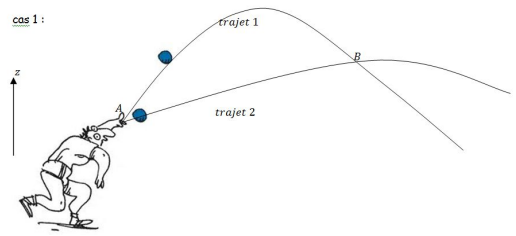
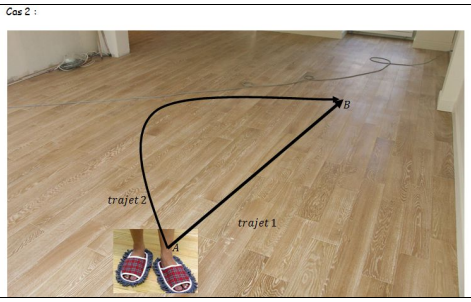
Document 1 : Force conservative et non conservative, différentielle totale exacte et forme différentielle

Examinons le travail de deux forces dans deux situations :

	
Travail du poids : $W = \int m\vec{g}.d\overrightarrow{OM} = \int -mg\overrightarrow{u_z}dz\,\overrightarrow{u_z} = -mg\int dz$	Travail de la force de frottement solide : $R_t = fmg$ où f est le coefficient de frottement : $W = \int \overrightarrow{R_T}.d\overrightarrow{OM} = \int -fmg.dOM = -fmg\int dOM$
$W_{AB_{trajet1}} = -mg(z_B - z_A)$ $W_{AB_{trajet2}} = -mg(z_B - z_A)$ Soit : $W_{AB_{trajet2}} = W_{AB_{trajet1}}$ On dit que le poids est une force conservative car son travail se conserve pour des trajets différents mais associés à un même état initial et final On pourra remarquer que pour le trajet fermé AB (trajet 1) puis BA (trajet 2) on a : $W_{AB_{trajet1}-BA_{trajet2}} = W_{AB_{trajet1}} - W_{AB_{trajet2}} = 0$	$W_{AB_{trajet1}} = -fmgAB$ $W_{AB_{trajet2}} = -fmg\widehat{AB}$ Soit : $W_{AB_{trajet2}} \neq W_{AB_{trajet1}}$ On dit que la force de frottement est une force non conservative car son travail dépend du chemin suivi. Pour ce type de force, le travail sur un chemin fermé peut être non nul !

Pour différencier le travail des forces conservatives de celui des forces non conservatives, on utilise la notation suivante :

Travail élémentaire de $\vec{f}$ conservative : $dW = \vec{f}.d\overrightarrow{OM}$. On dit que dW est une différentielle totale exacte. On a alors $\oint dW = 0$	Travail élémentaire de $\vec{f}$ non conservative : $\delta W = \vec{f}.d\overrightarrow{OM}$. On dit que δW est une forme différentielle. On a alors $\oint \delta W \neq 0$

Rq : Dans le cas général, le travail élémentaire est noté δW

U est une fonction d'état, les variations de cette fonction ne dépendent que de l'état initial et final. Au cours d'une transformation élémentaire, la différentielle associée à l'énergie interne U est donc une différentielle totale exacte notée dU : $dU \quad \underline{intégration} \quad \Delta U$

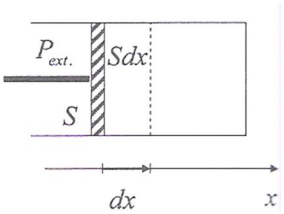
Le travail et le transfert thermique ne sont en général pas associés à des grandeurs différentielles totales exactes : leurs variations dépendent du chemin suivi. On utilise alors la notation δQ et δW pour des transformations élémentaires : $\delta W \text{ ou } \delta Q \quad \underline{intégration} \quad W \text{ ou } Q$

La somme de deux formes différentielles peut-il donner une différentielle totale exacte ?

Le 1e principe affirme que la somme de deux formes différentielles peut conduire à une différentielle totale exacte.

