

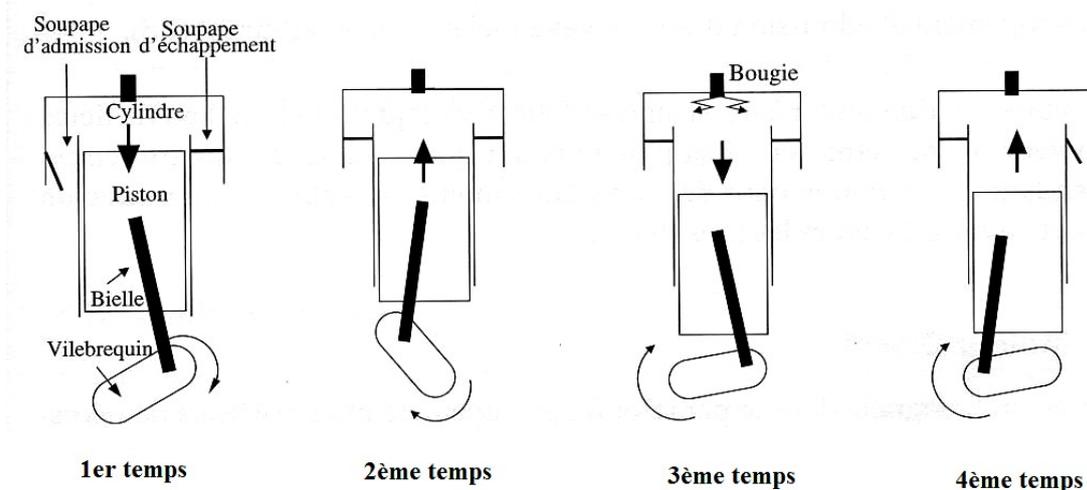
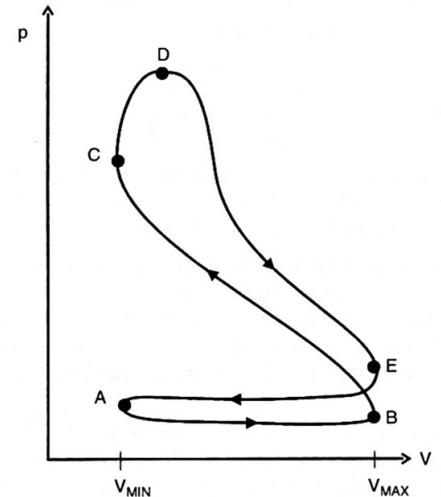
Cette dernière partie permet l'acquisition d'une certaine culture générale quant aux moteurs dithermes encore utilisés aujourd'hui.

1. Moteur à explosion (4 temps)

a) Cycle réel

Nous allons nous intéresser au moteur à 4 temps. Il est constitué d'un piston mobile dans un cylindre muni de soupapes d'admission et d'échappement. Le système thermodynamique subissant la transformation est l'ensemble des gaz entrant dans le cylindre lors de l'admission. L'allure de son diagramme de Watt est représentée sur la figure ci-contre où les points remarquables A, B, C, D et E correspondent aux extrema de la pression ou du volume.

On peut décomposer un cycle de fonctionnement en quatre phases successives (appelées « temps ») correspondant chacune à un aller simple du piston, comme cela est représenté sur le schéma ci-dessous :



- **1er temps : admission AB.** Le mélange {air, carburant} entre par la soupape d'admission ouverte dans le cylindre dès  $V_{min}$  (point A) quasiment à la pression atmosphérique et le piston se déplace jusqu'à  $V_{max}$  (point B).
- **2ème temps : compression BC.** Le piston comprime le mélange jusqu'à  $V_{min}$  (point C).
- **3ème temps : explosion et détente CDE.**
  - Explosion CD : une étincelle (bougie) provoque la combustion instantanée du mélange (le volume varie très peu, la pression par contre devient maximale) P augmente jusqu'à  $P_{max}$  (point D).
  - Détente DE : il y a une détente des gaz jusqu'à  $V_{max}$  (point E).
- **4ème temps : échappement EA.** L'expulsion des gaz par la soupape d'échappement diminue P et V jusqu'à  $V_{min}$  (point A). La soupape d'échappement se ferme, celle d'admission s'ouvre et le cycle recommence.

