

Énergie échangée par un système au cours d'une transformation

Partie I

Transformations d'un système thermodynamique

1 Définitions

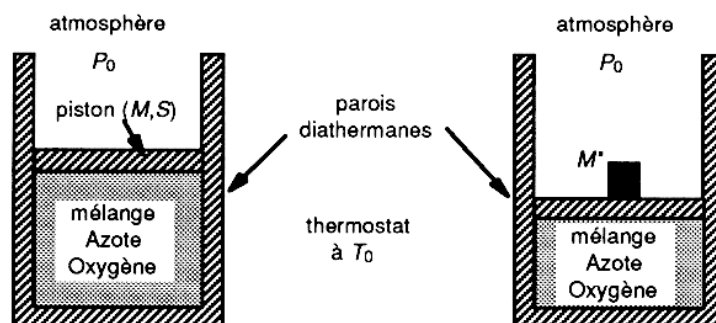
a) Transformation

Lorsque les conditions d'équilibre d'un système sont rompues, celui-ci évolue vers un nouvel état d'équilibre. On appelle évolution ou transformation, l'état du système entre deux états d'équilibre.

b) Transformation quasi-statique

Une transformation est dite **quasi-statique** lorsqu'elle est suffisamment lente pour que le système passe par une suite continue d'états d'équilibre thermodynamique infiniment voisins les uns des autres.

Revenons à l'exemple de la masse posée sur le piston dans le chapitre T_1 . Sur le piston qui surmontait le gaz, nous avons posé une masse M' comparable à la masse du piston, ce qui modifiait beaucoup la pression extérieure (c'est-à-dire la pression imposée au gaz par le milieu extérieur). Cette modification engendrait une tempête dans un gaz...et on passait **brutalement** de l'état d'équilibre (P_0, V_0, T_0) à l'état d'équilibre (P_1, V_1, T_0) .



On peut imaginer une autre façon d'amener le gaz de l'état (P_0, V_0, T_0) à l'état (P_1, V_1, T_0) . On divise la masse M' en N (très grand) masselottes de masse $m = M'/N$. On pose une première masselotte sur le piston, ce qui amène le gaz dans un état intermédiaire très voisin de son état initial; cet état intermédiaire est un état d'équilibre, dans lequel les paramètres d'état T_0 , P et V du gaz sont définis. Puis on répète le processus en ajoutant à nouveau une masselotte m et en attendant après chaque addition que l'état d'équilibre intermédiaire soit atteint. L'opération est achevée lorsque la somme des masses m est égale à M' . Au cours de cette transformation très progressive, le gaz passe de l'état d'équilibre initial à l'état d'équilibre final par une succession d'états d'équilibre très proches : cette transformation est dite quasi-statique.

En pratique, il faut que le temps de relaxation du système (c'est-à-dire le temps que le système met pour atteindre le nouvel état d'équilibre) soit petit devant la durée de la transformation pour qu'on puisse considérer une transformation comme quasi-statique.

c) Transformation réversible

Nous dirons qu'une transformation est réversible si elle est quasi-statique et qu'il est possible d'en inverser le sens en passant exactement par les mêmes états intermédiaires, par une modification infinitésimale des contraintes extérieures au cours de la transformation.

En particulier

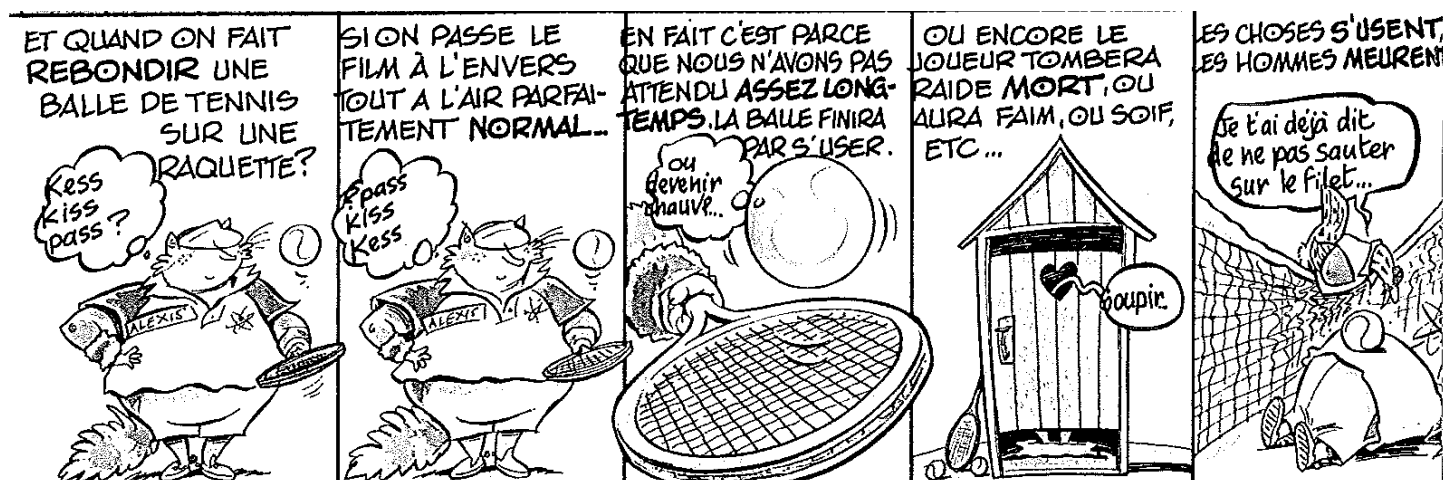
transformation réversible $\Rightarrow$ transformation quasi-statique

