Moteurs Diesel : la LII pour limiter les émissions de particules

Améliorant les connaissances sur les phénomènes mis en jeu lors de la combustion, de nouvelles technologies optiques apportent les données indispensables pour valider les modèles nécessaires au développement des moteurs propres. Ainsi, la LII (ou incandescence induite par plan laser), appliquée aux moteurs Diesel, permet de détecter et caractériser les particules de suies générées lors de la combustion, afin d'en réduire les émissions.

» **Christine MOUNAÏM-ROUSSELLE**
Professeur Polytech'Orléans
Laboratoire PRISME
christine.rouselle@univ-orleans.fr

Pour répondre rapidement aux normes de dépollution de plus en plus sévères, la première voie de recherche et de développements s'est concentrée sur l'optimisation des systèmes de dépollution à l'échappement : des procédés qui présentent non seulement un surcoût, mais qui ne sont pas forcément opérationnels dans toutes les configurations d'utilisation de nos véhicules. Le pot catalytique par exemple, qui limite les émissions d'hydrocarbures imbrûlés, ne fonctionne de façon optimale qu'à partir d'une certaine température dans le tuyau d'échappement.

D'autres voies de recherche et de développement ont été initiées sur de nou-

veaux modes de combustion. Ainsi la combustion HCCI (*homogeneous charge compression ignition*) combine les avantages du moteur à allumage commandé et du moteur Diesel. La combustion suralimentée fortement diluée permet quant à elle l'utilisation des petites cylindrées à pleine charge, c'est-à-dire là où le rendement est optimum. Ces modes de combustion se déroulent sous des conditions de pression, de température et de mélanges peu documentées jusqu'à présent. Les bancs d'essais moteurs classiques, même monocylindres « de recherche », ne donnent qu'une information globale des différents phénomènes physiques et ne sont utiles qu'en phase finale du développement du moteur. L'optimisation et le développement des nouveaux modes de combustion passent alors par l'utilisation de diagnostics optiques reposant souvent sur l'utilisation d'une source de lumière de type laser, qui offrira une informa-

tion fine et résolue dans le temps et dans l'espace.

L'équipe Combustion et Moteurs du laboratoire PRISME de l'Université d'Orléans, implanté à Polytech'Orléans, a développé depuis une dizaine d'années un savoir-faire quant à l'optimisation des moteurs de recherche à accès optique, qui permettent la mise en œuvre de ces diagnostics optiques. Le laboratoire s'est également spécialisé sur le développement des techniques optiques associées. Une démarche qui a été rendue possible grâce à de nombreuses collaborations avec les constructeurs français d'automobiles. Un exemple de moteur à allumage commandé à accès optiques est présenté sur la figure 1.

En associant différentes techniques laser (comme, par exemple, la vélocimétrie par imagerie de particules, la fluorescence induite par laser, l'incandescence induite par laser ou tout simplement l'imagerie directe), les différents couplages aéro-

Visualisation directe de la flamme dans le moteur

Implantation en cellule avec un diagnostic laser

Figure 1. Exemple de moteur optique et son implantation en cellule.

Figure 2a. Visualisation de la flamme dans un moteur Diesel, 1 ms après le début de l'injection. **2b.** Répartition moyenne de la fraction volumique de suies au même instant dans le cycle.

thermochimiques mis en jeu durant le cycle moteur peuvent être étudiés et analysés dans le temps et dans l'espace : dans le temps grâce à la forte résolution temporelle de ces diagnostics, dans l'espace puisque, grâce aux différents accès optiques, il est possible d'obtenir des informations 2D. Cela est rendu possible grâce au développement de sources laser adaptées à l'environnement moteur caractérisés par leur pulse à haute fréquence. Parallèlement, le développement des caméras haute cadence (de type CMOS) a permis une grande avancée sur le développement et l'utilisation de ces diagnostics.

Ces techniques s'avèrent particulièrement prometteuses quant à l'étude de la formation des suies dans les motorisations diesel – l'une des principales pollutions émises par ce type de moteur. Pour

limiter la formation des particules de suies dans les moteurs, il est nécessaire de mieux quantifier leur quantité dans la chambre de combustion et leur localisation (*figure 2a*) par rapport aux sites de combustion (*figure 2b*) ainsi que leur caractéristique géométrique (diamètre et distribution en taille). Pour cela, la technique la plus prometteuse mais qui demande encore de nombreuses études fondamentales et appliquées est la technique d'incandescence induite par plan laser (LII). Le principe est d'élever la température des particules de suies par un apport d'énergie de type laser, les particules vont alors rayonner dans le visible comme on peut le voir sur la *figure 2b*. L'intensité de ce rayonnement et son évolution temporelle permettent de remonter à la fraction volumique et au diamètre de ces particules.

