

## MOTEUR A ALLUMAGE COMMANDE

### BUT

Se familiariser avec les courbes caractéristiques d'un moteur à allumage commandé équipé d'un système d'injection et d'allumage électronique.

L'accent est mis sur les côtés techniques des systèmes d'injection et d'allumage électroniques et les méthodes d'analyse de gaz d'échappement.

### 1 - APPAREILLAGE

#### 1.1 - Le Moteur

Il s'agit d'un moteur à allumage commandé et à injection monopoint (Moteur Renault E7J) dont les caractéristiques sont :

Nombre de cylindres	4
Alésage	75,8 mm
Course	77 mm
Cylindrée	1390 cm <sup>3</sup>
Rapport volumique de compression	9,5
Couple maximal	106 N.m à 2750 tr/min
Puissance maximale	57,5 kW à 5750 tr/min

#### 1.2. - Injection d'essence

Le système est un système injection électronique centralisé à basse pression (**injection monopoint**) de chez AC DELCO electronics. Son coeur est constitué par l'unité d'injection monopoint et son injecteur électromagnétique, qui injecte le carburant par intermittence au-dessus du papillon. La répartition du carburant entre les différents cylindres s'effectue par le collecteur d'admission. Des capteurs détectent les principaux paramètres de fonctionnement du moteur, indispensables à l'adaptation optimale du mélange notamment le régime du moteur et la pression régnant dans le collecteur d'admission mais également l'accélération ou la décélération du moteur, la température du liquide de refroidissement, etc. ... La centrale de commande électronique calcule alors les signaux de pilotage de l'injecteur et de l'allumage. L'unité d'injection se compose du boîtier de papillon et de la partie hydraulique. Celle-ci est constituée par l'injecteur électromagnétique et le régulateur de pression qui maintient à un niveau constant (0,7 bar) la différence entre la pression du carburant et celle au point de dosage de l'injecteur. Le débit d'injection dépend donc uniquement de la durée d'ouverture de l'injecteur.

La pompe est du type multicellulaire à rouleaux entraînés par un moteur électrique 12V à excitation permanente noyé dans l'essence. Le filtre à essence, placé après la pompe retient les impuretés présentes dans le circuit d'essence qui pourraient nuire au bon fonctionnement du régulateur et de l'injecteur. L'injecteur électromagnétique est constitué essentiellement d'un noyau magnétique solidaire d'une aiguille d'injection comprimée par un ressort sur le siège du corps d'injecteur. A l'arrière, le corps d'injecteur porte un enroulement conducteur qui, lorsqu'il est alimenté, exerce sur le noyau magnétique un effort antagoniste au ressort, l'aiguille est alors décollée de son siège et laisse passer le carburant sous pression par un alésage calibré. Lorsque cette alimentation est coupée, le ressort repousse l'aiguille sur son siège et l'injecteur ne débite plus.

Lors de l'ouverture du papillon par l'actionneur d'accélérateur, le point de fonctionnement désiré est imposé au moteur. Un capteur de pression absolue de type piézo-résistif à membrane de silicium (MAP Sensor) mesure la pression régnant dans le collecteur d'admission (p). Le débit d'air admis est défini par la pression collecteur (p) et le régime moteur correspondant (n) : **système (p/n)**. Le régime moteur est mesuré par un capteur magnétique à réluctance variable monté sur le volant pourvu des cibles (volant broché). Le capteur comprend un aimant permanent suivi d'un axe polaire en acier doux autour duquel est placé un bobinage. Le défilement des dents de la cible provoque une

variation de flux dans l'axe polaire qui induit une tension dans le bobinage. Ce signal est ensuite mis en forme par un circuit spécifique (intégrateur différentiel) situé dans le calculateur, pour fournir une image électrique de la cible permettant au calculateur de déterminer le régime moteur et la phase au degré près par rapport au PMH.

Il est important, pour l'enrichissement à pleine charge et la coupure d'injection en décélération, de détecter les états de fonctionnement '**ralenti**' et '**pleine charge**', afin de satisfaire aux différents critères d'optimisation de ces états. A la pleine charge le moteur doit fournir sa puissance maximale. Le mélange air-carburant doit être alors enrichi par rapport à la charge partielle. La "pleine charge" est caractérisée par le fait que le papillon dépasse un angle d'ouverture. L'ampleur de l'enrichissement est programmée par la centrale de commande au niveau de la durée d'injection. Le régime de base de ralenti est entretenu par le passage de l'air au niveau du papillon. La position "ralenti" est atteinte dès que le levier du papillon actionne le contact de ralenti. La régulation auto-adaptative du ralenti est réalisée à l'aide d'un moteur pas à pas, piloté par le calculateur, qui gère le débit d'air dérivé en fonction de la charge moteur.

