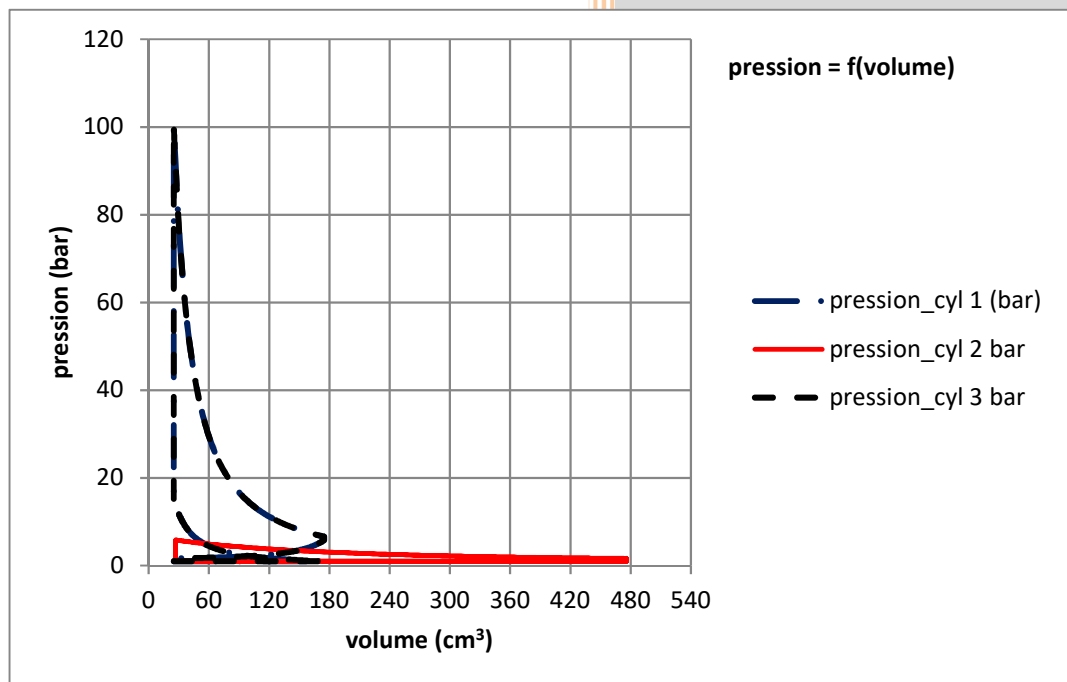


## Cycles théoriques

### Document de référence 4

### Moteur 5 Temps



# STS MCI

MCI Brest

## TABLE

|  |   |
|--|---|
| document de référence 3 : comparaison cycles .....               | 2 |
| ATKINSON-Diesel-Sabathé-BDR .....                                | 2 |
| 1. Objectifs .....   | 2 |
| 2. Notions abordées .....  | 2 |
| 3. Moyens .....  | 2 |
| 4. problématique .....   | 2 |
| 5. Le moteur à 5 temps:présentation .....                        | 3 |
| 6. travail demandé .....   | 3 |
| 6.1. Tableau de fonctionnement : .....                           | 3 |
| 6.2. Volume de détente prolongée .....                           | 3 |
| 6.3. Analyse théorique .....                                     | 4 |
| 6.3.1. Données.....  | 4 |
| 6.3.2. Hypothèses et modélisation.....                           | 4 |
| 6.3.3. Approche globale .....                                    | 5 |
| 6.3.4. Calcul des masses en œuvre et de l'énergie $Q_1$ .....    | 5 |
| 6.3.4.1. Masse en œuvre .....                                    | 5 |
| 6.3.4.2. Energie $Q_1$ .....                                     | 5 |
| 6.3.4.3. Application numérique .....                             | 5 |
| 6.3.5. Détermination des caractéristiques des points 5 et 6..... | 5 |
| 6.3.5.1. Point 5.....  | 5 |
| 6.3.5.2. Point 6.....  | 6 |
| 6.3.5.3. Application numérique .....                             | 6 |
| 6.3.6. Calcul du travail du cycle 2 .....                        | 6 |
| 6.3.6.1. Par $Q_3$ : $W_{cyl\_2} = Q_2 - Q_3$ .....              | 6 |
| 6.3.6.2. Par calcul direct : .....                               | 6 |
| 6.3.6.3. Application numérique .....                             | 6 |
| 6.3.7. Bilan : .....   | 7 |
| 6.4. Discussion.....   | 7 |

