

Contrôle de l'auto inflammation des mélanges d'isooctane et n-heptane en combustion HCCI.

Boussad BOUMEDDANE

Laboratoire moteurs à combustion interne

Département de génie mécanique, faculté des sciences de l'ingénieur, Université Saad DAHLEB
BLIDA BP 270, Route de Soumaa 09000 BLIDA, ALGERIE.

b.boumeddane@mail.univ-blida.dz

Résumé - Le contrôle de l'auto inflammation des moteurs HCCI dans une gamme de vitesses et de charges étendues représente le plus grand défi à surmonter dans le domaine de la R&D de ce type de moteur. Pour obtenir de plus, de meilleures performances du moteur, une auto inflammation du mélange au voisinage du PMH est nécessaire. Pour cela le contrôle de la température, de la pression et de la composition du mélange durant le cycle de fonctionnement est indispensable. La compréhension de l'influence de certains paramètres sur le moment et la durée de l'auto inflammation de ces types de combustibles engendre un meilleur contrôle de la combustion de ces types de moteurs et un élargissement de leurs zone de fonctionnement. Plusieurs techniques seront exposées dans ce travail pour contrôler le moment et la durée de l'auto inflammation de ces combustibles.

Nomenclature

\dot{m}_j	débits aux soupapes	$\frac{dQ_{hr}}{dt}$	dégagement de chaleur
$\sum_j h_j \dot{m}_j$	échanges de chaleur aux soupapes	$\frac{dQ_{ht}}{dt}$	échange de chaleur aux parois
$(\Delta h_f)_k$	enthalpie de formation de l'espèce k		

1. Introduction

L'auto inflammation dans les moteurs HCCI est fortement contrôlée par la cinétique chimique d'oxydation du carburant. Les conditions initiales en début de compression et les échanges de chaleur aux parois interviennent indirectement sur l'auto inflammation à travers l'effet thermique. Plusieurs modèles cinétiques de combustion des combustibles de référence existent dans la littérature scientifique, ces mécanismes réactionnels d'oxydation sont soit réduits ou complets. Les mécanismes réduits de cinétique chimique d'oxydation des combustibles primaires de référence sont les mieux adaptés pour la simulation numérique des cycles de fonctionnement des moteurs HCCI à cause des temps de calcul raisonnables obtenus sur les ordinateurs personnels. Le mécanisme réactionnel réduit d'oxydation des mélanges d'isooctane et d'heptane développé par TANAKA & al [1,2] est très adapté pour la simulation numérique de la combustion d'une essence de remplacement ayant des caractéristiques proches de l'essence réelle. Ce mécanisme est composé de 55 réactions et de 32 espèces.

Bien que les moteurs HCCI regroupent les avantages des moteurs à allumage par compression (haut rendement) et des moteurs à allumage commandés (charge homogène), il reste néanmoins certains problèmes à surmonter tel que le problème du contrôle de l'allumage et le démarrage à froid. La variation des conditions de fonctionnement du moteur influe grandement sur l'auto allumage de ce type de moteur. L'état thermodynamique du mélange (température, pression et composition du mélange) en début de compression et les températures de parois doivent être connus pour pouvoir déterminer avec exactitude le moment et la durée de l'auto inflammation ainsi que le taux de dégagement de chaleur.

Le choix de certaines conditions initiales peut engendrer dans certains cas soit à des ratés d'allumage, soit un fonctionnement détonnant à forte charge ou soit à un mélange partiellement brûlé. Le contrôle des conditions initiales en début de compression et des conditions aux limites aux parois du cylindre et des conditions aux collecteurs d'admission et d'échappement peut engendrer un allumage au voisinage du PMH et des performances accrues du moteur. Le moteur à taux de compression variable et la distribution variable (croisement négatif de soupapes) constituent des techniques efficaces de contrôle de l'allumage.

L'auto allumage des mélanges d'iso octane et d'heptane avec l'air en mode HCCI est fortement contrôlé par l'effet thermique, l'effet chimique et l'effet physique. La température initiale, la pression initiale, la température des parois et la température des gaz résiduels produisent un effet thermique sur la durée et le moment de l'auto allumage. Par contre la présence de certaines espèces dans les gaz brûlés, la richesse du mélange et la proportion d'iso octane dans le combustible produisent à leurs tours un effet chimique sur le phénomène de l'auto allumage. Enfin le taux de compression et la vitesse de rotation produisent un effet physique sur l'auto allumage.