La **température du moteur** exerce une influence considérable sur le besoin en carburant. Une sonde intégrée au circuit de refroidissement mesure la température du moteur et transmet un signal électrique à la centrale de commande. Ce capteur monté sur la culasse du moteur est constitué d'un boîtier dans lequel est noyé une thermistance. La caractéristique principale de cet élément est la variation de résistance en fonction de la température.

La masse volumique de l'air d'admission dépend de la température. L'air froid est plus dense que l'air chaud. La masse d'air aspirée par le moteur diminue donc lorsque la température de l'air augmente. Afin de tenir compte de ce phénomène, une sonde de température est disposée dans le canal d'admission de l'unité d'injection en aval du papillon. Elle fournit une image électrique de la **température de l'air** admis à la centrale de commande par variation de résistance à coefficient négatif (CTN).

Les temps d'attraction et de relâchement de l'injecteur électromagnétique varient en fonction de la **tension de la batterie**. Afin de compenser les retards de réponse de l'injecteur, la centrale de commande corrige les variations de la tension de bord en modulant la durée d'injection.

Au **départ à froid**, une partie du carburant injecté se condense sur les parois froides du collecteur d'admission. Afin de garantir des temps de démarrage courts ainsi que le fonctionnement stable du moteur, un supplément de carburant est injecté en fonction de la température du moteur. Avant que le moteur ait atteint sa température de service, l'enrichissement à la **mise en action** compense les pertes dues à la condensation et au mauvais mélange de l'air et du carburant. Cette fonction permet un fonctionnement parfait à toutes les températures, tout en minimisant la consommation.

Le phénomène de **mouillage de parois** en régime transitoire est largement compensé par anticipation de correction en terme de temps d'injection grâce aux informations fournies par les capteurs potentiomètre de papillon, capteur de pression et capteur de régime moteur.

La **sonde Lambda** montée sur la tubulure d'échappement transmet à la centrale de commande (calculateur) un signal caractéristique de la composition instantanée du mélange. Cette information permet au calculateur de déceler et de corriger les divergences par rapport à un dosage air-carburant bien défini ainsi de maintenir toujours la composition de mélange optimisée pour une dépollution efficace  $\lambda = 1,00$  ( $0,97 \sim 1,03$ ). Cette sonde est constituée par un matériau électrolytique (céramique dioxyde de zirconium) qui, à température élevée et en présence d'une différence de pression partielle d'oxygène entre les deux côtés du matériau, présente une différence de potentiel de la forme :

$$E = \frac{KT}{e} \text{Log} \frac{PO_2(\text{atm})}{PO_2(\text{é chp})}$$

Entre 350 °C et 800 °C, la tension délivrée par la sonde sera de 0 à 200 mV quand le mélange est pauvre et plus de 800 mV quand le mélange est riche.

### 1.3 - L'allumage

A partir des paramètres d'entrée - vitesse de rotation, charge - et de différentes grandeurs de corrections, le microcalculateur (c'est un même et seul boîtier calculateur injection - allumage) de la centrale de commande calcule un angle d'avance qui représente le flanc arrière du signal d'allumage et définit une position angulaire correspondant à la position momentanée du vilebrequin. Le microcalculateur détermine également l'angle de came nécessaire, représentant le flanc avant du signal d'allumage, à partir des données de fonctionnement du moteur. Ce signal, dont la durée correspond au temps de fermeture, module l'intervalle de conduction de la bobine par l'étage final de manière à procurer, au bon moment, une énergie d'allumage suffisante à l'inflammation du mélange air/carburant. Les signaux émis par le microcalculateur sont trop faibles pour **la bobine d'allumage de haute tension**. Ils sont amplifiés dans l'étage de puissance pour être en mesure de piloter la bobine. La haute tension disponible pour l'allumage provient essentiellement de l'énergie emmagasinée dans la bobine d'allumage. Cette dernière est constituée de deux enroulements en cuivre, superposés et bobinés autour d'un noyau de fer doux. Ces enroulements sont isolés réciproquement en fonction des différences de potentiel. Dès que la phase d'emmagasinage est terminée, le circuit primaire de la bobine est interrompu par l'étage de puissance du microcalculateur pour le déclenchement du point d'allumage. Au même instant, le champ magnétique disparaît et la tension d'allumage s'établit par induction dans l'enroulement secondaire. **Le distributeur à haute tension**, entraîné directement par l'arbre à came, assure la distribution de la haute tension depuis la bobine d'allumage vers les différentes bougies.

