

SANS ÉMISSIONS DIRECTES DE CO₂

L'hydrogène vert permet de propulser des véhicules sans émissions de gaz à effet de serre au niveau du pot d'échappement : pour ce faire, une pile à combustible transforme l'hydrogène en électricité, laquelle actionne alors un moteur électrique. Une alternative consiste à transformer l'hydrogène directement en énergie mécanique avec un moteur à combustion. Des chercheurs du Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche (Empa) de Dübendorf ont étudié, en collaboration avec des partenaires allemands, un nouveau procédé de combustion pour un moteur à combustion hydrogène, l'objectif étant de l'utiliser dans des véhicules utilitaires.

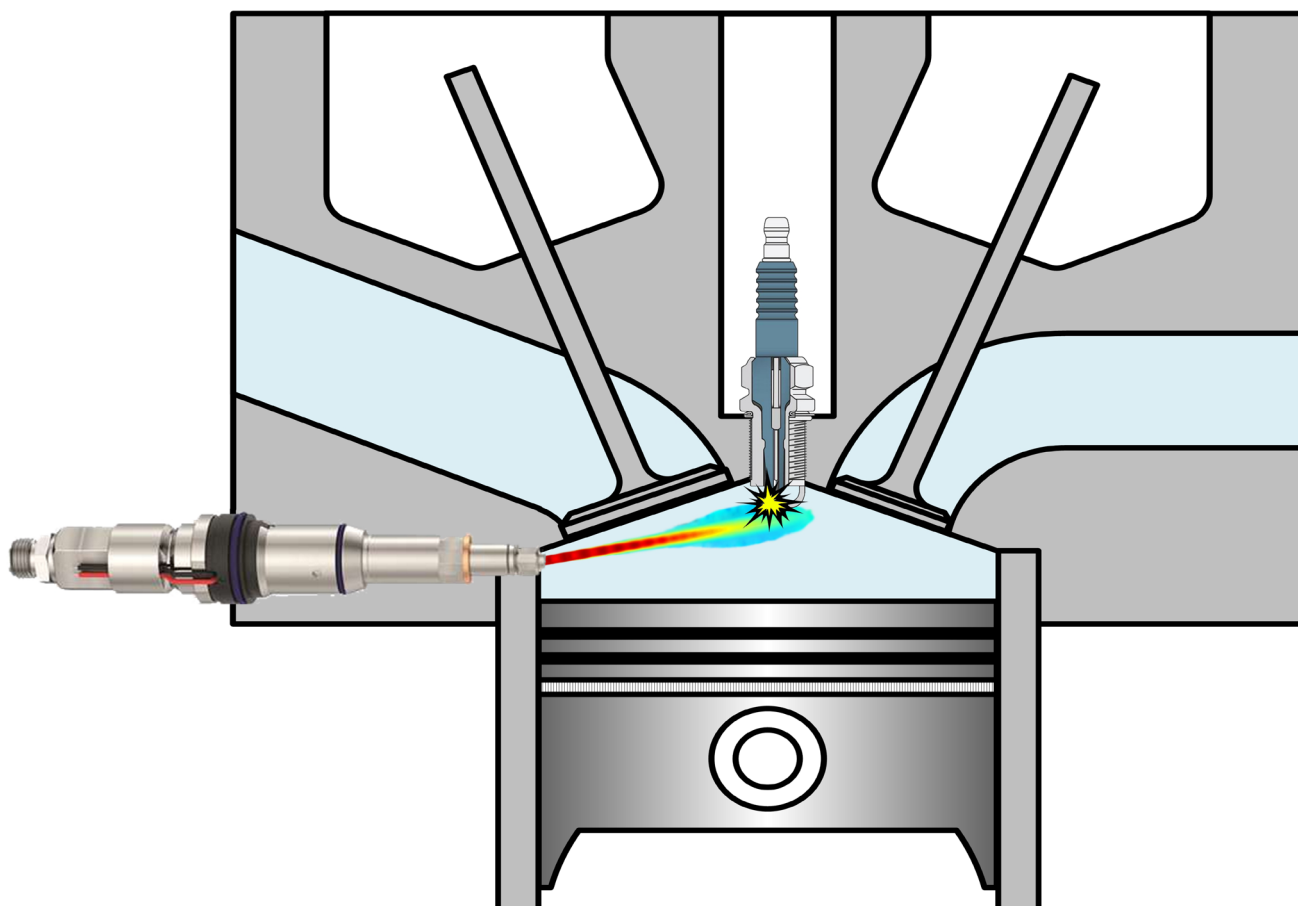
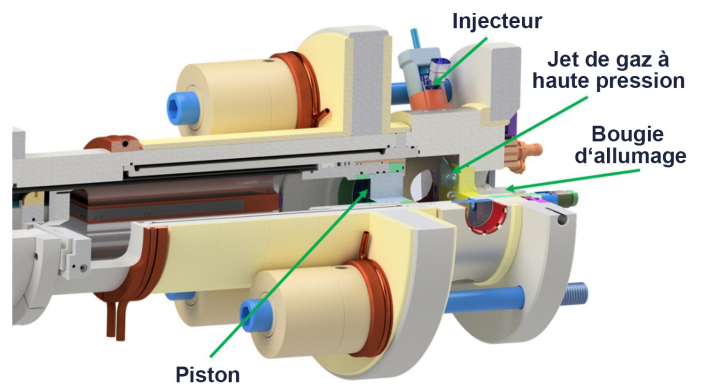


