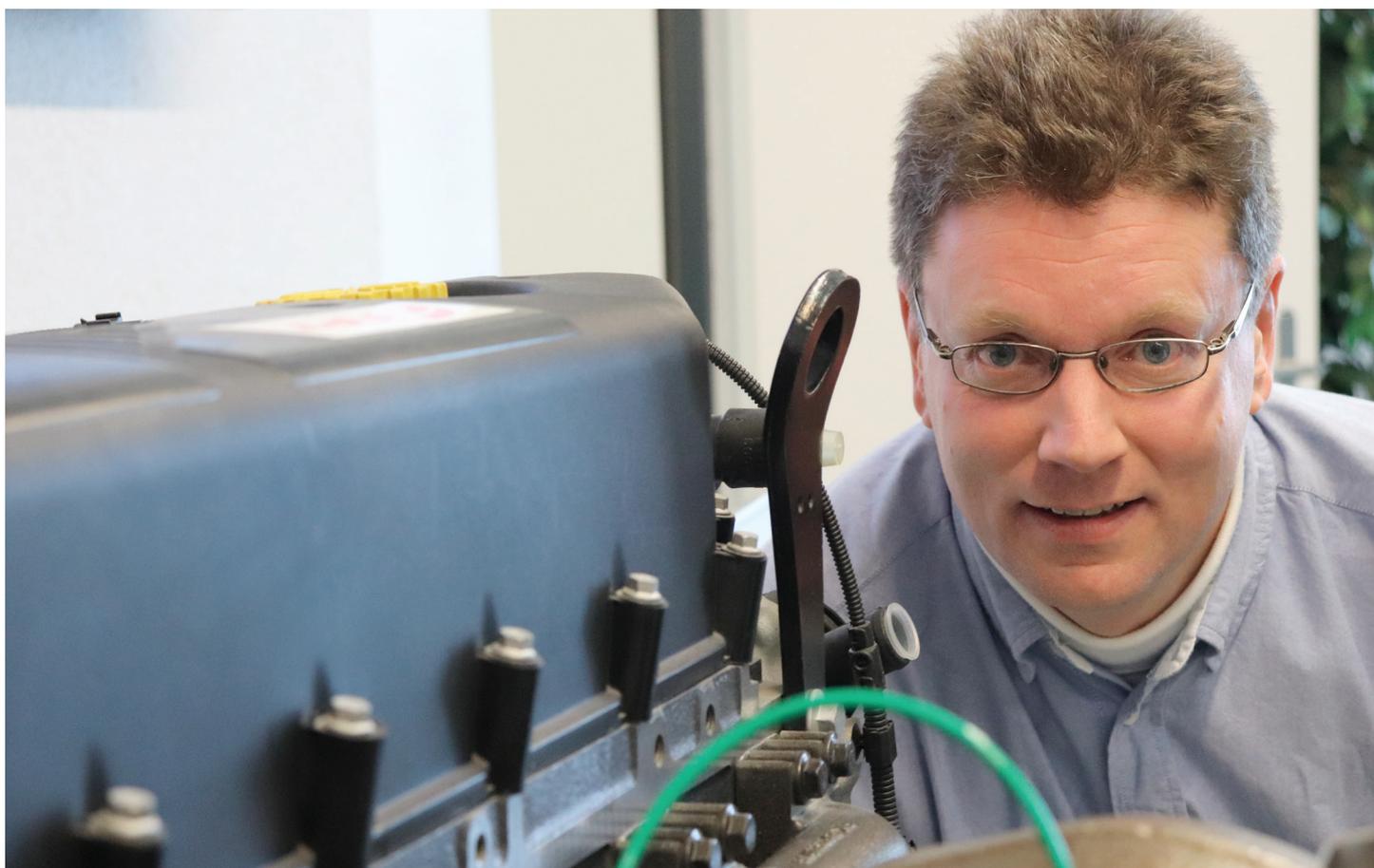


AMÉLIORER LE RENDEMENT DES MOTEURS DIESEL

Installés dans les voitures de tourisme et les véhicules utilitaires, les moteurs Diesel rendent de bons et loyaux services depuis des décennies. Cependant, leur impact environnemental fait actuellement l'objet d'un débat animé. La société FPT Motorenforschung AG à Arbon (TG) souhaite poursuivre l'amélioration du moteur Diesel dans la mesure où il manque encore des alternatives équivalentes pour les véhicules utilitaires et les machines lourdes. Dans un projet de recherche financé par l'Office fédéral de l'énergie, les ingénieurs de la société FPT ont démontré des technologies pour augmenter son rendement et réduire davantage les émissions d'oxyde d'azote.