Durant ces dernières années plusieurs travaux de recherche ont été menés à travers le monde pour comprendre le phénomène d'auto allumage des mélanges de combustibles de référence en mode HCCI. La compréhension de l'influence de certains paramètres sur le moment et la durée de l'auto inflammation de ces types de combustibles engendre un meilleur contrôle de la combustion de ces types de moteurs et un élargissement de leur zone de fonctionnement. Dans ce travail plusieurs techniques ont été étudiées pour contrôler le moment et la durée de l'auto inflammation de ces combustibles, à savoir :

- 1) Le piégeage de gaz résiduel (EGR interne).
- 2) Mélange de gaz d'échappement avec la charge fraîche (EGR externe).
- 3) Taux de compression variable.
- 4) Augmentation de la température de paroi du cylindre par chauffage des parois.
- 5) Chauffage de la charge fraîche avant l'entrée dans le cylindre.
- 6) Utilisation de mélange de combustible ayant des indices d'octane différents.
- 7) Suralimentation
- 8) Variation de la richesse du mélange

2. Equations gouvernantes

La détermination du moment et de la durée de l'auto inflammation du mélange réactif requiert la connaissance de l'évolution de la température à l'intérieur du cylindre en fonction du degré de rotation du vilebrequin. La résolution numérique des équations de conservation décrivant l'évolution du mélange réactif durant le cycle de fonctionnement du moteur permet la détermination de l'évolution temporelle des paramètres thermodynamiques à l'intérieur du cylindre.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dm}{dt} = \sum_j \dot{m}_j \\ \frac{d(mu)}{dt} = \left\{ -P \frac{dV}{dt} + \frac{dQ_{ht}}{dt} + \frac{dQ_{hr}}{dt} + \sum_j h_j \dot{m}_j \right\} \\ \frac{dm_k}{dt} = VW_s \dot{\omega}_k \quad k = 1, \dots, N_{sp} \\ \frac{dQ_{hr}}{dt} = \sum_k \frac{dm_k}{dt} (\Delta h_f)_k \quad k = 1, \dots, N_{sp} \end{array} \right. \quad (1)$$

Les équations de conservation décrivant un réacteur homogène à volume variable et possédant des conditions aux limites variables dans le temps sont données par le système précédent d'équations différentielles ordinaires EDO de 1^{er} ordre, non linéaires et de type raide

Les différents phénomènes se produisant dans un moteur, tels que le transfert de masse et de chaleur à travers les soupapes, le transfert de chaleur aux parois et la cinétique chimique d'oxydation du combustible avec l'air sont pris en compte dans la modélisation par différents sous modèles décrivant ces phénomènes.

Les équations différentielles gouvernant la cinétique chimique de production ou destruction des espèces chimiques sont des équations du type raide et leurs intégrations nécessitent des algorithmes appropriés et des pas de temps très réduits pour suivre l'évolution très raide de la température au cours de la combustion. L'intégrateur de D.Mott & al [3] de type prédicteur correcteur est utilisé dans cette étude à cause de sa grande stabilité numérique dès lors que la condition sur le pas de temps est respectée. Par contre les deux premières équations du système représentant la conservation de la masse et de l'énergie sont du type non raide et leurs intégration numérique dans le temps est effectuée en utilisant l'algorithme prédicteur correcteur d'Adams Bashforth de quatrième ordre.

