

DESCRIPTION PHYSIQUE DU MOTEUR SANS COMPRESSION

I) FONCTIONNEMENT DU MOTEUR SANS COMPRESSION

- 1) Cas général 2
- 2) Le moteur sans compression 2
- 3) Description 3
- 4) Constatations 4

II) APPLICATION DU PRINCIPE DE CONSERVATION DE L'ENERGIE

- 1) Cas général 4
- 2) Le moteur sans compression 5
- 3) Application 6

III) CONTRACTION PLUTOT QUE COMPRESSION

- 1) La compression 6
- 2) La contraction 7
- 3) Définition du nouveau coefficient ω 7

IV) DEFINITION COMPLETE DE MON MOTEUR

- 1) Description 8
- 2) Schéma thermodynamique 9
- 3) Équations de base 9
- 4) Résolution 9

V) APPLICATION NUMERIQUE ET ANALYSE DES RESULTATS

- 1) Analyse comparative de 2 cycles thermodynamiques 10
- 2) Comparaison des puissances utiles et rendements 11

VI) APPLICATION AVEC CHANGEMENT DE PHASE

- 1) Principe de fonctionnement 11
- 2) Analyse numérique 12

VII) CONCLUSION

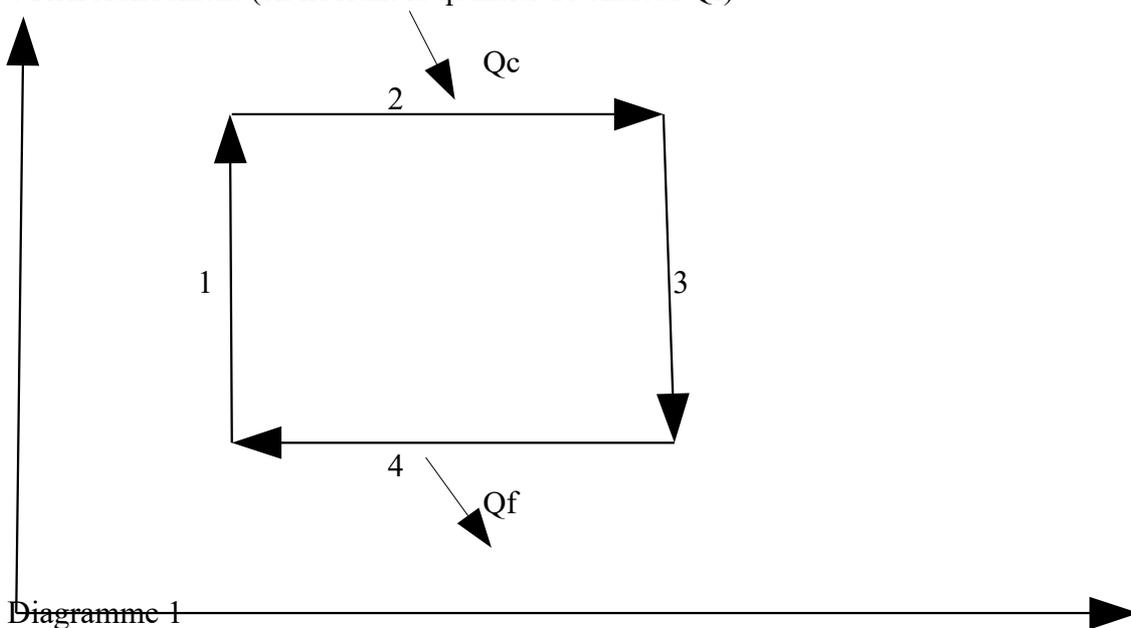
12

I) FONCTIONNEMENT DU MOTEUR SANS COMPRESSION

1) Cas général

La plupart des moteurs thermodynamiques suivent 4 phases

- 1 Compression
- 2 Échauffement (en absorbant la quantité de chaleur Q_c)
- 3 Détente
- 4 Refroidissement (en libérant la quantité de chaleur Q_f)



La compression nécessaire au fonctionnement du circuit se fait au détriment du rendement global du système.

2) Le moteur sans compression

Après plusieurs années de recherche, j'ai trouvé une possibilité de réaliser un cycle thermodynamique moteur où la phase de compression n'est plus consommatrice d'énergie mais devient moteur.

Source chaude
Fluide froid

Déplacement du piston sous l'effet de la pression

Un vérin chauffé par une source chaude est rempli avec un fluide froid.

Le déplacement du piston est bloqué dans un premier temps. Le fluide se réchauffe et monte en pression. Au bout d'un certain temps le piston est débloqué, il peut se déplacer en fournissant un effort mécanique. Le déplacement du piston soupape ouverte permet un retour à l'état initial sans avoir à fournir d'effort.

Pour que le fluide puisse réaliser un cycle, celui-ci devrait être refroidit pour revenir à son état initial.