Illustration du nouveau procédé de combustion de l'hydrogène : de l'hydrogène est injecté par la gauche dans la chambre de combustion avec de l'air comprimé (jet rouge et bleu) et allumé par une bougie. L'expansion due à la combustion pousse le piston vers le bas et les gaz de combustion s'échappent par la soupape en haut à droite. L'illustration aide à la compréhension et n'a pas la prétention de présenter les détails de construction d'un moteur à combustion hydrogène. Illustration : rapport final H2-DI

Si les véhicules électriques sont alimentés par de l'électricité renouvelable, la solution est propre et efficace. Les moteurs électriques à hydrogène constituent une alternative: les véhicules qui en sont équipés font le plein d'hydrogène et le transforment en électricité à l'aide d'une pile à combustible, laquelle alimente ensuite le moteur électrique. Dans la mesure où l'hydrogène a une densité énergétique élevée, les véhicules utilitaires à pile à combustible longue distance, par exemple, sont plus légers de quelques tonnes que les camions à batterie longue distance.

Les véhicules à propulsion électrique sont appréciés parce qu'ils ne produisent pas d'émissions locales, ce qui n'est pas le cas des véhicules équipés d'un moteur à combustion. Là encore, les émissions polluantes peuvent être réduites au strict minimum grâce à des concepts modernes. C'est notamment le cas lorsque le moteur à combustion ne brûle pas du diesel ou de l'essence, mais de l'hydrogène. Il en résulte principalement de l'eau, mais aussi des oxydes d'azote nocifs pour la santé et l'environnement, dont les émissions peuvent toutefois être évitées par des mesures appropriées. Ce système de propulsion est pauvre en CO₂, à condition d'utiliser de

