

Accès libre

Problème	Oil Gas Sci. Technol. - Rév. IFP Energies nouvelles Volume 75, 2020
Numéro de l'article	11
Nombre de pages)	13
EST CE QUE JE	https://doi.org/10.2516/ogst/2020006
Publié en ligne	06 mars 2020

- Haut
- Abstrait
- 1. Introduction
- 2 revêtements d'isolation intelligents
- 3 Configuration expérimentale
- 4 résultats
- 5. Conclusion
- Remerciements
- Les références
- Matériel supplémentaire
- Liste des tableaux
- Liste des figures

Science et technologie du pétrole et du gaz - Rév. IFP Energies nouvelles **75**, 11 (2020)

Article régulier

Évaluation expérimentale de nouveaux revêtements isolants pour les moteurs à allumage par étincelle à combustion pauvre

Jérôme Chérel ¹, Jean-Marc Zaccardi ^{2*}, Bernard Bouteiller ³ et Alain Allimant ³¹ IFP Energies nouvelles, 1 et 4 avenue de Bois-Préau, 92852 Rueil-Malmaison, France; Institut Carnot IFPEN Transports Energie² IFP Energies nouvelles, Rond-Point de l'Échangeur de Solaize, BP 3, 69360 Solaize, France; Institut Carnot IFPEN Transports Energie³ Saint-Gobain Research Provence, 550 Avenue Alphonse Jauffret, 84306 Cavailon, France* Auteur correspondant: j-marc.zaccardi@ifpen.fr

Reçu: 14 juin 2019

Accepté: 24 janvier 2020

Abstrait

Des moteurs à combustion interne propres et très efficaces seront encore nécessaires à l'avenir pour répondre à l'ambitieux CO₂ objectifs de réduction des émissions fixés pour les véhicules légers. L'efficacité maximale des moteurs à essence stoechiométriques à allumage par étincelle (SI) n'a cessé d'augmenter ces dernières années, mais reste limitée par la part relative importante des pertes de refroidissement. Des moteurs à faible rejet de chaleur utilisant des revêtements de barrière en céramique ont été présentés dans le passé, mais les revêtements d'isolation intelligents suscitent un regain d'intérêt en tant que moyen plus prometteur d'augmenter encore l'efficacité thermique maximale du moteur. Cet article met en évidence certains effets importants des revêtements d'isolation intelligents développés pour les moteurs à essence à allumage par étincelle à combustion pauvre. Cinq revêtements différents à faible conductivité thermique et capacité sont appliqués sur des pièces de moteur en aluminium avec la technique de projection plasma atmosphérique et sont testés avec deux moteurs différents. La technique de phosphorescence induite par laser est d'abord utilisée dans un moteur optique monocylindre pour quantifier les performances thermiques de ces revêtements en termes de variation de température lors de la combustion. Une augmentation maximale de la température de surface du piston d'environ 100 °C est mesurée à faible charge, confirmant ainsi l'impact attendu de la faible conductivité thermique et capacité, et suggérant ainsi un impact positif sur la consommation de carburant. Grâce aux tests effectués avec un moteur monocylindre métallique similaire, il est démontré que les émissions d'hydrocarbures imbrûlés peuvent augmenter considérablement jusqu'à 25% si la porosité ouverte sur le dessus du revêtement n'est pas correctement scellée, tandis que la rugosité de surface n'a pas d'impact sur ces émissions. Lorsqu'il est appliqué à la fois sur le piston et la culasse, le revêtement optimisé présente des effets distincts sur le taux maximal de dégagement de chaleur et les émissions de NO_x, indiquant que l'environnement thermique à l'intérieur de la chambre de combustion est modifié pendant la combustion. Grâce à la variation de température entre les phases moteur froide et chaude, le rendement volumétrique peut également être maintenu constant. Cependant, aucune augmentation de rendement ne peut être mesurée avec ce revêtement optimisé ce qui suggère que le bilan thermique n'est pas affecté uniquement par la réduction du différentiel de température entre les parois et le gaz.

Page d'accueil

Table des matières

◀ Article précédent Article suivant ▶

ARTICLE

- Abstrait
- **HTML complet**
- PDF (926,8 Ko)
- ePUB (3,191 Mo)
- Les références
- Matériel complémentaire

MÉTRIQUE

Afficher les statistiques de l'article

PRESTATIONS DE SERVICE

Mêmes auteurs

- Google Scholar
- Base de données EDP Sciences

Recommander cet article

Envoyer sur mon Kindle

Télécharger la citation

Alertez-moi si cet article est corrigé

Alertez-moi si cet article est cité

ARTICLES LIÉS

Une enquête sur les émissions d'hydrocarbures non brûlés dans les

sciences et technologies du pétrole et du gaz à **combustion diesel à basse température, guidées par mur** - Rev. IFP, Vol. 63 (2008), n° 4, pp. 433-459

Les moteurs optiques comme outils représentatifs dans le développement de nouveaux concepts de moteurs à combustion

Science et technologie du pétrole et du gaz - Rév. IFP Energies nouvelles, Vol. 66 (2011), n° 5, pp. 759-777

Sur la réduction d'un modèle de combustion CFD 3D pour construire un modèle 0D physique pour simuler le dégagement de chaleur, le cliquetis et les polluants dans les moteurs SI

Science et technologie du pétrole et du gaz - Rév. IFP, Vol. 64 (2009), n° 3, pp. 223-242

Plus

BOOKMARKING



Services aux lecteurs

Alerte email



Il s'agit d'un article en libre accès distribué sous les termes de la licence d'attribution Creative Commons (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui permet une utilisation, une distribution et une reproduction sans restriction sur tout support, à condition que l'œuvre originale soit correctement citée.

Nomenclature

APS: Pulvérisation au plasma atmosphérique

CAD: degré d'angle de manivelle

EVC: Fermeture de la soupape d'échappement

IMEP: pression effective moyenne indiquée

IVO: Ouverture de la soupape d'admission

LIP: Phosphorescence induite par laser

SEM: microscope électronique à balayage

SIRPA: aluminium anodisé poreux renforcé de silice

TDC: Top Dead Center

YSZ: Zircone stabilisée à l'Yttria

λ : rapport air-carburant relatif

μ HC: émissions d'hydrocarbures non brûlés

R_a : Moyenne de rugosité (moyenne arithmétique des valeurs absolues des hauteurs de profil sur la longueur d'évaluation)

1. Introduction

La réduction des émissions de gaz à effet de serre du secteur des transports est un défi important mais nécessaire à relever pour limiter le réchauffement climatique. En conséquence, des objectifs ambitieux de réduction des émissions de CO₂ ont été fixés pour les véhicules utilitaires légers dans le monde entier et si la majorité des futures architectures de motorisations seront électrifiées, il sera essentiel de développer également des moteurs à combustion interne propres et très efficaces. Il est difficile de prévoir de manière fiable et précise à quoi ressemblera le marché automobile en 2030 mais les scénarios de vente actuels montrent une forte préférence pour les moteurs à essence au détriment des motorisations Diesel.

L'efficacité maximale des moteurs à essence stoechiométriques à allumage par étincelle (SI) n'a cessé d'augmenter ces dernières années mais reste toutefois limitée par la part relative importante des pertes de refroidissement. Ces pertes pourraient être réduites en diluant le mélange air-carburant au moyen de grandes quantités d'air supplémentaire ou de recirculation des gaz d'échappement, ou encore par l'utilisation de revêtements isolants. Certains revêtements isolants céramiques pour moteurs à combustion interne avaient déjà été développés et testés il y a plus de 30 ans, mais ils ont récemment suscité un regain d'intérêt lorsqu'un revêtement isolant «intelligent» a été développé et mis sur le marché par *Toyota*.