On a donc deux temps moteurs : AB et CDE, et deux temps récepteurs : BC et EA d'après le diagramme de Watt. Les 4 cylindres d'un moteur classique étant décalés, le système est moteur à tout instant.

Remarques :

1. Un cycle représente **DEUX** aller-retour du piston.
2. Il n'y a qu'un temps réellement moteur : 3ème temps CDE. En effet, si le piston n'a aucune énergie cinétique, le premier temps ne peut pas s'effectuer : il faut fournir de l'énergie au système {piston + gaz} pour que le premier temps ait lieu. On verra que cette difficulté est levée lors du « cycle modèle » que l'on va étudier.
3. Les trois temps récepteurs se font alors par inertie de l'axe de rotation (vilebrequin) due au temps moteur précédent.
4. Dans la pratique, les moteurs à explosion fonctionnent généralement avec quatre cylindres, ce qui permet de réaliser une rotation quasi-uniforme du moteur en décalant, par exemple, d'un temps chaque piston. La rotation de l'axe par les cylindres « décalés en temps » est alors assurée par le vilebrequin (cf photo ci-dessous).  
Le vilebrequin joue donc le rôle du pédalier de vélo qui permet de séparer les deux temps moteurs : appui de la jambe droite puis appui de la jambe gauche.



5. Les dénominations des différents moteurs sont souvent en rapport avec la géométrie de l'agencement des différents cylindres, le vilebrequin assurant la rotation de l'axe.  
Exemples : 4 cylindres en lignes (photo ci-dessus), 6 cylindres à plat, 8 cylindres en V (V8) ...
6. Les soupapes (ouverture et fermeture) sont contrôlées mécaniquement par le vilebrequin ou électriquement (ainsi que l'étincelle de la bougie).
7. Moteur deux temps : les différentes phases réparties sur deux tours de vilebrequin pour un moteur quatre temps ne sont réparties que sur un tour pour le moteur deux temps :
  - 1er temps : montée du piston. Compression du mélange air-carburant jusqu'en C puis combustion.
  - 2ème temps : descente du piston. Détente (avec production de travail) puis échappement et admission d'un nouveau mélange air-carburant.

## **b) Modèle : cycle de Beau de Rochas**

### **i. Hypothèses simplificatrices**

Le moteur à explosion étant un système ouvert, on ramène l'étude à un système fermé  $\Sigma$  constitué par une masse déterminée de fluide au cours d'un cycle.

On suppose que :

- tout le mélange fluide (de l'admission à l'échappement) est assimilé à un même GP diatomique ( $\gamma = 1,4$ ), et que ce GP ne subit aucune évolution chimique. Cette hypothèse est raisonnable car l'air est en large excès dans le mélange et  $N_2$  et  $O_2$  réagissent peu lors de la combustion en  $NO$  et  $NO_2$ .
- tout se passe comme si la chaleur dégagée par la combustion était apportée au gaz par une source de chaleur fictive à la température  $T_C$  (qui est la température moyenne du GP après explosion).
- on simplifie le diagramme de Watt du moteur à explosion par le cycle théorique de Beau de Rochas (proposé en 1862) décrit dans le paragraphe suivant.

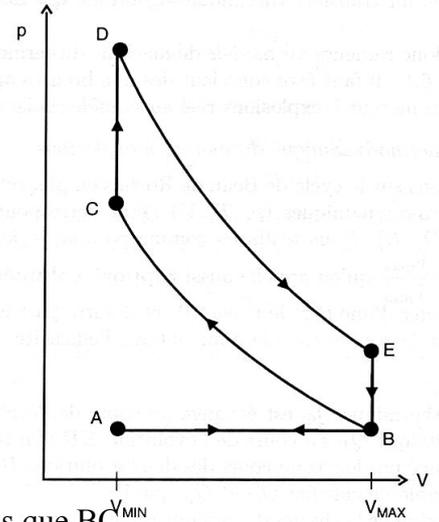
Remarque : Le premier moteur à explosion a été réalisé en 1878 par l'ingénieur allemand Otto sur l'idée de Beau de Rochas.

