

Stratégies d'injection et amélioration des performances

Nous pouvons observer que quelques moteurs, issus ou dérivés de la compétition⁽¹⁾, utilisent une technologie particulière comportant un injecteur "amont" placé au plus loin de la soupape d'admission dans la boîte à air. Cet injecteur s'ajoute à l'injecteur "aval" placé traditionnellement au plus près de la soupape, il est activé uniquement dans des situations proches de la puissance maximale (l'injecteur aval est alors inactif et ne débite plus).

L'orientation sportive de ces applications laisse à penser que cette stratégie peut amener un gain sur les performances, cette INFOTECH a pour objectif de mettre en évidence les phénomènes mis en jeu.

préambule

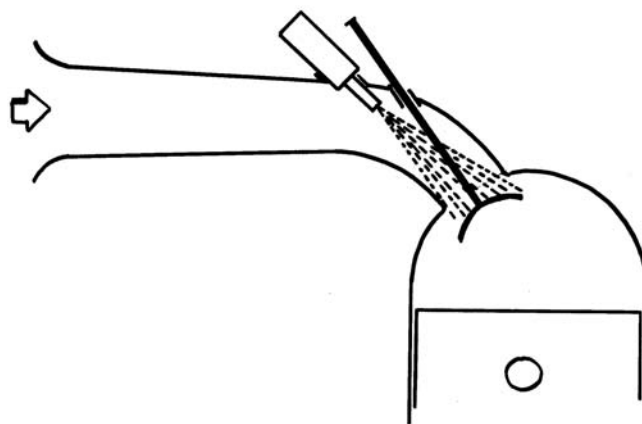
Le fait d'allonger le trajet de l'essence avant la chambre de combustion et de prolonger le contact air/carburant va favoriser la vaporisation du carburant avant que celui-ci soit introduit dans le cylindre. La question va donc se poser sous la forme : est-il souhaitable (d'un point de vue uniquement performances) d'introduire le carburant à l'état liquide dans la chambre ou bien au contraire, est-il préférable de le vaporiser avant son introduction.

J'ai préféré traiter directement le problème par des exemples appuyés sur des données chiffrées qui permettront de suivre les développements de manière plus imagée.

L'exemple sera traité pour de l'HEPTANE (C₇ H₁₆) à la stœchiométrie, cet hydrocarbure étant souvent utilisé dans les applications pédagogiques pour illustrer la combustion essence.

Premier cas : le carburant reste liquide dans l'air

Cette hypothèse est assez formelle mais nous pouvons imaginer une situation au plus près de ce cas.



Elle correspond à un injecteur placé très près de la soupape, injectant durant l'ouverture admission pour ne pas stocker le carburant derrière la soupape fermée (zone chaude). De plus la pression d'injection doit rester à des valeurs faibles

⁽¹⁾ montage courant en F1 depuis longtemps, utilisé par Ducati en Superbike et même présent sur un modèle plus commercial comme la Honda CBR 1000 RR présenté au mondial du 2 roues 2003

(usuellement autour de 3 bar) ce qui produit un "spray" de gouttelettes assez grosses, difficiles à vaporiser.

Notations utilisées : m : masse mélange (V_m : volume de mélange ; ρ_m : masse volumique du mélange)
 m_a : masse d'air (V_a : volume d'air ; ρ_a : masse volumique de l'air)
 m_c : masse carburant (V_c : volume de carburant ; ρ_c : masse volumique du carburant)
 P_{co} : pouvoir comburivore du carburant (= 1/dosage stoechio.)
 $P_{mél}$: pression du mélange
 T_c, T_a : température carburant et température air
 L_v : chaleur latente de vaporisation

Données :

$\rho_c = 680 \text{ kg/m}^3$ (état liquide)	Conditions initiales
$L_v = 310 \text{ kJ/kg}$	$T_c = 20^\circ\text{C}$ $P_{mél} = 1000 \text{ mb}$
$PCI = 44,4 \text{ MJ/kg}$	$T_a = 20^\circ\text{C}$ ρ_a dans ces conditions : $1,189 \text{ Kg/m}^3$
$P_{co} = 15,2$	

Objectif : il faut chiffrer l'énergie volumique du mélange introduit (air + carburant liquide) puisque c'est cette valeur qui détermine, pour un remplissage donné, l'énergie fournie au moteur par cycle et décide directement (par le rendement global) du couple atteint. Cette valeur sera exprimée en Joules par litre (W_v en J/L), unité pratique rapportée aux cylindrées habituelles.