La simulation d'un point de fonctionnement est réalisée sur plusieurs cycles de calcul pour vérifier la périodicité de tous les paramètres thermodynamiques et déterminer des conditions en début de compression exactes permettant une prédiction correcte du moment et la durée de l'auto inflammation du mélange réactif. La simulation numérique est basée sur un model zéro dimensionnel à une seule zone et tient compte de la variation de la masse, de l'énergie et des espèces durant le cycle de fonctionnement du moteur

3. Résultats et discussion

Le code de calcul établi pour la simulation du cycle de fonctionnement d'un moteur en mode HCCI permet de déterminer d'une part le moment et la durée de l'auto inflammation et d'autre part les performances et les niveaux de pollution. De plus une étude paramétrique a été effectuée pour déterminer l'influence de différents paramètres sur l'auto inflammation des mélanges d'iso octane et n-heptane [4]. Les différents défis qui freinent le développement des moteurs HCCI sont :

- Le contrôle du moment de l'auto inflammation et du taux de dégagement de chaleurs pour plusieurs vitesses de rotation et charges du moteur.
- Elargissement de la zone de fonctionnement pour les charges élevées du moteur.
- Le démarrage à froid et le comportement du moteur lors d'une variation de charge (les régimes transitoires : accélération/décélération)
- Réduction du taux de monoxyde de carbone

Dans ce travail, on va montrer l'effet des différentes techniques sur le contrôle de l'auto allumage lors d'un démarrage à froid, ou lorsque l'oxydation est partielle ou bien lors d'un fonctionnement à forte charge.

3.1. Moteur à taux de compression variable.

Au démarrage à froid, la température du mélange de gaz en fin de compression sera réduite car la charge fraîche qui n'ayant pas été préchauffée préalablement à l'intérieur du conduit d'admission continue à céder de la chaleur vers les parois froides du cylindre. La température nécessaire pour démarrer la cinétique chimique n'ayant pas été atteinte et l'effet thermique de la compression insuffisant, le mélange réactif est donc partiellement ou pas oxydé. Un

mécanisme compensatoire de l'effet thermique insuffisant consiste à augmenter le taux de compression du moteur. La figure 1 montre que l'augmentation du taux de compression du moteur provoque une diminution du délai d'inflammation et donc une avance à l'allumage. Même avec des taux de compression aussi élevés l'auto inflammation n'a pu se produire qu'avec des mélanges contenant une proportion importante d'heptane RON10 qui présente une faible résistance à l'auto allumage. Des conditions extrêmes ont été simulées dans ce cas de démarrage à froid en prenant une température de paroi de 300K et une température de l'air admis dans le moteur de 300K également et une richesse de $\phi=0.4$.

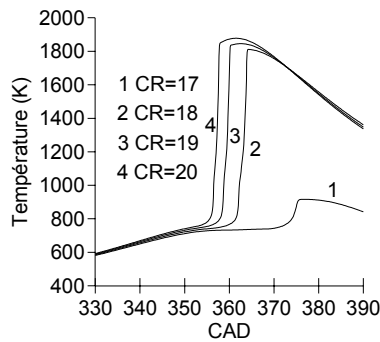


Figure 1 : Influence du taux de compression
 $T_p=300K$, RON 10, $\phi=0.4$

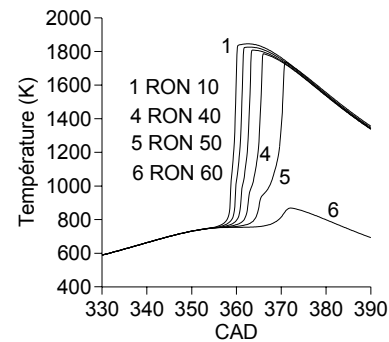


Figure 2 : Influence de l'indice d'octane
 $CR=19$, $\phi=0.4$, $T_p=300K$

3.2. Moteur bi-carburant.

Une autre alternative pour résoudre le problème du démarrage à froid consiste à utiliser deux combustibles en l'occurrence le n-heptane et l'iso-octane qui possèdent respectivement des indices d'octane de 0 et 100. Le premier combustible primaire de référence résiste moins à la détonation et s'enflamme rapidement et le second par contre possède une très grande résistance à la détonation et s'enflamme difficilement. Une plus grande proportion de n-heptane peut donc être utilisée au démarrage à froid du moteur pour faciliter l'auto allumage du mélange et à forte charge du moteur il est préconisé une forte proportion d'iso-octane pour résister à la détonation et réduire les pics de pression. La figure 2 montre que l'augmentation de la proportion de n-heptane dans le mélange provoque une diminution du délai d'inflammation et une augmentation de l'avance à l'allumage par rapport au PMH. Les mêmes conditions extrêmes ont été prises dans ce cas pour montrer l'efficacité de cette technique permettant de contrôler l'auto inflammation.