Source froide
Fluide chaud

Déplacement du piston sous l'effet de la dépression

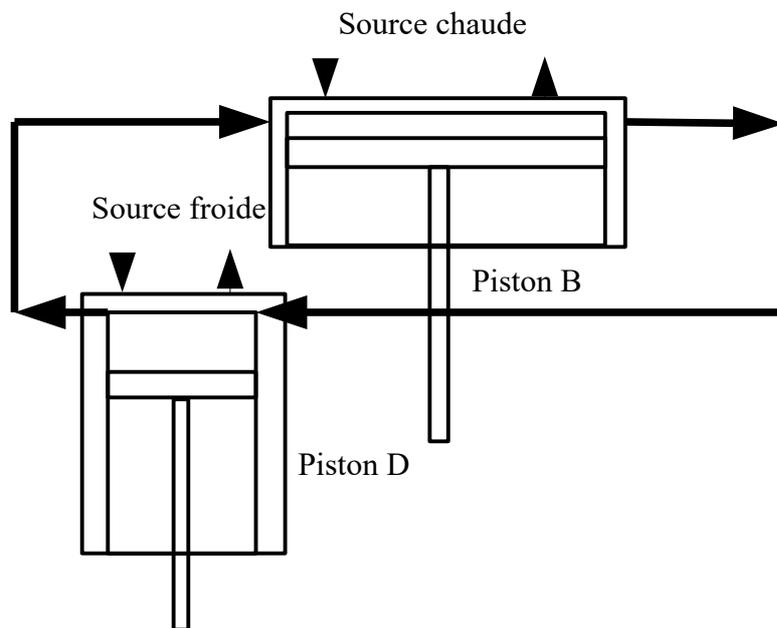
De même un vérin refroidit par une source froide peut être rempli par un fluide chaud.

Le déplacement du piston est bloqué dans un premier temps. Le fluide se refroidit la pression dans le vérin baisse. Au bout d'un certain temps le piston est débloqué, il peut se déplacer en fournissant un effort mécanique. Le déplacement du piston soupape ouverte permet un retour à l'état initial sans avoir à fournir d'effort.

Pour que le fluide puisse réaliser un cycle, celui-ci devrait être réchauffé pour revenir à son état initial.

Les deux cycles ci dessus permettent de réaliser, tous les deux des mouvements moteurs à partir de sources chaude et froide. Il est possible de combiner les 2 vérins. Cette combinaison permet d'obtenir un moteur où le fluide de travail va passer d'un vérin à l'autre, donc alternativement se réchauffer et se refroidir.

On va étudier le circuit suivant



3) Description du fonctionnement

Dans ce circuit le piston B est réchauffé par la source chaude, le piston D est refroidit par la source froide.

Au départ on remplit (à un certain niveau) le piston B du fluide contenu dans le réservoir froid A, et on remplit (à un certain niveau) le piston D du fluide contenu dans le réservoir C. Les pressions dans les réservoir A et C étant identiques (que l'on va appelé P_I). Les pistons B et D peuvent être mis l'un derrière l'autre en respectant certaines conditions.

On va considéré que les échanges thermiques entre le fluide contenu dans les pistons et les sources froide et chaude se font de manière isochore (blocage du piston). Alors, la pression dans le piston B va augmenter sous l'effet des calories apportées par la source chaude. En même temps, la pression dans le piston D va chuter sous l'effet du refroidissement lié à la source froide.

Lorsque les échanges opérés, les pistons sont libérés, on peut alors récupérer l'énergie liée aux échanges thermiques. En fin de cycle de détente, la pression dans les pistons est égale à P_I . Le retour à la position initiale se fait à une pression identique dans les 2 pistons = à la pression P_I , c'est à dire sans avoir à finir d'effort (hormis les frottements).

4) Constatations

Première constatation : Les échanges de fluide entre les pistons et les réservoirs se font à pression égale à P_I . Ce qui veut dire que ce type de moteur fonctionne sans avoir à fournir de compression.

Deuxième constatation : Le fluide comprimé fournit un effort moteur sur le piston, de même que le fluide contracté fournit un effort moteur sur le piston.

Troisième constatation : Dans le cas de la contraction du fluide qui fournit un effort moteur, le fluide ne travaille pas de la même façon que dans le cas d'une compression de fluide. Le fluide libère du travail au moteur ce qui se traduit par une baisse ou une élévation moindre de sa température. Le coefficient de contraction n'est pas le même que le coefficient de compression (souvent noté γ).

Le rendement de notre moteur, combinant une contraction moteur avec une détente moteur permet d'obtenir des rendements bien supérieurs à un moteur thermodynamique standard. Dans le cas d'un moteur suivant un cycle de Carnot, la compression peut représenter 60 à 80% de l'énergie produite par la détente.

Moteur thermodynamique standard	Moteur thermodynamique sans compression
1er principe de la thermodynamique	
$Q_{ch} + W_{comp} = Q_{fr} + W_{det}$ Q_{ch} = Quantité de chaleur apportée au système W_{comp} = Travail réalisé pour la compression Q_{fr} = Quantité de chaleur libérée par le système (refroidissement) W_{det} = Travail fourni par la détente (souvent la turbine)	$Q_{ch} = W_{cont} + W_{det} + Q_{fr}$ Q_{ch} = Quantité de chaleur apportée au système W_{cont} = Travail fourni par la contraction du fluide dans la chambre froide W_{det} = Travail fourni par la détente du fluide dans la chambre chaude Q_{fr} = Quantité de chaleur libérée par le système (refroidissement)
Calcul de l'énergie disponible (E_{dispo})	
$E_{dispo} = W_{det} - W_{comp}$	$E_{dispo} = W_{det} + W_{cont}$
Calcul du rendement	
$\eta = (W_{det} - W_{comp})/Q_{ch}$	$\eta = (W_{det} + W_{cont})/Q_{ch}$