Document 2 : Travail des forces de pression

On considère un réacteur thermomécanique cylindrique dont l'une des extrémités, de surface S, est mobile (piston). La pression extérieure P_{ext} traduit la force par unité de surface qu'exerce l'atmosphère extérieure ou un opérateur sur la paroi mobile.



Pour un déplacement élémentaire, le travail δW_P reçu par le piston de la part de l'extérieur est donné par : $\delta W_P = P_{ext} S dx$

Le volume balayé par le piston est Sdx et est l'opposé de la variation de volume dV du gaz. Donc : $\delta W_P = -P_{ext} dV$

On peut appliquer le théorème de l'énergie cinétique à la paroi entre deux positions immobiles : $dE_c = \delta W_P - \delta W + \delta W_f = 0$ Où δW est le travail perçu par fluide par le piston et δW_f est le travail des forces de frottement. Donc : $\delta W = \delta W_f + \delta W_P = -P_{ext} dV$ si $\delta W_f = 0$

1) Expression de W si la transformation est monobare $\mathbf{P_{ext} = cte}$ et sans frottement

$$W = \int_{V_i}^{V_f} -P_{ext} dV = -P_{ext} \int_{V_i}^{V_f} dV = -P_{ext}(V_f - V_i)$$

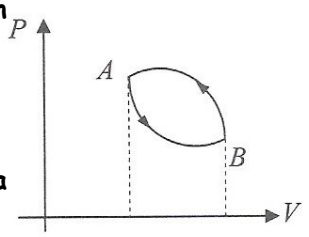
2) Expression de W si la transformation est mécaniquement réversible (mouvement du piston suffisamment lent pour que $\mathbf{P = P_{ext}}$ et sans frottement)

$\delta W = -P_{ext} dV = -PdV$, $W = -\int_{transfo} PdV$, P dépend a priori de V et le travail dépend du chemin

3) Expression de W si la transformation est isobare (mécaniquement réversible + monobare)

$$\delta W = -P_{ext} dV = -PdV, \ W = -\int_{transfo} PdV = -P(V_f - V_i)$$

On considère une transformation cyclique et mécaniquement réversible effectué par un système thermo-élastique et représentée sur le diagramme $P(V)$ représenté ci-dessous :



4) Quel est le signe du travail W_1 des forces de pression extérieures mis en jeu lors de la détente A→B ?

Il s'agit bien d'une détente donc $W_1 < 0$

5) A quelle grandeur « mathématique » s'identifie la quantité $|W_1|$?

Mathématiquement, $|W_1|$ représente l'aire sous la courbe $A \to B$

6) Quel est le signe du travail W_2 des forces de pression extérieures mis en jeu lors de la compression B→A ?

Il s'agit d'une compression donc $W_2 > 0$

7) A quelle grandeur « mathématique » s'identifie la quantité $|W_2|$?

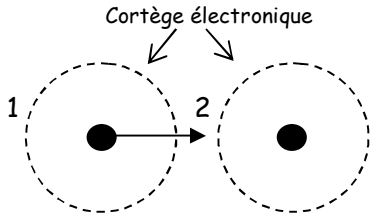
Mathématiquement, $|W_2|$ représente l'aire sous la courbe $B \to A$

8) Quel est le signe de $W = \oint -PdV$? Le fonctionnement est-il moteur ?

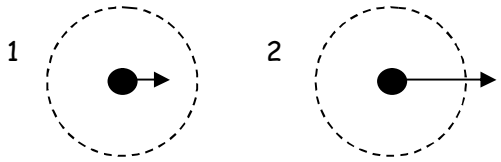
W est alors compté positivement et représente l'aire du cycle décrivant un récepteur

Document 3 : Le transfert thermique

On peut associer le transfert thermique au travail de forces à l'échelle microscopique des forces électromagnétiques :



L'atome 1 incident animé d'une vitesse se rapproche de l'atome2



Les répulsions électroniques freinent l'atome 1 et accélère l'atome 2 : de l'énergie a été communiquée à l'atome 2

Cependant la détermination de tous les travaux microscopiques à travers les parois du réacteur est impossible : on utilise donc la notion de chaleur « par défaut » pour traduire le bilan de ces travaux.