3.3. Moteur à distribution variable.

La technique de distribution variable consistant à fermer prématurément la soupape d'échappement et ouvrir tardivement la soupape d'admission provoque un piégeage d'une quantité non négligeable de gaz résiduels à l'intérieur du cylindre. Ce croisement négatif des soupapes induit une augmentation du taux de gaz résiduels par recirculation interne des gaz brûlés. L'emprisonnement des gaz brûlés chauds (EGR interne) ou la réintroduction des gaz d'échappement (EGR externe) augmente la température du mélange en début de compression et réduit par voie de conséquence le délai d'auto inflammation. En élargissant de plus en plus le croisement de soupapes, le taux de gaz résiduels augmente et l'effet thermique et chimique devient de plus en plus accru et le moment de l'auto allumage ajusté. L'augmentation du taux de gaz brûlés jusqu'à une certaine limite provoque une réduction du délai d'inflammation et une avance du début d'allumage. L'analyse de la figure 3 montre que

l'élargissement du croisement de soupapes provoque une perte de performances du moteur à cause de la dilution de la charge fraîche par les gaz résiduels.

Une autre alternative pour surmonter le problème du démarrage à froid est l'utilisation de la suralimentation qui permet d'avoir des pressions et des températures en début de compression dans le moteur capables de provoquer l'auto inflammation du mélange. La figure 4 montre qu'au fur et à mesure qu'on augmente la pression de suralimentation, le délai d'auto inflammation diminue et l'avance augmente. En choisissant des conditions extrêmes de température de paroi et un taux de compression de 12, l'auto inflammation est possible. Pour augmenter la température de l'air à la sortie du compresseur et avant introduction dans le cylindre un réchauffeur d'air électrique est utilisé.

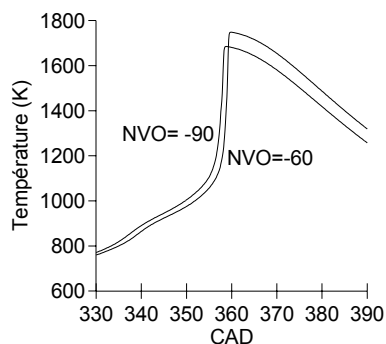


Figure 3 : Influence du croisement négatif de soupapes $CR=14$, $RON\ 90$, $\phi=0.4$, $T_{in}=420K$, $T_p=300K$

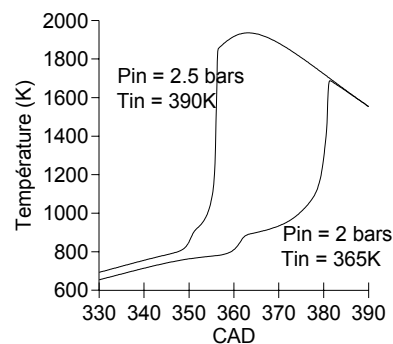


Figure 4 : Influence de la suralimentation $CR=12$, $RON\ 90$, $\phi=0.4$, $T_{in}=420K$, $T_p=300K$

3.4. Préchauffage de l'air.

Le préchauffage de l'air à la sortie du compresseur permet d'atteindre à la fin de la compression des températures suffisantes pour déclencher la cinétique chimique d'oxydation du mélange. L'effet thermique produit par le chauffage de la charge introduite permet de compenser les pertes de chaleur aux parois et initier l'auto inflammation du mélange. La figure 5, montre que l'augmentation de la température de l'air admis engendre une diminution du délai d'inflammation et une augmentation de l'avance à l'allumage.