### 1.4 - Alimentation en carburant

On utilise l'essence sans plomb EURO 95.

L'alimentation en essence du réservoir de la cellule d'essai est assurée par une pompe électrique 220 V. Son fonctionnement est contrôlé de manière autonome par un capteur de niveau placé dans le réservoir (Laisser toujours l'interrupteur pompe essence sur la position ON).

### 1.5 - Le positionneur de papillon

Le papillon de gaz est actionné par un positionneur motorisé. Un capteur détecte la position ralenti et informe l'opérateur en éteignant le voyant PLUS.

### 1.6 - Le dynamomètre

C'est un frein hydraulique Zöllner (3n19A). Il permet d'absorber une puissance maximale de 118 kW. Le couple admissible pour le frein est de 250 N.m. La vitesse maximale est de 7500 tr/min.

Le frein se compose d'un rotor comportant l'arbre et les brides d'accouplement, ainsi qu'un rouet et d'un stator comportant le carter et les pièces rapportées (corps pendulaire)

Le corps pendulaire est monté en balance sur les supports de palier. Il possède un levier qui attaque le peson de mesure de couple. Le rouet du rotor est monté dans le stator avec un jeu important. Il est doté d'un aubage incliné permettant de freiner dans un sens de rotation.

Les poches du rouet et du stator sont conçues de telle sorte que le couple ne subisse pas de variations périodiques. L'eau située dans les poches est mise en mouvement par la rotation du rouet et transmet le couple du rotor au carter. Comme ce dernier se trouve monté en balance, son levier attaque directement le peson qui indique le couple en lecture directe.

Le frein est **à réglage par tiroirs**. Il possède deux tiroirs semi-circulaires, logés entre le rouet et le stator, tiroirs mobiles radialement, qui servent d'écan entre les poches mobiles et fixes. Plus les poches sont obstruées moins le frein absorbe de puissance. En actionnant les boutons de charge (flèche vers le haut pour plus de charge et flèche vers le bas pour moins de charge), on commande un moteur électrique qui déplace les tiroirs à la position voulue.

## 1.7 - Circuits de refroidissement

Le moteur et le frein sont refroidis par eau de ville en circuit ouvert. Des régulateurs de pression sont installés sur les circuits de refroidissement moteur et frein. La pression de l'eau de frein est habituellement réglée à 2 bars et celle du moteur à 3 bars.

L'huile du moteur est refroidie à l'aide d'un échangeur Huile-Eau. Le liquide de refroidissement du moteur est refroidi à l'aide d'un échangeur Eau-Eau.

Les débits d'eau de refroidissement sont contrôlés par des vannes motorisées dont l'ouverture et la fermeture sont pilotées par des régulateurs à processus PID monté sur chaque circuit de refroidissement (huile et eau). Le régulateur permet de maintenir le liquide à refroidir à une température proche de celle de consigne.

Ainsi, on peut effectuer des essais à températures huile et eau constantes pour différents niveaux de consignes de températures quelles soient la charge et la vitesse de rotation du moteur.

## 1.8 - Dispositifs de sécurités moteur

Le banc d'essai est équipé des capteurs de sécurité permettant une protection du moteur.

On distingue deux types de sécurités moteur : *passive* et *active*.

Les dispositifs de sécurité passive sont de simples témoins attirant l'attention de l'opérateur quand un défaut est détecté. Parmi ces dispositifs, on peut citer :

- Température de l'huile moteur
- Température du liquide de refroidissement du moteur
- Température de l'eau du frein
- Pression de l'huile moteur
- Présence de l'eau dans le frein
- Présence de l'eau dans les circuits de refroidissement moteur

En plus de témoins lumineux, les dispositifs de sécurité active coupent l'alimentation stabilisée du calculateur et les modules de puissance, dès qu'un défaut est détecté.

