

## DM 5 – Étude du cycle du moteur à explosion

### Présentation générale

Le moteur à explosion a été proposé par le français Beau de Rochas en 1862, et construit par l'allemand Nikolaus Otto en 1876. Dans un tel moteur, la détonation du mélange air-carburant est provoquée par une étincelle produite par la bougie d'allumage, et ce à chaque fois que le piston atteint le point haut de sa course, ce qui le renvoie en bas et permet ainsi de fournir de l'énergie cinétique.

Nous étudions ici le cycle du moteur quatre temps, ainsi appelé car à chaque cycle le piston effectue quatre courses complètes (soit deux aller-retour) au sein du cylindre.

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 donc 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 seront 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.

### Questions

Pour des raisons de mises en page, la description du cycle et de sa modélisation est située au dos. Il faut toutefois la lire avant de lire les questions !

Dans tout ce qui suit, nous utilisons uniquement le cycle modèle.

- 1 - Reproduire le diagramme du cycle modèle, et indiquer sur chacune des quatre courbes s'il s'agit d'une compression adiabatique réversible, d'une détente adiabatique réversible, d'un apport de chaleur isochore, ou d'une évacuation de chaleur isochore.

L'objectif est ensuite de calculer le rendement théorique. Les données sont les suivantes : le mélange air-carburant est assimilé à un gaz parfait d'exposant adiabatique  $\gamma = 1.4$  qui constitue un système fermé de  $n$  moles de capacité thermique à volume constant  $C_V = \frac{nR}{\gamma - 1}$ ; le rapport entre le volume maximal et le volume minimal du cylindre lors de la course du piston est  $\alpha = V_A/V_B$ , et on prendra la valeur typique de 10; la pression en  $A$  est la pression atmosphérique  $p_A = p_0 = 1.0$  bar. On prend  $R = 8.314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

- 2 - (a) - Exprimer le transfert thermique  $Q_{BC}$  fourni au système lors de l'étape  $B \rightarrow C$ , en fonction de  $R$ ,  $n$ ,  $\gamma$ ,  $T_B$  et  $T_C$ .  
(b) - Quel est le signe de  $Q_{BC}$ ? D'après la description du début de l'énoncé, qu'est ce qui produit cette chaleur?
- 3 - (a) - Exprimer le transfert thermique  $Q_{DA}$  fourni au système lors de l'étape  $D \rightarrow A$ , en fonction de  $R$ ,  $n$ ,  $\gamma$ ,  $T_D$  et  $T_A$ .  
(b) - Quel est le signe de  $Q_{DA}$ ? D'après la description du début de l'énoncé, que se passe-t-il?
- 4 - (a) - Exprimer le travail  $W$  fourni au système lors d'un cycle en fonction de  $Q_{BC}$  et de  $Q_{DA}$ .  
(b) - Quel doit être le signe de ce travail si l'on veut que le système fournisse effectivement un travail au milieu extérieur (donc au piston puis au reste de la chaîne de transmission)?  
Au cours du cycle, lors de quelles étapes ce travail est-il produit?
- 5 - Définir le rendement thermique  $\eta$ . Puis l'exprimer en fonction de  $Q_{BC}$  et  $Q_{DA}$ . L'exprimer ensuite en fonction de  $T_A$ ,  $T_B$ ,  $T_C$ ,  $T_D$ .
- 6 - (a) - Exprimer le rendement thermique en fonction de  $\gamma$  et du rapport des volumes  $\alpha$  uniquement.  
(b) - Faire l'application numérique. Comment varie  $\eta$  en fonction du rapport de compression  $\alpha$ ?  
(c) - Les rendements des moteurs réels de ce type varient entre 25 et 30%. Comment peut-on expliquer les différences entre le rendement théorique et le rendement réel?
- 7 - **Question facultative.** Pour avoir une idée des contraintes exercées sur les matériaux (cylindre, piston), on veut calculer la pression et la température maximales atteintes lors du cycle. Ceci a lieu au point  $C$ .

On prend encore  $\alpha = 10$ . On donne  $p_A = p_0 = 1.0 \text{ bar}$ ,  $T_A = 17^\circ\text{C}$  (température de l'atmosphère), et on indique que la chaleur apportée lors de la combustion (étape  $BC$ ) est  $q = 23 \text{ kJ/mol}$  (la combustion de  $n$  moles de mélange apporte donc une chaleur  $nq$ ).

- (a) - Exprimer la température en  $B$  en fonction de  $\alpha$ ,  $\gamma$  et  $T_A$ . Faire l'application numérique.
- (b) - Exprimer la température en  $C$  en fonction de  $T_B$ ,  $q_m$ ,  $\gamma$  et  $R$ . Faire l'application numérique.
- (c) - Exprimer puis calculer la pression en  $C$ .

## Description du cycle et de sa modélisation

L'animation suivante aide beaucoup à comprendre le fonctionnement du cycle : [http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve\\_tulloue/Thermo/Machines/4temps.php](http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Thermo/Machines/4temps.php)

Le cycle de Beau de Rochas et sa modélisation sont les suivants :

- On part en  $A$  d'un cylindre rempli d'un mélange air-carburant, avec le piston au point mort bas (en bas du cylindre). Le piston monte jusqu'au point mort haut en  $B$  : le gaz est donc comprimé.