Une littérature abondante est maintenant disponible sur ce sujet puisque les revêtements de barrière thermique ont été développés et testés pour la première fois sur des moteurs diesel à faible rejet de chaleur dans les années 1980 [1] et quelques tentatives mineures ont également été faites à la même période avec des moteurs SI [2]. L'objectif principal de ces revêtements isolants céramiques épais était à l'origine d'augmenter la température de surface afin de diminuer la différence de température entre les parois de la chambre de combustion et les gaz chauds lors de la combustion, et ainsi d'abaisser le flux de transfert de chaleur convectif. Cependant, l'augmentation de la température de la paroi pendant la course d'admission entraînerait également une efficacité volumétrique inférieure et des émissions de NO_x accrues pour les moteurs diesel en raison de l'augmentation de la température de l'air d'admission. Dans le cas des moteurs SI,

Une très grande partie de la littérature récente concerne encore les moteurs Diesel développés soit pour les poids lourds [3-5] ou applications légères [6-8]. Plusieurs projets récents financés au niveau national envisagent également des moteurs à allumage par compression utilisant des pistons en acier ou en aluminium [9,10].

La zircone stabilisée à l'yttria (YSZ), qui était l'un des revêtements de barrière thermique les plus appliqués dans les années 1980, a été à nouveau examinée plus récemment par Binder *et al.* [3] pour une étude fondamentale combinant la visualisation directe de la flamme et les mesures de température de surface du piston avec un moteur monocylindre à usage intensif utilisant un piston à base en acier. Uchida et Osada [4] ont également rapporté les résultats d'une étude approfondie utilisant des revêtements isolants à base de zircone appliqués sur le piston en acier d'un moteur monocylindre à usage intensif. Sur la base d'analyses thermodynamiques et d'observations directes de l'impact de la flamme, il est d'abord montré qu'une capacité thermique et une conductivité beaucoup plus faibles que la zircone sont nécessaires pour obtenir une variation de température significative, et également que l'épaisseur de la couche limite thermique peut être abaissée en raison du revêtement, ce qui donc dans un coefficient de transfert de chaleur plus élevé. L'impact de l'emplacement du revêtement sur les pertes de refroidissement et l'efficacité volumétrique a été récemment rapporté par Uchihara *et al.* [5]. Grâce à la fois à des simulations et à des tests de moteur, l'emplacement d'un revêtement à base de zircone a été optimisé sur un piston en aluminium et il a été démontré qu'un meilleur compromis entre une efficacité accrue et une augmentation des émissions de fumée pouvait être attendu avec un piston partiellement isolé.

Pour les voitures particulières, une étude théorique avait déjà été rapportée en 2011 par Fujimoto *et al.* [6]. Les résultats de la simulation ont alors montré que des rendements de moteur très élevés pouvaient être attendus en combinant des taux de compression et des revêtements élevés avec une capacité thermique et une conductivité thermique extrêmement faibles (idéalement environ ou inférieures à 1/100 de celles de l'aluminium). Conformément à ces résultats, Caputo *et al.* [7] ont ensuite comparé les performances du YSZ à celles d'un revêtement à base d'aluminium anodisé présentant une conductivité thermique et une capacité thermique inférieures. Les simulations effectuées pour un moteur diesel 1,6 L Euro 6 ont montré que des réductions BSFC allant jusqu'à 0,8% pouvaient être attendues avec de l'aluminium anodisé alors qu'aucun avantage n'a été observé avec le revêtement à base de YSZ. Une étude exhaustive a également été récemment rapportée par Kaudewitz *et al.* [8] basé sur une campagne de recherche approfondie portant sur plus de 30 revêtements différents. Les performances de

base des revêtements isolants ont d'abord été quantifiées grâce à un processus CFD 3D complet et les phénomènes clés concernant la rugosité du revêtement ont également été évalués numériquement. Les performances de revêtements prometteurs obtenus par Oxydation Electrolytique Plasma ont ensuite été évaluées expérimentalement avec un moteur Diesel trois cylindres 1,5 L. Malheureusement, aucun des revêtements testés n'a pu montrer des avantages en termes de consommation de carburant spécifique sur l'ensemble de la carte du moteur malgré leurs porosités élevées et leurs faibles conductivités thermiques et capacités thermiques.

Les pistons en acier revêtus par pulvérisation au plasma atmosphérique (APS), pulvérisation à la flamme en suspension à haute vitesse et pulvérisation au plasma en suspension ont également été envisagés par exemple dans [9], tandis qu'un revêtement à base de microsphères creuses en alliage de nickel est envisagé [10] afin d'obtenir un porosité extrêmement élevée de 90%.

Face à ces résultats contrastés et parfois contradictoires, l'enjeu est plus que jamais de développer de nouveaux revêtements permettant à la température des parois de suivre au plus vite la variation de température des gaz au cours du cycle moteur, à savoir des revêtements isolants «intelligents» ou «suiveurs de température». Contrairement aux revêtements céramiques épais et denses développés précédemment, des couches minces et poreuses sont ciblées pour ces revêtements intelligents afin que la température des parois revêtues puisse suivre la température moyenne des gaz et ainsi réduire efficacement les échanges thermiques convectifs. Dans ce contexte, *Toyota* a lancé il y a quelques années un revêtement en aluminium anodisé poreux renforcé de silice (SiRPA) [11] affirmant que des gains d'efficacité peuvent être obtenus sans aucun inconvénient en ce qui concerne les émissions de polluants ou l'efficacité volumétrique. Pour atteindre ces performances, il faut d'une part minimiser la conductivité thermique et la capacité calorifique, et d'autre part optimiser l'épaisseur du revêtement intelligent afin de réduire le flux thermique du gaz chaud vers les parois lors de la combustion (le plus épais, mieux c'est), tout en contrôlant le flux des parois vers le gaz pendant les phases froides du moteur (le plus fin sera le mieux). Cette nouvelle technologie SiRPA a été mise sur le marché sur certains moteurs Diesel mais, à la connaissance de l'auteur, l'application de ce revêtement SiRPA sur les parois de la chambre de combustion d'un moteur SI n'a été signalée pour la première fois que très récemment [12]. Une comparaison qualitative entre les moteurs diesel et SI est présentée par Yamashita *et al.* concernant l'influence de la charge du moteur sur l'effet d'isolation potentiel du revêtement SiRPA mais ni les gains d'efficacité ni les interactions avec la combustion à cliquetis ne sont mentionnés.

L'objectif de cet article est de mettre en évidence certains effets des revêtements d'isolation intelligents appliqués aux moteurs SI fonctionnant dans des conditions pauvres. Ces moteurs pourraient offrir un avantage significatif en termes de consommation de carburant par rapport aux moteurs stœchiométriques mais avec des définitions techniques et des modes de combustion très différents de ceux des moteurs revêtus précédemment testés. Les sections 2 et 3 présentent tout d'abord les revêtements d'isolation intelligents considérés dans ces travaux et l'appareil expérimental utilisé pour quantifier les performances thermiques et thermodynamiques obtenues avec ces revêtements. Les résultats expérimentaux obtenus avec deux moteurs monocylindres sont ensuite présentés dans la section 4. La dernière section 5 résume enfin les principales conclusions et les perspectives supplémentaires pour améliorer encore ces revêtements.

2 revêtements d'isolation intelligents

Des revêtements d'isolation intelligents ont été développés dans cette étude afin de maximiser l'oscillation de la température de surface pendant la combustion tout en maintenant une température de surface moyenne proche du boîtier en aluminium non revêtu de référence pendant la course d'admission. Conformément à la littérature déjà disponible [11], la conductivité thermique et la capacité thermique doivent être minimisées et l'épaisseur du revêtement ne doit pas être supérieure à environ 100 μm , ce qui signifie au moins deux à trois fois plus mince que les revêtements de barrière thermique en céramique précédemment développés. L'optimisation des propriétés thermiques repose sur les matériaux sélectionnés mais aussi sur la structure interne (chemin du flux thermique, résistance de contact, résistance thermique des pores, etc.). Par conséquent, en plus des performances thermiques, la résistance thermomécanique doit être prise en compte ainsi que la force d'adhérence entre le revêtement et le substrat en aluminium, et entre les différentes couches à l'intérieur du revêtement. Afin de répondre à ces différentes contraintes, plusieurs revêtements multicouches ont été conçus et appliqués par APS (voir Tab.1, la sélection des matériaux et l'optimisation des procédés APS ont été récemment introduites lors de la dernière Conférence et Exposition Internationale sur la Pulvérisation Thermique [13]).

Tableau 1 Propriétés du revêtement isolant mesurées à 300 °C.