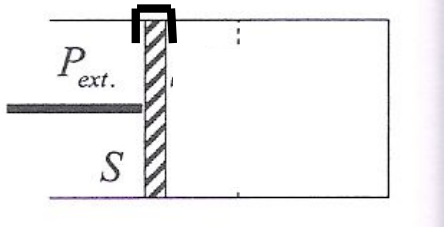
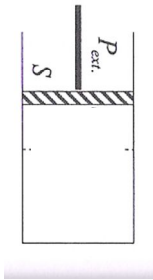
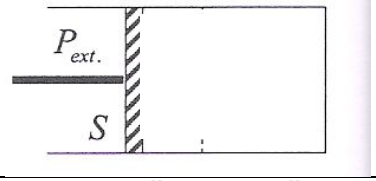
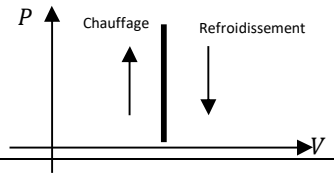
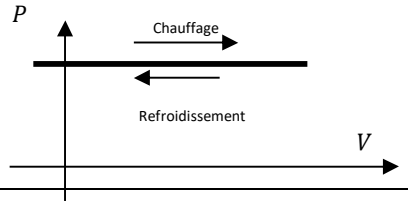
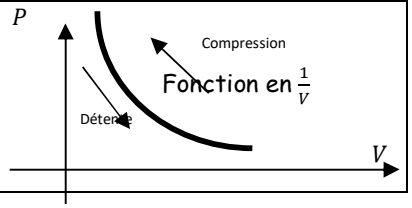
On distingue trois types de transferts thermiques :

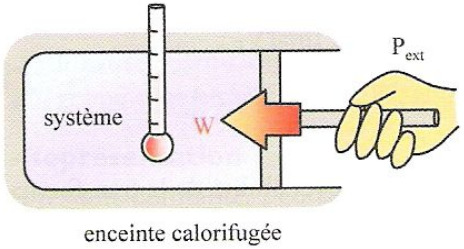
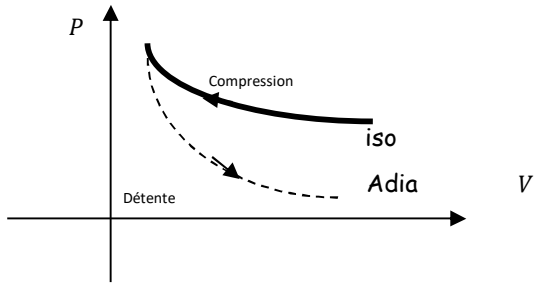
- La conduction thermique : C'est ce mode de transfert que l'on observe lorsque l'on plonge, dans une grande quantité d'eau chaude à la température T_c, un cylindre contenant un gaz et dont les parois sont fixes et diathermanes. L'augmentation de la température jusqu'à T_c s'accompagne inévitablement d'une augmentation de l'énergie interne.
- La convection thermique : la convection thermique ne peut avoir lieu que dans les fluides. Elle peut être naturelle, un fluide chaud étant moins dense qu'un fluide froid on observe le mouvement de tranches de fluide, ou forcée à l'aide d'une agitation extérieure
- Le rayonnement thermique : contrairement aux deux autres modes, la propagation de ce transfert thermique ne nécessite pas d'un milieu matériel. Par exemple, l'énergie thermique peut se propager dans le vide entre le soleil et la Terre sous forme d'ondes électromagnétiques.

Remplir par oui ou par non le tableau suivant :

Milieu	Convection	Rayonnement	Diffusion thermique
Vide	Non	Oui	Non
Solide	Non	Oui si transparent	Oui
Fluide	Oui	Oui si transparent	Oui

Document 4 : Expression du transfert thermique pour quelques transformations dans le cas d'un gaz parfait :

