçue par la résistance

Une résistance électrique R parcourue par un courant I pendant le temps infinitésimal dt apporte le **travail électrique** élémentaire : $\delta W = Ri^2 dt$.

Le travail s'exprime en joule.



Transfert thermique

Tout type de transfert d'énergie qui ne peut pas se mettre sous la forme d'un travail sera appelé transfert thermique. On le note en général Q . On emploie parfois le terme de "chaleur" pour désigner le transfert thermique.

Le transfert thermique s'exprime en joule.

I-4. Transformation brutale - Transformation quasi-statique

Temps de relaxation d'un système

Soit un gaz contenu dans un cylindre fermé par un piston mobile.

Quand on déplace le piston, on crée localement une surpression qui se propage dans le gaz. Puis, progressivement, la pression va s'homogénéiser au bout d'un temps caractéristique τ_p .

Si une transformation se déroule sur une durée $T_{\text{transfo}} \gg \tau_p$ alors on peut considérer que la pression est définie tout au long de la transformation. Pour que cette condition soit réalisée il faut que le déplacement du piston s'effectue à une vitesse faible par rapport à la vitesse de propagation de la surpression c_s dans le gaz. $\tau_p \approx L/c_s$.

Si on plonge un métal chauffé dans de l'eau froide il va atteindre une température d'équilibre au bout d'un temps caractéristique τ_T qui dépend de ses dimensions et de sa conductivité thermique.

Si une transformation se déroule sur une durée $T_{\text{transfo}} \gg \tau_T$, temps de relaxation en température d'un système alors on peut considérer que la température est définie tout au long de la transformation.

En général $\tau_p \ll \tau_T$

Transformation quasi-statique

Une transformation est quasi-statique lorsqu'elle se déroule sur une échelle de temps T_{transfo} très grande devant les temps de relaxation du système : la pression et la température sont alors définies tout au long de la transformation. On peut considérer qu'une transformation quasi-statique est une succession d'états d'équilibre internes du système.

Sinon, la transformation est dite brutale : dans ce cas la pression et la température ne sont a priori pas définies en dehors des états d'équilibre initial et final.

Des transformations modèles

On utilise des transformations modèles, idéalisées pour calculer les grandeurs de façon beaucoup plus simple qu'à partir de la transformation réelle.

Une transformation est dite **quasi-statique** lorsqu'elle est suffisamment lente pour que le système soit à tout moment en équilibre thermique et mécanique avec l'extérieur.

Une transformation quasi-statique est une transformation modèle, puisqu'elle ne peut être qu'infiniment lente. Dans la pratique, il y a toujours des inhomogénéités au sein du système, qui n'est donc pas à l'équilibre.

L'intérêt d'une telle modélisation est que toutes les variables d'état sont définies tout au long de la transformation.

Modéliser une transformation réelle par une transformation quasi-statique est donc très utile du point de vue des calculs.

Une transformation est dite **infinitésimale** lorsque les états d'équilibre initial et final sont infiniment proches.

Au contraire, une transformation qui n'est pas infinitésimale est qualifiée de **transformation finie**.

Remarque : les deux notions sont liées, puisqu'une transformation quasi-statique peut s'interpréter comme une succession de transformations infinitésimales.

Les sources de dissipation énergétique de type frottement sont responsables de l'irréversibilité des transformations (impossibilité de retrouver l'état initial en maintenant les mêmes contraintes extérieures).

Réversible = quasi-statique + retour en arrière possible par le même chemin.

Une transformation réversible est donc, dans le cas de nos systèmes fermés, quasi-statique et sans frottement.

Attention de ne pas confondre quasi-statique et réversible .

II TRAVAIL DES FORCES DE PRESSION

II-1 Définition

Travail reçu par le système {gaz} pour une transformation à pression extérieure fixée :

$$W = - \int_{V_1}^{V_2} P_{ext} dV$$

Comme la pression extérieure peut éventuellement varier au cours de la transformation, on ne peut pas à priori sortir P_{ext} de l'intégrale.

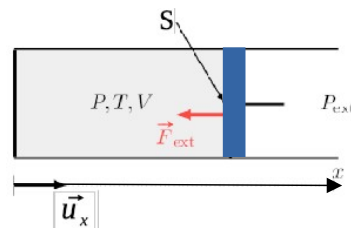
Ce travail est transmis au système {gaz} si le déplacement du piston s'effectue sans frottement.