Pour la configuration de référence non revêtu, le matériau du substrat en aluminium a une conductivité thermique d'environ $142 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ et une capacité thermique d'environ $2376 \text{ kJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$. La rugosité de la surface de la paroi est inférieure à $1 \mu\text{m}$ et la porosité est nulle. Les revêtements #A, #C, #D et #E ont été testés avec un moteur monocylindre optique, tandis que les revêtements #A, #B, #C et #E ont été testés avec un moteur monocylindre en métal.

3 Configuration expérimentale

3.1 Moteur monocylindre en métal

Les études expérimentales réalisées avec le moteur monocylindre métallique (SCE) visent à quantifier les impacts des revêtements d'isolation intelligents sur la combustion, en particulier sur les pertes d'efficacité et de refroidissement. La campagne d'essais a été réalisée avec un moteur à injection directe utilisant un taux de compression élevé et des orifices d'admission spécifiques favorisant un mouvement de culbute élevé et permettant ainsi d'étendre les limites de dilution à l'air. Le tableau 2 résume les principales caractéristiques de ce moteur.

Tableau 2 Principales caractéristiques du moteur monocylindre en métal.

Quant au carburant, une essence commerciale E10 a été utilisée. L'essence était directement injectée (position centrale) avec une pression d'injection constante de 200 bars. La consommation d'essence a été mesurée avec un débitmètre Coriolis (série Emerson Elite CMFS010). Cet appareil a été utilisé en complément du débitmètre massique de carburant AVL standard afin d'améliorer la précision de la mesure de la consommation de carburant. L'incertitude de mesure revendiquée pour ce débitmètre Coriolis est de 0,1%. Cependant, la précision globale de la mesure de la consommation de carburant au banc d'essai ne dépend pas seulement de la précision du débitmètre, mais également de l'environnement complet du banc d'essai (par exemple sur le Régulation) et également sur la stabilité de la combustion. Pour cette campagne de tests, la précision globale a ainsi été estimée en réalisant des tests de répétabilité (variations λ) avec la configuration de référence aluminium non revêtu et en calculant les écarts moyens entre ces tests de répétabilité. Il a ainsi été démontré que l'écart moyen est de l'ordre de 0,2 à 0,3% avec une valeur de pointe à 0,6%.

Les temps d'injection d'essence et d'allumage ont été contrôlés avec un module de commande interne. L'huile, le liquide de refroidissement et le carburant étaient fournis par des pompes à entraînement électrique. Les températures de l'huile et du liquide de refroidissement ont été maintenues à $90 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ et les essais n'ont été effectués qu'en régime permanent. L'air d'admission sous pression était fourni par un compresseur externe à travers un débitmètre sonique et un volet était utilisé dans la ligne d'échappement pour simuler la contre-pression d'une turbine. Les pressions d'admission, d'échappement et dans le cylindre ont été mesurées avec des capteurs conventionnels (refroidis à l'eau à l'échappement et à l'intérieur du cylindre) et les mesures ont été post-traitées avec un logiciel interne pour calculer les caractéristiques de combustion (taux de dégagement de chaleur et masse) fraction brûlée). La concentration des principaux polluants (uHC, CO et NOx) a été mesurée avec des analyseurs de gaz conventionnels. Capteur λ .

Des investigations ont été menées pour plusieurs points de fonctionnement et pour chacun d'entre eux le taux de dilution par l'air a été varié afin de quantifier les impacts des revêtements d'isolation intelligents sur les performances des moteurs avec des mélanges stoechiométriques et pauvres. Seuls les résultats obtenus à 3000 tr / min et 7 bars IMEP sont présentés dans cet article. Dans ces conditions, un fonctionnement sans cognement à un moment de combustion optimal est possible. Pour ce point de fonctionnement, le moteur fonctionne en mode atmosphérique. La pression d'admission et le débit de carburant sont contrôlés simultanément pour ajuster le taux de dilution (λ) et IMEP. On peut également noter que tous les résultats présentés dans la section 4.2 ont été obtenus dans des conditions stables avec un coefficient de variation de l'IMEP inférieur à 1,5%, et que le taux de compression a été adapté pour chaque configuration testée en fonction des épaisseurs de revêtements mesurées. Avec une épaisseur de revêtement de 100 μm sur la surface du piston, le taux de compression serait augmenté jusqu'à 14,2: 1 (+0,2 par rapport à la ligne de base). Cette augmentation peut sembler limitée mais elle pourrait théoriquement avoir le même impact sur la réduction de la consommation de carburant que l'impact attendu pour les revêtements.

3.2 Moteur monocylindre optique

Un moteur optique a été utilisé en parallèle de la phase de test réalisée avec le moteur monocylindre métallique. Ce moteur optique a des caractéristiques très similaires à celles du moteur métallique, comme indiqué dans le [tableau 3](#), la principale différence étant l'utilisation de l'injection de carburant par orifice et non de l'injection directe. Dans le cas de l'injection directe, le revêtement isolant peut avoir un effet sur les interactions spray / parois, et par conséquent sur la préparation du mélange et la propagation de la flamme. Les tests rapportés ici avec le moteur optique et l'injection de carburant à l'orifice visent à quantifier uniquement les performances thermiques des revêtements isolants sans aucune interférence entre les projections de carburant liquide et les parois. De nouveaux pistons ont été spécifiquement conçus et revêtus pour effectuer ces tests avec le même taux de compression que pour le moteur métallique. L'environnement du banc d'essai était similaire à celui utilisé pour le moteur métallique et les effets de plusieurs revêtements ont été étudiés pour deux points de fonctionnement à 2000 tr / min, 4 bar IMEP et 1500 tr / min, 6 bar IMEP.

Tableau 3 Principales caractéristiques du moteur monocylindre optique.

La technique de phosphorescence induite par laser (LIP) a été appliquée dans ce moteur optique pour mesurer la température de surface du piston pendant la combustion et pour quantifier l'oscillation de température obtenue avec divers revêtements. La température de surface des pistons non revêtus pourrait être mesurée avec d'autres techniques que le LIP, avec des thermocouples ou des capteurs de flux thermique par exemple. Cependant, aucune de ces techniques ne pourrait être utilisée avec des revêtements d'isolation intelligents d'environ 100 μm puisqu'ils nécessiteraient d'usiner la surface du piston. LIP offre ici le grand avantage d'être non intrusif. Cette technique exploite les propriétés luminescentes dépendant de la température des luminophores céramiques dopés aux terres rares ou aux métaux de transition [14, 15]. Différents luminophores présentent des durées de vie de désintégration suffisamment courtes pour les mesures résolues par l'angle de vilebrequin et peuvent être utilisés en fonction de la plage de températures ciblée. Ici, un revêtement de phosphore (Lanthane Oxysulfure dopé à l'Europium $\text{La}_2\text{O}_3\text{:Eu}$) est mélangé avec un liant hydroxypropylcellulose et appliqué sur la surface du piston avec un aérographe. Ensuite, la phosphorescence est générée par une excitation de faisceau laser UV utilisant la troisième harmonique d'un laser Nd: YAG pulsé à 355 nm. L'émission de phosphorescence est collectée par six fibres optiques de quartz, puis filtrée avant le photomultiplicateur qui est connecté à un oscilloscope rapide enregistrant les désintégrations de l'émission de lumière. La température de surface peut enfin être calculée sur la base de la durée de vie d'émission. La configuration complète de la mesure LIP, y compris le processus d'étalonnage, est la même que celle utilisée dans [14] et est également illustrée à la [figure 1](#).

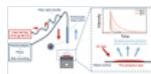


Fig. 1

Configuration LIP pour la mesure de la température de surface.

Le moteur optique utilisé dans cette étude offre un accès endoscopique presque parfaitement vertical (inclinaison 7°) situé juste au-dessus du centre du piston. Grâce à cette configuration verticale, la température peut être mesurée au même endroit quelle que soit la position du piston pendant le cycle moteur. En revanche, le principal inconvénient est que la température de surface ne peut être connue qu'au centre du piston, et non sur le bord extérieur. La [figure 2](#) montre la vue de dessus du piston et la zone spécifique où le revêtement de phosphore a été appliqué est mise en évidence avec la surface rouge hachurée (le revêtement d'isolation thermique étant appliqué sur toute la surface supérieure du piston). La cavité centrale du piston et les zones d'écrasement inclinées que l'on peut observer sur la [figure 2](#) sont conçus pour atteindre un taux de compression élevé similaire à celui du moteur monocylindre en métal. Ce type de cavité de piston est généralement conçu pour améliorer le mouvement de culbute à proximité du point mort haut mais c'est aussi l'occasion ici d'appliquer le revêtement phosphoreux au centre de la chambre de combustion à la verticale de l'accès endoscopique.