Ces dispositifs sont

- Arrêt général Coup-de-Poing (coupure manuelle)
- Régime moteur (survitesse)

## 1.9 - Analyse de gaz

Cette installation est réalisée afin d'effectuer des prélèvements répétitifs de gaz de combustion d'un moteur à allumage commandé en vue de mesurer leurs teneurs en gaz "permanents" : O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, et en polluants : CO, NO<sub>x</sub>, CH totaux. Les opérations seront continues en régimes stabilisés du moteur, et multiséquentielles pour l'étude des régimes transitoires.

Les gaz sont prélevés dans la conduite d'échappement, au moyen d'une sonde en inox traversant diamétralement la canalisation, construite et installée selon un schéma normalisé (OREUCF).

Un système utilisant un filtre à particules en céramique (seuil 0,5 µm) chauffé suivi de 5 mètres de canalisation thermostatée à 180 °C assure le transfert des fumées aux analyseurs.

Celles-ci sont analysées directement à cette température par l'analyseur CH-FID, ainsi qu'en parallèle, après déshumidification (condenseur 2 °C) par les analyseurs O<sub>2</sub> - CO<sub>2</sub> - CO - NO<sub>x</sub>.

La lecture des concentrations volumiques des divers gaz s'effectue sur les afficheurs de la baie d'analyse. Des étalonnages sont effectués régulièrement, à partir de bouteilles de gaz étalons, pour tenir compte des dérives éventuelles, en particulier dues à la variation de température ambiante.

### **CO - CO<sub>2</sub>**

Photométrie d'absorption non dispersive (NDIR) d'un faisceau de radiations infra rouges.

L'absorption IR répond aux lois de Lambert-Beer :  $A = \text{Log}\left(\frac{I_0}{I}\right) = KCL$

$I_0$	Energie lumineuse incidente
$I$	Energie lumineuse transmise
$K$	Coefficient d'extinction molaire
$L$	Longueur de la cellule de mesure (trajet optique)
$C$	Concentration de l'espèce absorbante

La *sélectivité* de ce type d'analyseur s'obtient par suppression des radiations gênantes au moyen d'un filtre à gaz ou interférentiel absorbant dans ce domaine ; le détecteur pneumatique rempli de gaz pur (CO<sub>2</sub> ou CO) de même nature que l'espèce à doser absorbe sélectivement une énergie liée à la quantité de gaz à doser.

### **O<sub>2</sub>**

Le Paramagnétisme élevé de ce gaz permet son dosage par action d'un champ magnétique hétérogène et d'une variation de sa susceptibilité magnétique sur son parcours par un gradient thermique, créant une convection : le débit ou la pression générés étant proportionnels à la teneur en O<sub>2</sub> du mélange à mesurer.

$$dF = dV \text{grad}\left(X \frac{B^2}{2}\right)$$

dF Force élémentaire

dV Volume élémentaire de gaz

X Susceptibilité magnétique

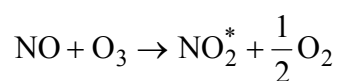
B Champ magnétique

La *sélectivité* est due au fait que seuls O<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, et ClO<sub>2</sub>, sont paramagnétiques (X>0).

### **NO<sub>x</sub>**

On désigne sous ce terme la somme NO + NO<sub>2</sub> obtenue après conversion de NO<sub>2</sub> en NO).

La chimiluminescence dans le proche IR de la réaction de NO et O<sub>3</sub> (ozone) a une intensité lumineuse proportionnelle au débit massique de NO, elle est convertie en signal électrique par un photomultiplicateur.



La sélectivité et la grande dynamique de mesure sont remarquables.

### **CH totaux**

Analyseur à détection par ionisation de flamme (FID).

Les effluents prélevés à chaud dans les échappements sont maintenus à 180 °C dans la ligne de transfert chauffée, les CH contenus étant détectés par la propriété  $-\overset{\cdot\cdot\cdot}{\underset{\cdot\cdot\cdot}{C}}-H$  d'ioniser une flamme de H (chimionisation). Le courant est collecté et amplifié.

La sélectivité est nulle puisque chaque liaison  $-\overset{\cdot\cdot\cdot}{\underset{\cdot\cdot\cdot}{C}}-H$  produit un signal, l'environnement moléculaire joue peu pour les divers CH (éthyléniques, benzéniques ...) mais la présence d'hétéroatomes (O-N ...) peut affaiblir, voire annuler le signal.