Dans le cas où, en plus des forces dues à la pression atmosphérique P_0 , on exerce une force supplémentaire $\vec{F}_{ext} = -F_{ext} \vec{u}_x$ sur la paroi du piston, avec \vec{u}_x orienté vers l'extérieur du gaz, alors :

$$P_{ext} = P_0 + \frac{F_{ext}}{S} \quad \text{où } S \text{ est la section du piston.}$$

Démonstration :

On note \vec{F}_{ext} la force exercée par le gaz situé à l'extérieur sur le piston.



Supposons maintenant que l'équilibre soit rompu et que le piston se déplace à la vitesse \vec{v} . Le travail infinitésimal de la force de pression extérieure sur la paroi est donc :

$$\delta W_{ext} = \vec{F}_{ext} \cdot \vec{v} dt = -P_{ext} S v dt = -P_{ext} S dx = -P_{ext} dV \quad \text{et} \quad W = \int_{V_1}^{V_2} \delta W_{ext}$$

II-2 Travail des forces de pression dans deux cas particuliers.

Transformation **isochore**, $W_{isochore} = 0$

Transformation **monobare**, $W_{monobare} = -P_{ext} \Delta V = -P_{ext} (V_2 - V_1)$

II-3 Travail des forces de pression pour $T_{transfo} \gg \tau_P$

a) Calcul

Travail reçu par le système {gaz} pour une transformation telle que $T_{transfo} \gg \tau_P$: la pression P du système {gaz} est alors définie tout au long de la transformation.

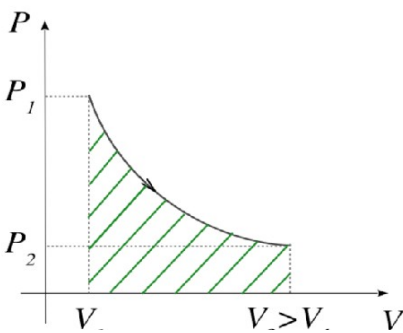
$$W_{rev} = - \int_{V_1}^{V_2} P dV \quad \text{car } P_{ext} = P$$

Exemple : un récipient contenant un gaz fermé par un piston.
 Initialement, les pressions extérieure et intérieure sont égales (équilibre).
 On verse progressivement des grains de sables sur le piston. À chaque instant, l'équilibre est atteint, même si la pression intérieure change progressivement au cours du temps.
 Le diagramme de Clapeyron (ou de Watt) est une représentation des transformations en coordonnées (P, V). Pour que cette représentation existe, les variables d'états doivent être définies en chaque instant, ce qui permet de tracer une courbe. Ce n'est pas le cas des transformations brutales, pour lesquelles les paramètres d'état peuvent ne pas être définis.

b) Représentation graphique dans le diagramme de Clapeyron (P,V)

Pour $T_{\text{transfo}} \gg \tau_p$ la pression est définie tout au long de la transformation : on peut donc tracer la courbe P(V). La nature de cette courbe dépend de la transformation subie par le système.

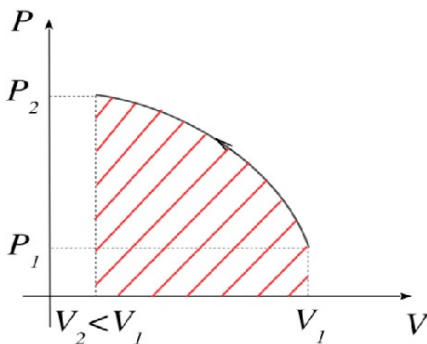
\mathcal{A} : aire sous la courbe.



détente

$$W = - \int_{V_1}^{V_2} P dV \text{ avec } V_2 > V_1 \quad W < 0 \text{ avec } W = - \text{aire hachurée.}$$