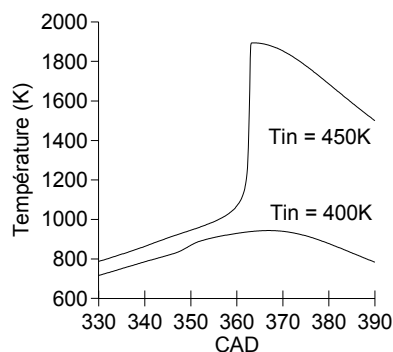


Figure 5 : Influence du préchauffage de l'air avant l'admission $CR=14$, $RON\ 90$, $\phi=0.4$, $P_{in} = 1\ bar$, $T_p=300K$

La courbe 1 de la figure 5 montre un cas d'oxydation partielle du combustible du à un effet thermique insuffisant, suite à un préchauffage moins important. En ayant choisi les mêmes conditions que celles de la figure 4, on montre que la recirculation interne des gaz brûlés par la technique du croisement négatif de soupapes permet d'éviter ce problème d'oxydation

partielle du combustible. La conjonction de la pré compression et du préchauffage de l'air avant l'introduction dans le cylindre évite le phénomène de l'oxydation partielle, qui est considérée comme source de pollution.

3.5. Démarrage en version allumage commandé.

Lors du démarrage à froid du moteur ou lors du fonctionnement à forte charge, le fonctionnement en version à allumage commandé est recommandé. Au démarrage à froid le basculement vers la version allumage commandé permet en utilisant la bougie d'apporter l'effet thermique nécessaire pour provoquer la combustion. Par contre à forte charge du moteur, où les richesses sont élevées, le fonctionnement détonnant du moteur apparait et cause des dommages au moteur. Le basculement vers la version allumage commandé est plus que nécessaire mais nécessite l'équipement du moteur d'un système à taux de compression et distribution variables permettant d'avoir des taux de compression faibles et une distribution adaptée aux moteurs à allumage commandé.

4. Conclusion

Le contrôle de la combustion dans les moteurs HCCI demeure un défi à surmonter dans le domaine de la R&D pour une commercialisation effective de ces moteurs. Dans ce travail on a mis en exergue les différentes techniques existant dans le domaine du contrôle de la combustion en mode HCCI. Les résultats obtenus montrent que l'augmentation du taux de compression et l'étalement de la zone du croisement négatif de soupapes engendre une augmentation de l'avance à l'allumage et une réduction de la durée d'allumage. L'utilisation de combustibles ayant des indices d'octane différents montre que le contrôle de l'allumage est possible au démarrage et à forte charge en choisissant un mélange avec des proportions adéquates d'iso octane et n-heptane. L'effet thermique induit par l'augmentation de la température et de la pression en début de compression génère une réduction du délai d'auto inflammation et la durée d'auto inflammation. Les résultats obtenus sont très satisfaisants et comparables à ceux obtenus dans la littérature scientifique

Références

- [1] S. Tanaka, F. Ayala, J.C. Keck, A reduced chemical kinetic model for HCCI combustion of primary reference fuels in a rapid compression machine. *Combust Flame* 133 (2003) 467
- [2] S. Tanaka, F. Ayala, J.C. Keck, J.B. Heywood, Two-stage ignition in HCCI combustion and HCCI control by fuels and additives, *Combust Flame* 132 (2003) 219–239
- [3] D.R. Mott, E.S. Oran, A Quasi-Steady-State Solver for the Stiff Ordinary Differential Equations of Reaction Kinetics, *Journal of Computational Physics* 164, 407–428 (2000)
- [4] B. Boumeddane, Influence des paramètres de fonctionnement sur l'auto inflammation des mélanges de combustible de référence en mode HCCI. *18^{ème} Congrès Français de Mécanique*. Grenoble, 27-31 août 2007
- [5] Chang, O. Güralp, Z. Filipi, D. Assanis, New Heat Transfer Correlation for an HCCI Engine Derived from Measurements of Instantaneous Surface Heat Flux, SAE paper no. 2004-01-2996
- [6] Hua Zhao, HCCI and CAI engines for the automotive industry, Edited by Hua Zhao, woodhead publishing limited cambridge England, ISBN 978-1-84569-128-8 (book)
- [7] S.B. Fiveland, D.N. Assanis A Four-Stroke Homogeneous Charge Compression Ignition Engine Simulation for Combustion and Performance Studies. SAE paper no 2000-01-0332
- [8] A. Bhave, M. Kraft, F. Mauss, A. Oakley, H. Zhao, Evaluating the EGR-AFR Operating Range of a HCCI Engine SAE paper no 2005-01-0161