DOCUMENT DE REFERENCE 3 : COMPARAISON CYCLES  
ATKINSON-DIESEL-SABATHE-BDR**1. Objectifs**

- Analyser le fonctionnement du moteur « à 5 Temps »
- Calculer le rendement thermodynamique théorique de ce moteur.
- Discuter le rendement en fonction des divers paramètres dont il dépend.

**2. Notions abordées**

- Thermodynamique : premier principe, transformations usuelles. Cycle Beau de Rochas.
- Matlab : création d'une matrice dans une double boucle itérative.

**3. Moyens**

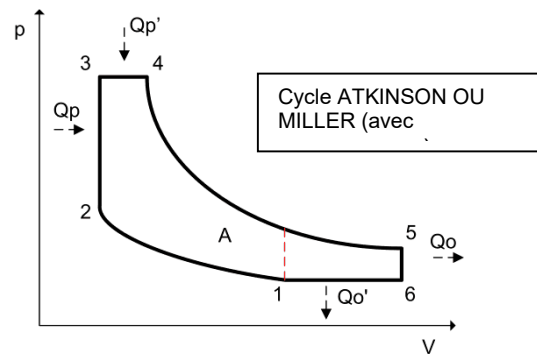
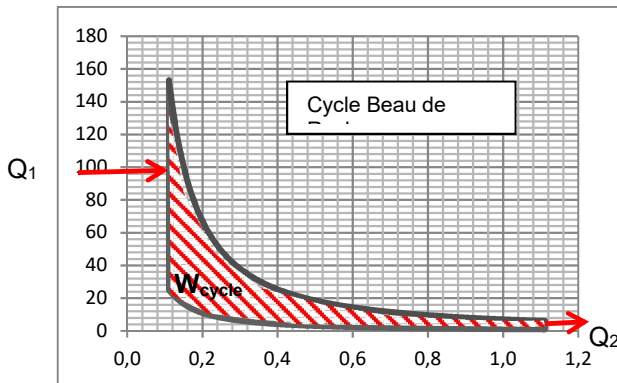
- On exploite un document paru sur le web et dans différentes revues, écrit par « l'inventeur » du procédé : Gerhard Schmitz.
- On dispose de Matlab pour effectuer les calculs numériques et tracer les graphes.

**4. problématique**

- On sait que, intrinsèquement, le rendement du cycle Beau de Rochas est déterminé par la chaleur perdue lors de la phase échappement isochore  $Q_2$ . Le rendement thermodynamique s'écrit :

