

### III.A – Description du moteur

Une enceinte étanche est séparée en deux chambres, une chambre chaude (chauffée par l'extérieur), de volume maximal  $V_1$ , et une chambre froide équipée d'un dissipateur thermique (ailettes), de volume maximal  $V_2$ . Chaque chambre est dotée d'un piston permettant de faire varier son volume et le fluide peut circuler librement d'une chambre à l'autre. Le piston de la chambre froide est le piston de travail, il entraîne le piston de la chambre chaude appelé « déplaceur » car son rôle est de faire circuler le fluide entre les deux chambres. Lors du transvasement, le fluide passe de la chambre chaude à la température  $T_3$  à la chambre froide à la température  $T_1 < T_3$  et réciproquement.

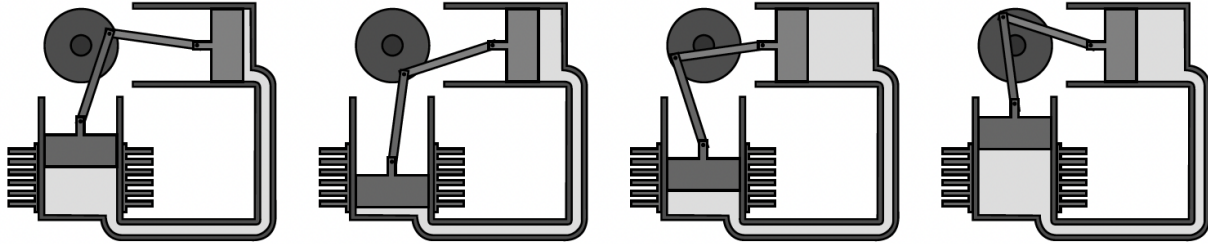


Figure 8 Phases de fonctionnement d'un moteur Stirling de type alpha (d'après Wikipedia)

Le mouvement du gaz peut être décrit par 4 phases plus ou moins distinctes (figure 8) :

- une phase de compression, pendant laquelle le volume de la chambre chaude est minimal, le fluide, entièrement situé dans la zone froide, est comprimé par le piston de travail dans sa course vers le bas ;
- une fois le piston de travail au point mort bas, le déplaceur est ramené à gauche, ce qui a pour effet de transvaser le fluide comprimé, qui passe de la zone froide vers la zone chaude et reçoit un transfert thermique de la source externe ;
- une phase de détente, pendant laquelle le fluide se détend dans le volume d'expansion où il continue d'être chauffé. Cette détente a pour effet de repousser le déplaceur et le piston de travail ;
- une fois que le piston de travail a atteint le point mort haut, le déplaceur est ramené à droite, ce qui a pour effet de transvaser le fluide de la zone chaude (volume d'expansion) vers la zone froide (volume de compression). Au cours de ce transfert, le fluide cède de la chaleur au refroidisseur.

Un cycle réel d'un moteur de Stirling est représenté dans le diagramme  $(p, V)$  en figure B du document réponse.

**Q 30.** Justifier que ce cycle est celui d'un moteur.

**Q 31.** Estimer la valeur du travail fourni par le moteur pendant un cycle.

### III.B – Modélisation du cycle

On étudie le cycle de Stirling idéal. Au cours de celui-ci,  $n$  moles de gaz parfait de coefficient adiabatique  $\gamma$  subissent les transformations suivantes :

- une compression  $(1 \rightarrow 2)$  isotherme réversible à la température  $T_1$ ,
- un échauffement  $(2 \rightarrow 3)$  isochore jusqu'à l'état 3 de température  $T_3$ ,
- une détente  $(3 \rightarrow 4)$  isotherme réversible à la température  $T_3$ ,
- un refroidissement  $(4 \rightarrow 1)$  isochore jusqu'à l'état 1.

Il n'y a pas d'autre travail que celui des forces de pression.

**Q 32.** Représenter sur la figure B du document réponse, à rendre avec la copie, l'allure du diagramme correspondant au cycle idéal.

On note  $r = \frac{V_1}{V_2}$  le rapport de compression entre les volumes fixés par construction. On rappelle que la capacité thermique à volume constant d'un gaz de  $n$  moles de gaz parfait vaut  $C_V = \frac{nR}{\gamma - 1}$  où  $R$  est la constante des gaz parfaits.

**Q 33.** Exprimer  $W_{12}$ , le travail reçu par le fluide au cours de la compression, en fonction de  $n$ ,  $R$ ,  $T_1$  et  $r$ . En déduire le transfert thermique  $Q_{12}$  reçu par le fluide au cours de cette compression en fonction de  $n$ ,  $R$ ,  $T_1$  et  $r$ . Préciser les signes de  $W_{12}$  et de  $Q_{12}$ .

**Q 34.** Exprimer  $Q_{23}$ , le transfert thermique reçu par le fluide au cours de l'échauffement isochore, en fonction de  $n$ ,  $R$ ,  $T_1$ ,  $T_3$  et  $\gamma$ . Préciser son signe.

**Q 35.** Exprimer  $W_{34}$ , le travail reçu par le fluide au cours de la détente, en fonction de  $n$ ,  $R$ ,  $T_3$  et  $r$ . En déduire le transfert thermique  $Q_{34}$  reçu par le fluide au cours de cette détente en fonction de  $n$ ,  $R$ ,  $T_3$  et  $r$ . Préciser les signes de  $W_{34}$  et  $Q_{34}$ .