II) PRINCIPE DE CONSERVATION DE L'ENERGIE

1) Cas général

Un moteur thermodynamique standard va suivre un cycle représenté sur le diagramme suivant. On pourra au titre de la conservation de l'énergie (premier principe de la thermodynamique)

$$E_c + Q_c = E_d + Q_f \text{ (la somme des énergies qui entrent dans le système en ressortent)}$$

où

E_c = Énergie de la compression

Q_c = quantité de chaleur fournie par la source chaude

E_d = Énergie récupérée lors de la détente

Q_f = quantité de chaleur évacuée vers la source froide

On va considéré dans ce qui suit, que les transformations sont idéales et qu'il n'y a pas de frottement.

Notre objectif étant d'augmenter l'énergie utile E_u , ici $E_u = E_d - E_c$

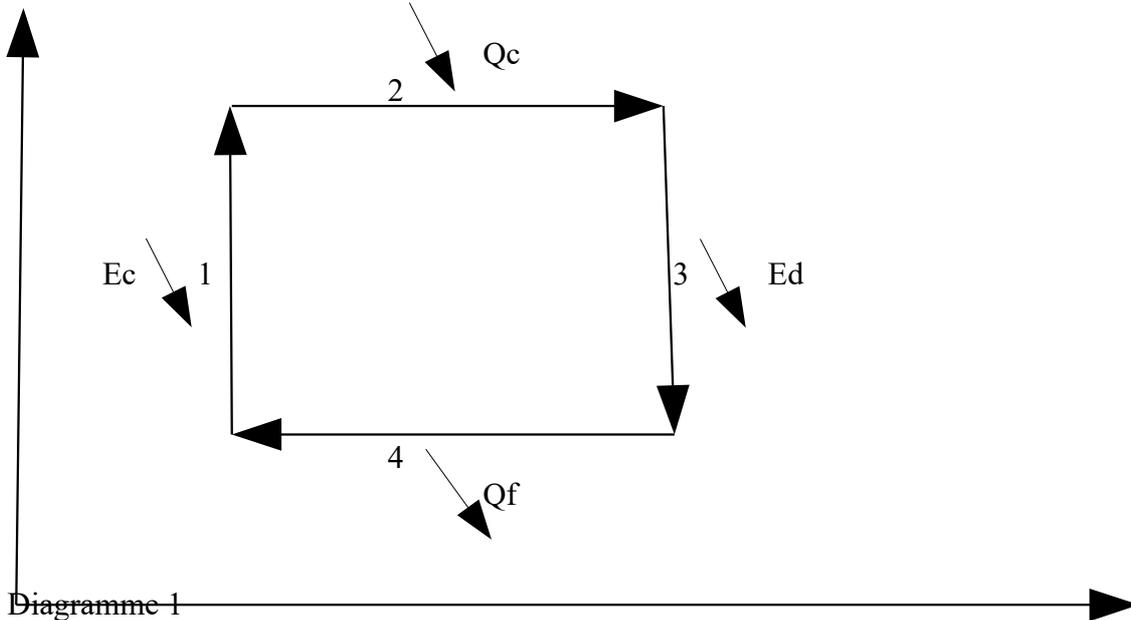


Diagramme 1

2) Le moteur sans compression

Dans mon moteur, E_c l'énergie de compression fournit au moteur pour comprimer le fluide devient E'_c une énergie de contraction, cette contraction étant moteur on peut écrire :

$$Q_c = E'_c + E_d + Q_f$$

L'énergie de compression devenant une énergie de contraction, je peux la transférer de l'autre coté de l'égalité.

On peut constaté tout de suite :

A Q_c et E_d égales, Q_f baisse, c'est à dire que la chaleur renvoyée vers la source froide diminue.

D'autre part l'énergie utile devient alors

$$E_u = E_d + E'_c \quad (\text{on avait avant } E_u = E_d - E_c)$$

D'où une augmentation significative de l'énergie disponible à la sortie de mon moteur