Qu'est-ce qu'une particule de suie....

La suie est une particule solide, résultant de la combustion incomplète des hydrocarbures. Sa formation est le résultat d'un processus chimique complexe, dans les régions de la flamme où la concentration en oxygène est très réduite. La formation des suies dans le moteur Diesel a lieu à des températures comprises entre 1000 et 2800 K, dans un domaine de pression de 50 à 100 bars. Les suies se présentent sous la forme de chaînes et d'agglomérés de dimensions comprises entre 10 et 1000 nm composés de particules plus ou moins sphériques, dont le « diamètre » se situe dans un intervalle de 5 à 30 nm. Le processus de leur formation suite à la combustion est un processus extrêmement complexe qui consiste, schématiquement, en une transition des molécules d'hydrocarbure vers des agglomérés contenant des milliers d'atomes de carbone, ce mécanisme se déroulant en plusieurs étapes qui ne sont pas impérativement délimitées les unes par les autres. De la pyrolyse du combustible jusqu'à la libération des suies dans l'atmosphère, l'évolution de ce polluant se réalise selon quatre étapes schématisées :

– La formation d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP ou PAH, l'abréviation de « polycyclic aromatic » >>>

SPECTROGON

State of the art products

Filtres Interférentiels

- De 200 à 15000 nm
- Passe-bande
- Passe-haut
- Passe-bas
- Large bande
- Densité neutre
- Disponible en stock

Réseaux Holographiques

- De 150 à 2000 nm
- Compression d'impulsion
- Télécom
- Accordabilité spectrale
- Monochromateurs
- Spectroscopie
- Disponible en stock

UK (parle français): sales.uk@spectrogon.com • Tel +44 1592770000
Sweden (headquarters): sales.se@spectrogon.com • Tel +46 86382800
US: sales.us@spectrogon.com • Tel +1 9733311191

www.spectrogon.com

hydrocarbon»), connus comme étant les précurseurs des suies ;

- La formation des premiers « nucleis » suite à la croissance tridimensionnelle des structures aromatiques ;
- La croissance des suies par croissance de la surface, coagulation et agglomération ;
- La réduction des suies par oxydation.

Et la LII ?

L'incandescence induite par laser (LII) est une technique non-intrusive permettant la détermination de la fraction volumique de suie et l'estimation de la taille moyenne des particules dans un milieu réactif. Cette technique est basée sur la mesure du rayonnement de type corps noir de la suie chauffée par une raie (ou une nappe) laser, la température des particules est ainsi amenée autour de la température de sublimation (vers 4000 K). La technique LII connaît principalement deux types de développement :

- Une approche temporelle, « TiReLII » pour time-resolved LII. Le signal est enregistré à l'aide de photomultiplicateurs, un exemple est présenté sur la figure 3. Le volume de mesure doit être suffisamment petit pour que le signal soit représentatif de l'évolution du processus LII dans le temps. Ce signal est caractérisé par un front montant d'une durée de quelques nanosecondes, correspondant à l'échauffement de la suie et d'une diminution progressive du signal, correspondant au refroidissement des particules

après l'apport énergétique du pulse laser. L'amplitude du signal LII est proportionnelle à la fraction volumique de suie dans le volume de mesure alors que la rapidité de décroissance du signal est reliée à la taille moyenne des particules.

- Une approche spatiale, « 2D LII », caractérisée par une image représentant les suies incandescentes dans une section de la zone de combustion. Cette image est obtenue par une caméra intensifiée durant une courte période du processus d'incandescence induite par laser. La variation de l'intensité du signal d'incandescence est due à la variation des fractions volumiques des suies dans la zone de combustion. Cette approche de la technique est principalement employée pour déterminer des fractions volumiques et offre la possibilité d'estimer simultanément concentrations de suies et diamètres de particules. La bonne résolution temporelle constitue un autre atout de la technique LII qui permet d'étendre l'utilisation de cette technique à tout système de combustion instationnaire. Le rayonnement de type corps noir émis par les particules chauffées par le faisceau laser est d'une intensité bien supérieure à celle des particules chauffées par la flamme proprement dite, permettant de caractériser avec une bonne résolution spatiale même des particules de suie situées au centre d'une flamme. Les inconvénients de la technique LII sont celles spécifiques aux diagnostics optiques : la nécessité d'interpréter les résultats par l'intermédiaire de modèles qui

sont souvent constitués de constantes méconnues, comme par exemple l'indice complexe de réfraction de la suie.