Fig. 2

Emplacement du revêtement phosphoreux.

En raison des différentes fréquences de fonctionnement du laser et du moteur, la température de surface est mesurée trois fois tous les cinq cycles du moteur pour chaque position angulaire du vilebrequin. La variation de température sur l'ensemble du cycle moteur est alors obtenue en collectant toutes ces mesures. Dans cet article, seules les températures moyennes à chaque degré d'angle de vilebrequin sont indiquées.

L'application de la technique LIP aux pistons revêtus est plus complexe que pour les pistons usinés en aluminium usinés en raison de la rugosité de surface et de la porosité ouverte des pistons revêtus. Il est très important de contrôler l'épaisseur du revêtement de phosphore

pour être sûr que la température mesurée est bien représentative de la température de la paroi. Une faible épaisseur de l'ordre de 10 à 20 μm est donc nécessaire pour observer des phénomènes transitoires rapides [15 ,16]. Par conséquent, la rugosité des revêtements isolants intelligents doit être bien contrôlée avant de procéder aux tests. Sinon, le revêtement de phosphore pourrait remplir les vides disponibles sur la surface du revêtement intelligent, sans couvrir toute la surface avec une épaisseur uniforme. Le revêtement de phosphore pourrait également infiltrer la porosité ouverte au-dessus du revêtement intelligent. Dans ce cas, il ne serait plus possible de contrôler précisément l'épaisseur de ce revêtement phosphorescent en surface.

Des analyses au microscope électronique à balayage (MEB) ont été effectuées pour mesurer l'épaisseur du revêtement phosphorescent sur divers échantillons avec ou sans revêtement isolant intelligent. Dans tous les cas, le revêtement phosphoreux a été appliqué exactement de la même manière que pour les pistons utilisés pour les essais moteurs. Ces mesures MEB montrent clairement que l'épaisseur du revêtement de phosphore est homogène au-dessus des surfaces des échantillons et contrôlée bien en dessous de 20 μm . [figure 3](#) montre que le revêtement de phosphore est appliqué de manière homogène sur le dessus du revêtement intelligent, et également que l'épaisseur du revêtement de phosphore est égale à la taille des cristaux blancs de lanthane inférieur à 10 μm (la spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie a été utilisée pour analyser la composition chimique de ces derniers cristaux blancs et a confirmé qu'ils étaient faits de La, S, Eu et O, comme indiqué dans le [matériel supplémentaire](#)).

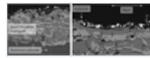


Fig. 3

Analyses SEM du revêtement phosphoreux appliqué sur le revêtement isolant intelligent #A.

Il peut être conclu à partir de ces mesures SEM que la température mesurée au-dessus de la surface du revêtement de phosphore doit être la même que celle de la surface du revêtement intelligent. Par contre, la mesure de température ne peut pas être effectuée dans toutes les conditions car l'intensité du signal émis par la faible quantité de revêtement phosphoreux est trop faible. Dans notre cas de moteur, cette limitation apparaît lorsque le piston s'éloigne trop de la source lumineuse, c'est pourquoi dans la section suivante les résultats ne seront affichés qu'autour du point mort haut (360 CAD) entre 270 CAD après 450 CAD.

4 résultats

4.1 Mesures de variation de température - SCE optique

Afin de valider la configuration, trois mesures ont été effectuées avant d'utiliser les pistons revêtus. Dans un premier temps, la température de surface du piston a été mesurée à l'arrêt dans des conditions chaudes (pas de vitesse de rotation, $T_{\text{huile}} = 90^\circ\text{C}$, $T_{\text{réfrigérant}} = 90^\circ\text{C}$) et en positionnant le piston au PMH puis pour la deuxième étape la température de surface du piston a été mesurée dans des conditions motrices chaudes à 1500 tr / min ($T_{\text{huile}} = 90^\circ\text{C}$, $T_{\text{réfrigérant}} = 90^\circ\text{C}$). On peut noter qu'un revêtement de phosphore de ZnO a été utilisé pour les deux tests en raison de sa sensibilité plus élevée dans la plage de basses températures que le revêtement de phosphore à base de lanthane. À l'arrêt, la température mesurée était de 90°C (c'est-à-dire exactement les mêmes que les températures de l'huile et du liquide de refroidissement) et l'écart type moyen à chaque angle de vilebrequin était d'environ $0,8^\circ\text{C}$. Dans des conditions motorisées, la température de surface a été mesurée entre 100°C et 107°C pendant le cycle du moteur, ce qui correspond à la température globale prévue de la structure du moteur. Dans ces conditions, l'écart type maximal était d'environ 3°C (voir [Fig. 4](#)). Enfin, la température de surface du piston a été mesurée pendant la combustion en considérant deux conditions de fonctionnement différentes. L'écart type maximal autour du point mort haut dans les conditions de tir était d'environ $3,5^\circ\text{C}$ comme le montre la [figure 4](#) (les barres d'erreur affichées sur la [figure 4](#) représentent le double de l'écart type). Variations de température illustrées à la [figure 4](#) près de 270 et 450 CAD sont dus à la distance accrue entre la source lumineuse et le piston et ne sont donc pas pertinents en raison de la très faible épaisseur de phosphore.

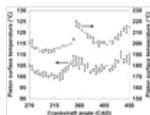


Fig. 4

Températures de la surface du piston pour les pistons en aluminium non revêtus dans des conditions motrices à 1500 tr / min (axe gauche) et à 2000 tr / min, 4 bar IMEP ($\lambda = 1,21$, axe droit).

Comme le montre la [figure 5](#) , la variation de température mesurée pendant la combustion est d'environ 20°C pour le piston en aluminium non revêtu. Cette variation de température se situe dans la gamme haute de celles disponibles dans la littérature mais des valeurs très similaires ont été rapportées par exemple par Köpplé *et al.* [17]. Le léger décalage angulaire de la température maximale qui peut être observé entre les deux points de fonctionnement est dû à des temps de combustion différents. Ces résultats montrent également que la température de base avant la combustion est déjà très élevée par rapport à ce à quoi on pourrait s'attendre pour de tels points de fonctionnement dans les moteurs habituels (des températures de surface comprises entre 200°C et 250°C sont généralement indiquées pour les points de fonctionnement à pleine charge [18]). Cette température de base très élevée peut s'expliquer par l'architecture spécifique du moteur optique, et notamment par l'absence de refroidissement d'huile sur la partie inférieure du piston (ni projection d'huile ni jets d'huile).

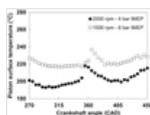


Fig. 5

Température de la surface du piston pour les pistons en aluminium non revêtus ($\lambda = 1,21$ pour les deux points de fonctionnement).

Des mesures ont ensuite été effectuées pour les revêtements #A, #C, #D et #E. [Le tableau 4](#) résume les variations de température mesurées pour toutes les configurations testées. Les plages de température sont mentionnées dans chaque cas et pas seulement des valeurs uniques en raison de la répétabilité des mesures. Les revêtements #C et #D entraînent des variations de température plus élevées que le revêtement #A, mais les meilleures performances sont obtenues avec le revêtement #E avec des variations de température supérieures à 100°C .

Tableau 4 Aperçu des variations de température.

Les valeurs résumées dans le [tableau 4](#) et illustrées dans les [figures 6 et 7](#) mettent en évidence l'effet principal des revêtements intelligents avec des variations de température 2 à 5 fois plus importantes que celles mesurées sans revêtement. Ces augmentations de température ne semblent pas être directement corrélées aux propriétés thermiques des revêtements (conductivité thermique et capacité thermique). Des investigations supplémentaires sont nécessaires, mais on peut supposer que la porosité ouverte et la rugosité de surface pourraient affecter les mesures de température pour les revêtements #A et #C qui n'ont pas de couche d'étanchéité supérieure et qui ont des rugosités R_a supérieures à l'épaisseur de revêtement phosphorée visée.