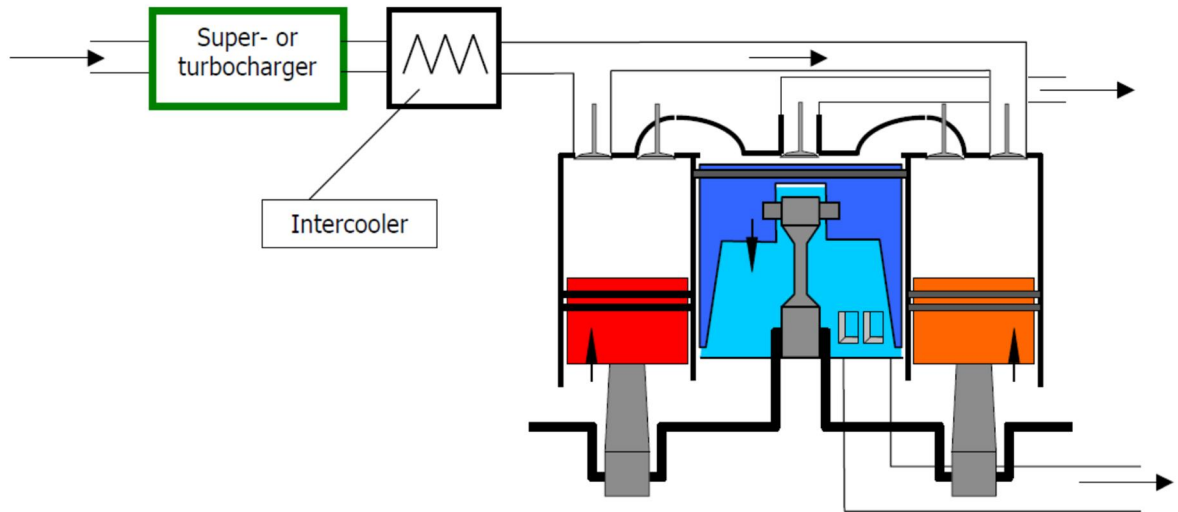
$$\eta_{th\_BdR} = \left| \frac{W_{cycle\_BdR}}{Q_1} \right| = \left| \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} \right| = 1 - \varepsilon_{BdR}^{1-\gamma}$$

- Une des raisons de cette perte d'énergie est le fait que les rapports volumétriques de compression et de détente sont égaux : on ne récupère pas toute l'énergie potentielle lors de la détente.
- De nombreuses « idées » existent pour tenter de récupérer cette énergie : la suralimentation, les cycles à compression « décalée », c'est-à-dire avec un fort RFA : cycle d'ATKINSON ou de MILLER (avec suralimentation).
- Une nouvelle solution, à priori pertinente, est le moteur à 5 Temps.



## 5. Le moteur à 5 temps:présentation

- Schéma du système :



Il s'agit d'un moteur 3 cylindres, notés 1, 2 et 3 à partir de la gauche par exemple. Les cylindres 1 et 3 seulement réalisent les combustions. Le cylindre du milieu (2) a pour fonction de « récupérer » les énergies  $Q_2$  des cylindres 1 et 3 et de les convertir en travail en détendant les gaz. Pour une meilleure efficacité, il est prévu que le moteur soit suralimenté.

- On pourra aussi parler de cylindre HP (Haute Pression) pour les cylindres 1 et 3, et de cylindre BP (Basse Pression) pour le cylindre 2.

## 6. travail demandé

### 6.1. Tableau de fonctionnement :

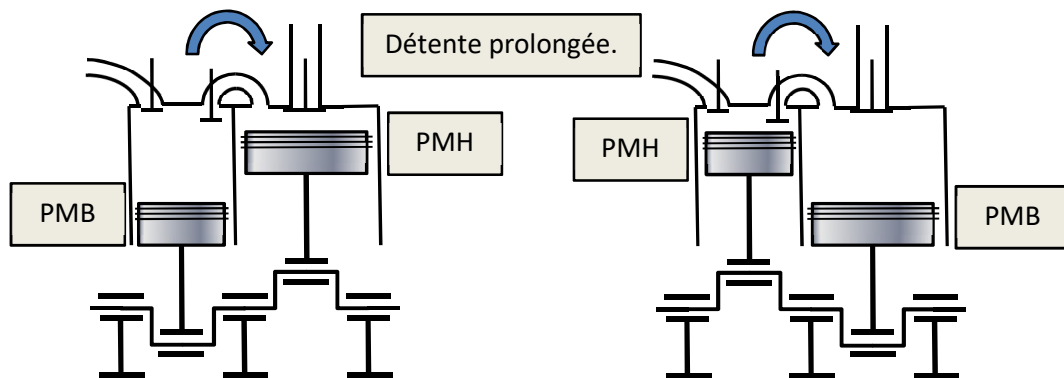
- Compléter le tableau de fonctionnement ci-dessous en utilisant les symboles proposés.

| cylindre | 0°   | 180° | 360° | 540° | 720° |
|----------|------|------|------|------|------|
| 1        | A ↓  | C ↑  | CD ↓ | T ↑  |      |
| 2        | E ↑  | D ↓  | E ↑  | D ↓  |      |
| 3        | CD ↓ | T ↑  | A ↓  | C ↑  |      |

A ↓ : admission ; C ↑ : compression ; CD ↓ : combustion détente (HP) ; T ↑ : transfert ; E ↑ : échappement ; D ↓ : détente (BP).