Gilles Hardy travaille chez FPT Motorenforschung à Arbon pour rendre les moteurs Diesel des véhicules utilitaires plus efficaces et plus propres.
Photo: B. Vogel

Arbon, au bord du lac de Constance, était un au lieu de l'industrie suisse au siècle dernier. Jusque dans les années 80, le groupe Saurer produisait, entre autres, des camions (poids lourds) et menait des recherches de haut niveau dans le domaine des moteurs Diesel. Au début du 20^e siècle, les moteurs Diesel, portant le nom de Rudolf Diesel, ont été développés pour être utilisés dans les véhicules utilitaires tout en étant sans cesse améliorés. Saurer a largement contribué à faire du moteur Diesel, à allumage par compression, le groupe propulseur favori pour les véhicules utilitaires.

La production de poids-lourds à Arbon fait désormais partie du passé. La recherche et le développement des moteurs à diesel y sont toutefois restés actifs et sont poursuivis par la société FPT Motorenforschung AG. Il s'agit de l'un des sept centres de recherche et de développement de FPT Industrial, un fabricant mondial de groupes motopropulseurs, qui appartient au groupe CNH Industrial, lequel emploie 64'000 employés dans le monde entier. FPT Motorenforschung emploie 250 personnes à Arbon, essentiellement des ingénieurs

et des mécaniciens. Ils perfectionnent et développent notamment des moteurs diesel pour les poids-lourds ainsi que pour les tracteurs agricoles et les engins de construction. Les experts en moteurs disposent de pas moins de 30 bancs d'essai dans le but d'améliorer la combustion, le post-traitement des gaz d'échappement ou le système électronique de contrôle des moteurs.

Un moteur Diesel avec de meilleures technologies

Les moteurs Diesel sont soumis à la pression des autorités et du grand public qui souhaite les voir plus sobres et moins polluants. « Afin d'assurer l'avenir du moteur Diesel en tant que solution de propulsion plus respectueuse de l'environnement, des développements supplémentaires doivent être poursuivis dans le domaine de la combustion et du post-traitement des gaz d'échappement en combinaison avec le support de système de contrôle électronique », déclare Gilles Hardy, ingénieur électromécanicien d'origine belge qui, après des étapes dans la filiale poids lourds de Toyota, Volvo et le

QUATRE TYPES DE PERTES

Le moteur Diesel d'un véhicule utilitaire transforme aujourd'hui environ 40% de l'énergie stockée dans le carburant Diesel en énergie mécanique (puissance de conduite/travail). Cela signifie une perte d'énergie d'environ 60%, et ce, sur quatre points:

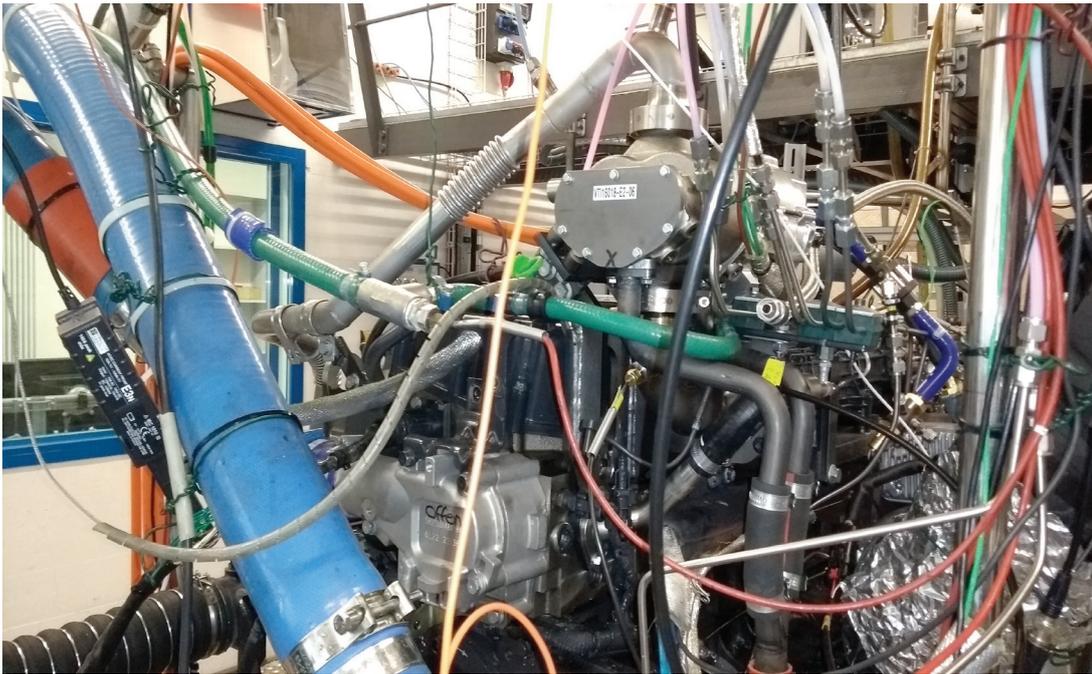
La **friction moteur** inclut les pertes de charge régulières entre les pièces mobiles du moteur mais également les besoins énergétiques pour les accessoires comme la pompe d'injection ou la pompe à eau. Les pertes dues à la friction du moteur altèrent le rendement moteur d'un facteur $\sim 0,9$.

Les **pertes dues au transfert de gaz** se produisent lorsque l'air/carburant entre dans le cylindre ou lorsque les gaz d'échappement sortent du cylindre. Les pertes dues au transfert de gaz n'altèrent le rendement du moteur que de manière insignifiante (facteur ~ 1). Les turbocompresseurs modernes et efficaces offrent parfois même des avantages durant le cycle d'admission d'air (facteur > 1).

Les **pertes de combustion** se produisent après l'auto-allumage du mélange air-carburant dans le cylindre, dues notamment aux limites physiques du rapport de compression et de la vitesse de combustion. Les pertes directement liées au processus de combustion altèrent très fortement le rendement moteur (facteur $\sim 0,6$).

Les **pertes de chaleur par la paroi** se produisent parce que le mélange air-carburant dans le cylindre est beaucoup plus chaud que l'environnement. Par conséquent, la chaleur se perd à travers la paroi du cylindre vers l'eau de refroidissement environnante. Les pertes de chaleur altèrent le niveau du rendement moteur d'un facteur $\sim 0,85$.

Le niveau de rendement moteur global est le produit des rendements individuels. BV



Vue sur le banc d'essai des moteurs: la pompe RGE se trouve en haut à droite. Photo: FPT Motorenforschung

fabricant de moteurs de navires Wärtsilä, conduit désormais des recherches innovatrices sur les moteurs Diesel à Arbon. Rendre les moteurs Diesel plus efficaces et moins polluants – tel était également l'objectif d'un projet de recherche de l'Office fédéral de l'énergie que Gilles Hardy a réalisé au cours des quatre dernières années avec son équipe à Arbon, en collaboration avec le Laboratoire fédéral d'essai des matériaux

et de recherche (Empa). Le projet, intitulé « Augmentation du rendement des moteurs Diesel pour véhicules utilitaires pour atteindre 50% », consistait à chercher des moyens d'améliorer les diverses technologies impliquées de telle sorte qu'un moteur Diesel puisse convertir la moitié de l'énergie chimique stockée dans le carburant en énergie mécanique (performance). Aujourd'hui, le rendement thermique des moteurs de

Etapes d'optimisation potentielles pour un moteur Diesel destiné aux véhicules utilitaires. Diagramme: FPT Motorenforschung