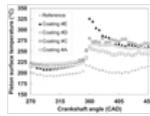


Fig. 6

Températures de surface du piston à 2000 tr / min, 4 bar IMEP ($\lambda = 1,21$ pour toutes les configurations).

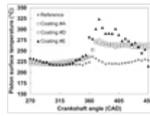


Fig. 7

Températures de surface du piston à 1500 tr / min, 6 bar IMEP ($\lambda = 1,21$ pour toutes les configurations).

A partir des propriétés du revêtement, on peut supposer deux groupes de revêtements avec des phénomènes physiques de transfert de chaleur différents. Pour les revêtements #A et #C avec des rugosités plus élevées et une porosité ouverte, la surface d'échange thermique accessible est plus élevée et le gaz chaud peut pénétrer à l'intérieur du revêtement et générer ensuite un échange thermique interne. Pour les revêtements #D et #E, l'échange thermique du gaz au solide est réalisé uniquement en surface.

Comme tous les revêtements testés ont des épaisseurs assez similaires, on peut supposer que la meilleure performance du revêtement #E par rapport au revêtement #D est liée à la nature des matériaux choisis et à l'empilement de ses différentes couches.

En fait, l'empilement de couches semble ajouter une résistance thermique de contact qui réduit le flux thermique en plus des matériaux à faible conductivité. Ici, le revêtement #E montre une température plus élevée que le revêtement #D, malgré le fait que la capacité thermique et la conductivité thermique sont plus élevées. Cette différence peut être expliquée par une résistance thermique plus élevée entre les couches de revêtement. Le revêtement #E a une couche de plus que le revêtement #D. De plus, la résistance thermique de contact de l'interface entre la couche de revêtement peut être différente en fonction des natures de la couche de revêtement.

Outre les variations de température, ces mesures montrent que les revêtements n'ont pas d'impact négatif significatif sur la température du piston obtenue en fin de course de compression juste avant la combustion. En d'autres termes, ces revêtements ne doivent avoir aucun impact négatif sur la température de surface du piston pendant la course d'admission et sur le rendement volumétrique. Des températures de surface plus élevées sont indiquées pour le revêtement #E sur la [figure 7](#) au début de la course de compression (de 270 CAD à environ 300 CAD). Cette mesure respecte un seuil de répétabilité maximale qui a été défini pour prendre en compte la perte de signal lorsque le piston s'éloigne du PMH, soit la mesure est considérée comme valide. Cependant, avec un seuil plus bas, ces mesures proches de 270 CAD pourraient ne pas avoir été validées et les résultats auraient été montrés dans une plage angulaire plus petite autour du TDC. Il est cependant confirmé que cette augmentation du niveau de température pour le revêtement #E ne résulte pas de l'évolution de la température pendant la course d'expansion puisque les mesures de température effectuées autour du PMH en fin de course d'échappement montrent que la température de surface du piston est déjà stabilisée à environ 225 °C (comme indiqué dans la [documentation supplémentaire](#)). Il sera également montré dans la [section 4.2](#) que ce revêtement #E n'a pas d'impact négatif sur le rendement volumétrique, ce qui signifie que la température de surface ne doit pas être augmentée pendant la course d'admission.

Grâce au LIP, les performances de différents revêtements ont pu être quantifiées en termes de variation de température. L'augmentation de température la plus élevée pendant la combustion a été mesurée à environ 100–120 °C avec le revêtement #E. Une variation de température plus élevée d'environ 140 °C a été mesurée par *Toyota* pour le revêtement SIRPA avec une procédure de mesure très similaire [15]. Cependant, il est important de noter que ces mesures ont été effectuées pour un moteur Diesel, pour différentes conditions de fonctionnement, pour différents endroits (sur la zone d'écrasement et non au centre du piston), et aussi que l'oscillation de température mesurée pour le non revêtu piston était d'environ 45 °C, c'est-à-dire environ deux fois plus que celui rapporté ici. Le rapport de variation de température entre les configurations revêtues et non revêtues a ainsi le même ordre de grandeur.

En ce qui concerne la phase de variation de température maximale, une augmentation du décalage de phase entre la température de surface maximale et le taux de dégagement de chaleur maximal était attendue lors du passage du revêtement #D au revêtement #E en raison de sa capacité thermique plus élevée et de sa conductivité thermique plus élevée. Cette augmentation de décalage n'a pas été mesurée et il est supposé que l'impact du revêtement #E sur le taux de dégagement de chaleur de combustion compense l'impact du matériau (voir la [section 4.2](#), [figure 14](#)).

Sur la base de ces résultats, on peut s'attendre à ce que les revêtements d'isolation intelligents développés aient un impact positif sur la réduction de la consommation de carburant en réduisant la différence de température entre le gaz et les murs, et donc en réduisant le transfert de chaleur par convection. Il faut également noter que les performances globales du revêtement ne dépendent pas seulement de la température maximale atteinte lors de la combustion, mais également de la décroissance de la température lors de la détente.

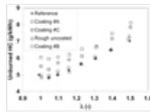
4.2 Performance thermodynamique - métal SCE

Comme mentionné dans la [section 2](#), les revêtements #A, #B, #C et #E ont été testés avec le métal SCE. Les revêtements #A, #B, #C ont été appliqués sur trois pistons et le revêtement #E a été appliqué sur le piston et la culasse.

Les revêtements #A et #C appliqués sur la surface du piston ont été les premiers à être testés et des mesures ont rapidement montré que les émissions d'hydrocarbures imbrûlés étaient significativement augmentées jusqu'à 25% selon le point de fonctionnement (voir [Fig.8](#) à 3000 tr / min, 7 bar IMEP). Des mesures de répétabilité ont été effectuées pour la configuration de référence non revêtue et pour tous les points de fonctionnement et ont confirmé que cette augmentation est supérieure aux écarts moyens auxquels on peut s'attendre.

Fig. 8

Émissions d'hydrocarbures non brûlés à 3000 tr / min, 7 bar IMEP.



Une telle augmentation des émissions d'hydrocarbures imbrûlés dégrade le rendement du moteur et peut complètement compenser l'effet positif attendu du revêtement isolant concernant la réduction des pertes de refroidissement. A 3000 tr / min, 7 bar IMEP, et $\lambda = 1,5$, la consommation spécifique moyenne de carburant est d'environ 200 g / kW h. Une augmentation des émissions d'hydrocarbures imbrûlés d'environ 1 g / kWh comme le montre la **figure 8** équivaut ainsi à une augmentation de la consommation de carburant de 0,5% qui est du même ordre de grandeur que la réduction de consommation de carburant attendue avec un revêtement isolant intelligent. Pour cette raison, un plan d'essais spécifique a été défini afin d'identifier les caractéristiques des revêtements expliquant cette augmentation des émissions d'hydrocarbures imbrûlés.

Il a d'abord été considéré que l'augmentation des émissions d'hydrocarbures imbrûlés pouvait être liée à la rugosité de surface des revêtements isolants #A et #C. Des résultats de simulation antérieurs ont montré que la rugosité de la surface du revêtement n'a qu'un impact très limité sur le transfert de chaleur tant que cette rugosité est maintenue en dessous de 14 μm [19], mais l'impact potentiel sur les mécanismes d'adsorption et de désorption des mélanges air-carburant et sur les émissions de CHU n'a pas été étudié. Un piston en aluminium non revêtu brut a ensuite été produit par sablage pour atteindre un analogue R_a comme pour les revêtements #A et #C (environ 9 μm). Les résultats des tests obtenus avec ce piston en aluminium rugueux ont clairement montré que la rugosité de surface n'explique pas l'augmentation des émissions comme le montre la **figure 8**.

Il a alors été décidé d'étudier les impacts des porosités ouvertes sur le dessus de la surface du revêtement. Pour ce faire, un revêtement double couche #B a été réalisé en scellant la partie supérieure du revêtement #A. Grâce à ce revêtement, les émissions d'hydrocarbures imbrûlés ont pu être abaissées aux valeurs de référence mesurées avec le piston de référence non revêtu comme illustré à la **figure 8**. Des mesures similaires ont été effectuées pour les autres points de fonctionnement et les mêmes observations ont été faites. En parallèle, un résultat similaire a été obtenu avec le moteur optique fonctionnant avec du carburant à l'orifice avec injection de carburant à l'orifice avec revêtement #D, ce qui signifie que le principal moteur de l'augmentation des émissions d'uHC est la porosité ouverte et non le mode d'injection. On peut également noter que les émissions de fumée mesurées avec les revêtements #A et #C sont également plus élevées que pour la référence, mais celles mesurées avec le revêtement #B sont similaires à celles de la référence non revêtu.