## ii. Description du cycle de Beau de Rochas

- AB : l'admission est supposée isotherme et isobare à  $P_0$  et  $T_f$  atmosphériques.
- BC : la compression est supposée adiabatique réversible ( $pV^\gamma = \text{cte}$ ).

L'hypothèse d'adiabaticité est légitime car les transferts thermiques à travers les parois du cylindre et du piston n'ont pas le temps de se faire. De plus, grâce aux lubrifiants employés, on peut négliger les frottements du piston contre la paroi du cylindre.

- CD : explosion isochore car la combustion ( $Q_c > 0$ ) est supposée suffisamment rapide pour qu'elle s'effectue sans que le piston n'ait le temps de bouger.
- DE : détente supposée adiabatique et réversible pour les mêmes raisons que BC.
- EB : refroidissement isochore car l'ouverture de la soupape d'échappement est supposée instantanée donc comme pour CD, le piston n'a pas le temps de bouger. P et T diminuent à V constant : c'est durant cette phase que le gaz cède de l'énergie thermique ( $Q_f < 0$ ) à l'atmosphère qui joue ici le rôle de source froide à  $T_f$ .
- BA : échappement isotherme et isobare à  $P_0$  et  $T_f$  atmosphériques.



En remarquant que les travaux échangés au cours des évolutions AB et BA se compensent, on peut « oublier » ces étapes au cours desquelles le système  $\Sigma$  constitué du gaz contenu dans le cylindre est un système ouvert. Pour les évolutions BC, CD, DE et EB, en revanche,  $\Sigma$  est un système fermé, évoluant au contact de deux sources de chaleur (la source chaude fictive et l'atmosphère).

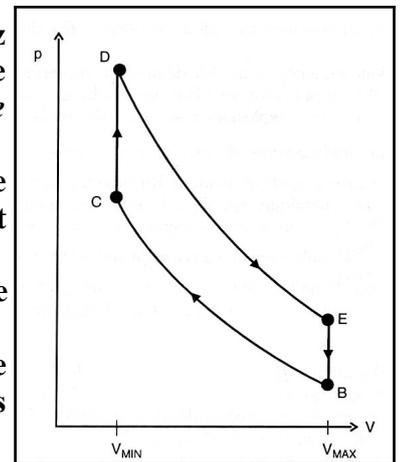
Dans le modèle adopté, le transfert thermique reçu par le fluide n'est plus issu d'une réaction chimique interne mais provient d'une source chaude fictive. Il n'est donc plus nécessaire de renouveler le fluide.

**Conclusion :** Tout se passe comme si une certaine quantité de gaz (supposé parfait) constituant un système fermé  $\Sigma$  décrivait indéfiniment le cycle simplifié BCDE de la figure précédente appelé *cycle de Beau de Rochas*.

$\Sigma$  échange un travail algébrique W avec l'extérieur, un transfert thermique algébrique  $Q_c = Q_{CD}$  avec la source chaude (combustion) et un transfert thermique algébrique  $Q_f = Q_{EB}$  avec la source froide (l'atmosphère).

De plus, ce cycle simplifié BCDE conserve « 4 temps » et le diagramme de Watt montre un comportement moteur de la machine ( $W_{\text{cycle}} < 0$ ).

On se ramène donc finalement au modèle classique d'une machine cyclique ditherme, mais il faut être conscient des nombreuses approximations conduisant du moteur à explosion réel au modèle simplifié choisi.