Point de charge: 1200x75% Turbocompresseur à un niveau Moteur NOx à l'arrêt: BS NOx = 10g/kWh	Friction moteur +WHR Niveau d'efficacité [%]	Pertes changement de charge Niveau d'efficacité [%]	Pertes de combustion Niveau d'efficacité [%]	Pertes de chaleur par la paroi Niveau d'efficacité [%]	Niveau d'efficacité totale [%]
EURO VI sans RGE (meilleur point)	93.1 %	99.0 %	55.7 %	84.9 %	43.6 %
Opt. sans RGE sans WHR	95.0 %	99.0 %	59.3 %	84.5 %	47.2 %
Delta (opt. RGE - EURO VI)	+1.9% point	+0.0% point	+3.6% point	-0.4% point	+3.6% point
Opt. RGE avec WHR (eTurbo)	98.3 %	97.0 %	59.3 %	84.5 %	47.8 %
Delta (eTurbo - opt. RGE)	+3.3% point	-2.0% point	+0.0% point	0.0% point	+0.6% point
Représentation avec eTurbo & TBC	99.0 %	97.0 %	60.0 %	86.8 %	50.0 %
Delta (TBC)	+0.7% point	+0.0% point	+0.7% point	2.3% point	+2.2% point

Remarque:

WHR: Waste Heat Recovery > utilisation de l'énergie des gaz d'échappement

TBC: Thermal Boundary Coating > revêtement thermique limite

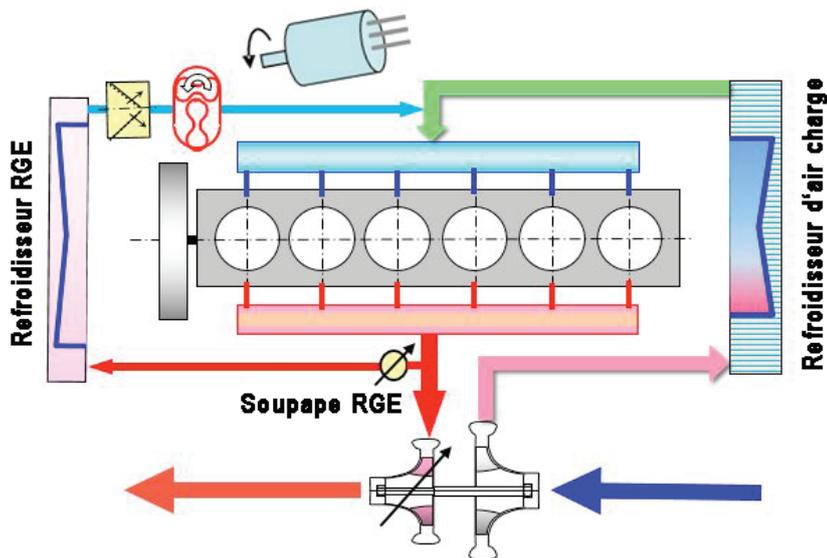
poids-lourds - nommée « Brake Thermal Efficiency » (BTE) par les experts - est de 40% en fonctionnement quotidien en charge partielle et peut atteindre 45% sur le point de fonctionnement optimal (voir encadré p. 2).

Pour atteindre son objectif, l'équipe a installé sur un banc d'essai, un moteur Diesel qui réunit les meilleures technologies disponibles aujourd'hui. La culasse du moteur fût coulée avec un matériau spécial de telle sorte que la pression maximum dans le cylindre a pu être augmentée à 270 bars, soit 50 bars de plus que dans les moteurs habituels, ce qui permet d'augmenter le rendement moteur par accroissement du taux de compression. Le moteur a été exploité à des fins expérimentales pour un total de 500 heures au banc d'essai et a été modifié avec l'ajout ou le remplacement de nouveaux composants à trois reprises. Pour évaluer les performances avec précision, près de 1500 points ont été mesurés sur le banc d'essai à l'Empa, Dübendorf.