Transformations	Chauffage isochore monotherme (irréversible)	Chauffage isobare (monobare + mécaniquement réversible) monotherme (irréversible)	Compression isotherme mécaniquement réversible (réversible)
Dispositif expérimental contenant n moles de gaz parfait	Le réacteur thermomécanique possède des parois diathermanes, fixes et plongées dans un bain d'eau chaude (Thermostat) $T_{ext} = T_{fin}$ et $T_{ini} < T_{ext}$ 	Le réacteur thermomécanique possède des parois diathermanes. Le piston en contact avec l'atmosphère (pressostat) permet de garantir une pression constante (mécaniquement réversible). Le mouvement lent du piston est assuré par l'inertie thermique (on plonge le réacteur sauf le dessus dans l'eau chaude) 	Le réacteur thermomécanique possède des parois diathermanes en contact avec un thermostat à la température T_0. L'évolution du piston doit être très lente de manière à assurer un transfert thermique permettant d'avoir une température du système constante. 
Travail (gaz parfait)	Le travail des forces de pression est donc nul (pas de variation de volume) : $W = 0$	$W = -\int_{V_i}^{V_f} P_{ext} dV = -P\int_{V_i}^{V_f} dV = -P\Delta V$	$W = -\int_{V_i}^{V_f} P dV = -\int_{V_i}^{V_f} nRT_0 \frac{dV}{V}$ $W = -nRT_0 ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right)$
Variation d'énergie interne (gaz parfait)	$dU = C_v dT$ $\Delta U = C_V \Delta T$	$dU = C_V dT$ $\Delta U = C_V \Delta T$	$dU = C_v dT$ $\Delta U = C_V \Delta T = 0$
Transfert thermique (gaz parfait)	$dU = \delta Q$ $\Delta U = Q$ On a donc un résultat général : La chaleur mise en jeu dans une transformation isochore est donnée par la variation d'énergie interne. $Q = C_V \Delta T$	$\delta Q = dU - \delta W$ $Q = C_V \Delta T + P\Delta V$ $Q = C_V \Delta T + nR\Delta T$ $Q = C_P \Delta T$ En posant : $C_P = C_V + nR$	$\delta Q = -\delta W$ $Q = nRT_0 ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right)$ Une compression s'accompagne d'un transfert thermique négatif. Une détente absorbe de la chaleur à l'extérieur.
Diagramme de Clapeyron			

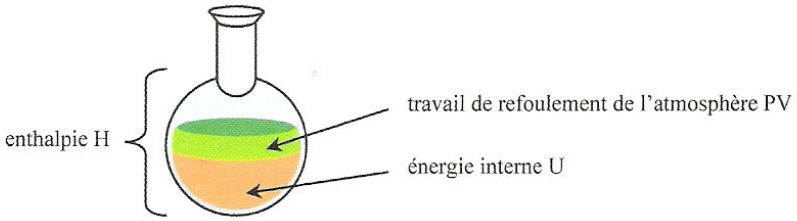
Transformations	Compression adiabatique mécaniquement réversible (réversible)
Dispositif expérimental	Le réacteur thermomécanique possède des parois athermanes, mobile (thermostat inutile)  Ne pas confondre adiabatique à isotherme. C'est justement parce que le travail apporté n'est pas évacué par transfert thermique que le gaz peut s'échauffer fortement.
Transfert thermique (gaz parfait)	Les parois athermanes imposent $Q = 0$. Expérimentalement, ce type de transformation pourra modéliser des transformations pour lesquelles le transfert thermique n'a pas eu le temps de s'effectuer.
Variation d'énergie interne (gaz parfait)	$dU = C_v dT$ $\Delta U = C_V \Delta T$
Travail et diagramme de Clapeyron (gaz parfait)	$W = \Delta U = C_V \Delta T$ On pose $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ avec $C_v + nR = C_p$. Avec une écriture différentielle : $dU = C_v dT = -pdV$ Soit :$C_v \frac{dPV}{nR} = -pdV$ et $C_v(PdV + VdP) = -nRPdV$ $PdV(C_v + nR) = PdVC_p = -C_v VdP$ $-\gamma \frac{dV}{V} = \frac{dP}{P}$ On obtient alors :$PV^\gamma = Cte$ ou $TV^{\gamma-1} = Cte$ ou $P^{1-\gamma}T^\gamma = Cte$ $T_f = T_i \left(\frac{V_i}{V_f}\right)^{\gamma-1}$ Soit : $W = \Delta U = C_V T_i (\left(\frac{V_i}{V_f}\right)^{\gamma-1} - 1)$ 