Résolution :

$$(1) : m = m_a + m_c = m_a + \frac{m_a}{15,2} = m_a \left(1 + \frac{1}{15,2} \right) = 1,066 \cdot m_a$$

$$\left[\begin{array}{l} V_c = \frac{m_c}{\rho_c} = \frac{m_a}{15,2 \cdot \rho_c} \\ V_a = \frac{m_a}{\rho_a} \end{array} \right.$$

(Le gaz et le liquide occupent chacun leur volume donc les volumes sont additifs)

$$\rightarrow (2) : V_m = \frac{m_a}{15,2 \cdot \rho_c} + \frac{m_a}{\rho_a} = m_a \left(\frac{1}{15,2 \cdot \rho_c} + \frac{1}{\rho_a} \right)$$

$$(1) \text{ et } (2) : \rho_m = \frac{m}{V_m} = \frac{1,066 \cdot m_a}{m_a \left(\frac{1}{15,2 \cdot \rho_c} + \frac{1}{\rho_a} \right)} = 1,279 \text{ kg/m}^3 \quad \text{soit } 1,279 \cdot 10^{-3} \text{ kg/L}$$

dans 1 litre de mélange la masse de carburant présente est de :

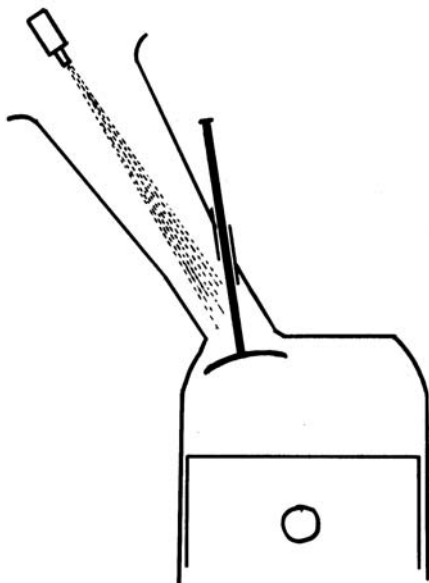
$$m_c / L = 1,279 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{16,2} \Rightarrow W_v = 1,279 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{16,2} \cdot 44,4 \cdot 10^6 = 3505 \text{ J/L}$$

Résultat : L'énergie volumique du mélange est de 3505 J/L avec le carburant en phase liquide pour un mélange à 1000 mb et 20 °C

Deuxième cas : le carburant est totalement vaporisé

L'organisation du système doit être adaptée pour rendre cette hypothèse acceptable :

- L'injecteur est éloigné au maximum de la soupape pour prolonger le temps de mise en contact de l'air et de l'essence : Il rejoint le boîtier à air au-dessus du "cornet" d'admission, exactement dans l'axe pour que le jet n'atteigne pas les parois.
- Pour la même raison l'angle de nappe du jet sera très réduit pour que le spray reste concentré dans le flux d'air.



- La pression d'injection sera elle nettement augmentée (pour atteindre des valeurs de 10 à 20 bar) ce qui permet d'obtenir des gouttes de carburant beaucoup plus petites qui se vaporisent rapidement.
- En considérant le carburant comme un paramètre de réglage nous pouvons aussi choisir une composition plus facile à vaporiser (en général à forte pression de vapeur saturante)

Cette vaporisation va avoir deux effets sur le moteur :

- Un effet négatif, dû à l'expansion du carburant de l'état liquide vers l'état gazeux, qui réduit la masse d'air introduite.
- Un effet positif, dû à la vaporisation du carburant, qui refroidit le mélange et augmente sa masse volumique (donc la masse introduite).