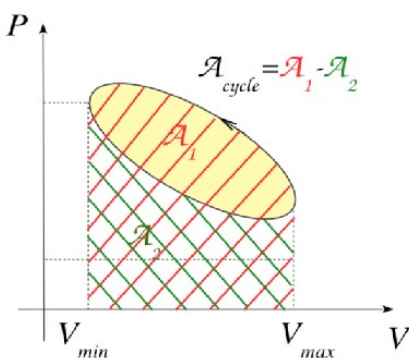
Au cours d'une détente $W < 0$: $W = -\mathcal{A}$.



compression :

$$W = - \int_{V_1}^{V_2} P dV \text{ avec } V_2 < V_1 \quad W > 0 \text{ avec } W = \text{aire hachurée.}$$

Au cours d'une compression $W > 0$: $W = +\mathcal{A}$.



cycle :

cas d'un cycle parcouru dans le sens trigonométrique.

$$W = \mathcal{A}_1 - \mathcal{A}_2 = \mathcal{A}_{\text{cycle}} > 0$$

Au cours d'un cycle le travail reçu correspond à l'aire du cycle, compté positivement pour un cycle décrit dans le sens trigonométrique (cycle récepteur $W > 0$) et négativement pour un cycle décrit dans le sens horaire (cycle moteur $W < 0$).

II-4 Autres cas particuliers

- **transformation isobare** $P_{\text{ext}} = P_{\text{syst}} = P_0$

$$W = -P_0(V_2 - V_1)$$

Dans le cas d'une transformation réversible et isobare d'un gaz, la courbe de la transformation est une droite horizontale, dans le diagramme (P, V).

- **transformation isotherme d'un gaz parfait** $T_{\text{ext}} = T_{\text{syst}} = T_0$

$$W = nRT_0 \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) = nRT_0 \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$$

démonstration:

$$W = -\int_{V_1}^{V_2} P dV = -nRT_0 \int_{V_1}^{V_2} dV/V = nRT_0 \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \quad \text{car } P = P_{\text{ext}} \text{ et } P = nRT_0/V$$

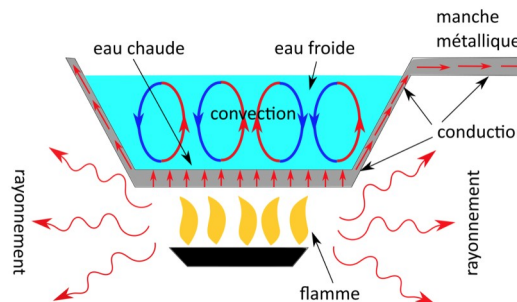
et comme $P_1 V_1 = nRT_0 = P_2 V_2$, $W = nRT_0 \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$

Dans le cas d'une transformation réversible et isotherme d'un gaz, la courbe de la transformation est une hyperbole, dans le diagramme (P, V).

- **transformation isochore** $V_2 = V_1$ d'où $W = 0$.

III ECHANGE D'ENERGIE PAR TRANSFERT THERMIQUE

III-1 Les différents modes de transfert



Conduction thermique

Lorsque l'on met deux corps solides de températures différentes en contact, la température va progressivement s'homogénéiser : un transfert thermique se produit du corps chaud vers le corps froid.

Ce transfert s'effectue à l'échelle microscopique. L'énergie cinétique microscopique d'agitation thermique se transmet de proche en proche par chocs entre molécules des zones les plus chaudes (où l'agitation est importante) vers les zones les plus froides.

La conduction thermique est un phénomène lent qui s'effectue sans transport macroscopique de matière. La conduction correspond au transfert de chaleur direct entre des matières en contact (par propagation de proche en proche). La conduction thermique est un terme spécifique aux solides.

*Le cuivre et l'aluminium sont des matériaux présentant une très forte conductivité thermique.
Le bois, le polystyrène et l'air sont des isolants.*

Les batteries de cuisine professionnelles en *cuivre*. Le cuivre est un matériau hygiénique (il possède des propriétés antibactériennes naturelles) et surtout il possède une excellente conductivité thermique. Ainsi, le cuivre transmet la chaleur entre la flamme et l'aliment en répartissant la chaleur de façon la plus homogène possible.

Le plancher chauffant est un exemple de chauffage par conduction où la chaleur est directement transmise aux pieds.

Convection

La convection permet un transfert thermique grâce un transport macroscopique de matière. Elle se produit donc avec des fluides (liquide ou gaz). Elle peut être forcée ou naturelle.