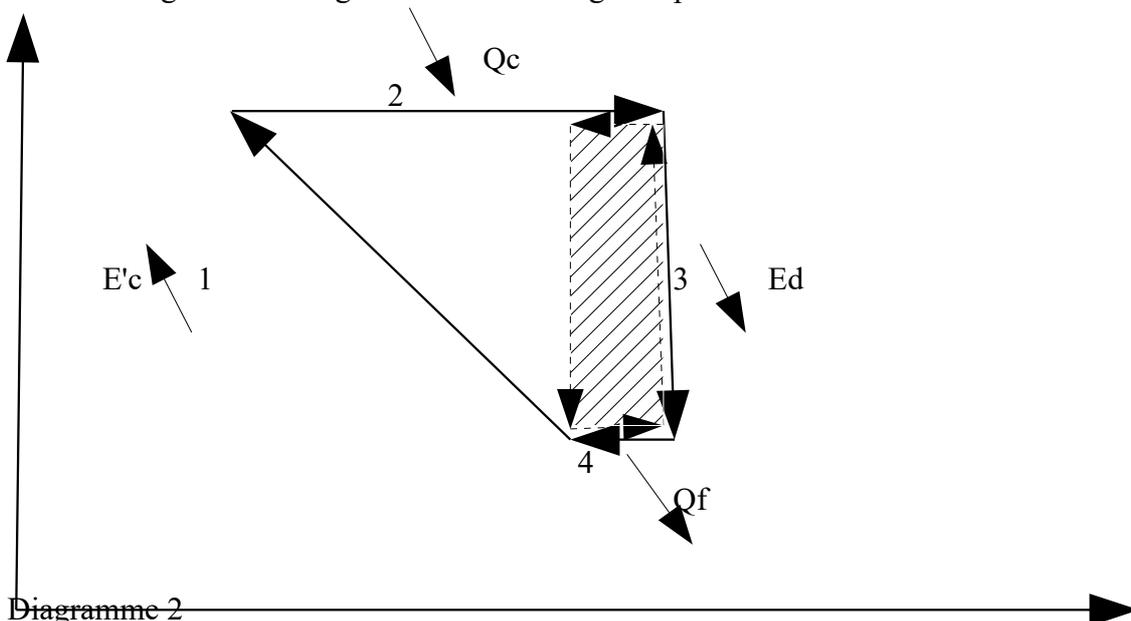


Diagramme 2

3) Application

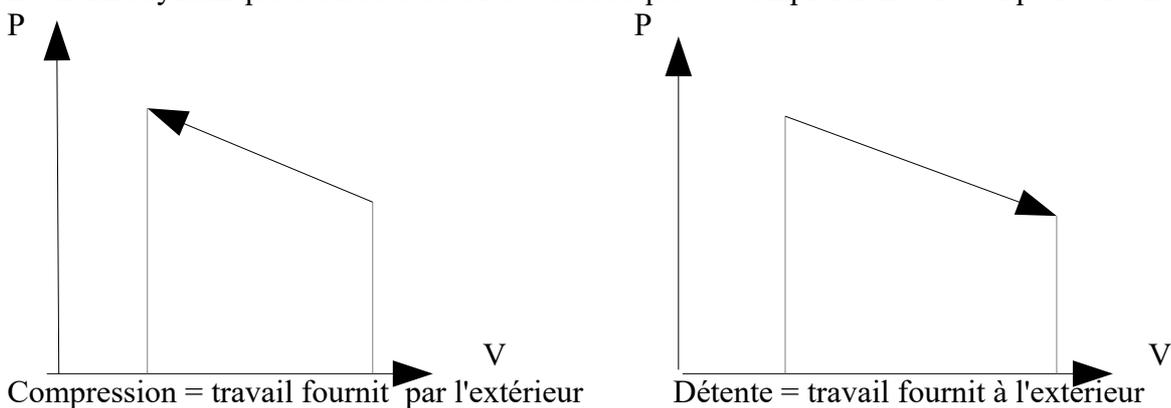
Le fonctionnement de mon moteur peut donc être représenté sur le diagramme 2 (par le cycle en flèches continues). L'utilisation d'une pompe à chaleur (cycle hachuré, flèches en pointillés) permet d'absorber la quantité de chaleur normalement absorbée par la source froide. Cette pompe à chaleur renvoie une partie de la chaleur nécessaire au fonctionnement de mon moteur, le reste de la chaleur étant fourni par le milieu extérieur.

III) CONTRACTION PLUTOT QUE COMPRESSION

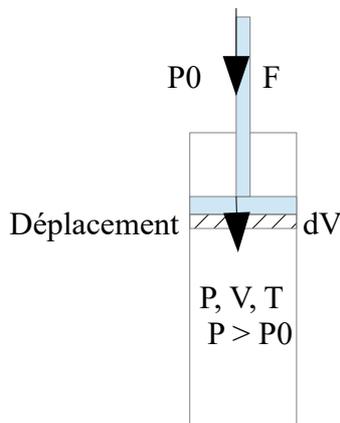
1) La compression

Pour comprendre pourquoi, il faut repartir sur l'analyse thermodynamique théorique, pour trouver les valeurs d'équilibre du système est en définir ainsi les paramètres de fonctionnement de mon moteur.

La thermodynamique étudie les détentes adiabatiques et compression adiabatiques suivantes :



Le fonctionnement normal d'une compression est la suivante :



Dans le cadre du fonctionnement « standard » d'une compression, le piston descend sous l'effet de la force F , venant du milieu extérieur, l'énergie interne du gaz, contenue dans le piston, va augmenter. Le volume diminue sous l'effet de la force F . L'effort F est fourni par le milieu extérieur.

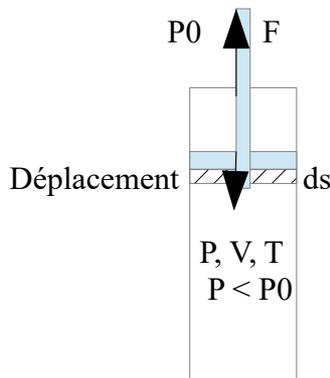
On peut écrire

$$\delta W = -PdV$$

2) La contraction

Hors, quand $P_{ext} > P_{int}$, on peut avoir une compression moteur (qui fournit du travail à l'extérieur), cette transformation n'est pas décrite dans les manuels de thermodynamique. On pourra appeler cette phase contraction du gaz plutôt que compression.