Il faut un calcul détaillé pour savoir si nous pouvons espérer un bilan positif.

Notations :

ρ_{vc} : masse volumique de la vapeur carburant en pression partielle

ρ_{pa} : masse volumique de l'air en pression partielle

P_{pc} : pression partielle carburant

P_{pa} : pression partielle air

M_c : masse molaire carburant (100g/mol pour l'Heptane)

M_a : masse molaire air (28,9g/mol pour l'air sec)

T_i : température initiale avant mélange (dans la boîte à air, toujours à 20°C)

T_f : température finale après vaporisation (à la soupape admission)

L_v : chaleur latente de vaporisation du carburant (310 kJ/kg pour l'heptane)

C_{pa} : chaleur massique air (1 kJ/kg)

C_{pc} : chaleur masique du carburant (de l'ordre de 2 kJ/kg pour les carburants usuels)

Calcul de la température après vaporisation T_f :

Nous considérerons pour cette vaporisation "idéale" que 100 % du carburant est vaporisé avant la soupape et que **la chaleur de vaporisation est totalement empruntée à l'air**, c'est à dire qu'il n'y a aucun échange de chaleur entre la tubulure et le mélange. Ce qui est assez réaliste au vu de l'organisation du système (décrit plus haut) et du fait que l'air est un mauvais conducteur de chaleur.

Une bonne isolation des tubulures admission par rapport à la chaleur culasse est de toute façon nécessaire (cales thermiques culasse/tubulure, écran thermique réfléchissant, utilisation des matériaux composites préférée à l'aluminium) car elle conditionne la température d'admission qui doit rester la plus basse possible sur les moteurs performants.

Cette hypothèse permet d'écrire :

- Chaleur apportée au carburant pour sa vaporisation : $mc.L_v$
- Chaleur perdue par l'air : $ma.C_{pa}.(T_i - T_f)$
- Chaleur perdue par le carburant de T_i à T_f : $mc.C_{pc}.(T_i - T_f)$

$$\text{D'où } \begin{cases} mc.L_v = ma.C_{pa}.(T_i - T_f) + mc.C_{pc}.(T_i - T_f) \\ \frac{mc}{ma} = \frac{1}{15,2} \end{cases}$$

$$\Rightarrow (T_i - T_f) = \frac{mc.L_v}{ma.C_{pa} + mc.C_{pc}} = \frac{mc.L_v}{mc.P_{co}.C_{pa} + mc.C_{pc}} = \frac{310.10^3}{15,2.1.10^3 + 2.10^3} = 18,02^\circ\text{C}$$

Nous prendrons pour la suite du Problème $T_f = 2^\circ\text{C}$

Remarque : la pression est toujours la même dans le conduit quel que soit le refroidissement produit par la vaporisation (toujours 1000 mb)

Calcul de l'énergie volumique du mélange à 2°C et 1000 mb :

Rappel : n nombre de moles, m masse de gaz, M masse molaire, R constante des gaz parfaits

$$\text{l'équation des gaz parfaits } \Rightarrow \left. \begin{array}{l} PV = nRT \\ PV = mrT \end{array} \right\} \rightarrow m = nM \text{ permet d'écrire } \rho = \frac{P}{r.T} = \frac{P.M}{R.T}$$

Dans notre cas nous avons un mélange de deux gaz en pressions partielles (vapeur de carburant et air) c'est à dire que, selon l'hypothèse des gaz parfaits, chacun des deux gaz occupe tout le volume disponible et apporte une part de la pression totale du mélange (dite alors pression partielle)⁽²⁾

⁽²⁾ rappelons qu'un gaz se comportant comme un gaz parfait est caractérisé par des distances intermoléculaires très grandes, ce qui fait que deux gaz mélangés n'ont aucune interaction ensemble, car la probabilité de chocs entre molécules est très faible. Par contre la pression sur les parois d'une enceinte dépend du nombre de chocs de molécules sur cette paroi (et de leur vitesse par la température) chacun des gaz contribue bien alors à la pression en fonction de la teneur à laquelle il est représenté dans l'enceinte.