Remarque : grâce à sa **capacité thermique élevée, l'eau est un bon fluide caloporteur.**

La convection peut être naturelle : au dessus d'un radiateur l'air chauffe. L'air chaud étant moins dense que l'air froid, il s'élève et est remplacé par de l'air froid.

Dans un four, on peut avoir une convection forcée en position "chaleur tournante". Cette dernière est plus efficace et permet d'obtenir une température plus homogène. Les courants chauds de surface (comme le Gulf Stream*) permettent de transférer de la chaleur reçue au niveau de l'équateur vers les hautes latitudes.

* Le Gulf Stream est un puissant courant entraîné par les vents au-dessus de l'Atlantique Nord, il transporte environ 20 millions de mètre cube d'eau par seconde. Une partie de ce courant atteint les côtes de l'Ouest de l'Europe et contribue à leur réchauffement.

Rayonnement

Ce dernier mode s'effectue même dans le vide. Tout corps chauffé émet un rayonnement électromagnétique de longueur d'onde d'autant plus courte que la température est élevée.

L'énergie des photons émis ($E = h \frac{c}{\lambda}$) est donc d'autant plus grande que la température est élevée. h est la constante de Plank : $h = 6,62607015 \cdot 10^{-34} \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$.

Ainsi le Soleil, avec une température de surface proche de 6000 K émet-il principalement dans le jaune ($\lambda_m = 500 \text{ nm}$).

Le corps humain ($T \approx 300 \text{ K}$) émet autour de $\lambda_m = 10 \text{ }\mu\text{m}$, ce que l'on peut observer grâce aux caméras IR. Ces mêmes caméras permettent d'étudier les pertes thermiques d'une maison l'hiver.

Le chauffage par rayonnement n'a que des avantages par rapport à la convection : il y a moins de circulation d'air, donc moins de brassage de poussières, l'air a moins tendance à s'assécher, on a une sensation de chaleur meilleure en chauffant moins, la température est plus homogène, en particulier de haut en bas.

Les trois modes de transfert thermiques décrits précédemment peuvent coexister.

III-2. Transformation adiabatique

Une transformation est dite adiabatique si aucun transfert thermique ne se produit au cours de cette transformation. On a alors $Q = 0$.

Réalisation

Deux possibilités :

- utiliser un système muni de parois empêchant tout transfert thermique. Les vases Dewar (principe de la bouteille thermos), ou les calorimètres tendent à isoler thermiquement leur contenu de l'extérieur.

- effectuer une transformation très rapide.

Un système peut posséder des parois diathermes et pourtant subir une transformation adiabatique. En effet, si la transformation s'effectue suffisamment rapidement, les transferts thermiques n'ont pas le temps d'intervenir.



adiabatique \neq isotherme Ce n'est pas parce qu'un système ne reçoit aucun transfert thermique que sa température est constante.

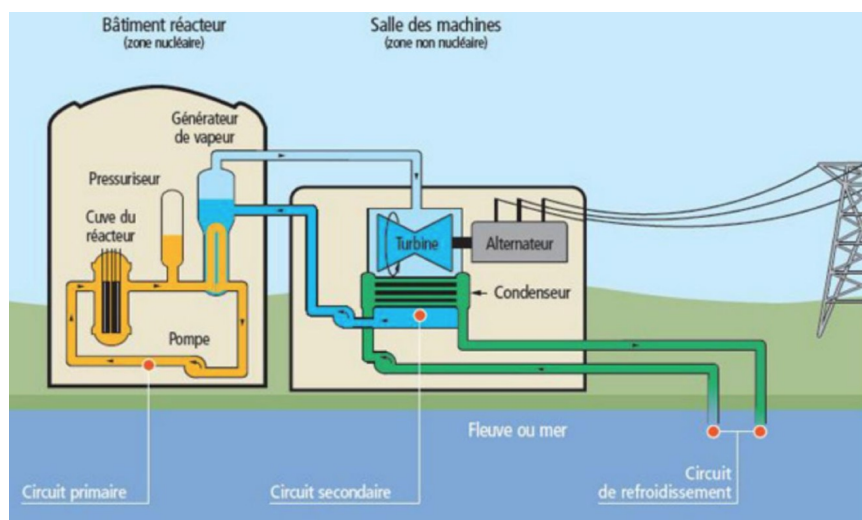
III-3. Thermostat

Le thermostat est un un modèle.

