

FONCTIONNEMENT TRANSITOIRE ET CONTRÔLE DE LA RICHESSE DES MOTEURS À ALLUMAGE COMMANDÉ À INJECTION MULTIPOINT

L. LE MOYNE, F. MAROTEAUX et M. MURAT

Laboratoire de Mécanique physique,
Université Paris VI¹

Sur les moteurs à allumage commandé à injection multipoint on observe des désadaptations de richesse lors de fonctionnement transitoire. Ces désadaptations sont dues au dépôt, sous forme de film liquide, du carburant injecté dans le collecteur. Elles peuvent être compensées par une gestion adéquate de la masse injectée. Ainsi, afin d'obtenir la masse de carburant qui maintient la richesse constante, nous avons développé un modèle bidimensionnel des écoulements dans le collecteur au cours du cycle moteur. Ce modèle décrit l'écoulement des gaz frais, des gouttes injectées, des gaz brûlés refoulés vers l'admission et du film sur les parois, sur le principe de la séparation des phases. Nous montrons que le modèle reproduit correctement le signal de richesse et comment il permet de supprimer les désadaptations. La mesure de richesse est faite à l'échappement avec une sonde à oxygène dont nous validons le fonctionnement en transitoire avec une corrélation à la pression maximale du cycle dans le cylindre.

TRANSIENT OPERATION AND AIR-FUEL RATIO
CONTROL OF SPARK-IGNITION
PORT-INJECTED ENGINES

Air-fuel ratio excursions are observed on port-injected spark ignition engines during transients. These excursions result from the liquid fuel film deposited on intake port. They can be compensated by controlling the injected fuel mass. In order to have the amount of fuel that keeps air-fuel ratio constant, we have developed a 2D model of flows in the intake port during engine cycle. This separate phases model describes the flow of fresh gases, injected droplets, hot burned gases and film on port walls. We show that the model effectively predicts the equivalence ratio and how it allows to eliminate excursions. Equivalence ratio measures are made with an oxygen sensor which functioning is validated during transients by correlating it to maximal pressure during engine cycle.

FUNCIONAMIENTO TRANSITORIO Y CONTROLADO
DE LA RIQUEZA DE LOS MOTORES DE ENCENDIDO
CONTROLADO CON INYECCIÓN MULTIPUNTO

En los motores de encendido controlado de inyección multipuntos se observan desadaptaciones de riqueza al producirse funcionamientos transitorios. Tales desadaptaciones se deben al depósito, en forma de película líquida, del carburante inyectado en el

(1) 2, place de la Gare de Ceinture,
78210 St-Cyr-l'École

colector y pueden ser compensadas por medio de una gestión adecuada de la masa inyectada. De este modo, y con objeto de obtener una masa de carburante capaz de mantener la riqueza a un valor constante, hemos desarrollado un modelo bidimensional de los flujos en el colector, durante el transcurso del ciclo motor. Este modelo describe el flujo de los gases nuevos, de las gotas inyectadas, de los gases consumidos impulsados hacia la admisión y de la película que se forma en las paredes, con respecto al principio de la separación de las fases. Se demuestra que el modelo reproduce correctamente la señal de riqueza y cómo permite así suprimir las desadaptaciones. La medición de la riqueza se efectúa en el escape, por medio de una sonda de oxígeno de la cual se valida el funcionamiento en régimen transitorio con una correlación con la presión máxima del ciclo en el cilindro.

INTRODUCTION

Les désadaptations de richesse en fonctionnement transitoire des moteurs à injection monopoint existent également sur les moteurs à injection multipoint. Ces problèmes constituent un obstacle à l'amélioration des performances de pollution et de consommation. Un contrôle extrêmement précis de la richesse du mélange pénétrant dans les cylindres est requis, en particulier depuis que les véhicules de série sont équipés de pots catalytiques. Le fonctionnement de ces catalyseurs d'oxydoréduction est optimal (absorption de 80 % des émissions de No_x , CO et HC), dans une fenêtre de richesse très étroite : 0,995 à 1,005.

Or en cycle urbain, un moteur est soumis fréquemment à des variations de charge et de vitesse de rotation, et pendant ces phases d'accélération ou de décélération, la richesse s'écarte de la valeur 1 si aucune compensation n'est prévue. Cela découle de l'existence d'un film liquide déposé sur les parois de l'admission issu d'une partie de l'essence injectée, dont le temps de réponse correspond à la durée de plusieurs centaines de cycles moteur. Le dosage prévu par le calculateur d'injection ne se fait donc pas immédiatement, ce qui se traduit par une augmentation des émissions de polluants car le catalyseur ne fonctionne pas dans la plage optimale, et par une augmentation de la consommation. Il y a donc nécessité de corriger ces désadaptations de richesse afin de la maintenir autour de 1 durant ces phases. Or les stratégies de correction actuelles ne sont pas basées sur la physique des phénomènes et sont mises au point à partir de procédés de contrôle et d'identification complexes [1] et [2]. Il est donc souhaitable, afin d'améliorer les stratégies de correction et de réduire le temps d'essais de calibration, de modéliser le fonctionnement à l'admission des moteurs de façon physique. Une telle modélisation permettrait de généraliser les procédés de mise au point des stratégies de correction.

Ces corrections utilisent la richesse comme valeur à réguler. La richesse est mesurée sur les véhicules actuels par une sonde à oxygène (ou sonde λ) placée dans le conduit d'échappement. Elle fournit une indication de l'état de la richesse par rapport à la valeur 1, qui est utilisée par le calculateur pour réguler l'injection de combustible.

Dans cet article, nous développons un modèle physique complet pour obtenir des lois de correction en fonctionnement transitoire du moteur. Ce modèle fournit le bilan des masses d'air et d'essence introduites

cycle à cycle. Nous utilisons pour la mesure de richesse et donc, pour la validation du modèle, une sonde à oxygène qui donne un signal proportionnel à la richesse des gaz d'échappement. Nous essayons alors de valider la mesure de richesse à l'échappement au cours de phases transitoires. Enfin, nous validons sur moteur les prédictions du modèle et les lois de correction calculées.

