

# BREVET DE TECHNICIEN SUPÉRIEUR

## MOTEURS À COMBUSTION INTERNE

Session 2014

### ÉTUDE DES MOTEURS U52 – ÉTUDE ET ANALYSE DES MOTEURS

Durée : 3 heures – Coefficient : 3

# Éléments de Correction

<b>CODE ÉPREUVE :</b> 1406MOE5EAM		<b>EXAMEN</b> BREVET DE TECHNICIEN SUPÉRIEUR	<b>SPÉCIALITÉ :</b> MOTEURS À COMBUSTION INTERNE
<b>SESSION :</b> 2014	<b>SUJET</b>	<b>ÉPREUVE : ÉTUDE DES MOTEURS</b> U52 – ÉTUDE ET ANALYSE DES MOTEURS	
<b>Durée : 3h</b>	<b>Coefficient : 3</b>	<b>Corrigé N° 05ED14</b>	<b>15 pages</b>

## Moteur à « 5 temps »

### PARTIE 1 : POTENTIEL DE GAIN SUR LE RENDEMENT THÉORIQUE

#### 1. Étude du potentiel de gain sur un cycle BdR à détente prolongée

##### 1.1. Rendement théorique du cycle Beau de Rochas : $\eta_{th\_BdR}$

- Calculer le rendement du cycle Beau de Rochas (BdR) constituant la « base » du cycle présenté :  $\eta_{th\_BdR}$ .

$$\eta_{th\_BdR} = 1 - \varepsilon^{1-\gamma} = 1 - 7^{-1,4} = 0,541$$

##### 1.2. Énergie introduite

###### 1.2.1. Déterminer la masse de carburant admise par le moteur : $m_{carb}$

$$m_{carb}(g) = \frac{\phi}{PCO} \cdot m_{air\_adm} = 1 \times \frac{1,17}{14,5} = 8,07 \cdot 10^{-2} g$$

###### 1.2.2. Calculer l'énergie introduite dans le cycle : $Q_1$

$$Q_1(J) = m_{carb}(g) \cdot PCI(J \cdot g^{-1})$$

$$\text{A.N. : } Q_1 = 8,07 \cdot 10^{-2} \times 44000 = 3550 J$$

##### 1.3. Travail du cycle et énergie perdue

###### 1.3.1. Calculer le travail fourni par ce cycle BdR : $W_{cycle\_BdR}$

$$W_{cycle\_BdR} = -\eta_{th\_BdR} \cdot Q_1$$

$$W_{cycle\_BdR} = -0,541 \times 3550 = -1920,5 J$$

###### 1.3.2. Calculer l'énergie « perdue » : $Q_2$

$$Q_2 = -Q_1 - W_{cycle}$$

$$Q_2 = -3550 + 1920,5 W_{cycle} = -1629,5 J$$

##### 1.4. Travail de détente prolongée

###### 1.4.1. Rapport volumétrique de détente prolongée : $\varepsilon_{4-5}$

- Exprimer et calculer le rapport volumétrique de « détente prolongée », c'est-à-dire du point 4 au point 5.

$$\varepsilon_{det\_prot} = \frac{V_5}{V_4} = \frac{4,487}{1,167} = 3,85$$

### 1.4.2. Calcul du travail de détente prolongée

On donne la formule de calcul du travail lors d'une transformation isentropique d'un point  $i$  à un point  $f$ :

$$W_i^f = \frac{p_i V_i}{\gamma - 1} \cdot \left[ \varepsilon_{i-f}^{1-\gamma} - 1 \right] \text{ où } p_i \text{ et } V_i \text{ sont respectivement la pression et le volume au point initial, et } \varepsilon_{i-f} \text{ le rapport volumétrique entre les points } f \text{ et } i \left( \varepsilon_{i-f} = \frac{V_f}{V_i} \right).$$

- Calculer le travail de détente prolongée  $W_4^5$ .

$$W_4^5 = \frac{p_4 \cdot V_4}{\gamma - 1} \cdot \left[ \varepsilon_{4-5}^{1-\gamma} - 1 \right]$$

$$W_4^5 = \frac{6,59 \cdot 10^5 \times 1,167 \cdot 10^{-3}}{0,4} \cdot \left[ 3,85^{-0,4} - 1 \right] = -801 \text{ J}$$