D'importantes économies de carburant

Un résultat majeur de l'étude: il est intéressant d'optimiser la géométrie de la chambre de combustion pour une certaine

plage de régime de charge partielle du moteur Diesel. Cela signifie que le moteur Diesel d'un tracteur pour semi-remorque de 40 tonnes – pour donner un exemple – sera développer de telle sorte que le moteur ne soit pas optimisé uniquement sur la puissance maximale de 350 à 400 kW mais également pour l'exploitation avec une puissance de 100 kW. « Les améliorations lors de la combustion ont permis de réduire la consommation de carburant de 1 à 1,5% (le rendement moteur passe de 45% à 45,7%). Concernant le un tracteur pour semi-remorque (30 l/10 km), cela réduit la consommation de 0,5 l, ce qui représente environ 7500 l de carburant pour un montant de 10'000 fr. sur le cycle de vie (1,5 millions de km) », prédit Mr. Hardy. Les modifications développées sur ordinateur avec l'aide d'un logiciel CFD, étalonné sur des mesures sur le moteur, concernent, par exemple, la géométrie du nez d'injecteur, le flux du mélange air-carburant dans la chambre de combustion, le taux de compression dans le cylindre (portée de 16,5 à 20,5) et la forme du piston. En tenant compte de l'optimisation de la friction et des améliorations apportées au turbocompresseur, le niveau d'efficacité est passé de 43,6% à 47,2% (ce qui correspond à une réduction de 8,3% de la consommation). En combinaison



Représentation schématique du recyclage des gaz d'échappement (RGE ou EGR en anglais): les gaz d'échappement (flèche verticale rouge) qui sortent du moteur (bloc gris) sont partiellement renvoyés du côté de l'échappement du moteur vers le côté induction d'air du moteur. Ce faisant, ils circulent à travers une soupape, un refroidisseur, un clapet anti-retour et la pompe RGE. La pompe est nécessaire car la pression du côté de l'échappement est parfois plus faible que celle du côté de chargement d'air. Cependant, un moteur fonctionne parfois à des points de charge sur lesquels la pression des gaz d'échappement est supérieure à la pression de charge; dans ce cas, la pompe RGE peut même fournir de la puissance électrique. Le graphique de droite illustre la récupération de l'énergie des gaz d'échappement à l'aide d'un turbocompresseur. Graphique: rapport final Office fédéral de l'énergie



Les chercheurs de FPT utilisent une des pompes conçues par Eaton pour la recirculation des gaz d'échappement (photo). Leur consommation d'énergie peut provoquer une augmentation jusqu'à 0,5% de la consommation du moteur. Toutefois pour certains points de fonctionnement du moteur, la pression du côté de l'échappement est plus élevée que celle du côté de l'admission. Dans ce cas, la pompe peut même entraîner une réduction de la consommation d'énergie. Photo: Eaton

avec l'utilisation de l'énergie des gaz d'échappement au moyen d'e-Turbo, des rendements de pointe de 47,8% peuvent être atteints (ce qui correspond à une réduction de 9,6% de la consommation). Dans ce cas, jusqu'à 43'000 litres de carburant sont économisés sur toute la durée de vie du véhicule.

Un second résultat majeur concerne la réduction des émissions nocives. Pour la réduction des émissions d'oxydes d'azote, les moteurs Diesel sont aujourd'hui équipés d'un catalyseur SCR qui élimine jusqu'à 98% des oxydes d'azote (NO , NO_2) des gaz d'échappement avec l'injection d'une solution d'urée. L'industrie automobile s'attend à ce que les futures normes européenne (EURO VII) réduisent encore plus les valeurs d'émission d'oxydes d'azote; la technologie SCR pourrait alors ne plus suffire. Dans ce contexte, les ingénieurs de FPT-Motorenforschung ont étudié l'amélioration d'un procédé reconnu pour la réduction de la formation d'oxyde d'azote dans la chambre de combustion: le recyclage des gaz d'échappement (RGE), lequel est majoritairement utilisé dans les moteurs Diesel de voitures de tourisme et souvent dans les poids-lourds. Ce faisant, une partie du gaz d'échappement est restitué et mélangé à l'air frais avant de parvenir dans la chambre de combustion. Le mélange des gaz d'échappement permet de réduire la teneur en oxygène et ainsi les émissions de NO_x lors de la combustion dans le moteur. Cependant, la réduction de la teneur en oxygène comporte le risque d'une production accrue de suie dans le moteur. Cela peut être évité en dosant la quantité de gaz d'échappement mélangée en fonction de la plage de régime d'utilisation du moteur.