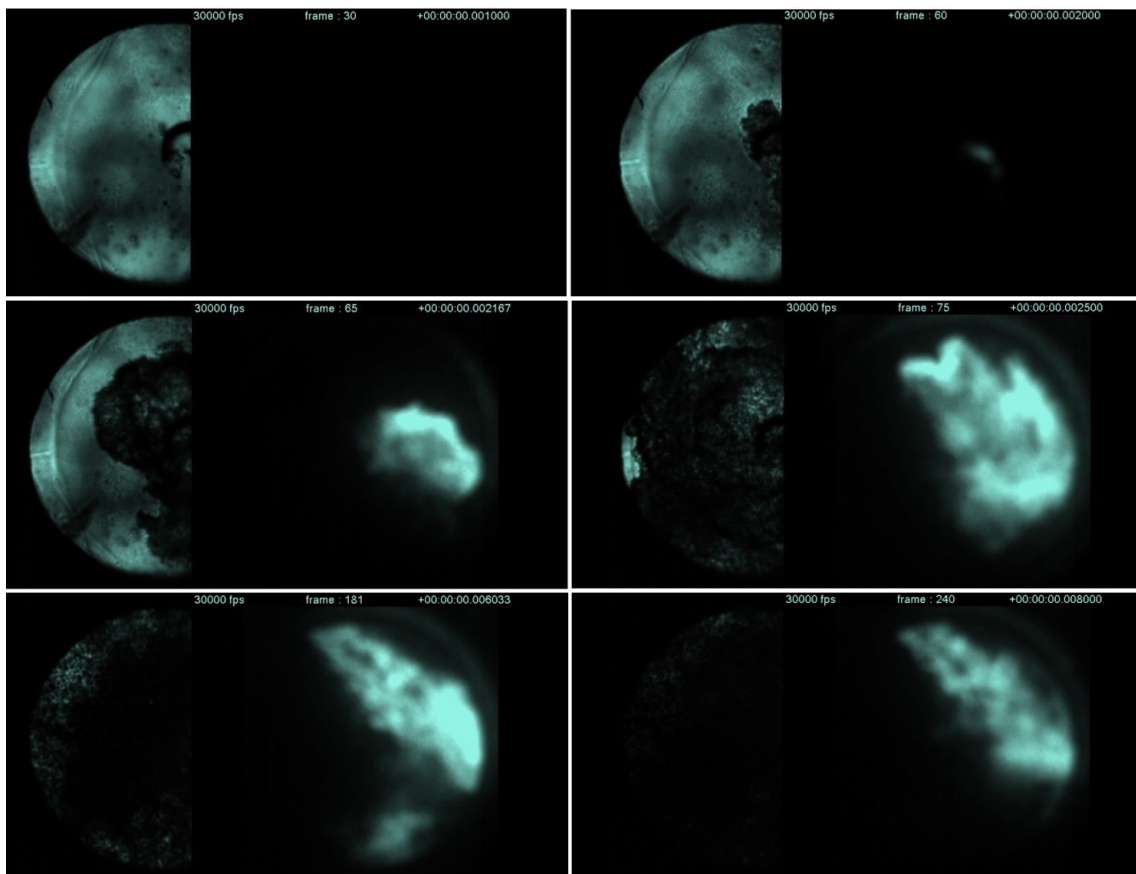


Le support d'essai optique avec lequel la combustion d'hydrogène a été étudiée à l'Empa. La chambre de combustion se situe à droite. Si l'hydrogène injecté s'y enflamme, le piston est accéléré vers l'arrière gauche. Illustration : rapport final H2-DI

l'hydrogène renouvelable. Il permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre dans des proportions similaires à celles des véhicules à pile à combustible.

La combustion au lieu des piles à combustible

Aujourd'hui, les moteurs à combustion utilisant de l'hydrogène sont essentiellement utilisés par les constructeurs de véhi-

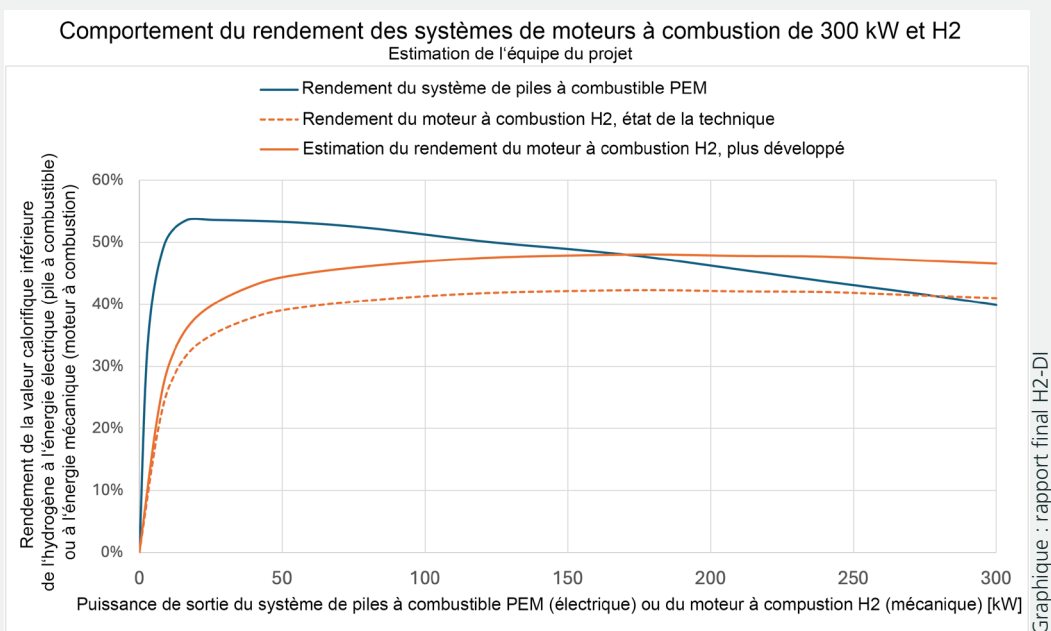


Les six images montrent (du haut à gauche vers le bas à droite) les 20 premiers millièmes de seconde après l'allumage du jet d'hydrogène dans la chambre de combustion d'un moteur à combustion hydrogène. Sur la moitié gauche de l'image, on voit à chaque fois comment le jet d'hydrogène est allumé au centre de la chambre de combustion et se propage ensuite radialement. La partie droite de l'image montre la croissance de la flamme. Les images ont été prises dans le support d'essai optique de l'Empa. Source : rapport final H2-DI