Il nous faut donc reprendre les équations de base de la thermodynamique pour déterminer quel est le comportement du fluide pour cette transformation particulière.



En libérant le piston, si l'on a $P < P_0$, le piston aura tendance à descendre. Pour ce faire il faudra que l'énergie interne du gaz, contenu dans le piston, diminue. Le piston fournit de l'énergie au milieu extérieur.

On peut écrire

$$\delta W = +PdV \quad \text{travail fournit au milieu extérieur}$$

On a aussi

$$\delta Q = dU - \delta W = dU - PdV = TdS \quad \text{où } dS \text{ est la variation d'entropie}$$

$$nC_v dT - PdV$$

Pour évolution adiabatique $\delta Q = 0$, réalisable avec une évolution suffisamment rapide ce qui limite les échanges avec l'extérieur.

3) Définition du nouveau coefficient ω

Si on utilise l'expression des gaz parfaits : $PV = nRT$, qu'on remplace dans l'équation précédente on va pouvoir écrire :

$$nC_v d(PV/nR) - PdV = 0$$

D'où

$$C_v(VdP + PdV) - RPdV = 0$$

ie

$$C_v V dP + (C_v - R) P dV = 0$$

Dans le cas des gaz parfaits diatomiques $C_v = 5/2 R$

D'où

$$5/2 R V dP + 3/2 R P dV = 0$$

Soit

$$5/3 V dP + P dV = 0$$

Cette équation peut se traduire en $PV^{3/5} = Cte$

Si on appelle le rapport $(C_v - R)/C_v = \omega$, on peut écrire l'équation sous la forme

$$PV^\omega = Cte$$

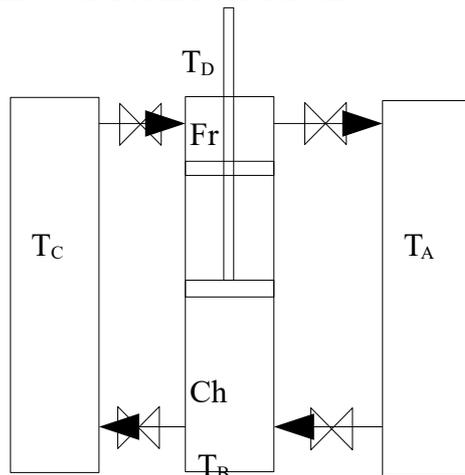
Ou encore $P^{(1-\omega)}T^\omega = \text{Cte}$
 $TV^{(1-\omega)} = \text{Cte}$

En outre, l'ensemble des calculs qui suivent restent valables si on fait nos calculs en remplaçant ω par γ . Les résultats varieront bien en fonction de cette modification.

IV) DEFINITION COMPLETE DE MON MOTEUR ET RESOLUTION

1) Description

Nous allons étudier le moteur suivant :



Soit un piston, contenant deux chambres. Le piston dispose d'une chambre chaude (Ch) qui reçoit de la chaleur, cette chaleur est reçue de manière isochore (le piston est bloqué), la pression dans cette chambre du piston augmente.

De l'autre côté du piston une chambre froide (Fr) libre de la chaleur de manière isochore (le piston est bloqué), la pression dans cette chambre diminue.

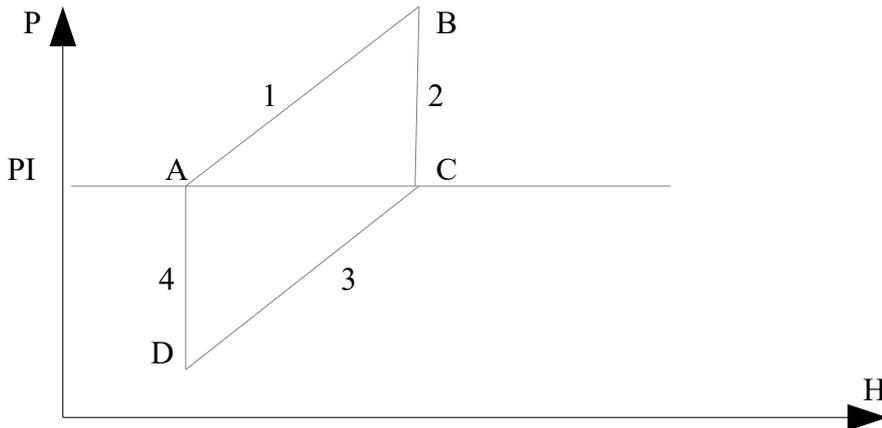
Deux réservoirs de chaque côté du piston permettent le transfert d'un côté à l'autre du piston lorsque celui-ci est en mouvement (cf dessin ci-dessus)

On va considérer que l'on va arriver à un équilibre « parfait », c'est à dire que la température à l'intérieur du piston est égale à la température extérieure. On va aussi considérer que le fluide est un gaz parfait diatomique.

Arrivé à l'équilibre thermique, on libère le piston, le gaz comprimé par la chaleur et le gaz détendu en libérant de la chaleur, vont déplacer le piston suffisamment rapidement pour que la détente et la compression soient considérées comme adiabatiques. L'énergie liée au déplacement du piston peut alors être récupérée.