Le rayonnement de type Planck associé au signal LII émis par une particule de diamètre d_p dans un angle solide de 4π stéradians et enregistré à une longueur d'onde, est décrit par l'équation ci-dessous :

$$LII(\lambda) = \frac{8\pi^3 c^2 h}{\lambda^6} \frac{1}{\left(e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1 \right)} d_p^3 E(m) !$$

$LII(\lambda)$: signal d'incandescence de la suie [W/m]

$c = 2,9.10^8$: vitesse de la lumière [m/s]

$h = 6,63.10^{-34}$: constante de Planck [J.s]

$k = 1,38.10^{-23}$: constante de Boltzmann [J/K]

d_p : diamètre de la particule [m]

La dépendance entre le signal LII émis par une particule supposée sphérique et le diamètre de cette particule est évidente, mais l'influence de la taille de la suie se retrouve également dans la température qu'elle atteint lors de son échauffement. En acceptant l'hypothèse de la sphéricité des particules, la modélisation des bilans énergétique et massique au niveau des suies permet de calculer une température au cours du processus LII et de déterminer finalement un signal LII « théorique ». On peut ensuite extraire l'information « diamètre moyen » par la mise au point d'une routine numérique afin de déterminer le signal modélisé optimal qui coïncide avec le signal expérimental, le diamètre considéré dans le modèle étant dans ce cas un paramètre variable.

Figure 3. Signaux LII caractéristiques.

Contraintes sur la source d'émission

La mise en place de la LII nécessite tout d'abord l'utilisation d'une source d'excitation, afin d'amener les particules à une température bien supérieure à celle du milieu réactif. Cette source doit être optimisée à partir des paramètres suivants :

- La longueur d'onde d'excitation ;
- L'intensité et la durée du pulse laser ;
- La distribution de l'énergie au travers du faisceau laser et éventuellement, la forme de la section transversale du faisceau laser.

Le choix de la **longueur d'onde d'excitation** est contraint par le fait qu'il faut éviter d'engendrer la fluorescence d'autres espèces comme par exemple les hydrocarbures aromatiques polycycliques et que l'ensemble diamètre de particule/ longueur d'onde doit être dans le régime Rayleigh, soit une longueur d'onde supérieure à 50 nm environ.

L'**intensité de l'excitation** est un paramètre lié à la durée du pulse laser, mais

aussi à la distribution de l'énergie à travers le faisceau laser. Pour une valeur fixée de la puissance laser, l'augmentation de la durée du pulse laser augmente la période d'échauffement des particules, d'où le risque de superposition entre l'échauffement et le refroidissement des particules. L'utilisation éventuelle d'un laser pulsé de type Nd:YAG garantit ainsi un pulse d'une durée de quelques nanosecondes, temps suffisamment court pour que l'hypothèse des phénomènes distincts soit valable : c'est-à-dire que l'absorption ne se superpose pas aux processus de refroidissement des suies.

Différentes études ont mis en évidence l'évolution du signal LII en fonction de la valeur du **flux laser**, en tenant compte du **profil de la distribution** de l'énergie laser à travers le faisceau. Dans une section transversale du faisceau laser, la répartition énergétique est typiquement gaussienne : l'énergie est maximale au centre et décroît vers l'extrémité (figure 4). Si le faisceau passe à travers un filtre spatial (comme par exemple une

fente) on obtient ce qu'on appelle une distribution « 1D gaussienne » de l'énergie laser ou on peut également filtrer le faisceau laser à l'aide d'un orifice suffisamment petit, la distribution énergétique au travers du faisceau est alors de type « top-hat ». Évidemment, cette distribution énergétique a une forte influence sur l'échauffement de la suie dans le volume de mesure. Dans le cas de l'utilisation d'un faisceau dont le profil est 2D gaussien, l'énergie apportée aux particules, situées dans le centre de la raie, est considérablement supérieure à celle qui chauffe les particules situées vers la périphérie.

Une valeur minimale du flux énergétique laser est recommandée pendant les expériences LII : cette valeur semble être autour de 10 MW/cm^2 (soit $0,1 \text{ J/cm}^2$ pour un pulse d'une durée moyenne de 10 ns). Elle est associée au flux laser minimal pouvant conduire au régime des températures spécifiques de sublimation de la suie ; toutefois, on trouve plus récemment des recherches à des flux

Puissance d'émission inégalée.

Stabilité garantie.

