

DM 5 – Étude du cycle du moteur de Stirling

Présentation générale

Le moteur de Stirling a été développé vers 1816 par Robert Stirling. Il est aujourd'hui utilisé dans certains sous-marins (par exemple les sous-marins de l'armée suédoise), scieries, satellites, groupes électrogènes, bateaux, même si son utilisation à grande échelle reste peu développée.

Le moteur de Stirling a plusieurs particularités :

- C'est un moteur à combustion externe : contrairement à un moteur à explosion où le combustible (le mélange air-carburant par exemple) brûle dans le cylindre, ici le combustible brûle à l'extérieur du moteur. Le choix du combustible est donc plus libre : il peut s'agir de combustion standard (hydrocarbures, ...), mais aussi d'une source de chaleur nucléaire, solaire, géothermique...

Dans le cas d'une combustion standard, celle-ci peut être optimisée : les combustibles peuvent brûler plus longtemps et donc de façon plus complète, ce qui permet de minimiser les rejets polluants.

- Il ne s'agit pas d'un moteur à explosion : il produit donc moins de vibrations et est plus silencieux.
- Le fluide qui est chauffé/refroidi dans le moteur fonctionne en circuit fermé : c'est toujours le même fluide. Il peut donc être optimisé : stable et chimiquement inerte, conductivité thermique élevée, etc. On utilise couramment de l'hydrogène ou de l'hélium.
- Son rendement est élevé.

En revanche, les variations de vitesse qu'il autorise sont très lentes, ce qui est un facteur limitant pour certaines utilisations. Il reste ainsi actuellement à l'état de prototype pour l'automobile.

Description du cycle et de sa modélisation

Il est évident que le cycle réellement effectué par le moteur est complexe, et ne peut être étudié qu'au prix d'une modélisation qui implique des hypothèses simplificatrices.

Nous allons par exemple supposer les gaz parfaits, et les détentes ou les compressions seront d'un type qui s'étudie facilement (adiabatique, isobare, etc.).

L'objectif d'une telle modélisation est par exemple de pouvoir prédire de quelles variables dépend le rendement, et comment celui-ci évolue lorsque l'on modifie ces variables. Les ordres de grandeurs et les sens de variations obtenus seront alors très probablement les mêmes que pour le moteur réel. Une modélisation simple permet également de comparer différents types de moteurs entre eux (le cycle Beau de Rochas, le cycle Diesel, le cycle de Stirling, etc.).

Une étude plus fine peut se faire en relâchant certaines hypothèses (équation d'état des gaz plus complexe, vraie dépendance en T des capacités thermiques, etc.), mais au prix de plus de calculs. Enfin, des simulations numériques peuvent aussi être utilisées.

Le moteur est constitué d'un cylindre, dans lequel coulissent librement un piston et un déplaceur. (Voir figure au dos.)

Le cylindre comporte une chambre haute (le volume au-dessus du déplaceur), et une chambre basse (le volume au-dessous du déplaceur).

La chambre haute est chauffée par un moyen externe (une flamme, ...), et la chambre basse est refroidie (par l'atmosphère, par contact avec de la glace, ...).

Le rôle du déplaceur est de pouvoir faire passer le fluide d'une chambre à l'autre.

Lors d'un tel passage, le fluide passe par un échangeur thermique aussi appelé régénérateur. Il s'agit d'un matériau dont la capacité calorifique totale est élevée et qui réalise des échanges thermiques rapides. Il permet d'emmagasinier l'énergie thermique du fluide lors de l'étape 4-1 (qui passe de la chambre chaude à la chambre froide), et de restituer cette énergie thermique au fluide lors de l'étape 2-3 (qui passe de la chambre froide à la chambre chaude). Un exemple concret peut être un entrelacement de fils de cuivre.