1 MODÈLE

Pour étudier l'évolution de la quantité de carburant aspirée par le moteur, nous avons développé un modèle qui décrit l'évolution de chaque phase en présence, depuis l'injecteur jusqu'au cylindre sur la base d'un modèle à phases séparées. Chaque phase (air, gouttes injectées, film déposé sur la paroi) est décrite grâce aux équations de bilan classiques (masse, quantité de mouvement et énergie). Les interactions entre phases (déposition, évaporation, entraînement) sont également prises en compte. Un certain nombre d'hypothèses simplificatrices sont adoptées dans la mise en équations et aboutissent aux systèmes énoncés ci-dessous. On suppose ainsi que les écoulements sont axisymétriques, on néglige les phénomènes de pulvérisation secondaire (scission, coalescence, arrachement), on suppose que les gaz frais ne se mélangent pas aux gaz brûlés et on suppose constante la température de gaz frais pendant le cycle.

Le modèle des gouttes est lagrangien discret et l'on suppose que la pulvérisation est un phénomène aléatoire dont on se donne les répartitions (répartition radiale de masse, répartition de masse par diamètre de goutte et répartition temporelle des diamètres de gouttes). Ainsi, les gouttes sont considérées sphériques, de diamètres initiaux différents, et l'on doit étudier tous les types de gouttes représentatifs du jet d'injection. Ensuite, le film est considéré d'un point de vue eulérien.

Les équations décrivant l'évolution des gouttes sont les suivantes :

– bilan de masse

$$* \frac{dm_d}{dt} = -\Gamma_{dv}$$

– bilan énergie

$$* \frac{dm_d T_d}{dt} = \frac{1}{C_p} [-\Gamma_{dv} L_{Lv} + \Phi_{md}]$$

– bilan de quantité de mouvement

$$* \frac{dm_d \bar{u}_d}{dt} = m_d \bar{g} + \bar{F}_d$$

Les expressions de ces termes sont les suivantes :

$$\Gamma_{dv} = \pi d_d \frac{D}{RT_d} P_m \cdot Sh \cdot \ln \left(\frac{P_m - P_v}{P_m - P_s} \right)$$

$$\Phi_{md} = h \pi d_d^2 (T_d - T_m) Z$$

$$Z = \frac{z}{e^z - 1} \quad z = \frac{\Gamma_{dv} C_p v}{\pi d_d \lambda_m Nu}$$

$$\bar{F}_d = \frac{\rho_m C_D \pi d_d^2}{8} (\bar{u}_m - \bar{u}_d) |\bar{u}_m - \bar{u}_d|$$

$$C_D = \left(0,63 + \frac{4,8}{\sqrt{Re_d}} \right)^2$$

Les équations du film sont :

– bilan de masse

$$* \frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial u_f e}{\partial z} = \frac{E_{df} - \Gamma_f}{\rho_f}$$

– bilan d'énergie

$$* \frac{\partial T_f}{\partial t} + \frac{\partial u_f T_f}{\partial z} = \frac{\lambda}{\rho_f C_p} \frac{\partial^2 T_f}{\partial r^2}$$

– bilan de quantité de mouvement

$$* \frac{\partial u_f}{\partial t} = v_f \frac{1}{r} \left(\frac{\partial u_f}{\partial r} + \frac{\partial^2 u_f}{\partial r^2} \right) + g \cos \gamma$$

$$\Gamma_f = \frac{D}{dRT_f} Sh \cdot (P_s - P_v)$$

Les conditions aux limites sont :

– à $r = d/2$:

$$u_f = 0$$

$$T_f = T_w \text{ (température de la paroi)}$$

– à $r = d/2 - e$:

$$-\mu_f \frac{\partial u_f}{\partial r} = \frac{f_m \rho_m u_m^2}{2}$$

$$-\lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial r} = \Gamma_f L - \phi_{mf}$$

avec :

$$\Phi_{md} = h(T_m - T_f)$$

Les modèles des gouttes et du film sont décrits de façon bidimensionnelle et l'atomisation secondaire (scission, coalescence, rebond, arrachement) est négligée. Le modèle de la phase gazeuse est monodimensionnel. L'ensemble des phases est étudié pendant tout le cycle moteur. La configuration de la tubulure d'admission est donnée à la figure 1 avec une représentation des gouttes et du film obtenue par le modèle.

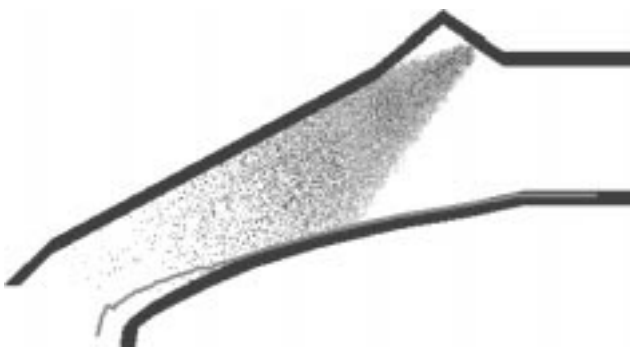


Figure 1

Configuration du jet et du film 5 ms après début de l'injection (le profil du film en bas de la tubulure a été amplifié 1000 fois).

Jet and film shape 5ms after beginning of injection (film profile on bottom port wall has been amplified 1000 times).

La masse d'essence entrant dans le cylindre prévue par le modèle dépend de la donnée des répartitions statistiques relatives à la pulvérisation. Des travaux menés par différents auteurs comme Senda [3] et Greiner [4] fournissent ce type de répartitions.