## **1.10 - Equipement d'essais et de mesures**

### *Couple*

Le capteur de force monté sur le dynamomètre permet de mesurer le couple résistant du frein. Ce capteur est étalonné avec le bras de levier du frein et le réglage du conditionneur permet un affichage du couple frein directement en *Newton-Mètre* par un afficheur.

### *Vitesse de rotation*

Le frein est muni d'un dynamo-tachymètre permettant la mesure de la vitesse de rotation du frein. L'affichage se fait en *tr/min*.

### *Consommation*

On mesure le temps que met le moteur pour consommer 100 ml (ou 50 ml) d'essence à l'aide des boules de consommation. La mesure est donc volumique. Pour retrouver la consommation massique, la mesure de la densité de l'essence est nécessaire. Faire attention au fait que l'essence est très volatile.

### *Températures*

Des sondes (thermocouples type K et sondes à résistance Pt 100) permettent de mesurer la température en divers points du circuit de refroidissement (eau et huile) et d'air (admission et échappement), ainsi que la température ambiante.

## **2 - MANIPULATION**

### **2.1 - Caractéristiques en fonction de la température du liquide de refroidissement**

A 2000 tr/min et à la demi charge, on effectuera des essais à 30°C, 50°C, 70°C et à 90°C pour les consignes de température du liquide de refroidissement en laissant la consigne de température de l'huile moteur à 90 °C (La température de l'huile moteur évoluera en fonction du temps selon la température du liquide de refroidissement ). On mesure les paramètres suivants :

- le régime moteur
- le couple au frein
- les température d'admission et l'échappement
- les température du liquide de refroidissement et de l'huile
- le temps de consommation  $t_c$
- les concentrations en CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, O<sub>2</sub> et HC<sub>totaux</sub> des gaz d'échappement.

### **2.2 - Caractéristiques en fonction de la vitesse de rotation**

On règle les consignes de températures Eau et Huile à 90 °C.

Le moteur fonctionnant à pleine charge, on effectue les mesures de 1500 tr/min à 4500 tr/min par pas de 1000 tr/min plus un point de fonctionnement à 2750 tr/min.

On note les mêmes paramètres que ci-dessus.

### 2.3 - Caractéristiques en fonction de la charge

A 2500 tr/min on effectuera des essais à 1/4, 2/4, 3/4 et 4/4 de la charge maximale et on mesure les mêmes paramètres que ci-dessus.

### 2.4 - Rendement mécanique

A 2500 tr/min, 1/2 charge, on coupe l'allumage d'un cylindre. On ramène la vitesse à 2500 tr/min en réduisant le couple résistant du frein. La lecture des deux couples frein permet le calcul du rendement mécanique en supposant les mêmes pertes sur chaque cylindre.

## 3 - RESULTATS DEMANDES

- 1 Tracer les courbes de variation, en fonction des températures du liquide de refroidissement, du couple, de la puissance, de la richesse, de la température d'admission, de la consommation horaire, de la consommation spécifique, des émissions en CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, et HC, des émissions spécifiques en CO, NO<sub>x</sub>, et HC et du rendement de remplissage pour les essais effectués en 2.1.
- 2 Tracer les courbes de variation des mêmes grandeurs en fonction de la vitesse de rotation pour les essais effectués en 2.2.
- 3 Tracer les courbes de variation des mêmes grandeurs en fonction de la charge pour les essais effectués en 2.3.
- 4 Calculer le rendement mécanique et le rendement global pour les essais effectués en 2.4.
- 5 Calculer les rendements mécaniques pour les essais effectués en 2.3, en supposant que la perte due au frottement reste constante.

N.B. :

1. On adopte la formule C<sub>7,17</sub>H<sub>13,22</sub>O<sub>0,02</sub> pour l'essence utilisée (EURO 95 sans plomb).
2. On suppose qu'il y a l'équilibre du gaz à l'eau et on prend  $[H_2] = \frac{1}{3}[CO]$  pour richesse supérieure à 1.
3. Pour le calcul du rendement global, on prend  $PCI_{essence} = 43700$  kJ/kg.
4. Des tableaux de résultats seront établis et feront partie du compte-rendu ainsi que des commentaires sur les résultats obtenus.