Document 5 : Intérêt de l'enthalpie

Voici quelques résultats démontrés dans le cas d'un gaz parfait

- Chaleur mise en jeu pour une transformation isochore monotherme : $Q = C_V \Delta T$
- Chaleur mise en jeu pour une transformation isobare monotherme : $Q = C_V \Delta T + nR\Delta T = C_V \Delta T + P\Delta V = C_P \Delta T$

Ces résultats montrent qu'un système nécessite, en se dilatant, davantage d'énergie pour augmenter sa température d'une unité. Cette énergie $P\Delta V$ supplémentaire est nécessaire pour que le système puisse occuper un volume ΔV supplémentaire (énergie qu'il faut fournir pour s'opposer au travail des forces de pression extérieures lors d'une évolution isobare).



Document 6 : variation enthalpique d'une phase condensée

Par définition : $H = U + PV$

Donc $dH = dU + VdP + PdV$

Pour une phase condensée : $dH \approx dU + VdP \approx CdT + VdP$

Soit pour 1 kg de phase condensée: $\Delta h \approx c\Delta T + v\Delta P$

On pourra envisager des transformations « extrêmes » telles que : $\Delta T \approx 1000K$ et $\Delta P \approx 100bar$

Dans le cas de l'eau $c \approx 10^3 J.kg^{-1}.K^{-1}$ et $v \approx 10^{-3} m^3.kg^{-1}$ soit $c\Delta T = 10^6 J.kg^{-1}$ et $v\Delta P \approx 10^4 J.kg^{-1}$

Soit : $\Delta h \approx c\Delta T$

Document 7 : Ce qu'apporte le second principe

Ecrivons le premier principe pour un système fermé contenu dans un piston (sans variation d'énergie cinétique et potentielle macroscopique) :

$$du = -P_{ext}dv + \delta q$$

- Mesure quantitative des sources d'irréversibilité

Ecrivons le second principe des système fermés au contact d'un thermostat à la température T_{ext} :

$$ds = \frac{\delta q}{T_{ext}} + \delta s_c$$

$$Tds = T\frac{\delta q}{T_{ext}} + T\delta s_c$$

Utilisons l'identité thermodynamique : $Tds = du + Pdv$

Ces équations donnent alors : $T\delta s_c = (P - P_{ext})dv + \delta q\left(\frac{T_{ext}-T}{T_{ext}}\right)$

Rq1 : δs_c rend compte des sources d'irréversibilités d'une transformation (inhomogénéité de la température, de la pression et même des frottements responsables d'une augmentation de T).

Rq2 : le signe de δs_c renseigne sur la possibilité d'une transformation ($\delta s_c > 0 \rightarrow$transformation possible) :

- Cas d'une compression adiabatique sans frottement : $P < P_{ext}$ alors $dv < 0 \rightarrow (P - P_{ext})dv > 0 \rightarrow \delta s_c > 0$
- Cas d'un chauffage isochore sans frottement $T < T_{ext}$ alors $\delta q > 0 \rightarrow \delta q\left(1 - \frac{T}{T_{ext}}\right) > 0 \rightarrow \delta s_c > 0$

- Travail et chaleur ne sont pas équivalent

Etudions une machine cyclique monotherme sur un cycle : $\begin{cases} \Delta S = \frac{Q}{T_{ext}} + S_c = 0 \rightarrow Q \leq 0 \\ \Delta U = W + Q = 0 \rightarrow W \geq 0 \end{cases}$

Le second principe affirme que la conversion intégrale du travail en chaleur est possible mais qu'une conversion intégrale de la chaleur en travail est impossible.

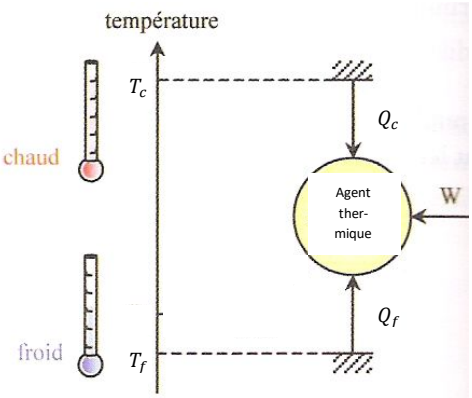
Il est cependant possible d'obtenir une conversion partielle de la chaleur en travail sur des machines cyclique ditherme.