La contraposée montre qu'on a la certitude qu'une transformation non quasi-statique est irréversible. On peut énoncer le critère de réversibilité suivant :

Si la projection du film de la transformation à l'envers est réaliste alors la transformation est réversible.

Dans l'exemple précédent, si on retire une à une les masselottes m , le piston remonte petit à petit en repassant par les mêmes états intermédiaires jusqu'à l'état initial (on repasse bien le film à l'envers).

Il en aurait été tout autrement s'il y avait eu des frottements piston/paroi. En effet, dans ce cas en ajoutant une à une les masses m , la paroi se serait échauffée au niveau du contact piston/paroi. Si la transformation était réversible, en retirant la masse m , il faudrait que le piston remonte et que la paroi se refroidisse, ce qui est évidemment impossible (au contraire, elle s'échauffe à nouveau) : la transformation est irréversible. On verra plus tard que les frottements sont une des causes d'irréversibilité.

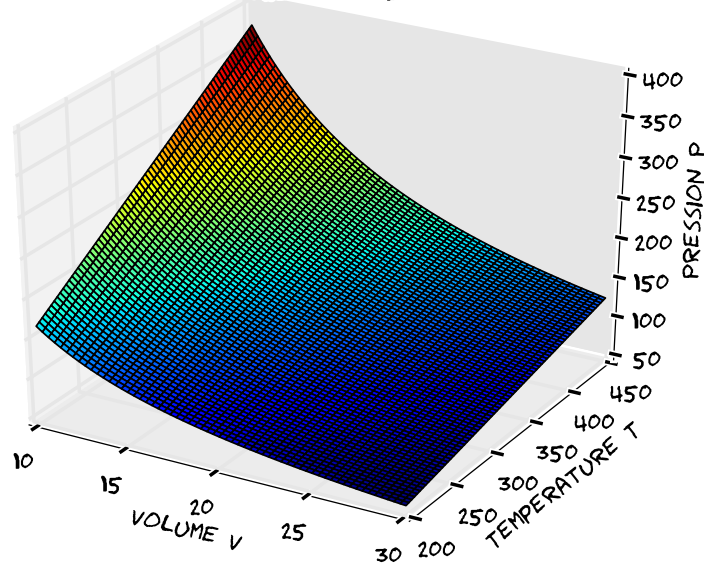


2 Représentation graphique

a) Surface caractéristique

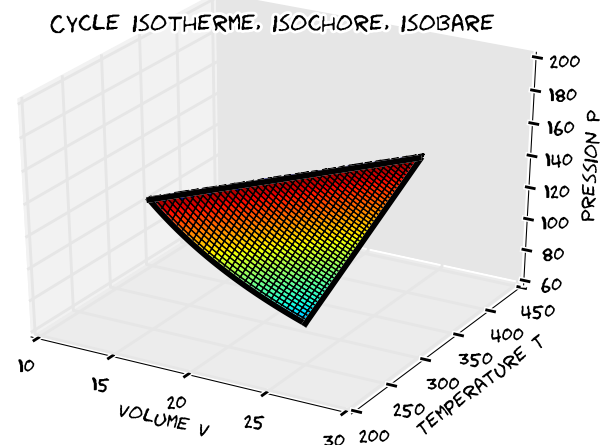
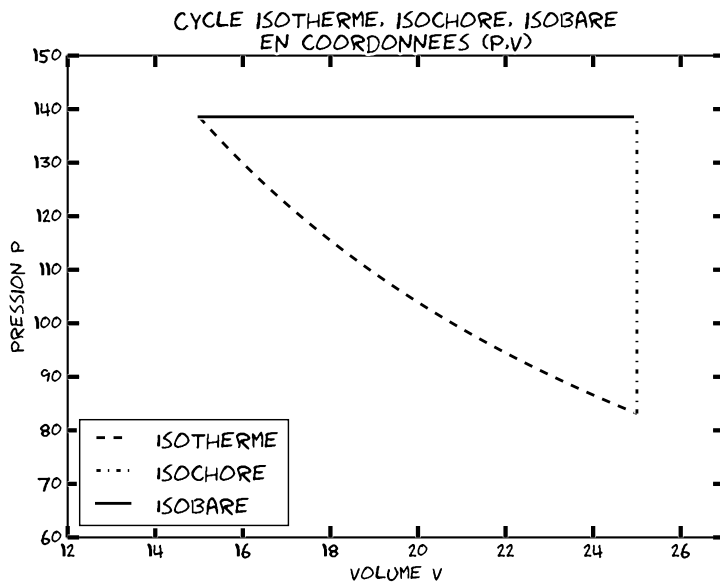
On peut chercher à représenter les états d'un système en fonction de ses n variables d'état. Dans de nombreuses situations pratiques, telles que la plupart de celles que nous étudierons, le système est divariant (deux variables indépendantes) et défini par trois variables en tout. Un système vérifiant une loi d'état, les états possibles définissent alors une surface de dimension $n - 1$ dans l'espace des n variables. L'évolution du système est alors une courbe dans cette surface.