- ✓ On a bien 5 temps : admission, compression, combustion détente, transfert et échappement.

### 6.2. Volume de détente prolongée



- Déterminer le volume et le rapport volumétrique de détente prolongée effectifs.

- ✓ On a au point 5 :  $V_5 = V_{cyl,1} + v_{mcy,1} + v_{mcy,2}$

- ✓ Et au point 6 :  $V_6 = V_{cyl,2} + v_{mcy,1} + v_{mcy,2}$

- ✓ Le rapport volumétrique de détente effectif est :

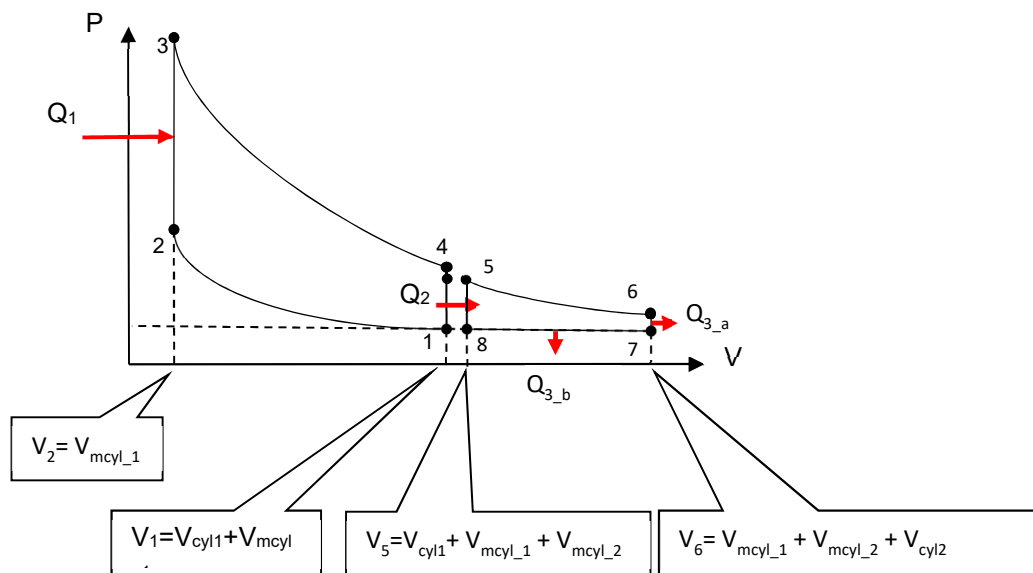
$$\varepsilon_{cyl2\_eff} = \frac{V_6}{V_5} = \frac{V_{cyl,2} + v_{mcy,1} + v_{mcy,2}}{V_{cyl,1} + v_{mcy,1} + v_{mcy,2}}, \text{ soit } \Delta V = V_{cyl,2} - V_{cyl,1}$$