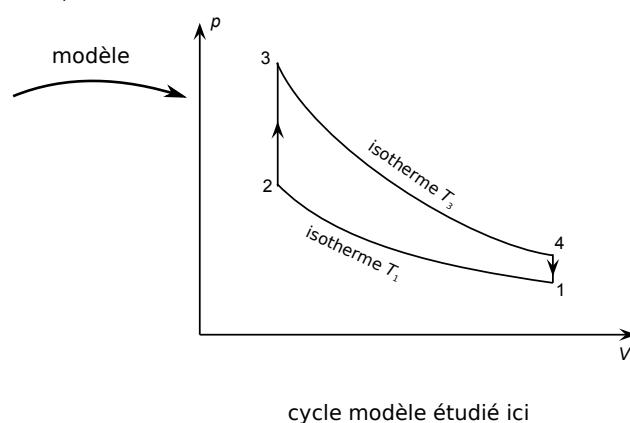
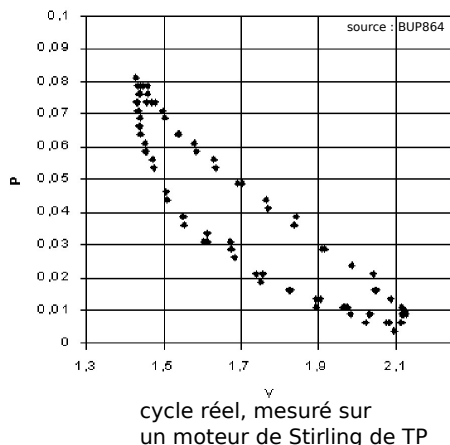
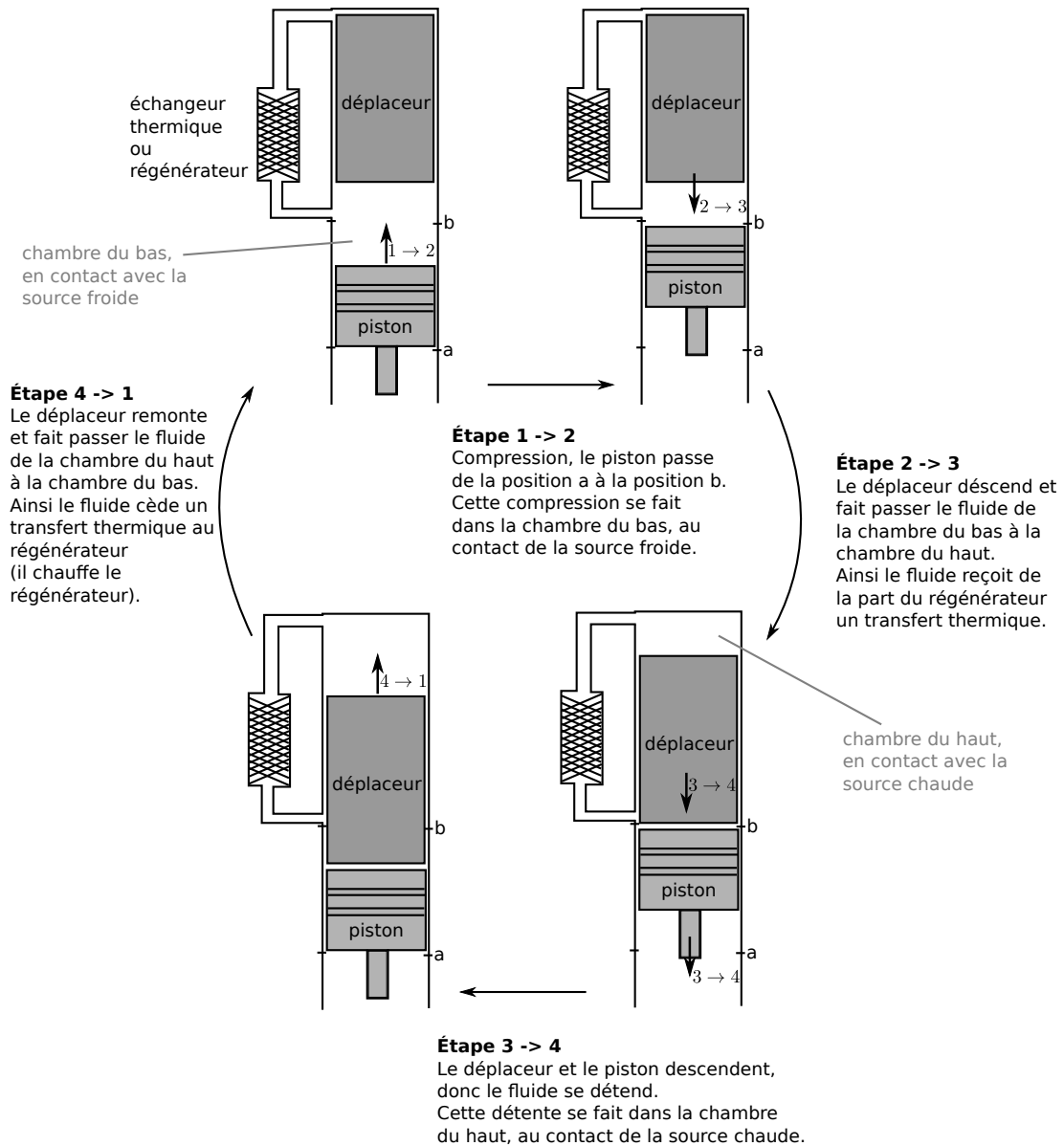
Hypothèses générales :