## ANNEXE

**A.1 Puissance** Elle est donnée par  $P_e = C \cdot \omega / 1000$  ou  $P_e = \frac{\pi \cdot C \cdot N}{30000}$

avec

$P_e$	Puissance (kW)
$C$	Couple moteur (N.m)
$\omega$	Vitesse moteur (rad/s)
$N$	Vitesse moteur (tr/min)

**A.2 Consommation horaire**  $C_h = 3600 \frac{W}{t}$

avec

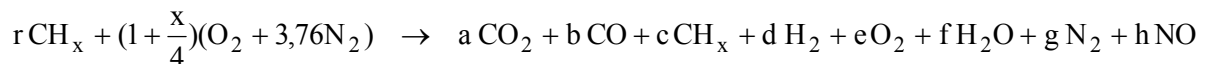
$C_h$	Consommation horaire (g/h)
$w$	Poids (g)
$t$	Temps (s)

**A.3 Consommation spécifique**  $C_s = \frac{C_h}{P_e}$

avec

$C_s$	Consommation spécifique (g/kWh)
$C_h$	Consommation horaire (kg/h)
$P_e$	Puissance (kW)

**A.4 Combustion** La combustion du mélange d'hydrocarbures composant l'essence s'écrit :



Equations des bilans :

(1) C :  $r = a + b + c$

(2) H :  $rx = cx + 2d + 2f$

(3) O :  $2 + \frac{x}{2} = 2a + b + 2e + f + h$

(4) N :  $2 \times 3,76(1 + \frac{x}{4}) = 2g + h$

Equilibre gaz à l'eau :

(5)  $d = \frac{1}{3}b$

Analyse des gaz (tous en % de volume) :

(6)  $\frac{b}{a} = \frac{[\text{CO}]}{[\text{CO}_2]}$  (7)  $\frac{c}{a} = \frac{[\text{CH}_x]}{[\text{CO}_2]}$  (8)  $\frac{e}{a} = \frac{[\text{O}_2]}{[\text{CO}_2]}$  (9)  $\frac{h}{a} = \frac{[\text{NO}]}{[\text{CO}_2]}$

Essence sans plomb EURO 95  $\text{C}_{7,17} \text{H}_{13,22} \text{O}_{0,02}$  donc  $x = \frac{13,22}{7,17} = 1,84$

**A.5 Richesse**

$$r = \frac{3(x+4)\{[\text{CO}] + [\text{CO}_2] + [\text{CH}_x]\}}{(3x+4)[\text{CO}] + 3(x+4)[\text{CO}_2] + 12[\text{O}_2] + 6[\text{NO}]}$$

## A.6 Rapport stoechiométrique

$$R_s = \left( \frac{M_{air}}{M_{essence}} \right)_{stoe} = \frac{\left(1 + \frac{x}{4}\right)(16 \times 2 + 3,76 \times 14 \times 2)}{12 + x} \quad \boxed{R_s = \frac{34,32(4 + x)}{12 + x}}$$

## A.7 Taux de remplissage

Quantité d'essence injectée par tour :  $M_e = \frac{C_h}{60N}$

Quantité d'air admis par tour :  $M_{air} = \frac{R_s M_e}{r}$  ;  $M_{air} = \frac{R_s C_h}{60rN}$

Quantité d'air de référence par tour  $M_{réf} = \rho \frac{V}{2}$   $M_{réf} = \frac{pV}{2RT}$  avec  $R = 287 \text{ J/kg.K}$

V Cylindrée  
 p Pression ambiante (ou Pression collecteur)  
 T Température ambiante (ou Température admission collecteur)

Taux de remplissage :  $\tau_R = \frac{M_{air}}{M_{réf}}$   $\tau_R = \frac{R_s C_h R T}{30r N p V}$

## A.8 Emission spécifique

Par la définition de concentration (analyse des gaz secs, sauf pour  $[\text{CH}_x]$  ignoré), pour  $\text{CO}_2$  :

$$[\text{CO}_2] = \frac{a}{a + b + c + d + e + f + g + h - f}$$

De A.4, on obtient :

$$[\text{CO}_2] = \frac{a}{D}$$

avec :

$$a = \frac{3(x+4)[\text{CO}_2]}{(3x+4)[\text{CO}] + 3(x+4)[\text{CO}_2] + 12[\text{O}_2] + 6[\text{NO}]}$$

$$f = \frac{(x+4)\{(3x-2)[\text{CO}] + 3x[\text{CO}_2]\}}{2\{(3x+4)[\text{CO}] + 3(x+4)[\text{CO}_2] + 12[\text{O}_2] + 6[\text{NO}]\}}$$

$$D = 4,76\left(1 + \frac{x}{4}\right) + \frac{5[\text{CO}] + 6[\text{CH}_x]}{3[\text{CO}_2]} a - f$$