### 6.3. Analyse théorique

#### 6.3.1. Données

| cylindres 1 et 3       |        |                 | cylindre 2           |        |                 | constantes |        |                                     |          |      |                    |
|------------------------|--------|-----------------|----------------------|--------|-----------------|------------|--------|-------------------------------------|----------|------|--------------------|
| $V_{cyl1}$             | 150    | cm <sup>3</sup> | $V_{cyl2}$           | 449    | cm <sup>3</sup> | $P_1$      | 1      | bar                                 | $\gamma$ | 1,4  | su                 |
| $V_{m cyl_1}$          | 16,67  | cm <sup>3</sup> | $V_{m cyl_2}$        | 26,412 | cm <sup>3</sup> | $T_1$      | 298    | K                                   | PCI      | 44   | kJ.g <sup>-1</sup> |
| $(\varepsilon_{cyl1})$ | 7      | su              | $\varepsilon_{cyl2}$ | 18     | su              | $r$        | 286,7  | J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> | PCO      | 14,5 | su                 |
| $A_{cyl1}$             | 6      | cm              | $A_{cyl2}$           | 8,3    | cm              | $c_p$      | 1003,4 | J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> | $\phi$   | 1    | su                 |
| $r_{cyl1}$             | 2,65   | cm              | $r_{cyl2}$           | 4,15   | cm              | $c_v$      | 716,7  | J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> |          |      |                    |
| $l_{cyl1}$             | 13     | cm              | $l_{cyl2}$           | 13     | cm              | $M_{air}$  | 29     | g.mol <sup>-1</sup>                 |          |      |                    |
| $S_{cyl1}$             | 28,274 | cm <sup>2</sup> | $S_{cyl2}$           | 54,11  | cm <sup>2</sup> | $R$        | 8,314  | J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> |          |      |                    |

#### 6.3.2. Hypothèses et modélisation



- Gaz parfaits assimilés à l'air.
- Cylindres 1 et 3 :
  - ✓ on considère un cycle Beau de Rochas classique.
- Cylindre 2 :
  - ✓ L'énergie perdue par le cycle BdR  $Q_2$  est "transmise" au cycle du cylindre 2.
  - ✓ A la fin de la détente du cylindre 1, le volume occupé par les gaz est le volume au-dessus du piston du cylindre 1 plus le volume mort du cylindre 2.
  - ✓ La masse de gaz alors en œuvre est celle du cylindre 1 plus celle du cylindre 2.
  - ✓ Cette masse subit une détente 5-6, de rapport volumétrique  $\varepsilon_{cyl2\_eff} = \frac{V_6}{V_5}$
  - ✓ L'énergie perdue  $Q_2$  correspond à l'énergie de l'isochore 8-5.
  - ✓ En fin d'échappement du cylindre 2, on est à la température  $T_8 = T_1 = 298 \text{ K}$ .
  - ✓ Le rapport volumétrique de détente effectif est :

$$\varepsilon_{cyl2\_eff} = \frac{V_6}{V_5} = \frac{V_{cyl2} + v_{m cyl_1} + v_{m cyl_2}}{V_{cyl1} + v_{m cyl_1} + v_{m cyl_2}}, \text{ soit } \Delta V = V_{cyl2} - V_{cyl1}$$

**6.3.3. Approche globale**

- L'application du premier principe nous donne :
  - ✓ Pour le cylindre 1 :  $Q_1 + Q_2 + W_{cyc\_1} = 0$
  - ✓ Pour le cylindre 2 :  $-Q_2 + Q_3 + W_{cyc\_2} = 0$
- Le rendement du cycle « complet » sera :  $\eta_{cycle\_complet} = \left| \frac{W_{cyc\_1} + W_{cyc\_2}}{Q_1} \right|$
- Résolution :
  - ✓  $W_{cyc\_1} = -\eta_{cyc\_1} \cdot Q_1 = (\varepsilon_{cyc\_1}^{1-\gamma} - 1) \cdot Q_1$
  - ✓  $Q_1 = m_{carb} \cdot PCI$
  - ✓ Pour le cylindre 2, 2 voies sont possibles :
    - $Q_3 = \Delta u_6^8 - W_7^8 = m_{cyc\_2} \cdot c_v \cdot (T_8 - T_6) + p_1 \cdot (V_8 - V_7)$
    - Ou :  $W_{cyc\_2} = \int_5^6 -p \cdot dv - p_1 \cdot (V_8 - V_7) = \frac{p_5 \cdot V_5}{\gamma - 1} \cdot [\varepsilon_{cyl2\_eff}^{1-\gamma} - 1] - p_1 \cdot (V_8 - V_7)$
    - Dans les 2 cas, il faut déterminer les caractéristiques des points 5 et 6.