Une fois que le piston a libéré son énergie, l'équilibre des pressions est atteint, un mouvement complet d'aller-retour est réalisé par le piston. Le fluide de la chambre froide est évacué vers le réservoir T_A puis aspiré par la chambre chaude. Le fluide de la chambre chaude est évacué vers le réservoir T_B pour être aspiré par la chambre froide. Le fluide va donc suivre un cycle Adiabatique / isochore / adiabatique / isochore suivant le schéma ci-dessous.

2) Schéma thermodynamique



Pour permettre un déplacement sans effort (hors frottements) du piston, il faut que l'on ait $P_A = P_C = P_I$ (Pression intermédiaire d'équilibre)

3) Equations de base

On peut écrire pour chaque transformation élémentaire :

- 1 Transformation isochore $A \rightarrow B$
 $P_A/T_A = P_B/T_B$ d'où $T_A = T_B (P_I/P_B)$ ou $T_B = T_A (P_B/P_I)$
- 2 Transformation adiabatique $B \rightarrow C$
 $P_B^{1-\gamma} T_B^\gamma = P_C^{1-\gamma} T_C^\gamma$ d'où $T_C = T_B (P_B/P_I)^{(1-\gamma)/\gamma}$
- 3 Transformation isochore $C \rightarrow D$
 $P_C/T_C = P_D/T_D$ d'où $T_C = T_D (P_I/P_D)$ ou $T_D = T_C (P_D/P_I)$
- 4 Transformation adiabatique $D \rightarrow A$ (contraction moteur)
 $P_D^{1-\omega} T_D^\omega = P_A^{1-\omega} T_A^\omega$ d'où $T_A = T_D (P_D/P_I)^{(1-\omega)/\omega}$

4) Résolution

A partir de ces équations nous pouvons en déduire

$$T_A = T_B (P_I/P_B) \quad \text{ou} \quad T_B = T_A (P_B/P_I) \quad \text{(équation 1)}$$

$$T_C = T_B (P_B/P_I)^{(1-\gamma)/\gamma} = T_A (P_B/P_I) (P_B/P_I)^{(1-\gamma)/\gamma} = T_A (P_B/P_I)^{1/\gamma} \quad \text{(équation 2)}$$

$$T_D = T_C (P_D/P_I) = T_A (P_D/P_I) (P_B/P_I)^{1/\gamma} = T_A (P_D/P_I) (P_B/P_I)^{1/\gamma} \quad \text{(équation 3)}$$

$$T_A = T_D (P_D/P_I)^{(1-\omega)/\omega} = T_A (P_D/P_I)^{(1-\omega)/\omega} (P_D/P_I) (P_B/P_I)^{1/\gamma} \quad \text{(équation 4)}$$

Ce qui se réduit à

$$T_A = T_A (P_D/P_I)^{(1/\omega)} (P_B/P_I)^{(1/\gamma)}$$

D'où une première équation pour arriver à l'équilibre

$$(P_D/P_I)^\gamma (P_B/P_I)^\omega = 1 \text{ ou } (P_D/P_I)^\gamma = (P_I/P_B)^\omega \text{ ou } (P_D/P_I) = (P_I/P_B)^{\omega/\gamma} \text{ (équation 5)}$$

Notre but, pour déterminer le système, est d'exprimer les variables internes en fonction des paramètres d'entrée. Pour nous, les paramètres d'entrée sont T_B , température de source chaude et T_D température de source froide.

Soit

$$T_A = T_B (P_I/P_B) \text{ (équation 1)}$$

$$T_A = T_D (P_D/P_I)^{(1-\omega)/\omega} \text{ (équation 4)}$$

D'où

$$T_B (P_I/P_B) = T_D (P_D/P_I)^{(1-\omega)/\omega}, \text{ or on a } (P_I/P_B)^{\omega/\gamma} = (P_D/P_I) \text{ (à partir de l'équation 5)}$$

D'où

$$T_B/T_D = (P_D/P_I)^{((1-\omega)/\omega) - (\gamma/\omega)} = (P_D/P_I)^{(1-\gamma-\omega)/\omega}$$

Or $\omega = (C_v - R)/C_v$ et $\gamma = (C_v + R)/C_v$, d'où $\omega + \gamma = 2$

$$D'où \quad T_B/T_D = (P_D/P_I)^{-1/\omega} \text{ ou } (P_D/P_I) = (T_B/T_D)^{-\omega} \text{ (équation 6)}$$

On peut, ainsi, définir l'ensemble des paramètres de notre circuit en fonction de P_I (Pression intermédiaire d'équilibre), de T_B , (température de la source chaude) et T_D , (température de la source froide).

Ces équations ont été écrites et entrées dans le fichier de calcul ci-joint **Comparatif MOSC Carnot**.

On constate que le rendement de notre moteur a un rendement supérieur à un moteur utilisant un cycle de Carnot pour des valeurs de température « faibles ».

V) APPLICATION NUMERIQUE ET ANALYSE DES RESULTATS

1) Analyse comparative de 2 cycles thermodynamiques

Nous allons comparer notre cycle thermodynamique avec le cycle le plus couramment utilisé en thermodynamique à savoir un cycle constitué de 2 isobares et 2 adiabatiques.