### 1.5. Calcul du travail échappement

- Calculer le travail d'échappement  $W_5^1$

$$W_5^1 = -p_1 \cdot (V_1 - V_5) = -10^5 \cdot (1,167 - 4,487) \cdot 10^{-3} = 332 \text{ J}$$

### 1.6. Bilan du cycle à détente prolongée

#### 1.6.1. Calculer le travail du cycle à détente prolongée : $W_{cycle}$

$$W_{cycle} = W_{cycle\_BdR} + W_4^5 + W_5^1 = -1920,5 - 801 + 332 = -2389,5 \text{ J}$$

### 1.7. Bilan du cycle à détente prolongée

#### 1.7.1. En déduire le rendement théorique de ce cycle : $\eta_{th\_cycle}$

$$\eta_{th\_cycle} = \left| \frac{W_{cycle}}{Q_1} \right| = \frac{2389,5}{3550} = 0,673$$

#### 1.7.2. Calculer le gain de rendement théorique par rapport au cycle BdR

$$G = \frac{\eta_{th\_cycle} - \eta_{th\_BdR}}{\eta_{th\_BdR}} \times 100 = \frac{673 - 541}{541} \times 100 = 24,4\%$$

## 2. Étude du cycle du moteur à 5 Temps

### 2.1. Compléter le tableau de fonctionnement (document réponse 1)

Voir doc réponse.

### 2.2. Détermination de rapport volumétrique de détente dans le cylindre 2 : $\varepsilon_{5-6}$

#### 2.2.1. Déterminer le volume $V_5$

$$V_5 = V_{cyl\_1} + v_{mcyL\_1} + v_{mcyL\_2} = 0,45 + 25 \cdot 10^{-3} + 26,9 \cdot 10^{-3} = 0,2019 \text{ dm}^3$$

#### 2.2.2. Déterminer le volume $V_6$

$$V_6 = V_{cyl\_2} + v_{mcyL\_1} + v_{mcyL\_2} = 0,45 + 25 \cdot 10^{-3} + 26,9 \cdot 10^{-3} = 0,5019 \text{ dm}^3$$

**2.2.3. En déduire rapport volumétrique de détente dans le cylindre 2 :  $\varepsilon_{5-6}$  ainsi que la variation de volume  $\Delta V = V_6 - V_5$**

$$\varepsilon_{5-6} = \frac{V_6}{V_5} = \frac{5019}{2019} = 2,486$$

$$\Delta V = V_6 - V_5 = 0,5019 - 0,2019 = 0,3 \text{ dm}^3$$

- Calcul du travail du cycle BdR « associé »
  - ✓ Le rendement théorique est connu :  $\eta_{th\_BdR} = 1 - \varepsilon^{1-\gamma} = 1 - 7^{-1,4} = 0,541$
  - ✓ L'énergie introduite est :  $Q_1 = 532 \text{ J}$
  - ✓ Le travail du cycle est donc :

$$W_{cycle\_BdR} = -\eta_{th\_BdR} \cdot Q_1$$

$$W_{cycle\_BdR} = -0,541 \times 532 = -287,8 \text{ J}$$

**2.3. Calcul du travail de détente prolongée :  $W_5^6$**

- À l'aide de la formule donnée en §1.5, calculer le travail de détente :  $W_5^6$ .

$$W_5^6 = \frac{p_5 \cdot V_5}{\gamma - 1} \cdot [\varepsilon_{5-6}^{1-\gamma} - 1] = \frac{5,85 \cdot 10^5 \times 0,2019 \cdot 10^{-3}}{0,4} \cdot [2,486^{-0,4} - 1] = -90 \text{ J}$$

- Le graphique du document technique 3/3 (travail **cumulé** durant la phase de détente prolongée) donne-t-il une valeur comparable ? Justifier la réponse.
  - ✓ On lit la même valeur :  $-90 \text{ J}$ .

**2.4. Travail des 3 cylindres**

- À l'aide du graphique du **document technique 3/3** déterminer la valeur du travail des 3 cylindres pour un cycle (2 tours).