2 MESURE DE RICHESSE

La sonde de richesse utilisée dans nos mesures fournit une tension proportionnelle à la concentration en oxygène des gaz d'échappement en mélange pauvre et proportionnelle à la concentration en monoxyde de carbone en mélange riche. Le signal de la sonde est étalonné en calculant la richesse par une analyse des gaz d'échappement sur un banc moteur en différents fonctionnements stabilisés. Le fonctionnement de ce type de sonde est décrit par Sasayama [5].

On peut donc obtenir une mesure rapide de la richesse du mélange admis à condition que les phénomènes de combustion et de transfert des gaz ne perturbent pas la mesure. Afin de valider l'utilisation de ce type de sonde pour le contrôle moteur, nous avons effectué une comparaison des réponses de richesse pour différentes positions de la sonde ainsi qu'une comparaison de la richesse mesurée à l'échappement et de la richesse déduite d'une analyse de la combustion.

2.1 Position de la sonde

Dans les véhicules de série, la sonde λ est placée assez loin du moteur dans l'échappement, après la jonction des conduits de chaque cylindre. Il y a donc mélange et retard de la réponse du signal de richesse à cause du temps de transfert des gaz de la colonne d'échappement et de la dynamique propre de la sonde.

Pour étudier l'influence de la position de la sonde sur le signal, nous avons effectué un transitoire de richesse en augmentant brutalement la quantité d'essence injectée, mais en maintenant le régime (vitesse de rotation du moteur) et la charge constants (2000 tr/min et 333 mbar de pression à l'admission). Les seuls paramètres qui varient alors sont ceux liés à la dynamique de l'essence injectée et à la mesure. Pour minimiser les effets de la dynamique de l'essence, nous avons maintenu la température du liquide de refroidissement autour de 95 °C. À cette température, l'essence se vaporise facilement dans le conduit et donc, le film liquide (à dynamique lente) n'est pas prépondérant dans l'évolution de la richesse admise.

La figure 2 montre ce transitoire de richesse de consigne, ainsi que la réponse de la sonde proportionnelle placée dans la position classique loin dans la tubulure et celle de la sonde placée à 10 cm de la soupape d'échappement sur le conduit d'un seul cylindre. On remarque une notable différence des signaux.

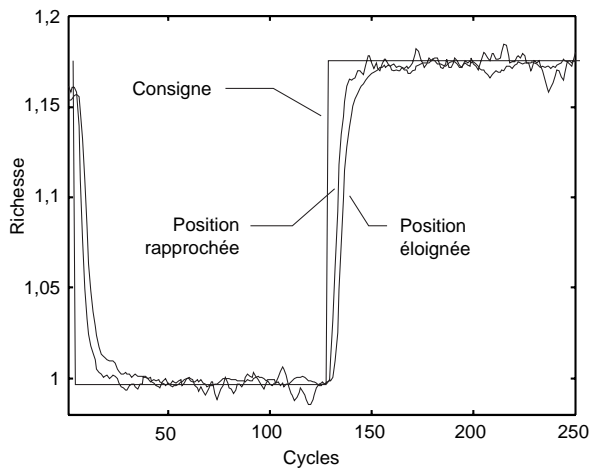


Figure 2

Transitoire de richesse. Réponse pour deux positions de la sonde.

Equivalence ratio transient. Sensor signal for two different sensor positions.

La position éloignée conduit à un filtrage du signal qu'il serait difficile de séparer des effets de la dynamique de l'essence. Au contraire, la position rapprochée assure que la mesure est effectuée pratiquement sans autre délai que le temps de réponse de la sonde. Or celui-ci est de l'ordre d'un cycle moteur à ce régime-là (60 ms à 2000 tr/min).

Il y a donc une notable amélioration de la mesure de richesse sur la position rapprochée bien que le signal soit plus irrégulier (ceci, probablement dû aux dispersions cycliques de la combustion). Nous avons adopté cette position rapprochée pour la suite de l'étude.

2.2 Validité de la mesure de richesse en transitoire

Afin de valider la mesure de richesse par la sonde, nous avons comparé cette mesure au calcul de la quantité de combustible brûlé déduite d'une analyse de combustion. On se place dans des conditions telles que seule la richesse varie : vitesse de rotation, charge, avance à l'allumage et température du liquide de refroidissement sont maintenues constantes.

Les variations de richesse sont obtenues en changeant, via le calculateur, la durée d'ouverture des injecteurs. Afin de maintenir les autres paramètres constants, on règle leur valeur et l'on travaille en mélange riche. Ainsi, le dégagement de chaleur varie peu et les performances du moteur sont à peu près constantes, ce qui permet une régulation plus efficace de la vitesse de rotation et de la pression dans le collecteur d'admission (charge).

La figure 3 montre, au cours d'un tel transitoire de richesse et pour différentes charges à 2000 tr/min, les facteurs de corrélation entre la richesse mesurée à l'échappement et les variations de différents observateurs de la combustion. Ceux-ci sont : la pression maximale au cours du cycle (P_{max}), la pression moyenne indiquée (PMI), l'angle de pression maximale dans le cycle (iP_{max}), le maximum du taux de dégagement de chaleur apparent ($t. \text{dég.}$) et la chaleur cumulée apparente dégagée à la fin de la combustion (dég. chal.).

Étant donné que seule la richesse varie au cours de ces essais, une bonne corrélation de l'un de ces observateurs indiquerait une mesure possible de la richesse dans la chambre de combustion. Remarquons que les facteurs de corrélation sont calculés sur trois transitoires

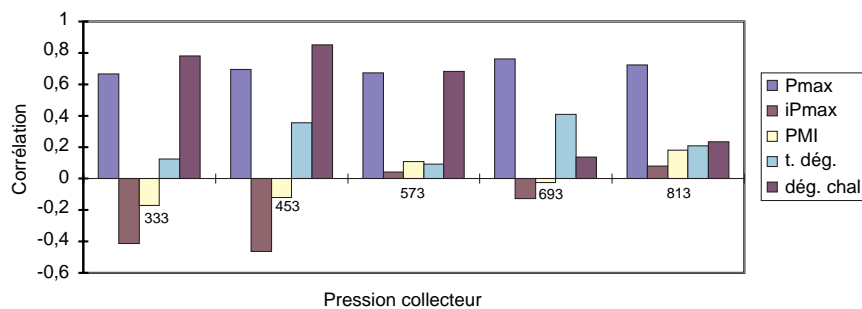


Figure 3

Facteurs de corrélation avec la richesse à l'échappement pour plusieurs charges.