Spitfire® Ace™

Pour plus d'informations, contactez-nous ou consultez
www.spectra-physics.com/Spitfire-Ace

MICRO-CONTROLE Spectra-Physics S.A.S

1, rue Jules Guesde — Bâtiment B Tél.: 01.60.91.68.68
ZI. du Bois de l'Épine — BP189 Fax: 01.60.91.68.69
91006 Évry CEDEX e-mail: france@newport.com

Chez Spectra-Physics, nous sommes conscients que la mesure de dynamiques ultra-rapides n'est possible qu'avec une équipe de recherche exceptionnelle dotée d'outils de mesure fiables. Nous savons également qu'à mesure que vos expériences deviennent de plus en plus sensibles au bruit avec des niveaux de signaux faibles, l'acquisition de données devient un véritable défi. Le nouvel amplificateur ultra rapide **Spitfire® Ace™** vous permet de relever ces défis grâce à sa fiabilité de fonctionnement, son bruit optique particulièrement faible et une puissance sans équivalence sur le marché. Avec la solution Spitfire® Ace™, optez pour des performances garanties quelles que soient les conditions environnementales, sur de longues durées.

Le Spitfire Ace est l'amplificateur régénérateur le plus performant et le plus abouti sur le marché. Encore une innovation de Spectra-Physics.

- Technologie de stabilisation XPert™ révolutionnaire
- Puissance moyenne d'émission supérieure à 5 W
- Qualité de faisceau TEM_{00} , $M^2 < 1,3$
- Électronique de synchronisation numérique
- Support technique et service après-vente de grande qualité

© 2011 Newport Corporation.

Figure 4. Schémas des répartitions énergétiques dans le faisceau laser. Nouvelle approche expérimentale originale de la technique LII.

énergétiques laser inférieurs à cette valeur, dans le but d'éviter la vaporisation des particules de suies.

Suite à l'analyse des différentes approches théoriques et expérimentales de la technique d'incandescence induite par laser, l'application de la pyrométrie bi-couleur semble être la plus avantageuse, en particulier dans le cas « instationnaire » où il est difficile de reprendre des conditions exactement similaires. En effet, la détection d'un signal LII temporel filtré à deux longueurs d'onde est une bonne solution pour extraire simultanément des informations relatives aux concentrations des suies et aux diamètres de particules. Néanmoins, une telle application permet de quantifier la suie dans un petit volume de mesure, un aperçu spatial de la formation des suies ne peut être possible que par des mesures en plusieurs endroits. Lors d'une thèse en partenariat avec PSA (A. Boiarciuc, 2008), un dispositif particulier de cette technique a été mis en place afin d'obtenir une car-

tographie des concentrations des suies dans une nappe laser simultanément avec une estimation locale des tailles des particules. L'excitation des particules est faite par une nappe laser et une détection simultanée du signal LII temporel filtré à deux longueurs d'onde distinctes et du signal LII 2D a été optimisée. L'image fournit ainsi une information sur la distribution des particules de suie à travers le milieu investigué, et les courbes des signaux temporels la fraction volumique moyenne dans un petit volume de mesure, repérable sur l'image. Dans l'hypothèse d'une relation de proportionnalité entre la fraction volumique de suies et l'intensité à travers l'image, on

détermine pour le petit volume de mesure un facteur de conversion égal au rapport entre la concentration de suies déjà estimée et l'intensité dans la zone correspondante de l'image. Ce facteur est ensuite appliqué à toute l'image LII pour réaliser la conversion de l'intensité en concentration de suies. Les signaux LII temporels peuvent ensuite être utilisés pour une estimation locale des tailles des particules.

Cette approche originale de l'application LII permet de réali-

ser des estimations quantitatives de tailles et de concentrations des suies aussi bien dans les flammes que dans des milieux caractérisés par une combustion turbulente non stationnaire, comme la chambre de combustion d'un moteur.

Exemple d'applications : dans un moteur Diesel « transparent »

Cette approche a été mise en œuvre dans un moteur Diesel « transparent » dont un schéma est proposé sur la figure 5. Sur le cylindre, deux accès optiques latéraux en quartz ont été implémentés, résistant aux conditions de haute pression et haute température spécifiques à la combustion diesel. Le piston est, quant à lui, muni de trois accès optiques dont deux latéraux nécessaires au passage d'une nappe laser et un central pour détecter le signal. Un trou oblong usiné sur la surface cylindrique du piston rehaussé permet d'introduire un miroir qui est fixé sur le bloc moteur permettant ainsi l'accès optique dans la chambre de combustion.