Les spécifications du revêtement #E ont ensuite été définies sur la base des résultats obtenus avec les revêtements précédents en combinant les matériaux optimaux et en utilisant une couche d'étanchéité sur le dessus du revêtement pour fermer les porosités ouvertes. La rugosité de surface a également été minimisée selon les informations disponibles dans la littérature [4, 8, 11]. Ce revêtement a été appliqué en premier uniquement sur la surface du piston, comme pour les revêtements précédents. Les résultats des tests ont alors montré des émissions d'hydrocarbures imbrûlés similaires ou même inférieures à celles de la configuration de référence sans revêtement, mais aucune augmentation de l'efficacité du moteur n'a pu être mesurée. Par conséquent, ce revêtement a été appliqué dans une deuxième étape sur les surfaces du piston et de la culasse (à l'exception des soupapes) pour maximiser son impact.

Seuls les résultats obtenus à 3000 rpm, 7 bars IMEP sont illustrés dans cet article mais des résultats similaires ont été obtenus pour d'autres points de fonctionnement. La comparaison entre la référence non revêtu et la configuration revêtu est ainsi réalisée à faible charge avec un timing de combustion optimal (fonctionnement sans cliquetis). Comme pour les tests précédents, la variation λ a été répétée deux fois. La **figure 9** montre tout d'abord le rendement de combustion calculé pour ce point de fonctionnement et notamment les deux résultats d'essais (1) et (2) avec des pièces revêtues. Cette efficacité est égale à 100% uniquement lorsque l'énergie chimique du carburant est entièrement convertie en chaleur pendant la combustion, et elle peut être calculée principalement sur la base des émissions d'hydrocarbures non brûlés et de monoxyde de carbone mesurées à l'échappement (l'oxydation complète du carburant ne conduirait qu'à du CO_2 formation). Ces résultats montrent que le rendement de combustion est encore légèrement meilleur pour les configurations revêtues que pour la référence non revêtu, confirmant ainsi que les émissions d'hydrocarbures imbrûlés ont été bien maîtrisées avec le revêtement optimisé #E. Les émissions de fumée mesurées pour les mêmes configurations sont illustrées à la **figure 10**. Aucun impact significatif des pièces revêtues ne peut être observé en ce qui concerne les émissions de fumée, mais des investigations supplémentaires doivent être effectuées en utilisant des systèmes de comptage de particules.

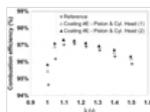


Fig. 9

Efficacité de combustion à 3000 tr / min, 7 bar IMEP.

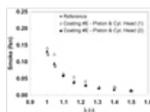


Fig. 10

Émissions de fumée à 3000 tr / min, 7 bar IMEP.

Le revêtement d'isolation intelligent vise à réduire le transfert de chaleur entre le gaz et les parois lors de la combustion, mais aussi lors de la course d'admission afin de limiter l'échauffement de l'air d'admission qui dégraderait le rendement volumétrique. Les **figures 11** et **12** montrent que cet objectif peut être atteint avec le revêtement #E car la même pression d'admission était nécessaire pour atteindre la même charge avec des configurations non revêtues et revêtues (la température d'admission est maintenue constante à 40 ° C pour tous les points de fonctionnement et toutes les configurations de moteur.). Un rendement volumétrique légèrement supérieur est même obtenu proche de la stoechiométrie et aucun impact négatif n'est observé en conditions pauvres.

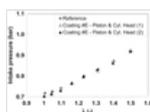


Fig. 11

Pression d'admission à 3000 tr / min, 7 bar IMEP.

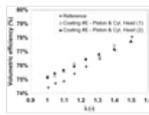


Fig. 12

Rendement volumétrique à 3000 tr / min, 7 bar IMEP.

Cependant, comme le montre la [figure 13](#), le rendement indiqué défini comme le rapport entre le travail indiqué et l'énergie d'entrée de carburant n'est pas plus élevé pour les configurations revêtues. Dans le meilleur des cas, seule la même efficacité que pour la configuration de référence peut être atteinte. Le bénéfice maximal attendu de l'efficacité indiquée avec les revêtements isolants est modéré, en particulier si seule la surface du piston est revêtue, et typiquement autour de 0,5% abs. [7 , 11]. Cependant, la [figure 13](#) montre que les rendements indiqués obtenus avec les configurations revêtues sont globalement légèrement inférieurs à ceux de la référence non revêtue et le même constat a été fait pour les autres points de fonctionnement: compte tenu de la précision de mesure de la consommation de carburant, les revêtements ont un impact soit négatif soit neutre sur l'efficacité.

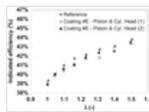


Fig. 13

Rendement indiqué à 3000 tr / min, 7 bar IMEP.

Les comparaisons des rendements indiqués pour les configurations revêtues et non revêtues nécessitent de quantifier les bilans thermiques complets.

- De $\lambda = 1$ à $\lambda = 1,5$, l'énergie d'entrée du combustible diminue de 740 à 660 J en raison de l'augmentation du rendement.
- Pour la même variation de λ , l'énergie non brûlée moyenne est d'environ 22 J (soit environ 3% de l'énergie d'entrée du carburant comme illustré ci-dessus sur la [figure 9](#)) avec une valeur minimale proche de 19 J et une dispersion entre les configurations non revêtues et revêtues d'environ 2 J. La dispersion est donc d'environ 0,3% de l'énergie d'entrée du combustible.
- On observe la même dispersion d'environ 2 J entre les configurations enrobées et non enrobées en termes de pertes de pompage qui sont en moyenne voisines de 18 J. Là encore, la dispersion est donc d'environ 0,3% de l'énergie d'entrée du carburant.
- Pour un λ donné, la capacité thermique du mélange est supposée être la même pour les configurations revêtues et non revêtues car le rapport air-carburant et le rapport de dilution avec les gaz brûlés résiduels ne sont pas affectés par le revêtement, et aussi parce qu'il a été montré que le revêtement n'a aucun impact sur le rendement volumétrique et la température du mélange au moment de la fermeture de la soupape d'admission (voir [Fig.12](#)).
- Aucun cognement ne peut être observé avec ce moteur à une charge aussi faible, ce qui signifie que la comparaison des configurations revêtues et non revêtues est effectuée au même moment de combustion optimal. Cependant, certains effets distincts peuvent être observés sur le processus de combustion. La [figure 14](#) montre que le taux de dégagement de chaleur maximal est clairement augmenté avec le revêtement #E, de manière cohérente avec les émissions de NOx légèrement plus élevées comme le montre la [figure 15](#). Ces résultats indiquent que l'environnement thermique à l'intérieur de la chambre de combustion a été modifié de telle sorte que la vitesse de combustion était plus élevée et que le processus de formation thermique des NOx a été amélioré. Cette observation confirmerait ainsi les performances thermiques du revêtement #E qui ont conduit à l'oscillation maximale de température lors des expériences réalisées dans le moteur optique (voir Sect. 4.1).

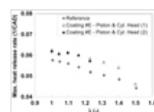


Fig. 14

Débit thermique maximal à 3000 tr / min, 7 bar IMEP.

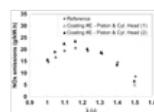


Fig. 15

Émissions de NOx à 3000 tr / min, 7 bar IMEP.