SURFACE CARACTERISTIQUE D'UN GAZ PARFAIT



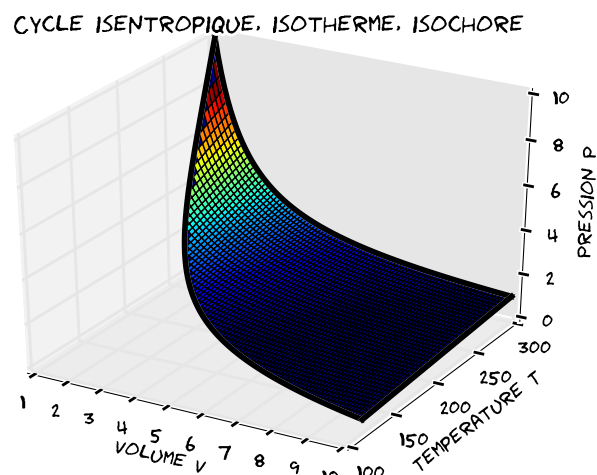
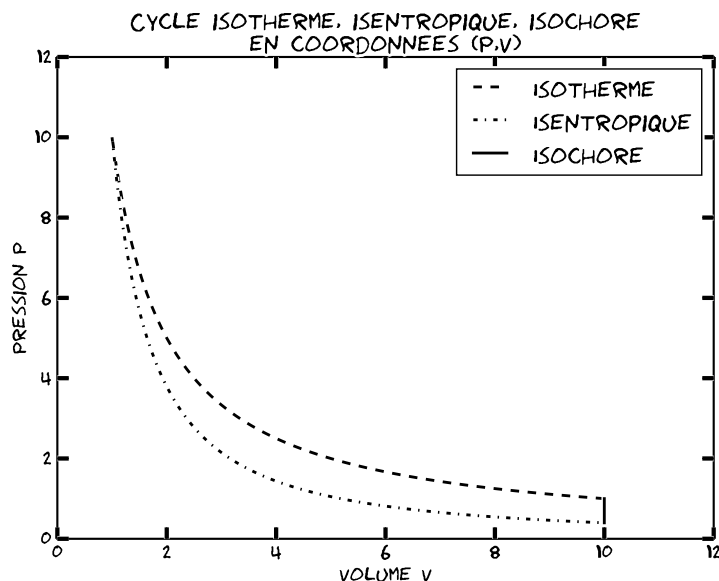
b) Projection sur un plan

Il est alors aisé de représenter une évolution dans le plan des deux variables indépendantes choisies. Les états caractérisés par des isovaleurs d'une de ces deux variables se trouvent alors sur des droites parallèles à l'axe correspondant, alors que les isovaleurs de la troisième variable forment une famille de courbes données par l'équation d'état. On distingue entre différentes transformations qui sont facilement représentées dans ces diagrammes.



c) Évolution cyclique

Si l'on considère une transformation telle que cette courbe soit fermée, on parle de cycle.



Partie II

Travail

1 Travail mécanique des forces de pression extérieures

a) Notion de pression extérieure

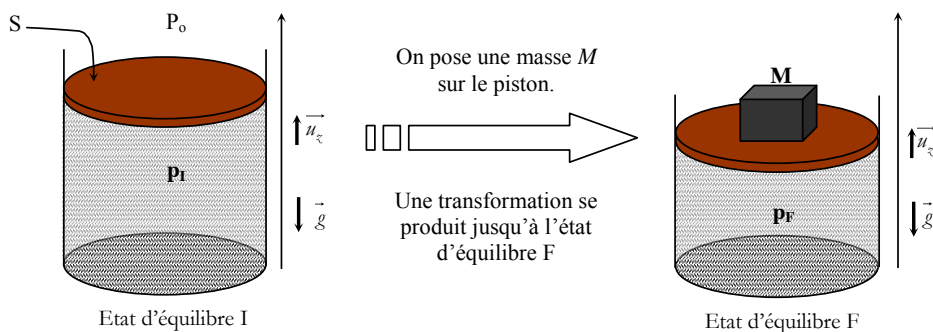
Il s'agit dans ce paragraphe de définir sur un exemple la notion de pression extérieure P_0 s'appliquant sur un système au cours d'une transformation.