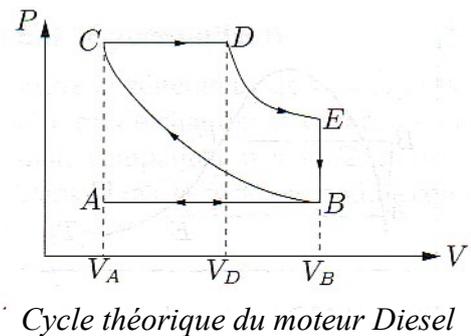
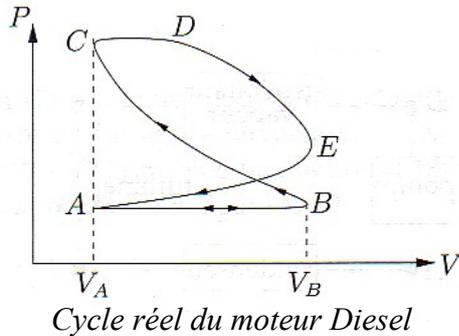


Remarques : Ici, seul DE est une phase moteur, d'où la nécessité de décaler les temps moteurs des différents pistons à l'aide de l'allumage et du vilebrequin. (On vient de s'affranchir de la difficulté du « pseudo temps moteur » AB puisqu'on est en présence d'un système fermé : il n'y a pas d'admission !)

### iii. Étude du rendement (TD ex4)

## 2. Moteur Diesel (moteur à injection)

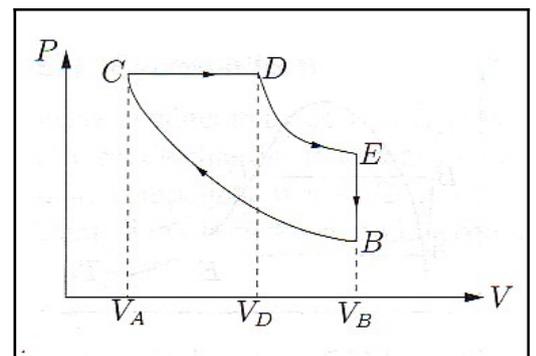
L'allemand R. Diesel a voulu améliorer, en 1892, le rendement du moteur à explosion en augmentant le taux de compression. Pour ce faire, on comprime l'air seul jusqu'en C pour éviter tout risque d'inflammation du à la pression excessive puis on introduit le combustible par un injecteur à la pression  $P_C$  qui s'enflamme alors : la combustion n'est plus réalisée par la bougie. La combustion ne se fait pas à volume constant, comme pour le moteur à explosion, mais à pression constante. On obtient alors le cycle réel suivant :



Les 4 temps du moteur Diesel réel sont alors les suivants :

- **1er temps : admission AB.** L'air entre par la soupape d'admission ouverte dans le cylindre dès  $V_{\min}$  (point A) quasiment à la pression atmosphérique et le piston se déplace jusqu'à  $V_{\max}$  (point B).
- **2ème temps : compression BC.** Le piston comprime l'air jusqu'à  $V_{\min}$  (point C).
- **3ème temps : injection et détente CDE.**
  - Injection CD : l'injection du combustible à la pression  $P_C$  provoque la combustion.
  - Détente DE : il y a une détente des gaz jusqu'à  $V_{\max}$  (point E)
- **4ème temps : échappement EA.** L'expulsion des gaz par la soupape d'échappement diminue P et V jusqu'à  $V_{\min}$  (point A). La soupape d'échappement se ferme, celle d'admission s'ouvre et le cycle recommence.

En supposant des hypothèses identiques à celles énoncées lors de la description du cycle de Beau de Rochas, on se ramène à l'étude d'un système fermé  $\Sigma$  (de l'air) décrivant indéfiniment le cycle simplifié BCDE de la figure ci-contre. BC et DE sont supposées adiabatiques réversibles, CD est supposée isobare (échanges thermiques avec la « source chaude » : combustion) et EB est supposée isochore (échanges thermiques avec la source froide : l'atmosphère).



Les récepteurs dithermes font intervenir des changements d'états du fluide lors de la transformation cyclique. Des rappels et des compléments sur les changements d'état sont alors effectués dans le prochain chapitre.