Correlation factors of equivalence ratio for different loads.

identiques successifs avec les signaux bruts. Sur la figure, on voit que les meilleurs observateurs de la richesse sont la pression maximale du cycle et la chaleur dégagée par la combustion. Cette dernière est calculée en négligeant les pertes aux parois car on peut les supposer pratiquement constantes étant donné que tous les paramètres autres que la richesse sont constants. Une étude de ce type de corrélations a été menée par Torredemé [6] sur un nombre plus important d'observateurs.

La qualité de ces deux observateurs, et en particulier la faible corrélation de la PMI, peut s'expliquer par le fait que dans les conditions d'une combustion en mélange riche, comme c'est le cas ici, les performances du moteur sont sensibles surtout en termes de qualité de la combustion puisque la masse d'air disponible est constante. Les variations de chaleur dégagée résultent d'une combustion plus ou moins complète de la quantité d'essence qui varie avec la richesse. Cela a une influence certaine sur l'élévation de pression. Une autre influence s'ajoute à cette élévation de la pression du fait que la vitesse de réaction varie aussi avec la richesse. Les transitoires étant réalisés à richesse supérieure à 1 et à débit d'air constant, la puissance fournie par le moteur varie peu, tandis que la vitesse et la qualité de la réaction changent.

Ainsi, sur des transitoires de richesse, la pression maximale dans la chambre semble être un bon observateur de la richesse car elle est assez sensible aux variations de richesse et très facile à obtenir. Par contre, la chaleur dégagée apparente doit être obtenue par un calcul intermédiaire et comporte les pertes aux parois. Pour accéder à la masse de combustible brûlé, il faudrait estimer et soustraire à la chaleur dégagée ces dernières.

L'inconvénient principal de l'utilisation de la pression maximale réside dans le fait que les instabilités cycliques propres aux moteurs à allumage commandé brouillent les tendances générales de la pression maximale sur un grand nombre de cycles. Dans notre cas les qualités de la chambre de combustion nous permettent d'utiliser le signal de pression maximale, car bien qu'irrégulier, l'écart par rapport à la moyenne reste faible.

Pour valider la qualité de la pression maximale du cycle comme indicateur de la richesse, nous avons effectué des moyennes de pression maximale sur 200 cycles en conditions stationnaires pour différentes valeurs de la richesse (fig. 4). La valeur de 200 cycles correspond à une quantité suffisante de cycles pour que

la valeur moyenne soit stable par rapport au nombre de cycles pris en compte pour calculer la moyenne. Sur cette figure on remarque que la relation richesse-pression maximale sur des cycles moyens stationnaires est assez nette. La dépendance de la pression maximale vis-à-vis de la richesse est nettement marquée et pratiquement linéaire pour des valeurs de richesse comprises entre 1,05 et 1,2.

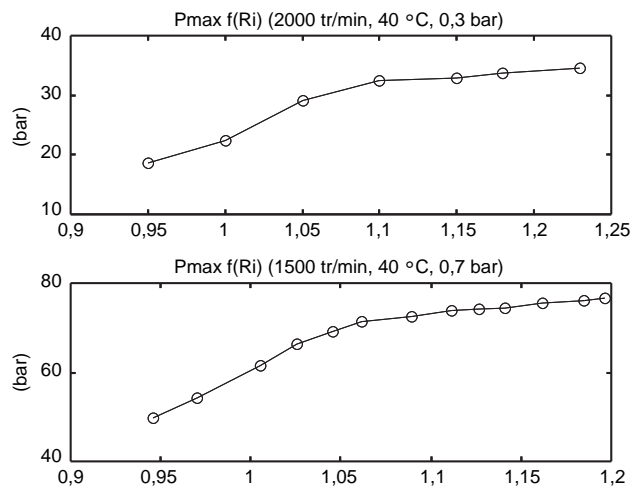


Figure 4

Pression maximale moyenne (200 cycles par point) en fonction de la richesse en régime stabilisé.

Mean maximal pressure (200 cycles for each point) as a function of equivalence ratio on permanent functioning.

Sur la figure 5 nous avons reproduit les signaux en fonction du temps, de la richesse à l'échappement et de la pression maximale rapportée à l'échelle de richesse par un facteur multiplicatif. On remarque que les deux signaux sont assez proches, avec un léger décalage de la richesse échappement (ligne lisse). Lorsque l'on rattrape ce retard en déplaçant la courbe de richesse échappement (deuxième graphe sur la figure 5), on constate que l'évolution globale des deux signaux est similaire. Ce retard d'un ou deux cycles est dû au temps de transfert des gaz d'échappement entre la soupape et la sonde et au temps de réponse de la sonde elle-même.

Cette relation étant valable pour des points de fonctionnement où seule la richesse varie, nous avons effectué des transitoires rapides de pression collecteur à vitesse de rotation et température du liquide de refroidissement constantes.