- Dégradation de l'énergie

Pour un système fermé en détente adiabatique : $dU = \delta W = TdS - pdV = T\delta S_{créée} + \delta W_{rev}$. Donc comme $T\delta S_{créée} > 0$, a détente réelle fournit moins de travail que la détente réversible. Du fait des irréversibilités, l'énergie est moins récupérable, on dit qu'elle est dégradée.

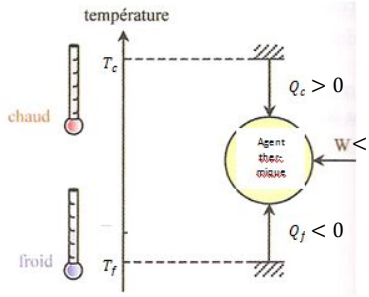
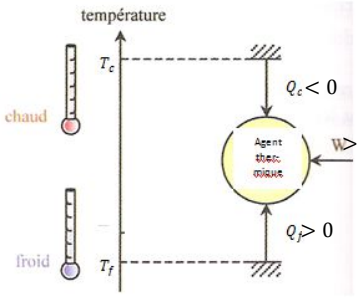
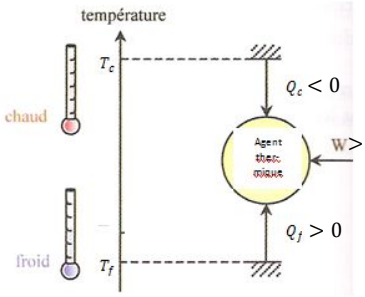
Document 8 : Bilan sur les machines dithermes cycliques

On désignera par machine ditherme cyclique, un dispositif imposant une suite de transformations formant un cycle au contact de deux thermostats (aux températures T_C et T_f).



Par convention, nous représentons par des flèches ces échanges énergétiques, en associant à ces flèches des transferts énergétiques algébriques. On compte positivement le transfert énergétique reçu et négativement le transfert énergétique cédé à l'extérieur. Par exemple, un travail cédé par la machine au milieu extérieur se traduit par une valeur $W < 0$

1) **Préciser les signes des différents transferts d'énergie pendant un cycle pour les trois applications suivantes. Exprimer le rendement ou l'efficacité en fonction de ces transferts thermiques.**

Moteur ditherme	Pompe à chaleur	réfrigérateur
		
Rendement : $r = \frac{-W}{Q_c}$	Efficacité : $e = \frac{-Q_c}{W}$	Efficacité : $e = \frac{Q_f}{W}$

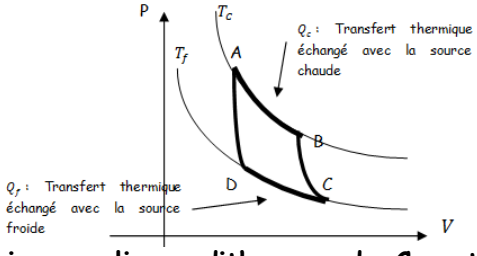
2) **Exprimer le premier et le second principe (pour un nombre entier de cycle) pour une machine ditherme cyclique.**

1e principe : $\Delta U = 0 = W + Q_c + Q_f$

2e principe $\Delta S = 0 = S_e + S_c$ avec $S_e = \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0$

3) **Exprimer le second principe dans le cas d'une machine cyclique, ditherme, réversible (c'est-à-dire d'un cycle, appelé cycle de Carnot, constitué de transformations réversibles isothermes et adiabatiques)**