1 mole $\text{CH}_x$	$\Rightarrow$	a mole $\text{CO}_2$
$(12 + x)$ grammes $\text{CH}_x$	$\Rightarrow$	$D [\text{C}_A] M_A$ grammes espèce A
$C_s$ g/kwh $\text{CH}_x$	$\Rightarrow$	$\frac{D[\text{C}_A]M_A}{12+x} C_s$ g/kWh espèce A

avec :

- $C_A$  concentration volumique en espèce A en gaz secs
- $M_A$  masse molaire de l'espèce A.

Emission spécifique  $E_{sA}$  (g/kWh) :

$$\boxed{E_{sA} = \frac{D[\text{C}_A]M_A}{12+x} C_s}$$

### A.9 Rendement mécanique

On suppose :  $P_e = 4P_{e1}$  ;  $P_i = 4P_{i1}$  ;  $P_{e3} = 3P_{e1}$

On a

$$P_{e4} = P_e ; P_{e4} = 4P_{i1} - P_f ; P_{e3} = 3P_{i1} - P_f ; \text{ et}$$

$$P_{i1} = P_{e4} - P_{e3} ; P_f = 3P_{e4} - 4P_{e3}$$

Donc

$$\eta_m = 1 - \frac{P_f}{P_i} \text{ ou } \boxed{\eta_m = 1 - \frac{P_f}{4(P_{e4} - P_{e3})}}$$

### A.10 Rendement global

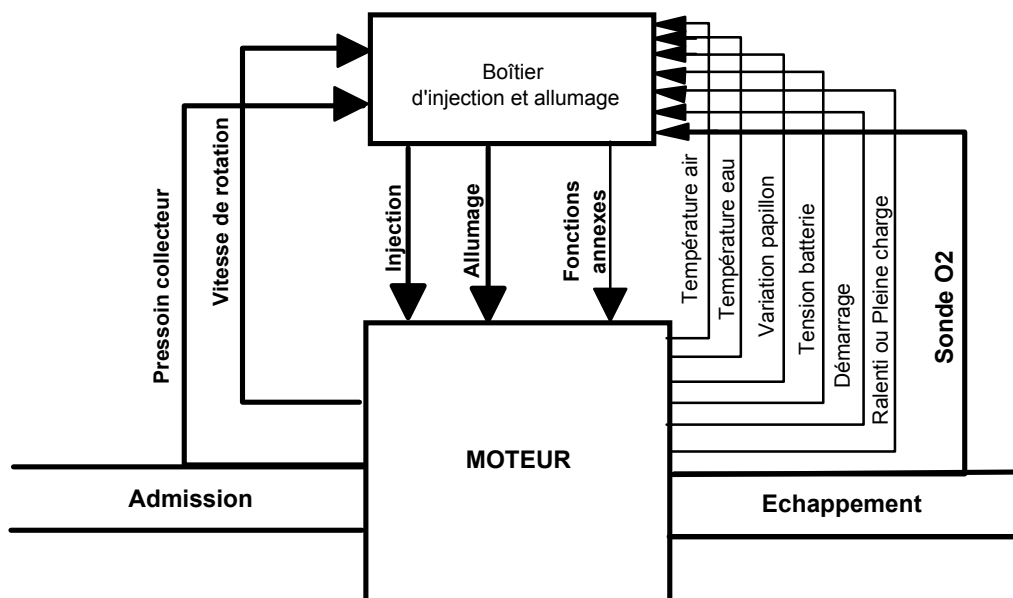
Energie contenue dans 1 gramme de carburant :  $E = \frac{P_{ci}}{1000}$  kJ

Energie contenue dans  $C_s$  grammes de carburant :  $E_s = \frac{P_{ci}}{1000} C_s$  kJ

En consommant  $C_s$  grammes de carburant, il est produit 1 kWh d'énergie mécanique (3600 kJ)  
Il en résulte que :

$$\boxed{\eta = \frac{3,6 \times 10^6}{C_s \times P_{ci}}}$$

avec  $P_{ci}$  kJ/kg  $C_s$  g/kWh



Régulation injection et allumage