La pompe RGE permet d'obtenir des valeurs de NO_x plus basses

Il existe différentes méthodes pour recycler les gaz d'échappement. Gilles Hardy et son équipe de chercheurs empruntent une nouvelle voie en utilisant une pompe volumétrique. « Avec la pompe RGE, nous pouvons doser la quantité de gaz d'échappement restituée avec précision en fonction de l'état de fonctionnement du moteur et ainsi empêcher la formation accrue de particules de suie. Grâce à la pompe RGE, nous pouvons réduire les émissions brutes de NO_x jusqu'à 50% par rapport à un moteur Diesel sans RGE. Cela permet une réduction des NO_x pouvant atteindre 99% en combinaison avec un catalyseur SCR », affirme Mr. Hardy. La pompe RGE a toutefois un inconvénient parce qu'elle consomme également de l'énergie, réduisant ainsi légèrement le niveau de rendement du moteur Diesel. A l'heure actuelle, l'industrialisation de ce concept est encore incertaine; elle dépend de l'analyse coûts-utilité, laquelle inclut la consommation d'AdBlue.

REJETS THERMIQUES

Un thème du projet de recherche décrit dans le texte principal était la récupération de la chaleur des gaz d'échappement. L'électricité peut être produite à partir des gaz d'échappement, qui peuvent atteindre des températures allant jusqu'à 450 °C, grâce à une turbine à gaz à laquelle est raccordé un générateur. Elle peut ensuite être utilisée dans des moteurs hybrides, tels que ceux qui seront probablement utilisés dans les poids-lourds à l'avenir. Les résultats de cette étude partielle donnent à réfléchir, déclare Gilles Hardy: « Bien que la récupération de la chaleur nous permette de réduire la consommation de carburant de 2 à 3% à forte charge, cet avantage est altéré par des coûts d'investissement considérables. » Le chercheur en moteurs voit le domaine d'application le plus probable dans les machines de construction et les moissonneuses-batteuses, qui fonctionnent toujours à pleine charge et sont donc les plus susceptibles de bénéficier de l'avantage d'un haut rendement. BV

Les résultats du projet de recherche contribuent à rendre les moteurs Diesel plus efficaces et plus propres. Mais pour porter le rendement des moteurs de camions aux 50% visés, d'autres mesures sont nécessaires, comme l'affirme Gilles Hardy: « Quelques petites étapes vers cet objectif sont réalisables grâce à une nouvelle réduction de la friction du moteur, des accessoires plus efficaces, une meilleure combustion et un rendement accru du turbocompresseur. Des progrès plus importants vers les 50% ou au-delà pourraient être possibles par l'isolation de la chambre de combustion en vue de réduire les pertes de chaleur par les parois, mais la technologie pour appliquer ces couches d'isolation n'est pas encore disponible. L'approche la plus prometteuse pour réduire les émissions de CO_2 des gaz d'échappement est celle des carburants synthétiques produits à partir de sources d'énergie renouvelables comme le méthanol ou le DME (éther méthylique). » FPT intégrera les conclusions sur l'augmentation du rendement moteur et la réduction des émissions dans un projet de suivi concernant l'utilisation de carburants synthétiques.

➤ Le **rapport final** du projet de recherche de l'OFEN « Augmentation du rendement des moteurs Diesel pour véhicules utilitaires pour atteindre 50% » est disponible sur: <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=38622>

- Stephan Renz (info[at]renzconsulting.ch), responsable du programme de recherche de l'OFEN « Systèmes énergétiques basés sur la combustion », communique des **informations** sur le projet.
- Vous trouverez d'autres **articles spécialisés** concernant les projets phares et de recherche, les projets pilotes et de démonstration dans le domaine de la combustion sur www.bfe.admin.ch/ec-combustion