Un thermostat est système fermé susceptible d'échanger de l'énergie par transfert thermique et dont la température reste constante et uniforme quel que soit le transfert thermique réalisé.

Pour qu'un système conserve une température constante quel que soit le transfert thermique, il devrait posséder une **capacité thermique infinie**. Pour qu'un système possède une température uniforme il devrait posséder une **conductivité thermique infinie**. Concrètement **un système de grande taille devant la taille du système considéré pourra être assimilé à un thermostat**.

Une façon simple de réaliser un thermostat est d'utiliser un bain-marie : on brasse, pour assurer une homogénéisation de la température, une grande quantité de liquide que l'on chauffe à la température souhaitée. Tout système en contact avec un thermostat subit une transformation monotherme.



Exercices d'applications

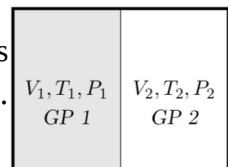
Exercice n°1

Considérons une enceinte calorifugée de volume fixé contenant n moles de gaz parfait de capacité calorifique C_v . Dans cette enceinte, une résistance électrique R est parcourue par un courant I pendant le temps Δt .

Donner l'expression de l'élévation de température du gaz.

Exercice n°2 : mélange de gaz parfaits

Considérons deux gaz parfaits monoatomique situés dans deux enceintes séparées par une paroi. On note n_1 le nombre de mole de gaz 1 et n_2 celui du gaz 2. L'ensemble est situé dans une enceinte calorifugée et immobile.



En utilisant l'extensivité de l'énergie interne, montrez que la température finale après avoir enlevé

la paroi est donnée par : $T_f = \frac{(n_1 T_1 + n_2 T_2)}{(n_1 + n_2)}$.

Exercice n°3 : expérience de Joule : équivalence chaleur – travail

L'expérience historique de Joule est illustrée sur le schéma ci-dessous. Elle consiste à chauffer de l'eau (1) dans une enceinte isolée thermiquement (2), par la rotation d'une hélice (3), entraînée par la chute d'un objet (4) relié par un fil à une poulie (5). Un thermomètre (6) permet de mesurer l'élévation de la température. Joule montra que la chaleur reçue par le liquide est égale, aux pertes près, au travail mécanique de la masse. Dans cet exercice, on négligera les pertes diverses.

Données :

Capacité thermique de la masse d'eau : $C_{\text{eau}} = 170 \text{ J.K}^{-1}$;

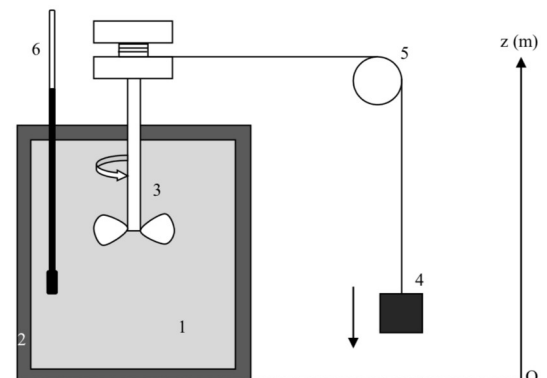
masse de l'objet : $m = 8,5 \text{ kg}$;

intensité du champ de pesanteur : $g = 10 \text{ m.s}^{-2}$;

variation d'énergie potentielle de l'objet : $\Delta E_p = -1,7 \cdot 10^{+2} \text{ J}$.

- Calculer la hauteur de chute de l'objet

- Déterminer ΔT la variation de la température de l'eau.



PLAN

I TRANSFORMATION THERMODYNAMIQUE SUBIE PAR UN SYSTEME

I-1 Transformation

I-2 - Vocabulaire de description des transformations

I-3 – Les différents types d'échanges d'énergie

I-4. Transformation brutale - Transformation quasi-statique

II TRAVAIL DES FORCES DE PRESSION

II-1 Définition

II-2 Travail des forces de pression dans deux cas particuliers.