DEUX FORMES DE PROPULSION À L'HYDROGÈNE

L'hydrogène peut être transformé en électricité de manière électro-chimique à l'aide d'une pile à combustible, avant d'être convertie en énergie mécanique par un moteur électrique. L'hydrogène peut également être brûlé dans un moteur à combustion (thermochimique), comme étudié dans le projet de recherche H2-DI, ce qui produit directement l'énergie mécanique qui propulse le véhicule.

Les estimations des experts de l'Empa montrent que l'on peut attendre des deux procédés un rendement de l'ordre de 50% à l'avenir. Cela signifie qu'avec les deux types de propulsion, un kilogramme d'hydrogène permet de parcourir à peu près la même distance. Il existe une différence importante à cet égard : les moteurs à pile à combustible sont les plus efficaces à faible puissance, tandis que les moteurs à combustion hydrogène sont les plus efficaces en cas de puissance élevée (voir graphique). Les moteurs à combustion hydrogène devraient donc être utilisés lorsqu'un véhicule doit fonctionner à haute puissance pendant une grande partie du temps de fonctionnement (par exemple dans les machines de construction et agricoles ou dans le transport longue distance). En revanche, les propulsions à pile à combustible sont recommandées pour les applications où des charges partielles sont souvent utilisées et où des temps d'arrêt courts pour le ravitaillement sont importants.



Les deux propulsions à hydrogène se distinguaient par d'autres aspects : les piles à combustible ne promettent une longue durée de vie que si elles fonctionnent avec de l'hydrogène extrêmement pur. Les encrassements, tels qu'ils peuvent se produire lors de la production, du transport ou de la compression de l'hydrogène, sont mieux tolérés dans les moteurs à combustion. Les piles à combustible ont également la particularité d'avoir besoin de radiateurs plus grands que les moteurs à combustion, ce qui peut entraîner des inconvénients de construction lors de la construction de véhicules et constitue un défi quasiment insurmontable, par exemple pour les applications nécessitant peu de déplacements (engins de chantier). Les engins de chantier peuvent en outre être soumis à des contraintes mécaniques extrêmement élevées, difficilement supportables pour les piles à combustible.

cules utilitaires. Les camions destinés à de courtes distances peuvent sans problème fonctionner avec une batterie et un moteur électrique. Mais plus l'autonomie est grande, plus les batteries sont lourdes et chères. Par ailleurs, elles requièrent une infrastructure de recharge rapide puissante et coûteuse de l'ordre du MW. Les véhicules à pile à combustible, ou les moteurs à combustion qui utilisent l'hydrogène, constituent

une alternative. Ces derniers sont particulièrement robustes et également recommandés pour les engins de chantier et autres applications tout-terrain. Les véhicules à pile à combustible sont moins adaptés à cet usage. En effet, les piles à combustible sont très sensibles aux vibrations ou aux impuretés présentes dans l'hydrogène ou dans l'air aspiré, ce qui accélère leur vieillissement.

« Pour les véhicules utilitaires puissants utilisés sur et hors route, un moteur à combustion hydrogène pourrait être une bonne solution », explique Patrik Soltic, expert en systèmes de propulsion à l'Empa à Dübendorf. Une équipe de chercheurs dirigée par Soltic s'est fixé pour objectif de rendre possible un nouveau type de moteur à combustion hydrogène pour les véhicules utilitaires lourds. Un projet de recherche de deux ans a été mis en place à cette fin, en collaboration avec l'université de Stuttgart. L'OFEN, ainsi que l'association de recherche FVV plus proche de l'industrie, ont soutenu l'Empa financièrement dans le cadre du projet portant l'abréviation H2-DI.