**6.3.4. Calcul des masses en œuvre et de l'énergie  $Q_1$** **6.3.4.1. Masse en œuvre**

- Masse en œuvre dans le cycle 1 :  $m_{cyc\_1} = \frac{p_1 \cdot (V_1 + v_{mcy1\_1})}{r \cdot T_1}$
- Masse en œuvre dans le cycle 2 :  $m_{cyc\_2} = \frac{p_1 \cdot (V_1 + v_{mcy1\_1} + v_{mcy1\_2})}{r \cdot T_1}$
- Masse d'air admise :  $m_{air} = \frac{p_1 \cdot V_1}{r \cdot T_1}$

**6.3.4.2. Energie  $Q_1$** 

- $Q_1 = m_{air} \cdot \phi \cdot \frac{PCI}{PCO}$

**6.3.4.3. Application numérique**

| cylindres 1 et 3                |          |                 | cylindre 2                     |        |                 |
|---------------------------------|----------|-----------------|--------------------------------|--------|-----------------|
| $V_{cyl1}$                      | 150      | cm <sup>3</sup> | $V_{cyl2}$                     | 449    | cm <sup>3</sup> |
| $v_{mcy1\_1}$                   | 25,00    | cm <sup>3</sup> | $v_{mcy1\_2}$                  | 26,886 | cm <sup>3</sup> |
| $\varepsilon_{cyl1}$            | 7        | su              | $\varepsilon_{cyl2}$           | 17,7   | su              |
| $A_{cyl1}$                      | 6        | cm              | $A_{cyl2}$                     | 8,3    | cm              |
| $r_{cyl1}$                      | 2,65     | cm              | $r_{cyl2}$                     | 4,15   | cm              |
| $l_{cyl1}$                      | 13       | cm              | $l_{cyl2}$                     | 13     | cm              |
| $S_{cyl1}$                      | 28,274   | cm <sup>2</sup> | $S_{cyl2}$                     | 54,11  | cm <sup>2</sup> |
| $m_{air\_cyl1}$                 | 0,205    | g               | $m_{air\_cyl2}$                | 0,031  | g               |
| $m_{air\_cyl1} \text{ déplacé}$ | 0,175575 | g               | $\varepsilon_{cyl2\_effectif}$ | 2,48   |                 |
| $Q_1$                           | 532,780  | J               |                                |        |                 |

**6.3.5. Détermination des caractéristiques des points 5 et 6****6.3.5.1. Point 5**

- On connaît par hypothèse le point 8 :  $p_8 = 1 \text{ bar}$  ,  $T_8 = 298 \text{ K}$ .

- La chaleur apportée sur l'isochore 8-5 nous donne :  $-Q_2 = m_{cyl_2} \cdot c_v \cdot (T_5 - T_8) \Rightarrow T_5 = \frac{-Q_2}{m_{cyl_2} \cdot c_v} + T_8$
- Et :  $p_5 = p_8 \cdot \frac{T_5}{T_8} = \frac{T_5}{T_1}$

### 6.3.5.2. Point 6

- Sur l'isentropique de détente :  $p_6 = p_5 \cdot \varepsilon_{cyl2\_eff}^{-\gamma}$  et  $T_6 = T_5 \cdot \varepsilon_{cyl2\_eff}^{1-\gamma}$

### 6.3.5.3. Application numérique

| cycle 2 |         |     |
|---------|---------|-----|
| T5      | 1742,37 | K   |
| P5      | 5,85    | bar |
| P6      | 1,64    | bar |
| T6      | 1211,40 | K   |

### 6.3.6. Calcul du travail du cycle 2

#### 6.3.6.1. Par $Q_3 : W_{cyl,2} = Q_2 - Q_3$

$$Q_3 = m_{cyc,2} \cdot c_v \cdot (T_8 - T_6) + p_1 \cdot (V_8 - V_7) = m_{cyc,2} \cdot c_v \cdot (T_1 - T_6) - p_1 \cdot (V_{cyl,2} - V_{cyl,1})$$