Des analyses de combustion basées sur la première loi de la thermodynamique ont ensuite été effectuées pour calculer les pertes de refroidissement survenant à l'intérieur de la chambre de combustion (excluant ainsi les échanges convectifs à l'intérieur des orifices d'échappement). De manière surprenante, ces analyses ont montré que les pertes de refroidissement avec les revêtements étaient plus élevées que pour la référence non revêtue comme le montre la [figure 16](#). Une différence maximale d'environ 10 J peut être observée entre les configurations revêtues et non revêtues, soit environ 1,4% de l'énergie d'entrée du carburant. Cette variation est plus élevée que celles des pertes de pompage et des énergies imbrûlées, et pourrait expliquer à elle seule la diminution du rendement indiqué illustré à la [figure 13](#). En parallèle, une légère diminution des températures d'échappement est observée pour les essais réalisés avec des revêtements mais cette diminution ne représenterait que moins de 1 J, confirmant ainsi que l'augmentation des pertes de refroidissement est directement compensée par une diminution du travail indiqué. Cette observation inattendue a été confirmée pour tous les points de fonctionnement.

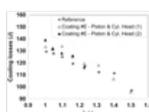


Fig. 16

Pertes de refroidissement à l'intérieur de la chambre de combustion à 3000 tr / min, 7 bar IMEP.

Pour résumer, les émissions d'hydrocarbures imbrûlés plus élevées ont d'abord été mesurées avec les revêtements #A et #C appliqués sur la surface du piston. Des investigations complémentaires ont ensuite montré que la rugosité de surface n'a pas d'impact sur ces émissions contrairement à la porosité ouverte sur le dessus du revêtement d'isolation intelligent. Cette observation a ensuite été confirmée avec le revêtement #E lorsqu'il était appliqué uniquement sur la surface du piston, puis sur les surfaces du piston et de la culasse. Avec cette configuration ultérieure, des effets clairs pourraient être observés par rapport à la référence non revêtue, mais aucune réduction de consommation de carburant n'a pu être mesurée. Au contraire, pour la plupart des points de fonctionnement, des augmentations de la consommation de carburant et des pertes de refroidissement ont été observées. Ce résultat mitigé suggère que le bilan thermique n'est pas seulement affecté par la réduction de la différence de température entre les parois et le gaz comme prévu, ou du moins pas aussi directement que prévu. Plusieurs hypothèses supplémentaires sont désormais envisagées pour expliquer comment le transfert de chaleur dans les moteurs à allumage commandé peut être modifié lors de l'utilisation de revêtements isolants. Comme mentionné par Uchida et Osada [4], on pourrait supposer par exemple que l'augmentation de la température de surface ou la texture de la surface du revêtement pourraient abaisser l'épaisseur de la couche limite thermique et induire une augmentation du coefficient de transfert thermique qui contrebalancerait l'effet positif de la différence de température diminuée entre le gaz et les murs. Kosaka *et coll.* [20] ont également récemment rapporté des enquêtes intéressantes sur ce sujet. Dans ces travaux, la spectroscopie LIP et Raman anti-Stokes cohérente est utilisée pour mesurer les températures de la paroi et de la phase gazeuse avec une configuration de brûleur de trempe de paroi latérale, sans revêtement isolant mais avec une température de paroi variable. On montre qu'une température de paroi élevée favorise la diminution de la distance de trempe et l'augmentation de la température de la phase gazeuse à proximité de la paroi. Par conséquent, la vitesse de la flamme laminaire à proximité de la paroi est également augmentée, la flamme peut se propager plus près de la paroi et le flux thermique résultant est augmenté malgré la température de paroi plus élevée. Ce mécanisme contre-intuitif pourrait également expliquer les résultats mitigés obtenus jusqu'à présent avec les revêtements isolants dans l'étude rapportée ici.

5. Conclusion

Cinq différents revêtements d'isolation intelligents à faible conductivité thermique et capacité thermique ont été appliqués sur des pièces de moteur en aluminium avec la technique de projection plasma atmosphérique et ont été testés avec deux moteurs différents. Les résultats ont montré que la rugosité de la surface du piston n'a aucun impact sur les émissions d'hydrocarbures imbrûlés, mais les porosités ouvertes au-dessus de la couche de revêtement d'isolation intelligente doivent être scellées afin d'éviter des augmentations significatives des émissions d'hydrocarbures imbrûlés. Grâce à la technique LIP, une variation de température maximale de plus de 100 °C a été mesurée à faible charge avec le revêtement optimisé #E, confirmant ainsi l'impact attendu de la faible conductivité thermique et capacité thermique, et suggérant ainsi un impact positif sur consommation de carburant. Même si certains impacts positifs distincts ont été observés lorsque ce revêtement optimisé #E a été appliqué à la fois sur les surfaces de piston et de culasse du SCE métallique, les pertes de refroidissement à l'intérieur de la chambre de combustion ont été augmentées. En conséquence, il a été observé que la consommation spécifique de carburant qui en résultait était augmentée ou, dans le meilleur des cas, maintenue constante en tenant compte de la précision des mesures.

Plusieurs perspectives sont désormais possibles pour approfondir l'analyse et améliorer encore ces résultats. En ce qui concerne les effets fondamentaux des revêtements, des études expérimentales ou numériques supplémentaires pourraient être effectuées pour évaluer les effets de la distribution de l'oscillation de température sur l'ensemble des surfaces du piston et de la culasse. Les impacts du revêtement sur la couche limite thermique doivent également être étudiés en relation avec le mode de combustion considéré car certains effets peuvent être différents entre les flammes de diffusion et de propagation. Des systèmes de combustion alternatifs devraient également être envisagés pour identifier la meilleure adéquation entre les effets d'isolation attendus et la stratégie de combustion. Finalement,

Remerciements

Ce projet a reçu un financement du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne dans le cadre de la convention de subvention n° 724084. Les auteurs tiennent à remercier F. Moreau, T. Colliou et N. Leblanc pour les essais moteurs et les analyses SEM.

Les références

- Bryzik W., Kamo R. (1983) TACOM / Cummins Adiabatic Engine Program, SAE Technical Paper 830314. doi: [10.4271 / 830314](https://doi.org/10.4271/830314) . [[Google Scholar](#)]
- Assanis D., Mathur T. (1990) L'effet des revêtements céramiques minces sur les performances des moteurs à allumage par étincelle, SAE Technical Paper 900903. doi: [10.4271 / 900903](https://doi.org/10.4271/900903) . [[Google Scholar](#)]
- Binder C., Abou Nada F., Richter M., Cronhjort A., Norling D. (2017) Analyse de la perte de chaleur d'un piston en acier et d'un piston revêtu de YSZ dans un moteur diesel à usage intensif utilisant des mesures de thermométrie au phosphore, SAE Int. J. Engines 10, 4, 1954–1968. doi: [10.4271 / 2017-01-1046](https://doi.org/10.4271/2017-01-1046) . [[Google Scholar](#)]
- Uchida N. et Osada H. (2017) Un nouveau concept d'isolation de piston pour les moteurs diesel lourds afin de réduire la perte de chaleur du mur. SAE Int. J. Engines 10, 5, 2565–2574. doi: [10.4271 / 2017-24-0161](https://doi.org/10.4271/2017-24-0161) . [[Google Scholar](#)]
- Uchihara K., Ishii M., Nakajima H., Wakisaka Y. (2018) Une étude sur la réduction des pertes de refroidissement dans un piston partiellement isolé pour moteur diesel, document technique SAE 2018-01-1276. doi: [10.4271 / 2018-01-1276](https://doi.org/10.4271/2018-01-1276) . [[Google Scholar](#)]
- Fujimoto H., Yamamoto H., Fujimoto M., Yamashita H. (2011) A Study on Improvement of Indicated Thermal Efficiency of ICE Using High Compression Ratio and Reduction of Cooling Loss, SAE Technical Paper 2011-01-1872. doi: [10.4271 / 2011-01-1872](https://doi.org/10.4271/2011-01-1872) . [[Google Scholar](#)]
- Caputo S., Millo F., Cifali G., Pesce F. (2017) Enquête numérique sur les effets de différentes stratégies d'isolation thermique pour un moteur diesel de voiture particulière, SAE Int. J. Engines 10, 4, 2154–2165. doi: [10.4271 / 2017-24-0021](https://doi.org/10.4271/2017-24-0021) . [[Google Scholar](#)]
- Kaudewitz T., Lange F., Rablbauer R., Mork A., Schüttenhelm M., Frambourg M., Lösche-ter Horst T., Pitsch H. (2018) Innovative piston technologies for future performance and emissions objectives, in: 27th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, 8-10 octobre 2018, Aix-la-Chapelle, Allemagne. [[Google Scholar](#)]
- THESTA (2016) Innovatives Thermomanagement für Stahlkolben, Rapport final. doi: [10.2314 / GBV: 870173170](https://doi.org/10.2314/GBV:870173170) . [[Google Scholar](#)]
- Schaedler T., Andruskiewicz P. (2018) Revêtements de barrière thermique suivant la température pour les moteurs à haut rendement, DOE Vehicle Technologies Annual Merit Review. [[Google Scholar](#)]
- Toyota Central R&D Labs., Inc. (2017) Les défis des moteurs à combustion interne pour atteindre une société à faible émission de carbone (numéro spécial complet), R & D Review of Toyota CRDL 48, 4. <https://www.tytlabs.com/review/> , ISSN 2186-9014. [[Google Scholar](#)]