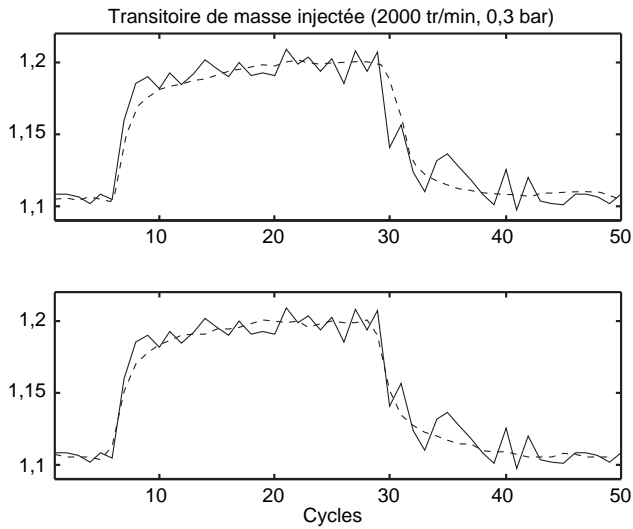


Figure 5

Transitoire de richesse - Réponse de la sonde à l'échappement (trait mixte) et de la pression maximale (trait continu) :
haut : signaux bruts,
bas : rattrapage du retard à l'échappement.

Equivalence ratio transient - Exhaust Sensor signal and maximal pressure:
top: untreated signals,
bottom: exhaust delay eliminated.

Ainsi, à l'échelle de temps des variations de richesse pour un moteur froid, qui sont de l'ordre de plusieurs centaines de cycles, un transitoire qui dure quelques cycles peut être considéré du point de vue de la pression collecteur et de l'avance comme la succession de deux états stationnaires. La richesse devient alors le seul paramètre variable. Plus précisément, puisque la pression collecteur se stabilise très vite, la masse d'air entrant dans le cylindre est alors pratiquement constante après le changement de niveau de fonctionnement. Il n'y a que la masse d'essence entrant dans le cylindre qui varie, comme dans le cas des transitoires de richesse précédents. La relation pression maximale-richesse doit donc rester valable si la sonde effectue toujours une mesure correcte. Si, de plus, les fluctuations de richesse sont situées entre les valeurs 1,05 et 1,2, cette relation est pratiquement linéaire.

La figure 6 montre au cours d'un transitoire de pression collecteur à régime constant et à froid (2000 tr/min, 40 °C), les variations de la pression collecteur, de l'avance, de la pression maximale et de la richesse au cours du transitoire. On peut noter que seule la richesse à l'échappement offre des évolutions lentes d'amplitude importante.

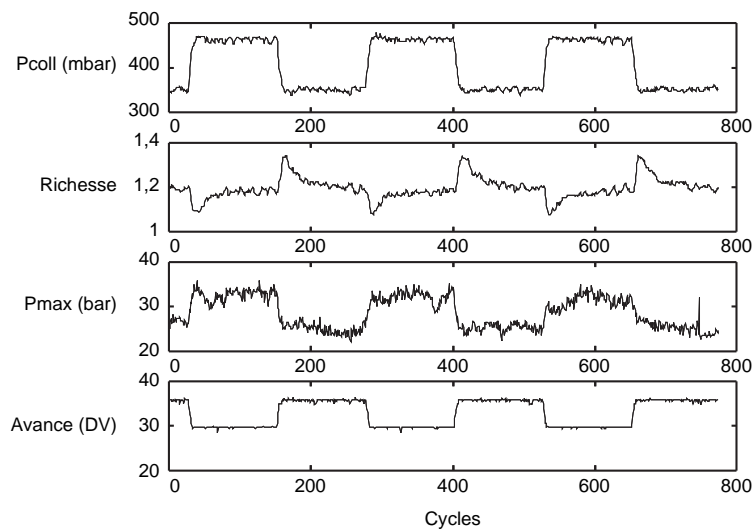


Figure 6

Pression collecteur, richesse échappement, pression maximale et avance lors du transitoire de pression collecteur.
Port pressure, equivalence ratio, maximal pressure and spark advance during port pressure transient.

Pour remonter à la quantité d'essence entrant dans le cylindre et pouvoir comparer directement avec le signal de pression maximale du cycle, on se sert du fait que la masse d'air admise dans le cylindre est directement proportionnelle à la pression collecteur. Le produit de la pression collecteur par la richesse mesurée par la sonde est donc, si la mesure de la sonde est correcte, proportionnel à la quantité d'essence qui entre dans le cylindre.

La figure 7 montre les variations de pression maximale et de richesse multipliée par la pression collecteur, normalisées par leur moyenne (chacun des signaux est divisé par sa propre moyenne pour le ramener autour de la valeur 1), sur des transitoires moyens de 250 cycles pour éliminer les perturbations des dispersions cycliques.

Nous avons donc effectué 18 transitoires identiques successifs et moyenné cycle à cycle pour constituer un transitoire moyen. On remarque sur la figure qu'il y a un bon accord des deux signaux, ce qui montre que la sonde effectuée dans la plage de richesses 1,05 à 1,2 une bonne mesure.

Ces résultats permettent d'affirmer que la mesure de richesse par ce type de sonde peut être représentative de la richesse initiale du mélange entrant dans le cylindre pendant des phases transitoires sous certaines

conditions. En particulier, l'éloignement de la sonde se traduit par une distorsion du signal et celle-ci ne peut être considérée comme un bon indicateur de la richesse du mélange à l'admission. Les conditions explorées ici ne concernent que des fonctionnements à vitesse de rotation constante.

Il est possible que lorsque la vitesse de rotation change, la mesure effectuée par la sonde ne soit pas représentative du mélange à l'admission.

En effet, nous avons observé qu'il existe un retard de la sonde même si elle est située à quelques centimètres de la soupape d'échappement. Si ce retard est imputable au transfert des gaz, il doit varier avec la vitesse de rotation et contribuer alors à une distorsion de la richesse mesurée.

Par ailleurs, il est possible aussi que lorsque les écarts de richesse sont trop importants, la sonde ne respecte pas la linéarité de la tension délivrée avec la richesse. Or ces zones de fonctionnement ne peuvent pas être explorées sur moteur à cause des limites d'inflammabilité. Il n'est pas facile d'étalonner la sonde au-delà de la richesse 1,3 ou en dessous de 0,9 car le moteur fonctionne avec difficulté.