La source d'excitation utilisée est un laser pulsé Nd:YAG dont l'énergie maximale par pulse est autour de 400 mJ pour une durée du pulse de 10 ns (largeur à mi-hauteur) et une longueur d'onde de 1064 nm. L'utilisation de cette longueur d'onde en proche infrarouge évite la fluorescence de certaines espèces comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques (PAH) et celle du C_2 si l'énergie du pulse est relativement faible.

Figure 5. Moteur Diesel à accès optiques et LII

Figure 6. Évolution de la combustion durant le cycle moteur (colonne de gauche) et de la répartition des suies (colonne de droite).

Une nappe laser d'une hauteur de 50 mm et d'une largeur d'environ 1 mm est générée grâce à un jeu de deux lentilles cylindrique et sphérique, le flux laser correspondant est estimé à $0,15 \text{ J/cm}^2$ pour un profil spatial gaussien selon les deux directions. Une caméra intensifiée de type Princeton avec une résolution de 512×512 pixels² à une fréquence d'acquisition maximale de 16 Hz est placée devant le miroir du moteur afin de détecter le signal d'incandescence. Un filtre passe-bas placé entre la caméra et l'objectif laisse passer le rayonnement d'une longueur d'onde placée dans l'intervalle 400 à 450 nm.

Des exemples d'images obtenues en présence ou non d'émission laser (rayonnement naturel de la combustion) sont présentés sur la *figure 6*. On peut noter la distribution très inhomogène et liée à la zone de combustion. L'analyse statistique de ce genre de données est très complexe. Il semble donc qu'une des voies de développement de la LII soit de faire le suivi temporel en 2D de la LII afin d'obtenir la répartition spatiale et l'évolution en diamètre simultanément.

Conclusions

L'ensemble des informations obtenues à partir des techniques optiques, dans les moteurs « transparents », permet de mieux appréhender les phénomènes physiques mis en jeu lors de la combustion dans les moteurs thermiques. Dans les moteurs Diesel en particulier, les développements de la LII permettent de modéliser précisément, au moment même de la combustion, la formation des polluants majeurs que sont les suies : une technique sur laquelle le développement des moteurs propres ne pourra pas faire l'impasse... ■

Références

A. Boiarciuc, F. Foucher, C. Mounaïm-Rousselle, Soot volume fractions and primary particle size estimate by means of the simultaneous Two, Color, Time, Resolved and 2D Laser, Induced Incandescence, Applied Physics B, 2006, vol. 83, No. 3, pp. 413-421

A. Boiarciuc, F. Foucher, C. Mounaïm-Rousselle, O. Pajot, Estimate Measurement of Soot Diameter and Volume Fraction Inside the Bowl of a Direct, Injection, Compression, Ignition Engine: Effect of the Exhaust Gas Recirculation, Combustion Science and Technology, 2007, vol. 179, I 8, pp. 1631-1648

H.A. Michelsen, F. Liu, B.F. Kock, H. Bladh, A. Boiarciuc, M. Charwath, T. Dreier, R. Hadeif, M. Hofmann, J. Reimann, S. Will, P.E. Bengtsson, H. Bockhorn, F. Foucher, K.P. Geigle, C. Mounaïm-Rousselle, C. Schulz, R. Stirn, B. Tribalet and R. Suntz, Modelling laser-induced incandescence of soot: a summary and comparison of LII models, Applied Physics B, 2007, vol. 87, No. 3, pp. 503-521

C. Marchal, J.L. Delfau, C. Vovelle, G. Moréac, C. Mounaïm-Rousselle, F. Mauss, Modelling of aromatics and soot formation from large fuel molecules, Proceedings of the Combustion Institute, 2009, vol. 32, pp. 753-759

Optique adaptative en microscopie

Le miroir déformable mirao 52-e, avec ou sans analyseur de surface d'onde HASO, avec nos logiciels CASAO ou GENAO, offre la meilleure capacité de correction et permet d'améliorer la résolution de l'image de manière spectaculaire.

En haut, image d'une larve de drosophile en microscopie THG non-correctée. En bas, image du même échantillon corrigée avec l'optique adaptative.

Images de E. Beaufreire, D. Débarre et N. Olivier, Ecole Polytechnique, LOB

Venez nous rencontrer à LASER World of Photonics à Munich sur le stand 121 dans hall C1.

Pour plus d'informations, appelez +33 (0)1 64 86 15 60, ou visitez:

imagine-optic.com

Imagine Optic™

©2011 Imagine Optic. Tous droits réservés.