Wcyl 1	-265	J
Wcyl 2	-265	J
Wcyl 3	-167	J

**2.5. Travail du cycle et rendement théorique**

- Déduire des questions précédentes le travail du cycle complet (pour les 3 cylindres).

$$W_{cycle\_5T} = W_{cyl\ 1} + W_{cyl\ 2} + W_{cyl\ 3} = -2 \times 265 - 167 = -697 \text{ J}$$

- Déterminer enfin le rendement théorique. Justifier la réponse.

Le travail calculé à la question précédente est bien le travail du moteur complet pour un cycle. Il ne faut pas oublier que durant ce cycle, 2 combustions ont été réalisées, apportant  $2 \times Q_1$ . Le rendement s'écrit donc :

$$\eta_{th\_cycle\_5T} = \left| \frac{W_{cycle\_5T}}{2 \times Q_1} \right| = \frac{697}{2 \times 532} = 0,655$$

**2.6. Calculer le gain par rapport au cycle BdR**

$$G = \frac{\eta_{th\_cycle} - \eta_{th\_BdR}}{\eta_{th\_BdR}} \times 100 = \frac{655 - 541}{541} \times 100 = 21\%$$

### 3. Analyse critique l'évolution du rendement théorique en fonction des 4 facteurs d'influence

- Analyser et justifier, à l'aide des graphiques du **document technique 4** 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...

## PARTIE 2 : SIMULATION NUMÉRIQUE

### 4. Analyse des résultats de la simulation

#### 4.1. Déterminer, pour le cycle (3 cylindres) :

- le travail indiqué  $W_{i\_3cyl}$ .
- le travail de frottement  $W_{f\_3cyl}$
- le travail effectif  $W_{eff\_3cyl}$

travail indiqué						
alfa (°)	cyl1	cyl2	cyl3			
0°-180°	51,3	-147,8	732,7	J		
180°-360°	-158,4	348,2	-94,2	J		
360°-540°	732,7	-147,8	51,3	J		
540°-720°	-94,2	348,2	-158,4	J	$W_{i\_3cyl}$	
sommes	531,4	400,8	531,4	J	1463,6	J
travail de frottement						
	cyl1	cyl2	cyl3		$W_{f\_3cyl}$	
$W_f$	29,3	24,6	29,3	J	83,2	J

Par définition :  $W_{eff\_3cyl} = W_{i\_3cyl} - W_{f\_3cyl} = 1463,6 - 83,2 = 1380,4 J$

#### 4.2. En déduire, dans l'ordre :

- Le rendement indiqué  $\eta_{i\_5T}$ .

$$\eta_{i\_5T} = \frac{W_i}{Q_1} = \frac{1463,6}{2 \times 1582,8} = 0,462$$

- Le rendement effectif  $\eta_{eff\_5T}$ .

$$\eta_{eff\_5T} = \frac{W_{eff}}{Q_1} = \frac{1380,4}{2 \times 1582,8} = 0,436$$

- Le rendement mécanique  $\eta_{m\_5T}$ .

$$\eta_{m\_5T} = \frac{W_{eff}}{W_i} = \frac{1380,4}{1463,6} = 0,943$$

- Le rendement de forme  $\eta_{f\_5T}$ .

$$\eta_{f\_5T} = \frac{\eta_{eff\_5T}}{\eta_{c\_5T} \cdot \eta_{th\_5T} \cdot \eta_{m\_5T}} = \frac{0,436}{0,98 \times 0,655 \times 0,943} = 0,720$$

## PARTIE 3 : ANALYSE DES ESSAIS SUR MOTEUR PROTOTYPE \_ SYNTHÈSE

### 5. Champ d'iso-CSE

#### 5.1. Déterminer les meilleurs CSE et rendements pour chacun des moteurs

Reporter les résultats dans le tableau de synthèse (document réponse 2).

Pour le moteur standard, la CSE à 3500 tr.min<sup>-1</sup> est de 250 g.kW<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>.

Pour le moteur « 5T », on a, pour ce même régime, 236,5 g.kW<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>.