Modèle : cette compression est supposée adiabatique et réversible.

Justifications : la compression est assez rapide pour que les échanges de chaleur avec l'extérieur n'aient pas lieu (hypothèse adiabatique) ; le mouvement du piston est lent par rapport à la vitesse du son, ce qui fait que la transformation est quasi-statique, et les frottements pas trop importants (hypothèse réversible).

- Au point  $B$ , la bougie fournit une étincelle qui déclenche l'explosion du mélange. Cette combustion apporte de la chaleur au gaz. En conséquence, la pression augmente jusqu'au point  $C$ .

Modèle : cette augmentation de pression est supposée isochore.

Justification : elle a lieu au point mort haut, et la pression augmente très rapidement par rapport à la variation de volume.

C'est au cours de cette étape qu'a lieu l'apport de chaleur au système (chaleur fournie par la "source chaude" dans le modèle des machines dithermes).

- Entre  $C$  et  $D$ , le piston est éjecté vers l'extérieur à cause de l'augmentation de pression jusqu'à ce qu'il atteigne le point mort bas. Il s'agit donc d'une détente.

Modèle : on suppose cette détente adiabatique réversible.

- Au point  $D$ , il y a dans le cylindre un mélange air-carburant qui a déjà brûlé. Il faut donc évacuer ces gaz et les remplacer par un mélange "neuf" prêt à brûler à nouveau. C'est le rôle de l'aller-retour  $A \rightarrow A' \rightarrow A$ .
  - Au point  $D$ , la soupape d'éjection s'ouvre. La pression retombe donc à la pression atmosphérique.
  - De  $D$  à  $A'$ , la soupape d'éjection est toujours ouverte et le piston remonte, ce qui éjecte tout le gaz vers l'extérieur.
  - De  $A'$  à  $A$ , la soupape d'éjection est fermée et la soupape d'admission est ouverte. Le piston redescend, ce qui remplit le cylindre avec un mélange air-carburant nouveau.

Modèle : on ignore l'aller-retour  $A-A'$  dans le modèle du cycle. Au lieu de cela, on suppose que de  $D$  à  $A$  le mélange revient à la pression atmosphérique à cause de l'ouverture de la soupape, de façon isochore jusqu'en  $A$ . Dans le modèle le mélange reste donc le même, mais il est prêt à brûler à nouveau.

C'est au cours de cette étape que le gaz cède de la chaleur à la "source froide" dans le modèle des machines dithermes (donc ici à l'atmosphère extérieur).

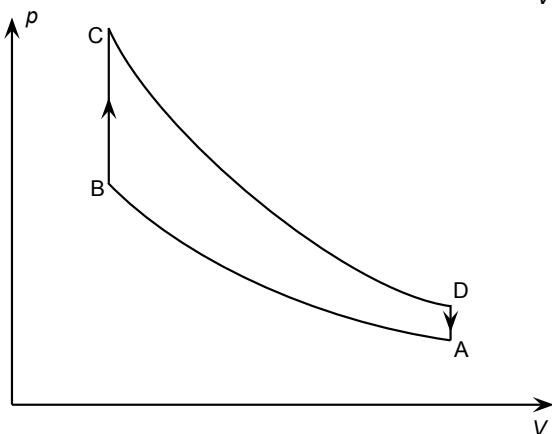
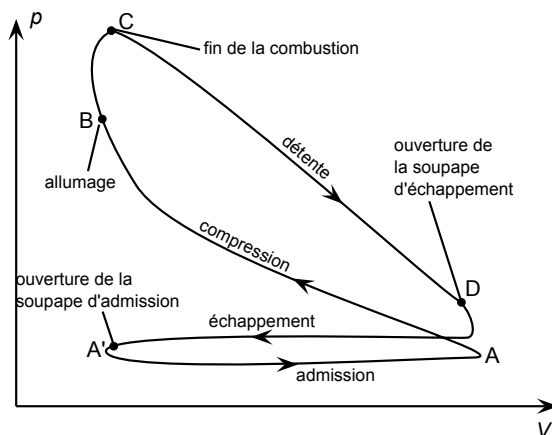
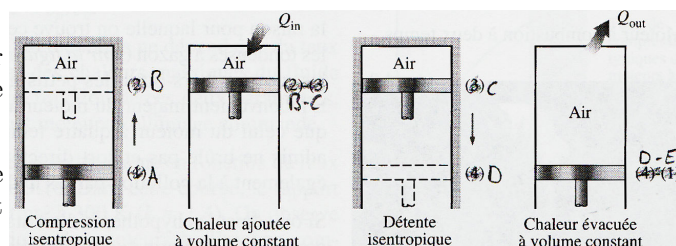


Diagramme du cycle réel en haut, et du cycle modèle en bas.



Représentation des étapes du cycle théorique (les soupapes d'admission et d'échappement ne sont pas représentées, et donc l'aller-retour  $AA'$  est ignoré ici).