- Yamashita H., Kawaguchi A., Iguma H., Tanaka K., Ogawa T., Yamashita C., Fukui K., Wakisaka Y. (2018) Isolation thermique par variation de température dans les parois de la chambre de combustion (cinquième rapport), JSAE 20184159 (en japonais). [[Google Scholar](#)]
- Bouteiller B., Allimant A., Zaccardi J.-M., Chérel J. (2019) Développement de nouveaux revêtements de barrière thermique en céramique dans un moteur à allumage par étincelle - enquête expérimentale, dans: International Thermal Spray Conference and Exposition, 26-29 mai, 2019, Yokohama, Japon. [[Google Scholar](#)]
- Kashdan J., Bruneaux G. (2011) Mesures de phosphorescence induite par laser de la température de surface de la chambre de combustion sur un moteur diesel monocylindre, SAE Technical Paper 2011-01-2049. doi: [10.4271 / 2011-01-2049](#) . [[Google Scholar](#)]
- Fukui K., Wakisaka Y., Nishikawa K., Hattori Y., Kosaka H., Kawaguchi A. (2016) Développement d'une technique de mesure instantanée de la température pour la surface de la chambre de combustion et vérification de l'oscillation de température, SAE Technical Paper 2016-01-0675 . doi: [10.4271 / 2016-01-0675](#) . [[Google Scholar](#)]
- Knappe C., Andersson P., Algotsson M., Richter M., Linden J., Alden M., Tuner M., Johansson B. (2011) Phosphorescence induite par laser et impact de l'épaisseur du revêtement de phosphore sur l'angle de vilebrequin résolu températures de paroi du cylindre, document technique SAE 2011-01-1292. doi: [10.4271 / 2011-01-1292](#) . [[Google Scholar](#)]
- Köpple F., Seboldt D., Jochmann P., Hettinger A., Kufferath A., Bargende M. (2014) Etude expérimentale de l'impact du carburant et du refroidissement par pulvérisation sur le piston d'un moteur GDI via des mesures de température de surface instantanée, SAE Technical Paper 2014-01-1447. doi: [10.4271 / 2014-01-1447](#) . [[Google Scholar](#)]
- Ishibashi A., Nakamura M., Muramatsu H. (2014) Mesure de la température du piston en combustion interne avec méthode téléométrique, document technique SAE 2014-32-0051. doi: [10.4271 / 2014-32-0051](#) . [[Google Scholar](#)]
- Broatch A., Olmeda P., Margot X., Gomez-Soriano J. (2019) Simulations numériques pour évaluer l'impact des revêtements d'isolation avancés sur la combustion pauvre d'essence additivée H₂ dans un moteur turbocompressé à allumage par étincelle, Appl. Thermie. Eng. 148, 674-683. doi: [10.1016 / j.applthermaleng.2018.11.106](#) . [[Google Scholar](#)]
- Kosaka H., Zentgraf F., Scholtissek A., Bischoff L., Häber T., Suntz R., Albert B., Hasse C., Dreizler A. (2018) Flux de chaleur des parois et formation / oxydation de CO en laminaire et turbulent trempe des parois latérales des flammes de méthane et DME, Int. J. Heat Fluid Flow 70, 181-192. doi: [10.1016 / j.ijheatfluidflow.2018.01.009](#) . [[Google Scholar](#)]

Matériel supplémentaire

Figure 1S. Analyse de la composition chimique des cristaux de revêtement de phosphore par spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie.

Figure 2S. Températures de surface du piston à 2000 tr / min, 4 bar IMEP ($\lambda = 1,21$) en fin de course d'échappement (de -60 à 0 CAD) et en début de course d'admission (de 0 à 60 CAD).

([Accédez ici](#))

Tous les tableaux

Tableau 1 Propriétés du revêtement isolant mesurées à 300 ° C.

[Dans le texte](#)

Tableau 2 Principales caractéristiques du moteur monocylindre en métal.

[Dans le texte](#)

Tableau 3 Principales caractéristiques du moteur monocylindre optique.

[Dans le texte](#)

Tableau 4 Aperçu des variations de température.

[Dans le texte](#)

Tous les chiffres

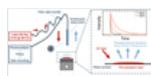


Fig. 1

Configuration LIP pour la mesure de la température de surface.

[Dans le texte](#)



Fig. 2

Emplacement du revêtement phosphoreux.

[Dans le texte](#)

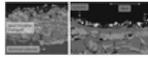


Fig. 3

Analyses SEM du revêtement phosphoreux appliqué sur le revêtement isolant intelligent #A.

[Dans le texte](#)

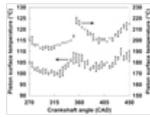


Fig. 4

Températures de la surface du piston pour les pistons en aluminium non revêtus dans des conditions motrices à 1500 tr / min (axe gauche) et à 2000 tr / min, 4 bar IMEP ($\lambda = 1,21$, axe droit).

[Dans le texte](#)

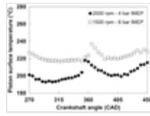


Fig. 5

Température de la surface du piston pour les pistons en aluminium non revêtus ($\lambda = 1,21$ pour les deux points de fonctionnement).

[Dans le texte](#)

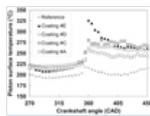


Fig. 6

Températures de surface du piston à 2000 tr / min, 4 bar IMEP ($\lambda = 1,21$ pour toutes les configurations).

[Dans le texte](#)

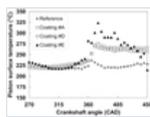


Fig. 7

Températures de surface du piston à 1500 tr / min, 6 bar IMEP ($\lambda = 1,21$ pour toutes les configurations).

[Dans le texte](#)

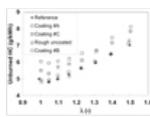


Fig. 8

Émissions d'hydrocarbures non brûlés à 3000 tr / min, 7 bar IMEP.

[Dans le texte](#)

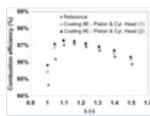


Fig. 9

Efficacité de combustion à 3000 tr / min, 7 bar IMEP.

[Dans le texte](#)

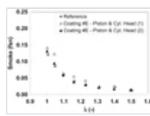


Fig. 10

Émissions de fumée à 3000 tr / min, 7 bar IMEP.

[Dans le texte](#)

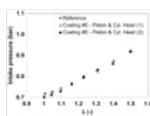


Fig. 11

Pression d'admission à 3000 tr / min, 7 bar IMEP.

[Dans le texte](#)

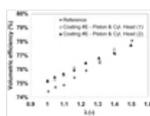


Fig. 12

Rendement volumétrique à 3000 tr / min, 7 bar IMEP.

[Dans le texte](#)

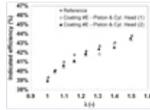


Fig. 13

Rendement indiqué à 3000 tr / min, 7 bar IMEP.

[Dans le texte](#)

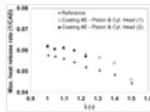


Fig. 14

Débit thermique maximal à 3000 tr / min, 7 bar IMEP.

[Dans le texte](#)

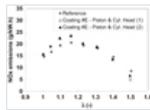


Fig. 15

Émissions de NOx à 3000 tr / min, 7 bar IMEP.

[Dans le texte](#)

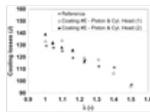


Fig. 16

Pertes de refroidissement à l'intérieur de la chambre de combustion à 3000 tr / min, 7 bar IMEP.

[Dans le texte](#)