Considérons le système $\Sigma = \{\text{gaz}\}$. On désigne par P la pression du gaz. Le piston est de surface S , de masse m négligeable devant $P_0 S / g$.

Nommons P_I la pression du gaz dans l'état d'équilibre I. Le système étant à l'équilibre mécanique, le piston est immobile ce qui impose, d'après la RFD,

$$\vec{0} = P_I S \vec{e}_z - P_0 S \vec{e}_z \quad \text{soit} \quad P_I = P_0$$

On pose alors une masse M sur le piston : il s'abaisse tandis que le gaz se comprime. Au cours de la transformation, la pression P dans le fluide n'est pas définie; en revanche la pression exercée par le milieu extérieur P_{ext} est souvent constante et définie. Ici, le milieu extérieur exerce la force $F_{\text{ext}} = P_0 S + Mg$ sur le piston c'est-à-dire la pression extérieure



$$P_{\text{ext}} = \frac{F_{\text{ext}}}{S} = P_0 + \frac{Mg}{S}$$

Après des petites oscillations (qui disparaissent grâce à des tourbillons de gaz) le piston redevient immobile. On obtient un nouvel état d'équilibre mécanique. On peut déterminer la pression P_F du gaz dans l'état d'équilibre final. Le piston étant immobile, la R.F.D. s'écrit

$$\vec{0} = P_F S \vec{e}_z + \vec{F}_{\text{ext}} \quad \text{soit} \quad P_F = P_0 + \frac{Mg}{S}$$

Tout se passe, dans cet exemple, comme si une pression imposée par le milieu extérieur $P_{\text{ext}} = P_0 + Mg/S$ était appliquée au système au cours de la transformation.

Remarque : Plutôt que de placer une masse M , on aurait pu appliquer une force F_0 constante. On aurait obtenu $P_{\text{ext}} = P_0 + F_0/S$.

b) Travail élémentaire δW des forces de pression

Commençons par étudier un cas particulier. Considérons une enceinte cylindrique contenant un fluide soumis à une pression extérieure P_{ext} . Lors d'une transformation infinitésimale faisant varier la position du piston de dx , le travail δW reçu par le fluide est :

$$\delta W = \vec{F}_{\text{ext}} \cdot d\vec{OM} = -P_{\text{ext}} S \vec{e}_x \cdot dx \vec{e}_x = -P_{\text{ext}} dV$$

Remarque : sur cet exemple $dx < 0$ donc $dV < 0$ et $\delta W > 0$. Ceci est en accord avec le fait que le système reçoit effectivement de l'énergie puisqu'il est comprimé. Si $dx > 0$ alors $dV > 0$ et $\delta W < 0$. Lors de la détente, le gaz cède de l'énergie au milieu extérieur.

Regardons à présent le cas général. Une enveloppe contient un fluide Σ . Entre t et $t + dt$, la surface de l'enveloppe se déforme sous l'effet des forces de pression extérieures (uniformes) et balaie le volume dV grisé. Le travail élémentaire des forces de pression vaut $\delta W = -P_{\text{ext}} dV$. En conclusion,

Le travail élémentaire des forces de pression extérieures (uniformes) s'exerçant sur un système thermodynamique vaut $\delta W = -P_{\text{ext}} dV$ où dV est le volume élémentaire décrit par les parties mobiles du système (il coïncide souvent avec la variation du volume du système).

c) Travail des forces de pression lors d'une transformation finie (=non élémentaire)

On considère à nouveau le système $\Sigma = \{\text{gaz}\}$. Il subit une transformation de l'état d'équilibre initial où $V = V_I$ à l'état d'équilibre final où $V = V_F$. Soit W le travail reçu par au cours de la transformation. On a alors

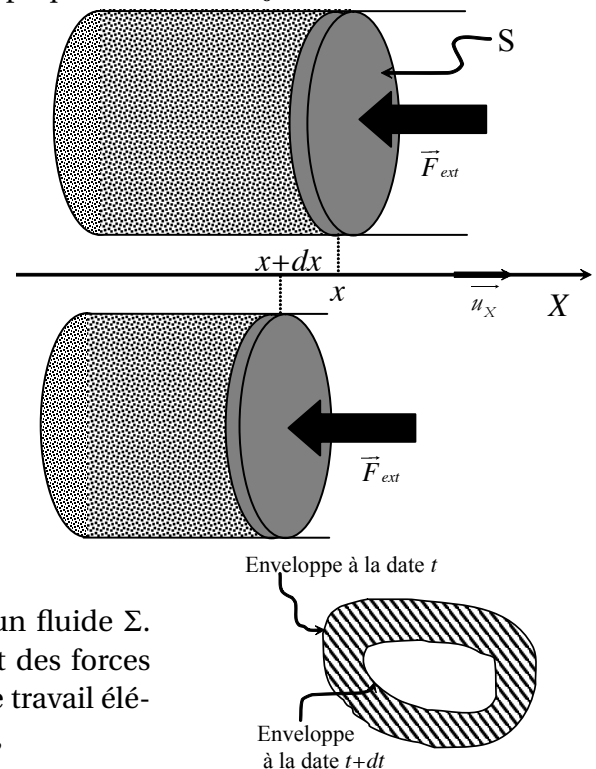
$$W = \int_I^F \delta W = \int_{V_I}^{V_F} -P_{\text{ext}} dV$$