**Q 36.** Exprimer le transfert thermique  $Q_{41}$  reçu par le fluide au cours du refroidissement en fonction de  $n$ ,  $R$ ,  $T_1$ ,  $T_3$  et  $\gamma$ . Préciser son signe.

### III.C – Rendement du moteur

**Q 37.** Définir puis exprimer le rendement idéal du moteur en fonction de  $T_1$ ,  $T_3$ ,  $r$  et  $\gamma$ .

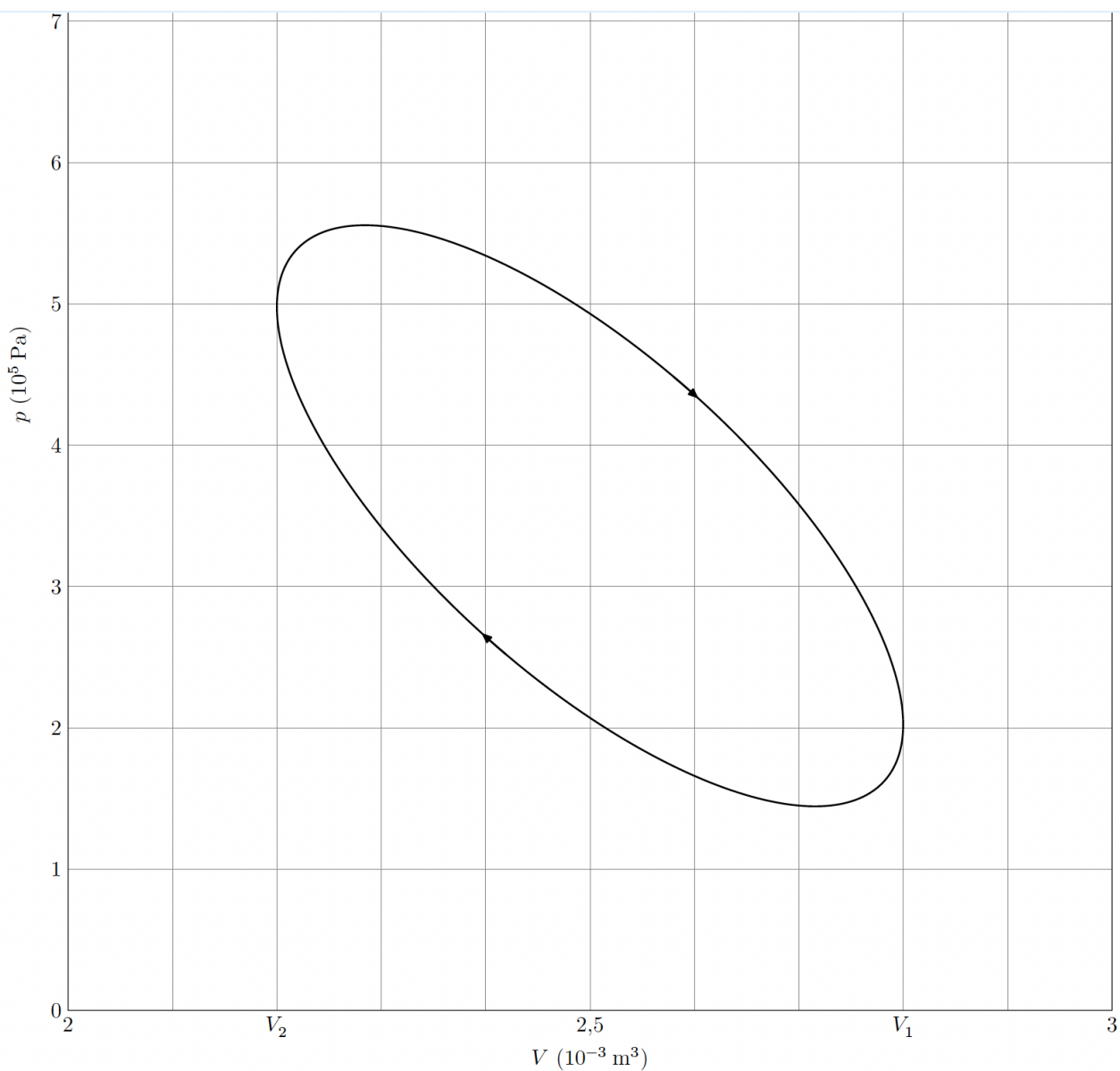
**Q 38.** Définir et exprimer le rendement de Carnot en fonction de  $T_1$  et  $T_3$ .

En réalité, le moteur de Stirling utilisé dans le projet KRUSTY contient un régénérateur. Dans ce cas, la chaleur perdue par le gaz lors du refroidissement isochore ( $4 \rightarrow 1$ ) est récupérée par le gaz lors du chauffage isochore ( $2 \rightarrow 3$ ). Si le régénérateur est idéal, cette récupération est totale.

**Q 39.** Que devient le rendement du cycle idéal dans ce cas ?

Dans les conclusions du test de la NASA du dispositif KRUSTY réalisé en 2018, les ingénieurs indiquent que l'efficacité des moteurs a évolué pendant l'expérience entre 30 % et 50 % de l'efficacité de Carnot. De plus, pour les deux moteurs combinés, la puissance électrique obtenue est d'environ 180 W.

**Q 40.** En prenant une température chaude de 640 °C et une température froide de 60 °C et en supposant la conversion du travail mécanique en travail électrique parfaite, estimer numériquement la puissance thermique fournie par la source chaude aux deux moteurs de Stirling combinés.



**Figure B** Allure du cycle réel d'un moteur Stirling dans le diagramme  $(p, V)$