#### 6.3.6.2. Par calcul direct :

$$W_{cyc,2} = \int_5^6 -p \cdot dv - p_1 \cdot (V_8 - V_7) = \frac{p_5 \cdot V_5}{\gamma - 1} \cdot [\varepsilon_{cyl2\_eff}^{1-\gamma} - 1] - p_1 \cdot (V_{cyl,2} - V_{cyl,1})$$

- Rappel :
  - ✓ Sur une isentropique, on a selon la loi de Laplace  $p \cdot v^\gamma = cte$ . On peut donc exprimer facilement la pression en fonction du volume et d'une constante prise au point initial  $i$ :  $p = p_i \cdot v_i^\gamma \cdot v^{-\gamma}$
  - ✓ Le travail s'écrit entre les points  $i$  (initial) et  $f$  (final) :

$$W_i^f = - \int_i^f p \cdot dv = \frac{p_i \cdot v_i^\gamma}{\gamma - 1} \cdot [v_f^{1-\gamma} - v_i^{1-\gamma}]$$

$$\text{Pour la détente, on aura donc : } W_{det} = \frac{p_5 \cdot V_5}{\gamma - 1} \cdot [\varepsilon_{cyl2\_eff}^{1-\gamma} - 1]$$

### 6.3.6.3. Application numérique

|      |         |   |
|------|---------|---|
| W5-6 | -89,93  | J |
| W6-7 | 29,90   | J |
| Q6-8 | -184,60 | J |

**6.3.7. Bilan :**

- En déduire le rendement du cycle complet, c'est-à-dire pour les 3 cylindres.

- ✓ On a sur 2 tours moteur :
  - L'énergie introduite :  $2 \times Q_1$
  - Le travail des cylindres 1 et 3 :  $2 \times W_{cyc\_1}$
  - Le travail du cylindre 2 :  $2 \times W_{cyc\_2}$

- ✓ Le rendement théorique est par conséquent :

$$\eta_{th} = \left| \frac{W_{cycle\_cyl1} + W_{cycle\_cyl2}}{Q_1} \right|$$

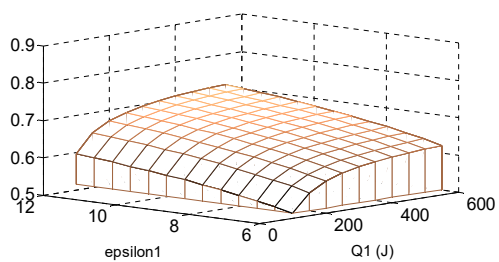
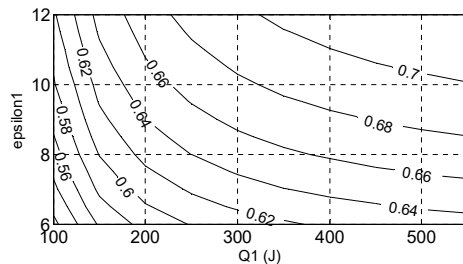
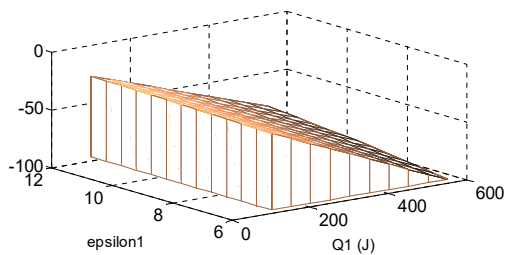
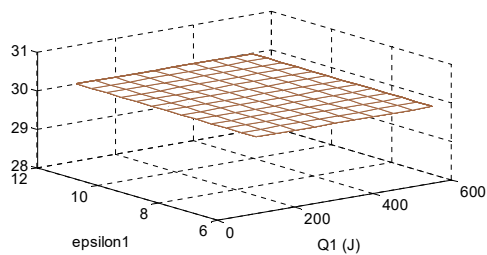
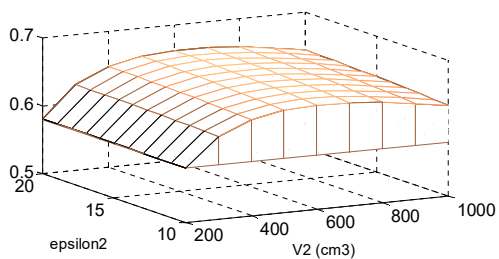
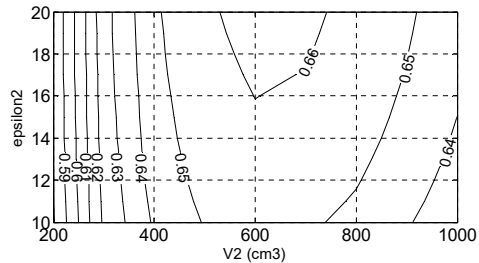
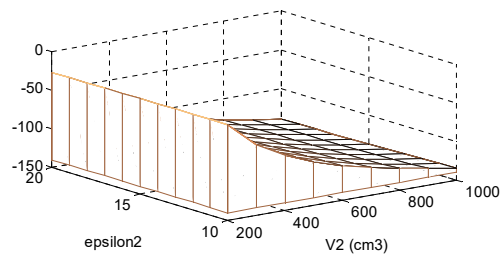
- ✓ Application numérique :