d'où les 4 équations régissant ce mélange :

$$\left[\begin{array}{l} \rho_{vc} = \frac{P_{pc} \cdot M_c}{R \cdot T_f} \text{ et également } \rho_a = \frac{P_{pa} \cdot M_a}{R \cdot T_f} \\ P_{pc} + P_{pa} = 10^5 \text{ Pa} \quad \text{et} \quad \frac{\rho_{vc}}{\rho_a} = \frac{1}{15,2} \end{array} \right.$$

Cette fois ce sont les pressions partielles qui sont additionnées puisque les deux volumes de gaz sont confondus

ce qui permet de trouver les 4 inconnues P_{pa} , P_{pc} , ρ_a , ρ_c

$$P_{pc} \cdot M_c \cdot 15,2 = P_{pa} \cdot M_a \quad (\text{et } P_{pa} = 10^5 - P_{pc})$$

$$P_{pc} \cdot M_c \cdot 15,2 = 10^5 \cdot M_a - P_{pc} \cdot M_a$$

$$P_{pc} = \frac{10^5 \cdot M_a}{M_c \cdot 15,2 + M_a} = \boxed{1865 \text{ Pa}}$$

$$\text{d'où } P_{pa} = 10^5 - 1865 = \boxed{98135 \text{ Pa}}$$

nous pouvons maintenant calculer la masse volumique de la vapeur de carburant présente dans le mélange

$$\text{alors } \rho_{vc} = \frac{1865 \cdot 100 \cdot 10^{-3}}{8,314 \cdot 275} = 81,57 \cdot 10^{-3} \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{soit } \rho_{vc} = 81,57 \cdot 10^{-6} \text{ kg/L}$$

cette masse volumique permet de calculer l'énergie volumique du mélange à partir du P_{ci} d'où :

$$W_v = 81,57 \cdot 10^{-6} \cdot 44,4 \cdot 10^6 = \boxed{3622 \text{ J/L}}$$

CONCLUSION

La vaporisation complète du carburant peut donc dans notre exemple, apporter un gain de l'ordre de 3,5% et s'avère positive dans un objectif de performances.

Cette valeur peut être nettement plus importante avec des carburants possédant un P_{co} plus faible (par exemple avec des carburants alcoolisés) et des richesses plus importantes (la recherche de puissance impose des richesses de l'ordre de 1,2) puisque ces deux facteurs augmentent la quantité à vaporiser.

La composition du carburant peut également modifier de manière significative la chaleur latente de vaporisation (rappelons par exemple que la méthanol possède une valeur de L_v égale à 3,6 fois celle de l'heptane), les pétroliers prennent également ce facteur en compte pour produire des carburants adaptés à la compétition.

Tous ces facteurs additionnés peuvent conduire à des écarts ($T_i - T_f$) réels mesurés de 20 à 25 °C, ce qui représente un gain significatif.

Il faut cependant rappeler que ce gain potentiel est exploitable si le carburant est réchauffé uniquement par l'air, et non par les parois. L'architecture de l'admission et les stratégies d'injection devront s'adapter à cette contrainte.

Remarques :

- Dans ce document nous avons considéré que l'essence devait être vaporisée **avant** de franchir la soupape mais il est vrai que cette vaporisation aura toujours un effet positif, même si elle se produit dans le cylindre, tant que la soupape d'admission est ouverte. Le refroidissement contractera la charge gazeuse déjà admise et permettra d'augmenter le remplissage, le bénéfice en sera cependant réduit car l'essence empruntera de la chaleur aux parois de la chambre pour se vaporiser.
- Une vaporisation se produisant soupape fermée comme dans le cas des **injections directes** n'aura aucun effet sur le remplissage cependant l'effet thermique amènera indirectement des gains. La réduction de la température fin compression repousse la limite de cliquetis ce qui autorise des rapports volumétriques plus élevés et/ou des lois d'avances plus sévères.