Retour sur l'exemple de la masse M déposée sur le piston (voir section II.1.a)). La pression extérieure est alors constante et vaut

$$P_{\text{ext}} = P_0 + \frac{Mg}{S}$$

de sorte que

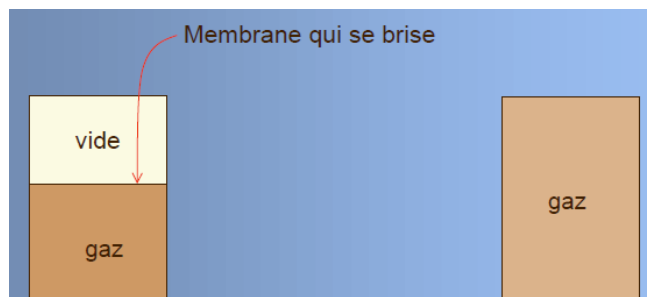
$$W = \int_{V_I}^{V_F} -P_{\text{ext}} dV = -P_{\text{ext}} \int_{V_I}^{V_F} dV = -P_{\text{ext}} (V_F - V_I)$$



d) La frontière : lieu des échanges

Le choix du système impose un mode de raisonnement, mais quel que soit le système choisi, les résultats doivent être cohérents entre eux. Considérons par exemple un gaz retenu dans une partie de boîte par une membrane qui finit par se déchirer pour laisser le gaz occuper toute la boîte.

Selon que l'on considère comme système juste le gaz ou le gaz plus le vide, le raisonnement n'est pas tout à fait le même. Regardons d'abord ce qui se passe si on prend seulement le gaz comme système. Alors on a une évolution qui n'est pas une suite d'états d'équilibre! Mais la pression nulle et constante à l'extérieur de la frontière du système permet d'affirmer que le travail est nul. Si au contraire on prend pour système {gaz + vide}, on a une évolution à volume constant : le travail est nul. Dans les deux cas, le travail reçu par le système (qui s'apparente au travail reçu par le gaz puisque le vide est... vide) est bien nul.



2 Cas particulier de la transformation mécaniquement réversible

a) Définition

Une évolution est mécaniquement réversible si, à chaque instant, la pression P du fluide est environ égale à la pression extérieure.

b) Propriétés

- Une évolution mécaniquement réversible est nécessairement quasi-statique.
- Une évolution mécaniquement réversible n'est pas nécessairement réversible (songer à l'existence de frottements par exemple).
- La plupart des évolutions quasi-statiques sont mécaniquement réversibles (de sorte que dans la plupart des cours, la distinction quasi-statique/mécaniquement réversible est absente). Et de ce fait, pour ne pas rendre le cours indigeste, nous confondrons donc ces deux notions tant que cela est possible.

c) Travail élémentaire

Dans le cas de la transformation quasi-statique, à chaque instant la pression du système P vaut P_{ext} donc Pour une transformation quasi-statique²

$$\delta W = -P dV$$

d) Transformation finie

Le système Σ subit une transformation de l'état d'équilibre initial où $V = V_I$ à l'état d'équilibre final où $V = V_F$. Le travail W reçu par Σ au cours de la transformation vaut

Pour une transformation quasi-statique³

$$W = \int_I^F \delta W = \int_{V_I}^{V_F} -P dV$$

e) Interprétation graphique : diagrammes de Clapeyron ou de Watt

Lorsque la transformation est quasi-statique, il existe une infinité d'états d'équilibre infiniment proches les uns des autres. On peut placer les points représentatifs de ces états d'équilibre dans un diagramme avec P

2. En fait mécaniquement réversible...

3. En fait mécaniquement réversible...

en ordonnée, V en abscisse (diagramme de Watt) ou v (volume massique pour le diagramme de Clapeyron). On parle aussi de diagramme (P, V) ou (P, v) .

Petit rappel mathématique. Si l'on prend une fonction f positive sur un intervalle $[a; b]$, alors $\int_a^b f(x) dx$ est donné par l'aire géométrique $\mathcal{A}$ sous la courbe représentative de la fonction f . Ainsi, si on note $\mathcal{A}$ l'aire géométrique sous la courbe $P(V)$ dans le diagramme de Clapeyron entre les points I et F, alors

$$\text{Si } V_I < V_F, \text{ on est dans le « bon » sens : } W = - \int_{V_I}^{V_F} P dV = -\mathcal{A}$$

$$\text{Si } V_I > V_F, \text{ on est dans le « mauvais » sens : } W = - \int_{V_I}^{V_F} P dV = \int_{V_F}^{V_I} P dV = \mathcal{A}$$

Cette interprétation graphique montre bien que le travail dépend de la transformation suivie. En effet, si l'on considère deux transformations menant du même état I au même état F, les aires sous les n chemins suivis z sont différentes.