II-3 Travail des forces de pression pour $T_{\text{transfo}} \gg \tau_p$

II-4 Autres cas particuliers

III ECHANGE D'ENERGIE PAR TRANSFERT THERMIQUE

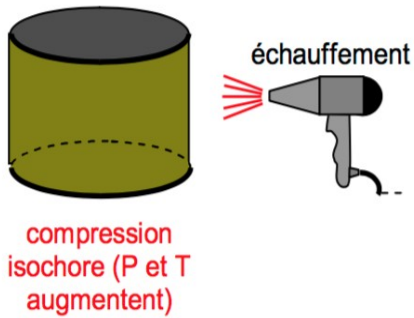
III-1 Les différents modes de transfert

III-2. Transformation adiabatique

III-3. Thermostat

Les transformations thermodynamiques

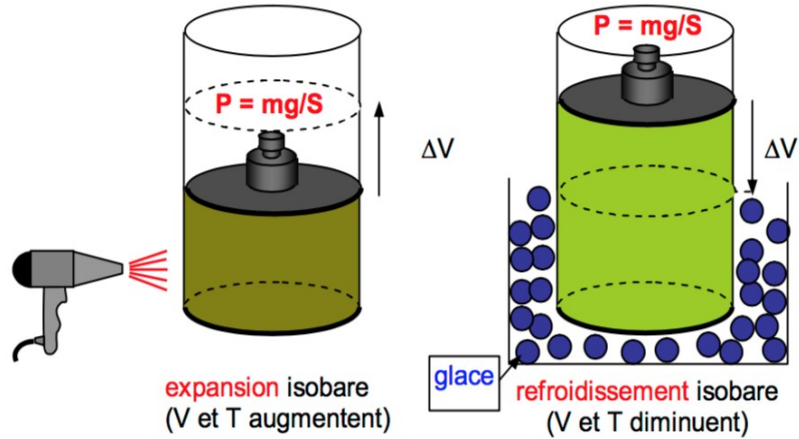
Transformation isochore
(parois du cylindre rigides = volume constant)



$$\Delta V = 0 \Rightarrow W = 0$$

pas de travail échangé avec l'extérieur

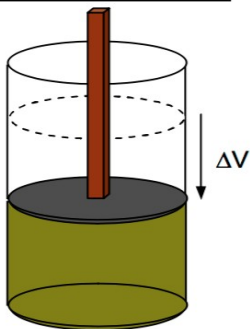
Transformation isobare (pression constante) : couvercle du cylindre de surface S glissant sous un poids P constant



$$P = \text{constante} \Rightarrow W = -P \cdot \Delta V$$

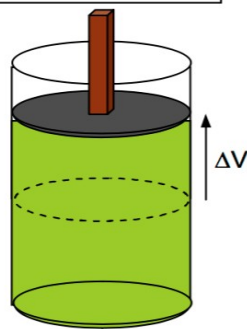
Transformation adiabatique
(parois calorifugées ou transformation rapide)

piston poussé rapidement (< 1 min par exemple)



compression adiabatique
(T et P augmentent, V diminue).

piston tiré rapidement (< 1min par exemple)



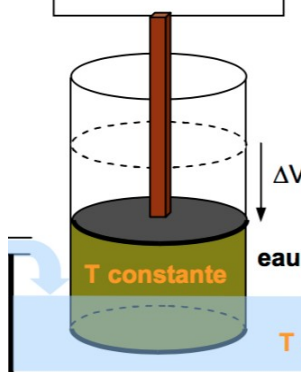
détente adiabatique
(T et P diminuent, V augmente).

$$\text{on a alors } Q = 0$$

Pas de chaleur échangée avec l'extérieur

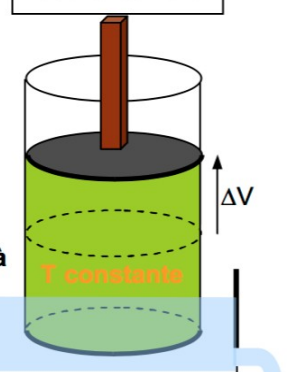
Transformation isotherme
(température maintenue constante)

piston poussé très lentement



compression isotherme (P augmente et V diminue)

piston tiré très lentement



détente isotherme (P diminue et V augmente)

On verra que cela correspond à $W + Q = 0$