Afin de travailler de manière comparable, on va considérer que l'on travaille entre 2 sources de chaleur dont les températures seront identiques pour nos 2 cycles.

La source chaude à la température T_B fournit de la chaleur au circuit, quand la source froide refroidit celui-ci.

Mon objectif sera donc de comparer nos 2 circuits entre nos 2 sources (froide et chaude) mais surtout d'en définir la puissance utile restituée.

Sur mon circuit, on calculera son rendement (Puissance restituée / chaleur absorbée au niveau de la source chaude).

Le tableau Comparatif MOSC Carnot, est un tableau qui compare les rendements thermodynamiques théoriques d'un moteur sans compression (MOSC) et d'un moteur utilisant un cycle de Carnot

Je vais travailler sur la base de gaz parfait diatomique dans les 2 cas, mon objectif étant de réaliser un comparatif.

2) Comparaison des puissances utiles et rendements

Je travaille avec un gaz parfait, les résultats sont donnés pour 1 mole de gaz parfait. Cette valeur permet de donner une notion de puissance restituée en fonction du volume utile de mon moteur. De plus j'ai choisi de prendre une pression P_I de 20 bars, qui permet d'obtenir un écart de pression ($P_B - P_D$) de l'ordre 14 bars avec un écart de température de 100K. Cette différence de pression doit permettre le déplacement du piston.

Le diagramme issu du tableau de comparaison montre clairement que le fonctionnement d'un moteur sans compression (MOSC) est très différent du fonctionnement des moteurs thermodynamiques usuels. Le rendement du MOSC est moins tributaire de la température et même avec de faibles écarts de températures le rendement du MOSC est loin d'être négligeable. Cette caractéristique est particulièrement intéressante car ceci permet d'envisager une mise en cascade de plusieurs MOSC afin d'améliorer le rendement, ce qui n'est pas possible actuellement.

La réalisation de mon moteur est facilement réalisable, alors que réaliser en pratique un cycle de Carnot est très difficile voire impossible.

Un autre aspect intéressant du MOSC, est le fait que l'on peut réduire aussi sensiblement le besoin en refroidissement de notre cycle

L'amélioration du rendement permet une transformation plus importante de la chaleur en énergie et donc une baisse sensible du refroidissement nécessaire.

VI) APPLICATION AVEC CHANGEMENT DE PHASE

1) Principe de fonctionnement

Toutefois mon moteur présente un inconvénient lié à son fonctionnement. Comme on travaille en refroidissement et réchauffement isochore, le déplacement utile du piston est inversement proportionnel à la différence de température. Il faut donc chercher à optimiser le fonctionnement de mon moteur.

On peut utiliser mon moteur avec un changement de phase.

Avec le changement de phase on va avoir

Dans la chambre chaude :

Admission du fluide (en phase liquide)

Augmentation de la température jusqu'à la température de la source chaude (ou à peu près)

Déplacement du piston et évaporation du fluide

Détente (équilibre des pressions)

Échappement du fluide sous forme gazeuse

Dans la chambre froide

Admission du fluide sous forme gazeuse

Baisse de la température du fluide jusqu'à la température de la source froide (ou à peu près)

Déplacement du piston et condensation du fluide

contraction (équilibre des pressions)

Échappement du fluide sous forme liquide

La fin du cycle de déplacement du piston permet de revenir à l'étape initiale se fait à pression constante, soit sans effort (hormis les frottements).

Le déplacement du piston se fait sous l'effet des changements de phase (évaporation / condensation) à pression constante. La différence de pression entre les 2 chambres étant fonction de la différence de température des 2 sources de chaleur.

2) Analyse numérique

A titre d'exemple, avec du propane, entre 0 et 30 °C, l'écart de pression pour les changements de phase est 6,2 bar.

Dans ce cas, avec un piston d'une section de 38mm de diamètre, l'effort exercé sur le piston est de près de 690 N. Cet effort est largement suffisant pour que le piston se déplace.

Le choix d'un autre gaz permettra certainement d'en améliorer le rendement.

VII) CONCLUSION

Avec un moteur de type MOSC, il est possible d'obtenir de meilleurs rendements qu'avec les moteurs actuels. Le rendement global du système peut être amélioré en agencant plusieurs moteurs en cascade. Il faut quand même faire attention au fait que cette étude porte sur les rendements théoriques thermodynamiques de mon moteur, mécaniquement les choses sont un peu différentes sachant que plus l'écart de pression sera maximal et plus le rendement mécanique sera meilleur aussi.

En utilisant une pompe à chaleur il est possible d'envisager de produire de l'énergie en captant des calories directement dans le milieu ambiant. Sachant que toutes calories transformées en énergie redeviendront des calories, on crée ainsi une singularité vis à vis du second principe de la thermodynamique.

La création du MOSC est une avancée pour la physique mais peut surtout être une avancée essentielle dans la lutte contre le réchauffement climatique car on peut potentiellement envisager à court terme de se passer des énergies fossiles pour produire de l'énergie avec une technologie abordable.