- On considère n moles de gaz dans le moteur. Le gaz est modélisé comme un gaz parfait, de capacité thermique à volume constant $C_v = \frac{nR}{\gamma - 1}$, et à pression constante $C_p = \frac{nR\gamma}{\gamma - 1}$, avec $\gamma = 1.4$ l'exposant adiabatique (supposé indépendant de la température).
- Le régénérateur est supposé parfait, ce qui se traduit par le fait que cette régénération permet des aller-retour entre les deux isothermes à T_1 et T_3 .

Les étapes du cycle sont décrites dans la figure ci-dessous (à consulter). On en retient le modèle suivant :

- L'étape 1 → 2 de compression au contact de la source froide est modélisée comme une compression isotherme réversible à la température $T_3 = 600$ K.
- L'étape 2 → 3 d'échauffement du fluide lors du passage dans le régénérateur est modélisée comme un échange thermique isochore.
- L'étape 3 → 4 de détente au contact de la source chaude est modélisée comme une détente isotherme réversible à la température $T_1 = 300$ K.
- L'étape 4 → 1 de refroidissement du fluide lors du passage dans le régénérateur est modélisée comme un échange thermique isochore.

De plus :



Questions

- 1 - Reproduire le diagramme du cycle modèle, et indiquer sur chacune des quatre courbes s'il s'agit d'une compression isotherme, d'une détente isotherme, d'un chauffage isochore ou d'un refroidissement isochore.
Comment peut-on savoir, sans calcul, si le cycle est celui d'un moteur ou d'un récepteur ?
- 2 - Montrer que le travail reçu par le fluide au cours de la compression est $W_{12} = nRT_1 \ln \rho$, où ρ est le rapport de compression $\rho = V_1/V_2$.
Que vaut la variation d'énergie interne du gaz pour cette compression isotherme d'un gaz parfait ?
En déduire l'expression du transfert thermique Q_{12} reçu par le fluide au cours de cette compression en fonction de n , R , T_1 et ρ .
Préciser les signes de W_{12} et Q_{12} , et expliquer pourquoi on attendait ces signes là au vu du fonctionnement.
- 3 - Montrer que le transfert thermique Q_{23} reçu par le fluide au cours de l'échauffement 2 vers 3 est $Q_{23} = \frac{nR}{\gamma - 1}(T_3 - T_1)$.
Préciser son signe.
- 4 - De même que pour l'étape 1 vers 2, exprimer W_{34} et Q_{34} , cette fois en fonction de n , R , T_3 et ρ .
Préciser leurs signes et commenter.
- 5 - De même que pour l'étape 2 vers 3, exprimer le transfert thermique Q_{41} reçu par le fluide au cours du refroidissement 4 vers 1, en fonction de n , R , T_1 , T_3 et γ .
Préciser son signe.
- 6 - On souhaite enfin exprimer le rendement η du cycle. Le régénérateur étant parfait, la seule grandeur coûteuse est le transfert thermique reçu par le fluide de la part de la source chaude externe, c'est-à-dire Q_{34} . La grandeur utile est le travail $W_{\text{cédé}}$ cédé par le fluide au milieu extérieur (le "milieu extérieur" étant l'arbre moteur lié au piston).
On peut appliquer le premier principe à tout le fluide sur un cycle, on a alors $0 = \Delta U = -W_{\text{cédé}} + Q_{12} + Q_{23} + Q_{34} + Q_{41}$.
Déduire de tout ceci une expression de η en fonction de T_1 et de T_3 . Application numérique.

Remarque : Les rendements réels des meilleurs moteur de Stirling atteignent 40%.