Grand excédent d'air, faible densité de puissance

Jusqu'à présent, les véhicules équipés de moteurs à combustion hydrogène n'ont pratiquement pas été produits en série. Les fabricants de véhicules travaillent toutefois en ce sens. Ainsi, le constructeur de camions néerlandais DAF a présenté en 2022 un camion équipé d'un moteur à combustion à hydrogène, conçu sur la base d'un moteur diesel. La société BMW avait déjà fait parler d'elle en 2000 avec un moteur à combustion hydrogène conçu, quant à lui, sur la base d'un moteur à essence.

Quiconque souhaite utiliser un moteur à essence ou diesel pour la combustion d'hydrogène se voit confronté à un défi de taille : en raison de sa température de flamme élevée ainsi que de sa faible énergie minimale d'ignition, l'hydrogène doit être brûlé avec un grand excédent d'air (fortement comprimé) si l'on veut que la combustion se déroule de manière contrôlée (pas de cliquetis) et respectueuse de l'environnement (faibles émissions de NO_x). La forte consommation d'air a pour inconvénient une faible densité de puissance: un camion équipé d'un moteur de 13 litres a une puissance de 300

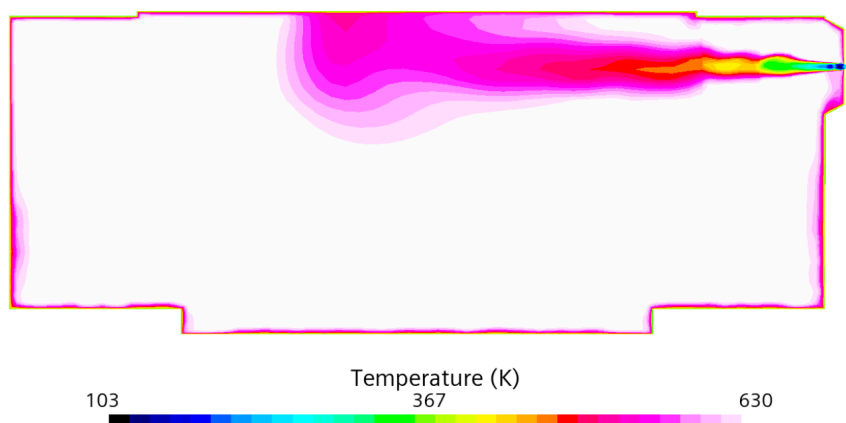
PERTES DE CONVERSION

L'argument volontiers avancé contre l'utilisation de l'hydrogène est que la production d'hydrogène vert (par électrolyse à partir d'électricité renouvelable) ou sa reconversion en énergie finale a un faible rendement. Pour Patrik Soltic, cette approche est trop limitée: « L'hydrogène et les autres énergies renouvelables sont plus faciles à transporter que l'électricité sur de longues distances et peuvent être produits efficacement dans des régions où l'énergie renouvelable est moins chère. Les conditions marginales pratiques et économiques sont décisives pour la décarbonisation, et c'est sur ce point que les approches basées sur les batteries électriques et celles basées sur des carburants durables peuvent se compléter ».

à 400 kW avec du diesel ; s'il fonctionne à l'hydrogène avec la même cylindrée, sa puissance est de seulement 200 kW environ. Une augmentation de la densité de puissance implique de nouveaux procédés capables d'injecter beaucoup d'air comprimé dans la chambre de combustion – ou un nouveau procédé de combustion indépendant de cet énorme excédent d'air.

Injection d'hydrogène

L'objectif du projet H2-DI était justement de concevoir un procédé de combustion sans cet énorme excédent d'air. Pour cette nouvelle approche, on renonce à un mélange air-carburant avec un fort excédent d'air. L'air est plutôt comprimé dans la chambre de combustion et le carburant y est ensuite injecté. On connaît le processus du moteur diesel, où le jet de carburant s'enflamme lui-même et où la flamme persiste ensuite dans l'air comprimé aussi longtemps que le diesel est injecté (« combustion par diffusion »). Dans le projet



L'hydrogène est injecté dans la chambre de combustion à température ambiante et sous une pression de 100 bars. Comme le montre la simulation numérique, l'expansion soudaine provoque des ondes de choc au cœur du jet d'injection et des températures extrêmement basses, de l'ordre de 100 Kelvin. Illustration : rapport final H2-DI

H2-DI, ce n'est pas du diesel liquide, mais de l'hydrogène gazeux qui est injecté dans la chambre de combustion. Comme l'hydrogène a une température d'allumage très élevée, il ne s'enflamme pas spontanément, mais doit être allumé par une bougie (comme dans un moteur à essence). Une fois la flamme présente, une combustion par diffusion se produit tant que de l'hydrogène est injecté. Dans la mesure où aucune compression du mélange air-hydrogène susceptible de provoquer une combustion détonante n'a lieu, les mesures antidétonantes (telles que l'excédent d'air élevé) deviennent inutiles.