SCHEMAS

f) Sous-entendus de ces diagrammes

Dès lors qu'on est capable de représenter le diagramme de Clapeyron ou de Watt cela sous-entend que le système a subi une transformation quasi-statique puisqu'on est capable de tracer une courbe (i.e. une infinité de points représentatifs d'états d'équilibre proches les uns des autres).

g) Cas particulier (important) d'un cycle

Lorsque l'état initial I et l'état final F sont confondus, on dit que le système thermodynamique a réalisé un cycle.

Graphiquement, on peut évaluer le travail W reçu par le système.

Si le cycle est décrit dans le sens des aiguilles d'une montre

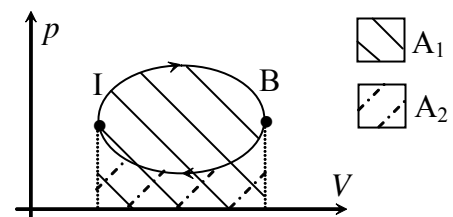
$$W_{II} = W_{IB} + W_{BI} = -A_1 + A_2 = -\text{Aire du cycle}$$

Lorsque le cycle est décrit dans le sens des aiguilles d'une montre alors $W = -\mathcal{A}_{\text{cycle}} < 0$. On dit que le cycle est **moteur**.

Inversement, si le cycle est décrit dans le sens trigonométrique

$$W_{II} = W_{IB} + W_{BI} = -A_2 + A_1 = \text{Aire du cycle}$$

Lorsque le cycle est décrit dans le sens trigonométrique alors $W = \mathcal{A}_{\text{cycle}} > 0$. On dit que le cycle est **récepteur**.



Dans les deux cas

$$|W| = \mathcal{A}_{\text{cycle}}$$

3 Travaux pour les transformations usuelles (définitions à retenir!)

Dans ce paragraphe, il ne faut retenir que les définitions. Les résultats obtenus doivent être retrouvés rapidement mais pas connus par coeur.

a) Isochore

On appelle transformation **isochore** une transformation au cours de laquelle le **volume du système est constant**. Lors d'une transformation isochore $V = C^{\text{te}}$ donc $dV = 0$ donc $\delta W = -P_{\text{ext}} dV = 0$ soit

$$W = 0$$

b) Monobare

On appelle transformation **monobare** une transformation à **pression extérieure P_{ext} constante et uniforme** (cf. exemple de la section II.1.a)). On a alors

$$W = \int_{V_I}^{V_F} -P_{\text{ext}} dV = -P_{\text{ext}} \int_{V_I}^{V_F} dV = -P_{\text{ext}} (V_F - V_I) = -P_{\text{ext}} \Delta V$$

c) Isobare

On appelle transformation **isobare**, une transformation *quasi-statique* dont la **pression P du système est constante** au cours de la transformation.

$$W = \int_{V_I}^{V_F} -P_{\text{ext}} dV = - \int_{V_I}^{V_F} P dV = -P \int_{V_I}^{V_F} dV = -P \Delta V$$

d) Isotherme

On appelle transformation **isotherme**, une transformation *quasi-statique* dont la **température T_0 du système reste constante** au cours de la transformation.

Pour le calcul du travail, on doit faire une hypothèse sur le fluide considéré. Prenons le cas archi-classique d'une évolution isotherme d'un gaz parfait de (P_I, V_I, T_0) à (P_F, V_F, T_0) . On a alors

$$W = - \int_{V_I}^{V_F} P dV = - \int_{V_I}^{V_F} \frac{nRT_0}{V} dV = -nRT_0 \ln \left(\frac{V_F}{V_I} \right)$$

e) Monotherme

On appelle transformation **monotherme**, une transformation au cours de laquelle le système thermodynamique est **en contact avec un système dont la température T_0 est constante** (on verra qu'un tel système se nomme thermostat). Attention! Cela ne signifie pas que le système thermodynamique est à la température T_0 au cours de la transformation! Songez à une bonne quiche lorraine (ou une tarte aux quetsches pour ceux qui préfèrent les desserts) que l'on laisse tranquillement refroidir à l'air libre avant de servir à table.

f) Polytropique d'un gaz parfait

On dit qu'une transformation est **polytropique d'indice k** si elle est *quasi-statique* (et mécaniquement réversible) et si **il existe une constante k telle que $PV^k = C^{\text{te}}$** au cours de l'évolution.