|              |         |   |
|--------------|---------|---|
| $Q_1$        | 532,780 | J |
| $W_{cyc\_1}$ | -288,15 | J |
| $Q_2$        | -244,63 | J |
| $W_{cyc\_2}$ | -154,70 | J |
| h th cycle   |         |   |
| 5T           | 0,654   |   |

**6.4. Discussion**

- Analyser et justifier, à l'aide des graphiques ci-dessous et en quelques lignes, l'évolution du rendement.
  - ✓ Logiquement, le rendement augmente avec  $\varepsilon_{cyl1}$  : c'est le gain sur la partie BdR du cycle ( $\eta_{th\_BdR} = 1 - \varepsilon^{1-\gamma}$ ).
  - ✓ On voit cependant que le rendement est dépendant de l'énergie introduite, ce qui n'est pas le cas pour le BdR. A faible énergie introduite, on récupère peu d'énergie pour la partie détente prolongée, ce qui est confirmé par le graphique du travail de détente en fonction de  $Q_1$ ,  $\varepsilon_{cyl1}$ .
  - ✓ Par ailleurs, on voit que le rendement est finalement peu sensible à  $\varepsilon_{cyl2}$ . Le volume du cylindre de détente a en revanche une influence non négligeable. Au-delà d'une certaine valeur, de l'ordre de 600 cm<sup>3</sup>, le rendement tend à diminuer. Ceci est dû au travail de détente prolongée qui tend vers une limite asymptotique, alors que le travail d'échappement ne cesse de croître...



rendement théorique  $\epsilon_2 = 17,7$   $V_{cyl1} = 150 \text{ cm}^3$   $V_2 = 450 \text{ cm}^3$ rendement théorique  $\epsilon_2 = 17,7$   $V_{cyl1} = 150 \text{ cm}^3$   $V_2 = 450 \text{ cm}^3$ travail de détente prolongée  $\epsilon_2 = 17,7$   $V_{cyl1} = 150 \text{ cm}^3$   $V_2 = 450 \text{ cm}^3$ travail d'échappement  $\epsilon_2 = 17,7$   $V_{cyl1} = 150 \text{ cm}^3$   $V_2 = 450 \text{ cm}^3$ rendement théorique  $\epsilon_1 = 7$   $V_{cyl1} = 150 \text{ cm}^3$   $Q_1 = 530 \text{ J}$ rendement théorique  $\epsilon_1 = 7$   $V_{cyl1} = 150 \text{ cm}^3$   $Q_1 = 530 \text{ J}$ travail de détente prolongée  $\epsilon_1 = 7$   $V_{cyl1} = 150 \text{ cm}^3$   $Q_1 = 530 \text{ J}$ travail d'échappement  $\epsilon_1 = 7$   $V_{cyl1} = 150 \text{ cm}^3$   $Q_1 = 530 \text{ J}$ 