Tableau des valeurs calculées à partir des éléments ci-dessus

Ecart temp	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300
TA (°C)	-7,61258	-14,5308	-20,8567	-26,6721	-32,0438	-43,8712	-53,8886	-62,5244	-70,076	-76,7576	-82,7281	-92,9909	-101,546	-108,83	-115,135
TA (K)	265,537	258,619	252,293	246,478	241,106	229,279	219,261	210,626	203,074	196,392	190,422	180,159	171,604	164,32	158,015
PA (bar)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
PA (Pa)	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000
VA (l)	1,1039	1,07514	1,04884	1,02467	1,00233	0,95317	0,91152	0,87562	0,84423	0,81645	0,79163	0,74896	0,7134	0,68312	0,6569
VA (m3)	0,0011	0,00108	0,00105	0,00102	0,001	0,00095	0,00091	0,00088	0,00084	0,00082	0,00079	0,00075	0,00071	0,00068	0,00066
QA-B (J)	573,959	1133,49	1680,7	2217,3	2744,68	4029,84	5277,37	6496,18	7692,46	8870,65	10034,1	12326	14582,5	16812,5	19022,1
TB (°C)	20	40	60	80	100	150	200	250	300	350	400	500	600	700	800
TB (K)	293,15	313,15	333,15	353,15	373,15	423,15	473,15	523,15	573,15	623,15	673,15	773,15	873,15	973,15	1073,15
PB (bar)	22,0798	24,2171	26,4097	28,6557	30,9532	36,9114	43,1585	49,6758	56,4474	63,4597	70,7009	85,8297	101,764	118,446	135,829
PB (Pa)	2207975	2421708	2640974	2865571	3095317	3691139	4315853	4967582	5644740	6345969	7070089	8582970	1E+007	1E+007	1E+007
VB (l)	1,1039	1,07514	1,04884	1,02467	1,00233	0,95317	0,91152	0,87562	0,84423	0,81645	0,79163	0,74896	0,7134	0,68312	0,6569
VB (m3)	0,0011	0,00108	0,00105	0,00102	0,001	0,00095	0,00091	0,00088	0,00084	0,00082	0,00079	0,00075	0,00071	0,00068	0,00066
WB-C (J)	-169,822	-346,271	-528,759	-716,786	-909,915	-1412,69	-1940,3	-2489,14	-3056,4	-3639,88	-4237,77	-5471,13	-6747,25	-8059,39	-9402,47
TC (°C)	11,83	23,3413	34,562	45,5162	56,2249	82,037	106,654	130,25	152,96	174,889	196,125	236,79	275,397	312,271	347,657
TC(K)	284,98	296,491	307,712	318,666	329,375	355,187	379,804	403,4	426,11	448,039	469,275	509,94	548,547	585,421	620,807
PC (bar)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
PC (Pa)	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000
VC (l)	1,18473	1,23258	1,27923	1,32477	1,36929	1,47659	1,57893	1,67703	1,77144	1,8626	1,95089	2,11994	2,28044	2,43373	2,58084
VC (m3)	0,00118	0,00123	0,00128	0,00132	0,00137	0,00148	0,00158	0,00168	0,00177	0,00186	0,00195	0,00212	0,00228	0,00243	0,00258
QC-D (J)	-245,901	-485,176	-718,41	-946,107	-1168,7	-1705,23	-2216,93	-2707,4	-3179,44	-3635,27	-4076,69	-4921,95	-5724,44	-6490,92	-7226,46
TD (°C)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TD (K)	273,15	273,15	273,15	273,15	273,15	273,15	273,15	273,15	273,15	273,15	273,15	273,15	273,15	273,15	273,15
PD (bar)	19,1698	18,4255	17,7536	17,1433	16,586	15,3806	14,3837	13,5424	12,8206	12,1931	11,6414	10,713	9,95904	9,33174	8,79983
PD (Pa)	1916976	1842550	1775362	1714333	1658596	1538063	1438373	1354238	1282064	1219313	1164136	1071303	995904	933174	879983
VD (l)	1,18473	1,23258	1,27923	1,32477	1,36929	1,47659	1,57893	1,67703	1,77144	1,8626	1,95089	2,11994	2,28044	2,43373	2,58084
VD (m3)	0,00118	0,00123	0,00128	0,00132	0,00137	0,00148	0,00158	0,00168	0,00177	0,00186	0,00195	0,00212	0,00228	0,00243	0,00258
WD-A (J)	-162,773	-319,01	-469,369	-614,405	-754,591	-1086,4	-1395,44	-1685,44	-1959,25	-2219,08	-2466,67	-2930,62	-3359,81	-3760,41	-4137
TB-TD	20	40	60	80	100	150	200	250	300	350	400	500	600	700	800
Rendit MOSC	0,57947	0,58693	0,59388	0,60036	0,60645	0,62015	0,63208	0,64262	0,65202	0,66049	0,66817	0,68163	0,6931	0,70304	0,71177
Rendit Carnot	0,06822	0,12773	0,1801	0,22653	0,26799	0,35448	0,4227	0,47787	0,52342	0,56166	0,59422	0,64671	0,68717	0,71931	0,74547
PB-PD (bar)	2,90999	5,79158	8,65612	11,5124	14,3672	21,5308	28,7748	36,1334	43,6268	51,2666	59,0595	75,1167	91,8046	109,114	127,029

Diagramme

Comparaison rendements thermodynamiques