Les rendements sont donc respectivement :  $\eta_{eff} = \frac{3600}{CSE \text{ (g.kW}^{-1}\text{.h}^{-1}\text{)} \cdot PCI \text{ (kJ.g}^{-1}\text{)}}$

Soit :

$$\eta_{eff} = 32,7\% \text{ pour le moteur 4T}$$

$$\eta_{eff} = 34,6 \text{ pour le moteur 5T}$$

### 6. Synthèse

- En quelques lignes, rédiger une synthèse de l'étude. On pourra utiliser les résultats synthétisés sur le tableau, et commenter les rendement théoriques et mécaniques...

La première partie nous a permis de montrer qu'il y a un potentiel de gain certain sur le rendement théorique avec la détente prolongée. Le moteur 5T a donc un intérêt très intéressant puisqu'il y a un gain de rendement théorique de l'ordre de 20% par rapport au cycle BdR classique.

La partie simulation semble confirmer ce potentiel, puisque les modèles de calcul donnent un rendement effectif de 43% contre 33% pour un moteur équivalent standard. Le gain se trouve d'une part dans le rendement théorique, ce qui corrobore l'étude théorique. On a d'autre part un gain sur le rendement mécanique. On peut penser que le système de transfert de gaz d'un cylindre à l'autre générerait des pertes non négligeables. Par ailleurs, le fait d'avoir 3 pistons au lieu de 4 diminue les pertes par frottement. La simulation donne l'avantage à ce second aspect.

La troisième partie montre que le gain réel, à pleine charge et au meilleur rendement, n'est que de 6%. Les modèles mathématiques utilisés dans la simulation ne sont peut-être pas optimisés...

## Document Réponse 1

- Question 1.1 : indiquer les différentes phases de fonctionnement avec les « codes » ci-dessous :

A ↓ : admission ; C ↑ : compression ; CD ↓ : combustion détente (HP) ;

T ↑ : transfert ; E ↑ : échappement ; D ↓ : détente (BP).

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

## Document Réponse 2

su : sans unité.

	pour un cycle ( 720°)		
	travail indiqué	travail de frottement	travail effectif
<b>cyl1</b>	531,4	29,3	502,1
<b>cyl2</b>	400,8	24,6	376,2
<b>cyl3</b>	531,4	29,3	502,1
<b>bilan pour le moteur</b>	1411	83,2	1380,4

				moteur 4 T	moteur 5 T
simulation	rapport volumétrique $\epsilon$	$\epsilon$	su	10,0	7 / 17,7
	$C_{eff}$ @ 4000 tr.min <sup>-1</sup>	$C_{eff}$	mN	109,8	109,8
	PME @ 4000 tr.min <sup>-1</sup>	PME	bar	11,5	46,0
	PMF @ 4000 tr.min <sup>-1</sup>	PMF	bar	1,5	2,8
	PMI @ 4000 tr.min <sup>-1</sup>	PMI	bar	13,0	48,8
	rendement théorique thermodynamique	$\eta_{th}$	su	0,602	0,665
	rendement de combustion	$\eta_c$	su	0,98	0,98
	rendement indiqué	$\eta_i$	su	0,402	0,462
	rendement mécanique	$\eta_m$	su	0,885	0,943
	rendement de forme	$\eta_f$	su	0,682	0,709
	rendement effectif	$\eta_{eff}$	su	0,356	0,436
prototype	rendement effectif	$\eta_{eff}$	su	0,327	0,345

### Synthèse

La recherche de meilleurs rendements afin de répondre aux exigences de pollution et de coût de l'énergie conduit à identifier de nouvelles techniques pour les moteurs à combustion interne.

On a montré dans la partie 1 que la différenciation des courses de compression et de détente, matérialisée ici par la solution technique simple du moteur « 5 Temps, permet un gain significatif de rendement théorique, supérieur selon les hypothèses faites à 20%.

La simulation numérique permet de montrer, en comparant ce moteur à un moteur standard que l'on conserve un gain substantiel, même en prenant en compte les pertes aux parois ou dans les transferts. Ceci avec une cylindrée nettement inférieure, à la condition d'une forte suralimentation.

Enfin, l'essai du prototype montre toujours un rendement maxi intéressant de près de 35%.

Il reste cependant à consolider ces résultats, notamment en termes de polluants et de suralimentation...