Par contre, en fonctionnement transitoire ces valeurs de richesse peuvent être dépassées sans problème. Des

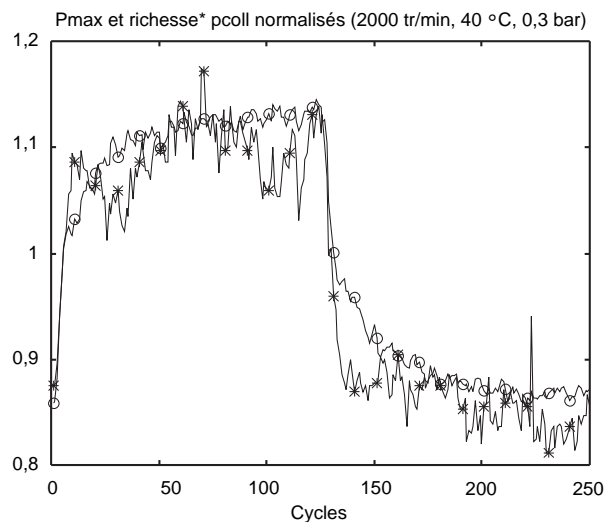


Figure 7

Pression maximale et produit pression collecteur par richesse échappement lors du transitoire de pression collecteur :

- pression collecteur*richesse,
- * pression maximale.

Maximal pressure and product of port pressure by exhaust equivalence ratio during port pressure transient:

- port pressure*equivalence ratio,
- * maximal pressure.

analyses ultérieures doivent permettre de valider la mesure à vitesse de rotation variable et pour des valeurs de richesse extrêmes.

3 RÉSULTATS

Le modèle décrit précédemment est appliqué à différents transitoires, l'évolution de la richesse obtenue par le modèle est comparée à celle mesurée sur moteur. Puis le modèle est mis en œuvre pour trouver une loi de correction pour chaque transitoire.

3.1 Transitoire de masse injectée

Nous avons appliqué le modèle au transitoire de masse injectée à vitesse de rotation, charge et température constantes. La figure 8 montre la richesse de consigne commandée par le calculateur ainsi que les réponses de richesse mesurées par la sonde et déduites de la pression maximale comparées à celle prévue par le modèle. Les résultats expérimentaux correspondent à ceux de la figure 5 et représentent donc la moyenne de

18 essais similaires. On peut constater que la réponse du modèle reproduit les richesses obtenues sur moteur. Nous n'appliquons pas ici de correction.

3.2 Transitoire de charge à régime constant

La figure 9 montre un transitoire de pression collecteur à vitesse de rotation du moteur constante (2000 tr/min). La température du liquide refroidissement est régulée à 40 °C pour simuler un fonctionnement du moteur à froid. La figure montre la comparaison des réponses de richesse mesurée et calculée sans correction. On note une bonne adéquation du modèle à la mesure. La figure 10 montre la réponse de richesse mesurée sur moteur avec l'application de la loi de correction calculée par le modèle ainsi que la loi de correction pour ce transitoire. La loi de correction est donnée comme la masse d'essence à ajouter par rapport à la quantité stœchiométrique. On remarque que la loi de correction prévue par le modèle diminue considérablement la désadaptation de richesse.

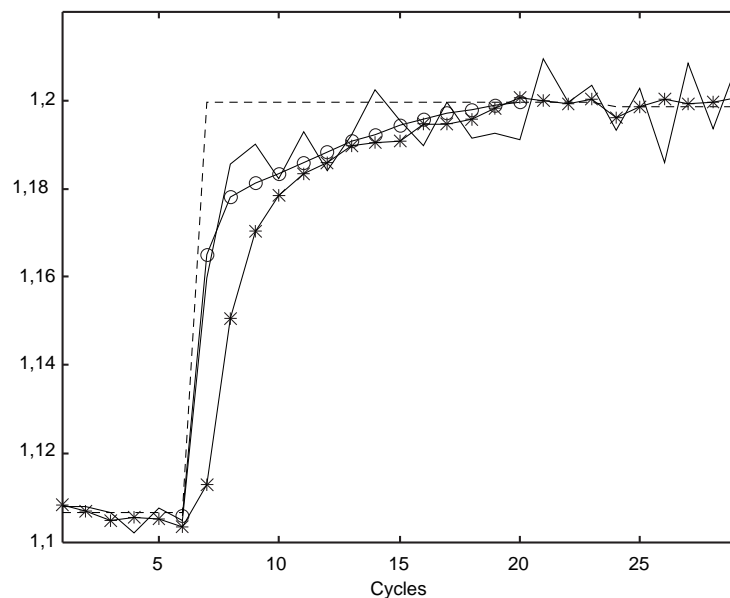


Figure 8

Transitoire de masse injectée:

-- consigne de richesse ○ richesse modélisée — pression maximale du cycle * richesse à l'échappement.

Injected mass transient:

-- equivalence ratio order ○ model equivalence ratio — cycle maximal pressure * exhaust equivalence ratio.

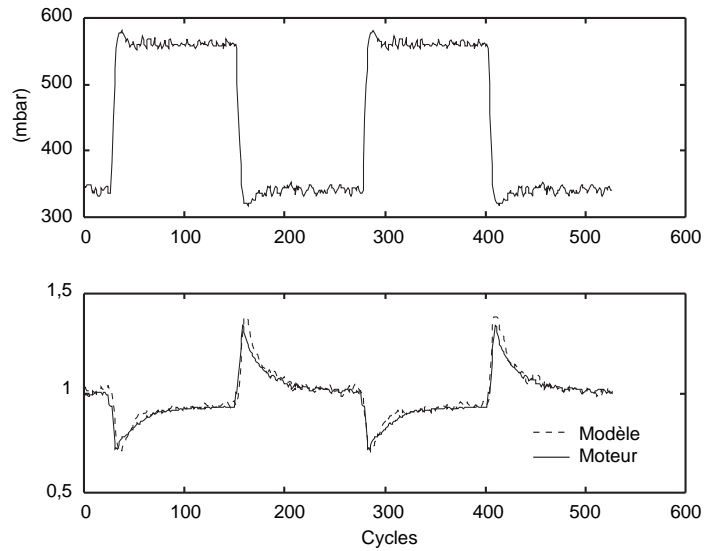


Figure 9

Transitoire de charge à vitesse constante - Pression collecteur (haut) et richesses mesurée et prévue par le modèle (bas).
Load transient at constant speed - Port pressure (top) and equivalence ratios measured and modeled (bottom).