Là encore pour le calcul du travail, on va se placer dans le cadre du gaz parfait pour disposer de l'équation d'état permettant de faire le lien avec la température en bout de calcul. Considérons donc l'évolution polytropique d'indice k d'un gaz parfait d'un état (P_I, V_I, T_I) à un état (P_F, V_F, T_F) . On a alors, en posant $PV^k = \kappa$,

$$\begin{aligned}
 W &= - \int_{V_I}^{V_F} P dV \\
 &= -\kappa \int_{V_I}^{V_F} \frac{dV}{V^k} \\
 &= \left[\frac{1}{k-1} \frac{\kappa}{V^{k-1}} \right]_{V_I}^{V_F} \\
 &= \left[\frac{1}{k-1} \frac{\kappa}{V^k} \times V \right]_{V_I}^{V_F} \\
 &= \left[\frac{1}{k-1} PV \right]_{V_I}^{V_F} \\
 \boxed{W = \frac{1}{k-1} (P_F V_F - P_I V_I) = \frac{nR}{k-1} (T_F - T_I)}
 \end{aligned}$$

où l'hypothèse de gaz parfait ne sert que dans la toute dernière égalité.

4 Travail électrique

Prenons comme système un dipôle électrique. On a vu dans le cours d'électrocinétique que la puissance instantanée reçue par le dipôle est $p(t) = u(t)i(t) = \delta W/dt$. Ainsi, Le travail élémentaire δW reçu entre les dates t et $t + dt$ par un dipôle en convention récepteur, parcouru par un courant d'intensité $i(t)$ et soumis à la tension $u(t)$ est

$$\boxed{\delta W = u(t)i(t) dt}$$

Partie III

Transfert thermique

Dans la suite du cours on se placera dans le cas où les systèmes thermodynamiques sont macroscopiquement au repos et effectuent des transformations où l'énergie potentielle extérieure ne varie pas (ou dont la variation est négligeable devant les autres échanges d'énergie).

1 Origine physique

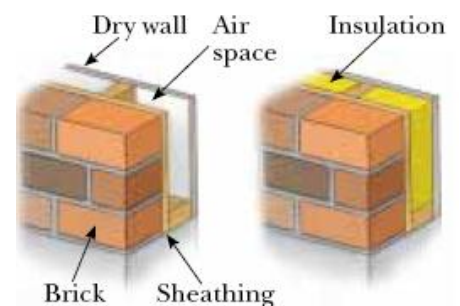
Un échange de chaleur d'un corps à un autre peut se faire de trois manières différentes pouvant coexister : par conduction, rayonnement ou convection.

a) Conduction

L'expérience montre que si l'on introduit une longue barre métallique dans un feu, au bout d'un certain temps, l'extrémité de la barre hors du feu devient extrêmement chaude : le feu a apporté de la chaleur à l'extrémité de la barre qui est en contact avec lui, cette chaleur s'est propagée jusqu'à l'autre extrémité. C'est cette propagation que l'on appelle « conduction ». La même expérience montre que si les métaux sont de bons conducteurs de la chaleur, d'autres corps par contre, comme la laine de verre ou l'amiante, sont de mauvais conducteurs thermiques.

b) Rayonnement

Un corps chauffé émet, d'une manière générale, un rayonnement sous forme d'ondes électromagnétiques. Lorsque ce rayonnement rencontre un obstacle (un autre corps), l'énergie qu'il transportait sous forme élec-



trou électromagnétique est alors transformée en chaleur. Ainsi, le Soleil communique aux planètes de la chaleur correspondant aux ondes électromagnétiques qu'il émet.



La nature et l'intensité du rayonnement électromagnétique émis par les corps chauffés dépendent en particulier de la température de ces corps. La théorie du rayonnement thermique s'est développée au cours de la deuxième partie du XIX^e siècle par la loi de Stéfán (la puissance du rayonnement émis par un corps chauffé est proportionnelle à T^4), la loi de Wien, ... Je vous invite à cet effet à regarder la vidéo de e-penser sur « Chaleur, température, zéro et Kelvin » : <https://www.youtube.com/watch?v=Rs7WkNV8nAA>

c) Convection

Un échange de chaleur par convection a lieu lorsqu'un fluide vient alternativement se réchauffer au contact d'un corps chaud puis se refroidir au contact d'un corps froid, servant ainsi de véhicule qui permet à la chaleur de passer d'un corps à un autre. Il se produit à l'intérieur du fluide, dont la masse volumique dépend de la température, des courants de convection qui ont tendance à égaliser la masse volumique en ses différents points qui n'étaient pas à la même température.

Un tel échange de chaleur se produit, par exemple, dans une chambre où se trouve un radiateur de chauffage.