L'équipe de chercheurs du projet H2-DI a pu montrer que la combustion par diffusion d'hydrogène fonctionnait à l'échelle du laboratoire et atteignait la même densité de puissance qu'un moteur diesel. Pour ce faire, les partenaires allemands du projet de l'université de Stuttgart ont utilisé un moteur de recherche monocylindre de 0,5 litre de cylindrée. Le procédé de combustion a également été mis en œuvre avec succès à l'Empa à Dübendorf. Pour ce faire, un banc d'essai spécial a été utilisé, conçu de manière à pouvoir observer les processus qui se déroulent dans la chambre de combustion à l'aide de caméras à haute vitesse, d'un spectromètre et d'autres outils de diagnostic optique. « Ces expériences nous ont permis de créer et de valider des modèles numériques de combustion de l'hydrogène », explique Patrik Soltic. « Il s'agit d'une étape importante sur la voie d'un futur moteur à combustion à hydrogène. En effet, l'hydrogène brûle différemment du diesel, et nous n'avons donc pas pu utiliser les outils de simulation traditionnels. Nous avons dû les développer de A à Z ».

Les étapes vers un nouveau type de moteur à combustion

Il reste encore un long chemin à parcourir avant d'obtenir un moteur à hydrogène commercial basé sur le nouveau procédé de combustion. Dans le cadre d'un projet consécutif de deux ans, lequel a démarré fin 2024, les scientifiques de l'Empa veulent optimiser la combustion de l'hydrogène. Ils veulent notamment savoir exactement comment l'hydrogène doit être injecté et comment l'injecteur nécessaire doit être conçu. Ils étudient également quelle quantité d'hydrogène doit être injectée et pendant combien de temps, ou quelle devrait être la distance idéale entre l'injecteur et la bougie d'allumage.

Dans le cadre du projet de suivi, auquel participe l'université de Stuttgart ainsi que l'université technique de Berlin, un



Le groupe néerlandais DAF a présenté ce camion équipé d'un moteur à combustion hydrogène en 2022. Les premiers essais sur route ont été effectués avec le prototype, mais il n'est pas encore commercialisé. Photo : DAF Trucks

moteur monocylindre de deux litres de cylindrée est utilisé. Le projet prévoit également d'inclure un banc d'essai permettant aux scientifiques de mesurer les injecteurs par voie optique, ce qui les aidera à trouver la conception optimale de l'injecteur. « Plusieurs années devraient encore s'écouler avant qu'un moteur à hydrogène commercial fonctionnant avec notre procédé de combustion ne soit disponible », estime le scientifique de l'Empa Soltic.

➤ Le **rapport final** (en anglais) du projet 'H2-DI – Hydrogen Direct Injection Combustion Process' est disponible sur : <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=48410>.

LE SPORT DE COURSE

Les moteurs à combustion hydrogène sont également à l'ordre du jour dans les courses automobiles. Toyota, Bosch et l'équipementier automobile autrichien AVL, par exemple, ont développé des technologies de moteurs adaptées. Pour contrôler le processus de combustion de l'hydrate d'alumine, on injecte de l'eau. Elle réduit la réactivité de l'hydrogène et refroidit le moteur. Les voitures de course doivent donc transporter de l'eau, ou bien l'eau doit être obtenue par condensation à partir des gaz d'échappement. L'ajout d'eau est adapté aux besoins spécifiques de la course automobile; ce procédé de combustion n'est pas adapté à une large utilisation dans les véhicules de tourisme et les véhicules utilitaires.

- Stephan Renz (info@renzconsulting.ch), directeur externe du programme de recherche sur les systèmes énergétiques basés sur la combustion de l'OFEN, communique des **informations** sur ce projet.
- Vous trouverez plus d'**articles spécialisés** concernant les projets pilotes, de démonstration et les projets phares dans le domaine de la combustion sur www.bfe.admin.ch/ec-combustion.