$$S_e = \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} = 0$$



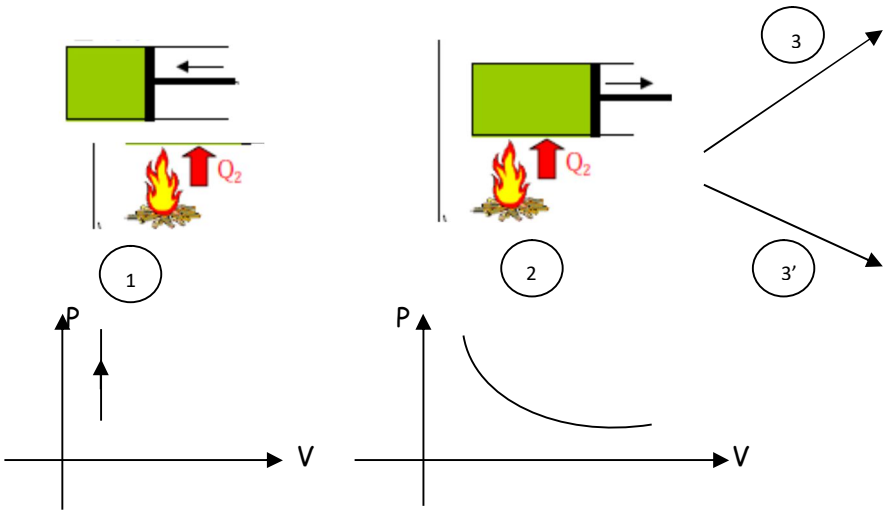
4) **Exprimer rendement ou efficacité des machines cycliques dithermes de Carnot en fonction des températures T_c et T_f**

Moteur ditherme	Pompe à chaleur	réfrigérateur
$r = 1 - \frac{T_f}{T_c}$	$e = \frac{T_C}{T_C - T_f}$	$e = \frac{T_f}{T_C - T_f}$

Document 9 : Performance du moteur ditherme

Prenons l'exemple d'un moteur que l'on souhaite cyclique. On veut donc observer au moins un aller-retour du piston.

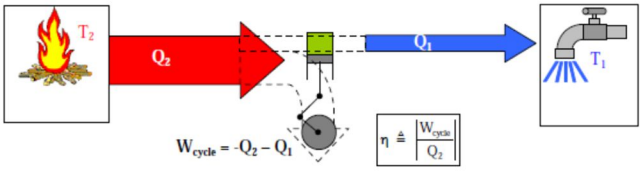
Pour repousser le piston à sa position initiale on peut envisager de comprimer le piston. Si on le fait sur l'isotherme précédente, alors on restitue tout le travail récupéré. Et de manière adiabatique, il faut fournir plus de travail que lors de la précédente détente.



Commençons par bloquer le volume occupé par le fluide et faire un chauffage isochore.

Continuons à chauffer, après avoir relâché le piston, afin d'observer une détente isotherme. On récupère un travail durant cette détente d'un gaz chaud initialement comprimé.

Pour ramener le piston sans dépenser trop d'énergie, il faut rendre le gaz plus compressible donc moins chaud. Il faut donc entamer un refroidissement et admettre que l'on va perdre une partie de l'énergie pour en récupérer une autre (c'est mieux que rien !). On peut, par exemple, proposer un refroidissement isochore et une compression sur une autre isotherme: d'où la nécessité d'un autre thermostat plus froid. Le prélèvement d'une partie du transfert thermique donnée par la source chaude explique le rendement inférieur à 1.



1) Montrer, à l'aide du second principe, qu'une machine motrice cyclique monotherme n'existe pas.

Il faut utiliser toutes les hypothèses : $W = -Q$ et $\frac{Q}{T_{ext}} \leq 0$ soit $W \leq 0$

2) Pourquoi les transferts thermiques lors de processus isothermes ne sont pas utilisés en pratique ?

Isotherme signifie quasistatique et monotherme ; donc transformation lente

3) Quelles transformations permettant la mise en jeu de transferts thermiques sont retenues en pratique?

Chauffages et refroidissement monobares et isochores (monontherme)

4) Pourquoi un moteur de Carnot a-t-il un rendement inférieur à l'unité et pourquoi les moteurs réels ont-ils un rendement encore moins bons ?

Pour bénéficier d'un écoulement thermique depuis la source chaude, il faut une source froide. Une fois la chaleur piégée au niveau de la source froide, elle devient irrécupérable. Les isobares et isochores rajoutent encore de la dégradation de l'énergie : $W = \frac{-Q_C(T_C - T_f)}{T_C} T_f + S_c T_f$