La puissance thermique cédée est donnée par la loi de Newton

$$\mathcal{P}_{th} = hS(T - T_{ext})$$

où S est la surface de contact et h une constante dépendant de la nature de la surface d'échange.

d) En résumé

Situation typique	Contact mécanique entre source chaude et corps froid	Contact indirect de deux corps par un fluide en mouvement	Pas de contact direct ou indirect
Schéma			
Processus physique	Transfert par conduction de chaleur	Transfert conducto-convectif	Transfert par radiation électromagnétique
Exemple	Toucher un objet chaud, simple vitrage en hiver	Cuillère dans le café, circuit de refroidissement	Soleil – terre, ampoule classique

2 Vocabulaire

Revenons un moment sur quelques points de vocabulaire déjà abordés pour la plupart mais ici rassemblés de par leurs liaisons avec la notion de transfert thermique

Parois adiabatiques (ou athermanes) vs parois diathermanes Des parois sont dites adiabatiques (ou athermanes) quand elles empêchent tout transfert thermique. Au contraire, les parois sont dites diathermanes si elles permettent ces échanges thermiques menant (à terme!) à une égalisation des températures (on ne peut donc en général connaître que la température à l'état final et pas tout au long de la transformation).

Transformation adiabatique Une évolution est dite adiabatique si le système ne reçoit aucun transfert thermique Q de la part du milieu extérieur.

Transformation isotherme/monotherme Voir à la section précédente.

Thermostat de température constante susceptible d'être utilisé pour réaliser des transferts thermiques avec un corps placé à son contact. Cette définition impose que l'évolution subie par le thermostat soit *réversible* (cf chapitre $\mathcal{T}5$ sur l'entropie). On ne peut en général qu'approcher le modèle du thermostat que sur une échelle réduite de transfert thermique absorbable. Par exemple, un mélange eau/glace est un thermostat tant qu'il reste de l'eau *et* de la glace (et que la pression extérieure reste constante). Un autre thermostat est par exemple un grand lac : si vous vous jetez dans le lac, sa température ne va pas notablement varier (alors que la votre oui!) du fait de la très grande capacité calorifique qui lui permet d'absorber beaucoup d'énergie pour une variation négligeable de température.

3 Transformations adiabatique

a) Définition

On appelle transformation adiabatique, une transformation au cours de laquelle il n'y a pas de transfert thermique entre le système et le milieu extérieur soit $Q = 0$.

b) Réalisations possibles

Première réalisation possible Pour réaliser une transformation adiabatique, on peut placer le système dans une enceinte calorifugée (i.e. munie de parois athermanes : ce sont des parois qui interdisent les transferts thermiques avec le milieu extérieur).

Remarque : de fait, on ne peut jamais interdire totalement les échanges thermiques ; fatalement l'énergie se propage des zones de haute température vers les zones de basse température mais les parois athermanes ralentissent ce processus (songez à une bouteille Thermos).

Deuxième réalisation possible Une condition d'adiabaticité est réalisée lorsque la transformation est suffisamment rapide pour que les transferts thermiques (toujours bien plus lents que les échanges d'énergie par travail) n'aient pas eu le temps de se produire.

c) Erreur à ne pas commettre!

Attention!

~~~~~ Ce n'est pas parce que la transformation est adiabatique que  $T_F = T_I$  !!  
~~~~~ Réciproquement,  $T_F = T_I$  ne signifie pas que la transformation est adiabatique !!

d) Loi de Laplace

La loi de Laplace est vérifiée si l'on vérifie *toutes* les hypothèses suivantes :

- Le système est un système fermé constitué d'un gaz parfait.
- Le coefficient de Laplace $\gamma = C_{p,m}/C_{v,m}$ du gaz ne dépend pas de la température sur la zone étudiée.
- Le système subit une transformation adiabatique et quasi-statique.

Alors

$$PV^\gamma = C^{\text{te}} \text{ au cours de la transformation.}$$

Comme le gaz est parfait, on a que $P = nRT/V$, d'où l'on déduit aussi

$$TV^{\gamma-1} = C^{\text{te}}$$

(une autre...)

Et si on remplace à présent $V = nRT/P$, on trouve aussi

$$T^\gamma P^{1-\gamma} = C^{\text{te}}$$

(encore une autre...)

e) Quasi-statique ou réversible?

Dans la littérature, on trouve parfois l'hypothèse (plus forte) réversible plutôt que quasi-statique. On montrera au chapitre suivant que la transformation adiabatique quasi-statique d'un gaz parfait suivant la loi de Laplace est nécessairement réversible.

En fait, si la transformation n'est pas réversible, on trouve toujours une des hypothèses de l'énoncé qui est mise en défaut. Par exemple, considérons un gaz parfait placé dans une enceinte calorifugée surmontée d'un piston (de masse nulle) sur lequel on place successivement des masselottes de sorte que la transformation soit quasi-statique.

1^{er} cas : absence de frottements piston/cylindre. Les conditions d'application de la loi de Laplace sont réunies ; la transformation est par ailleurs réversible.

2^e cas : il existe des frottements piston/cylindre. Les parois en contact s'échauffent et il se produit un transfert thermique des parois vers le gaz. La transformation pour le gaz ne peut plus être considérée comme adiabatique (la transformation est, par ailleurs, irréversible) : on ne peut donc plus appliquer la loi de Laplace.