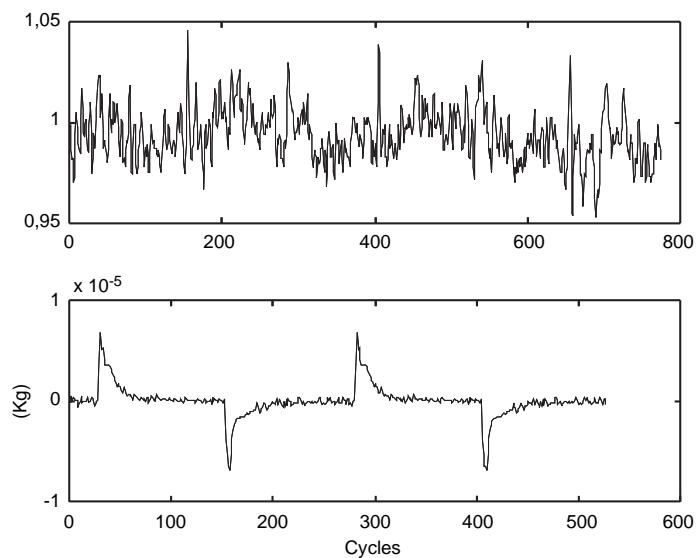


Figure 10

Transitoire de charge à vitesse constante : richesse mesurée avec correction et masse relative d'essence pour la correction.
Load transient at constant speed: Equivalence ratio measured with compensation and relative fuel mass for compensation.

3.3 Transitoire de charge à vitesse variable

Pour se rapprocher d'un fonctionnement réel sur véhicule, nous avons effectué un transitoire de charge en ne régulant pas le régime. La figure 11 montre les évolutions de la pression et du régime pendant le transitoire. La température du liquide de refroidissement est là aussi de 40 °C. La figure montre aussi l'évolution de la richesse mesurée sur moteur ainsi que celle calculée par le modèle sans correction. On remarque que le modèle ne prévoit pas correctement la désadaptation de richesse lors des décélérations.

La figure 12 montre la loi de correction prévue par le modèle ainsi que la richesse mesurée sur moteur lorsqu'on applique la loi de correction. On retrouve sur la richesse corrigée les écarts observés sur la richesse non corrigée, en particulier lors des décélérations. En plus des limitations du modèle, on doit faire mention ici du fait que la mesure de richesse est effectuée dans des conditions que nous n'avons pas encore validées : vitesse variable et mélange très riche. Étant donné le

gain considérable obtenu par la correction calculée avec le modèle, il est possible qu'une partie de l'écart observé sur la prévision de la richesse non corrigée soit imputable au fonctionnement de la sonde.

CONCLUSION

Nous avons constaté que la position de la sonde de mesure de richesse à l'échappement des moteurs a une influence non négligeable sur le signal de richesse obtenu en fonctionnement transitoire. Il nous semble souhaitable de minimiser la distance entre les soupapes d'échappement et la sonde, et de travailler sur l'échappement d'un seul cylindre. Étant donné les divergences que nous avons observées entre ces conditions et la position de mesure classique sur les véhicules, il semble recommandable d'adopter une nouvelle disposition de la sonde pour effectuer la régulation de richesse en transitoire. En rapprochant la sonde des soupapes d'échappement et en effectuant des mesures à vitesse de rotation constante et à richesse supérieure à 1, nous

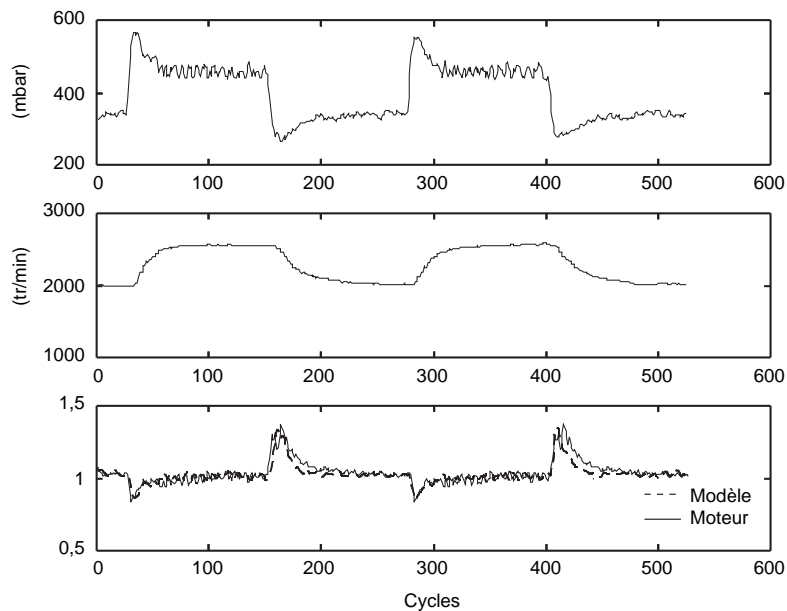


Figure 11

Transitoire de charge - Pression collecteur, vitesse de rotation et richesses mesurée et prévue par le modèle.
Load transient - port pressure, engine speed and equivalence ratio measured and modeled.

avons pu valider le signal de la sonde en le comparant à d'autres observateurs de la richesse. Des essais supplémentaires doivent être menés afin de vérifier la validité de la mesure par la sonde de richesse pour d'autres conditions de fonctionnement transitoire. Par ailleurs, nous avons développé un modèle physique tenant compte de l'ensemble des phénomènes importants ayant lieu à l'admission, qui permet de prévoir correctement les désadaptations de richesse sur moteur. La pertinence des écarts prévus par le modèle peut être contrôlée avec la mesure de richesse décrite précédemment.

Ce modèle nous a permis d'étudier différents types de transitoires et de proposer pour chacun une évolution particulière au cours du temps de l'injection qui élimine les écarts de richesse. Son principal avantage étant sa simplicité, il permet d'obtenir en quelques minutes sur un petit ordinateur la réponse de richesse en fonction d'un transitoire et d'une correction particulière, ou de trouver la correction d'un transitoire donné.

Le domaine de validité du modèle proposé reste encore à explorer. Mais il est, à l'heure actuelle, appliqué industriellement et semble satisfaire aux besoins pour lesquels il a été développé :

- proposer des fonctions de correction efficaces pour un moteur donné à partir de données géométriques et de fonctionnement ;
- éliminer l'exploration systématique des corrections de tous les transitoires possibles en simulant le comportement réel du moteur ;
- être facilement exploitable sur banc moteur et applicable à tout moteur de type injection multipoint.

Afin de compléter le contrôle des écarts de richesse, il reste à étudier l'influence de l'amélioration de la mesure de richesse sur les stratégies déjà existantes sur calculateur et de les parfaire à l'aide des résultats fournis par la modélisation. Dans le domaine théorique, le modèle peut être complété et étendu au cadre tridimensionnel et devrait pouvoir être appliqué aux moteurs à injection directe moyennant l'adaptation des écoulements et des corrélations.

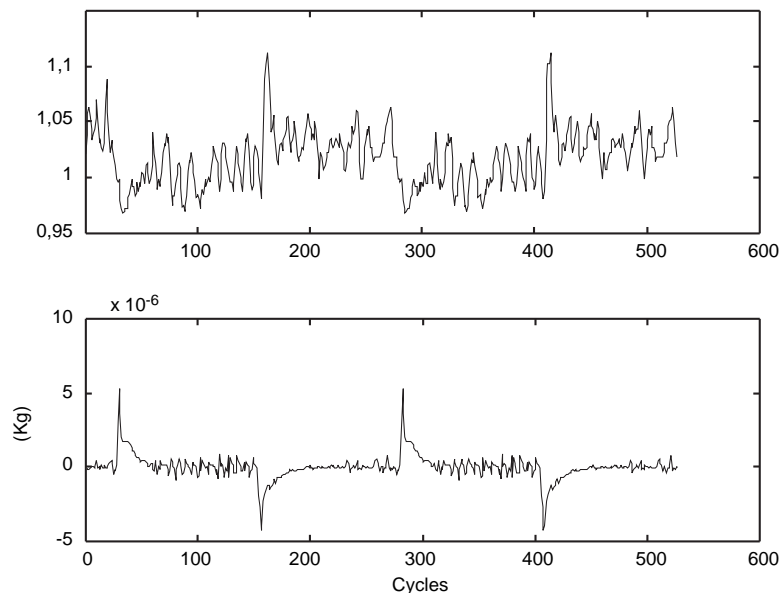


Figure 12

Transitoire de charge - Richesse mesurée avec correction et masse d'essence relative à injecter pour la correction.
Load transient - Equivalence ratio measured with compensation and relative fuel mass for compensation.

NOTATIONS

Pour les variables physiques nous utilisons la notation suivante :

C_p	capacité calorifique à pression constante de la goutte
L_{Lv}	chaleur latente de vaporisation
Γ_{dv}	débit évaporé de la goutte vers le mélange
Φ_{md}	flux de chaleur convecté du mélange vers la goutte
\vec{F}_d	traînée de la goutte
Γ_f	débit évaporé du film
C_D	coefficient de traînée
C_{pf}	capacité calorifique à pression constante du film
D	coefficient de diffusion moléculaire
d	diamètre de la tubulure
e	épaisseur
E_{df}	débit de masse déposée des gouttes vers le film
f_m	coefficient de frottement à la surface du film
ϕ_{mf}	flux de chaleur convecté du mélange vers le film
γ	angle entre la paroi de la tubulure et la verticale
h	coefficient de convection
L	chaleur latente de vaporisation
λ	Conductivité thermique du film
m	masse
P	pression
P_s	pression de saturation
P_v	pression de vapeur
R	constante des gaz parfaits
r	coordonnée radiale

ρ	masse volumique
Re_g	nombre de Reynolds de la goutte
Sh	nombre de Sherwood de la goutte
T	température
u	vitesse
z	coordonnée axiale
Z	facteur de correction de la vaporisation.

L'indice d est relatif aux gouttes, f au film et m au mélange gazeux air-essence.

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier *Renault SA* pour l'appui apporté à la réalisation de cette étude.

RÉFÉRENCES

- 1 Maki H. et S. Akazaki, Real time engine control using STR feedback system. *SAE Paper* 950007.
- 2 Almkvist G. et S. Eriksson, A study of air to fuel transient response and compensation with different fuels. *SAE Paper* 941931.
- 3 Senda J., Nishikori T., Tsukamoto T. et H. Fujimoto, Atomization of spray under low-pressure field from pintle type gasoline injector. *SAE Paper* 920382.
- 4 Greiner M., Romman P. et U. Steinbrenner, Bosch fuel injectors - New developments. *SAE Paper* 870124.
- 5 T. Sasayama, An advanced computer controller engine system employing new combustion monitoring sensors. *SAE Paper* 865077.
- 6 Torredemé S., Chaumerliac V., Nuglich H.J., Charnay G. et S. Boverie (1993), Caractérisations de la pression cylindre dans un moteur à allumage commandé à des fins de contrôle. *Entropie*, n° 174/175.

Manuscrit définitif reçu en juin 1997