



www.h2et.info

**PLATEFORME HEET –« Hydrogène, Energie, Environnement et Transports »
en Région Nord-Pas de Calais**

**HYDROGENE ET MOTEUR A COMBUSTION INTERNE :
UNE TECHNOLOGIE DE TRANSITION REALISTE
VERS L'ECONOMIE HYDROGENE**

Le déploiement d'une économie hydrogène est une réponse possible aux défis de nos sociétés : effet de serre et pollution locale, dépendance du pétrole dans les transports et sécurité d'approvisionnement, épuisement prévisible des ressources et instabilité des prix à court et moyen terme.

Dans ce cadre, l'utilisation d'hydrogène dans les moteurs à combustion interne (H2-MCI) permet de disposer rapidement de véhicules hydrogène. Son rendement est théoriquement plus faible que celui de la pile à combustible. Cependant, différentes voies d'amélioration permettront d'atteindre un rendement de plus de 40%, même à charge partielle (rendement à comparer au rendement théorique de 50% prévu pour la Pile à Combustible).

Ainsi, la technologie H2-MCI a un rôle à jouer dans l'émergence d'un futur énergétique de l'après-pétrole. Permettant de réaliser dès aujourd'hui des opérations de démonstration (les deux premiers projets hydrogène de France, Althytude et Ultim Car), elle doit contribuer à lever les verrous techniques (stockage à bord du véhicule, mise en place de stations service) et non techniques (réglementation, acceptation du public).

Il est donc nécessaire de développer cette technologie en adaptant les moteurs au nouveau carburant hydrogène et en mettant sur la route des véhicules qui seront le support d'actions concrètes de développement.

Ce document, réalisé dans le cadre de la plateforme HEET mise en place dans la région Nord-Pas de Calais, fait le point sur la technologie H2-MCI, les travaux en cours dans les différents pays et les pistes d'amélioration

Mai 2006



TABLE DES MATIERES

| | |
|---|---|
| 1. Etat de la technologie..... | 3 |
| 1.1. L'hydrogène peut être utilisé pour alimenter les moteurs à combustion interne..... | 3 |
| 1.2. Le moteur à combustion interne supporte le carburant hydrogène..... | 3 |
| 1.3. L'hydrogène dans les moteurs à combustion interne est une technologie peu polluante | 3 |
| 1.4. Les moteurs à combustion interne à l'hydrogène constituent une solution de transition vers la pile à combustible (PAC)..... | 4 |
| 1.5. La différence de rendement global entre les moteurs à combustion interne à l'hydrogène et les piles à combustibles se resserre..... | 4 |
| 1.6. De nombreux pays engagés dans le développement de l'hydrogène dans les transports font aujourd'hui appel à la technologie H2-MCI | 5 |
| 1.7. Avec la technologie H2-MCI, l'hydrogène peut s'appuyer sur l'expérience du gaz naturel véhicules (GNV)..... | 5 |
| 2. Développements récents (2000 – 2006)..... | 6 |
| 2.1. EUROPE | 6 |
| 2.2. AMERIQUE DU NORD | 7 |
| 2.3. ASIE..... | 7 |
| 3. Exemples de réalisations..... | 8 |
| 3.1. Exemple 1 : Voiture Prius hydrogène de Quantum Technologies (Californie)..... | 8 |
| 3.2. Exemple 2 : Minibus Ford E-450..... | 8 |
| 3.3. Exemple 3 : Bus MAN (Allemagne)..... | 8 |
| 4. Le futur de la technologie H2-MCI | 9 |
| 5. Références..... | 9 |

1. Etat de la technologie

1.1. L'hydrogène peut être utilisé pour alimenter les moteurs à combustion interne.

L'utilisation de l'hydrogène comme carburant dans un moteur à combustion interne (H₂-MCI) a une longue histoire. En 1820, Cecil a été le premier à préconiser l'utilisation de l'hydrogène comme carburant dans les moteurs. En 1860, Lenoir teste un véhicule au gaz de houille (mélange d'hydrogène (60%) et d'oxyde de carbone), l'Hippomobile, à Paris.

La conversion à l'hydrogène des moteurs essence (bi-carburant ou non) peut être aujourd'hui réalisée sur la base des technologies développées pour le gaz naturel avec l'installation d'un système d'injection électronique en parallèle avec le système essence existant. Il est aussi possible de convertir des moteurs Diesel soit à l'hydrogène pur, soit en injection simultanée d'hydrogène et de Diesel (injection pilote).



Moteur Ford H₂-MCI

Le moteur à combustion interne est en constant développement pour répondre au renforcement des normes environnementales : cette technologie est encore susceptible de nombreuses améliorations en terme de rendement et de pollution. Par ailleurs, elle bénéficiera du développement des véhicules hybrides, essence ou Diesel et électricité, permettant d'augmenter le rendement de la chaîne de traction à régime partiel.

Il est aussi possible de concevoir des moteurs à combustion interne optimisés pour le carburant hydrogène. Les travaux menés par Ford sur le moteur hydrogène montrent qu'il est possible d'atteindre des rendements indiqués de 52% à charge maximale, avec des émissions de NO_x de quelques ppm (Natkin, 2003).



Test d'un véhicule H₂-MCI

Par ailleurs, BMW a obtenu un rendement du réservoir à la roue de 37,5% (rapport entre l'énergie restituée à la roue et l'énergie du carburant) et prévoit d'atteindre 50% en utilisant notamment l'injection directe.

1.2. Le moteur à combustion interne supporte le carburant hydrogène

L'utilisation d'hydrogène dans les moteurs à combustion interne n'exige en général que des adaptations matérielles mineures, notamment le renforcement de la ventilation positive de carter, l'installation de bougies « froides » et l'injection au plus près des soupapes d'admission.

Les différents essais n'ont pas fait état de détériorations spécifiques suite à l'utilisation d'hydrogène. Si cela est le cas (comme on le constate parfois d'une conversion au GNV ou au GPL), il existe des solutions : renforcement des sièges de soupape, soupapes refroidies.

Les phénomènes de *flashback* (explosion de la pipe d'admission) observés sur des moteurs équipés de carburateur ont disparu avec l'injection électronique. Quant à la fragilisation des matériaux par l'hydrogène, aucune mention n'en a été faite dans les développements récents.

1.3. L'hydrogène dans les moteurs à combustion interne est une technologie peu polluante

Un moteur H₂-MCI rejette à l'échappement de la vapeur d'eau ainsi que de très faibles quantités de dioxyde de carbone (CO₂), de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrocarbures (HC). La présence de ces polluants est liée à la présence de lubrifiants dans le moteur.

Les émissions d'oxydes d'azote (NO_x : NO et NO₂) ont été constatés sur les premiers véhicules convertis à l'hydrogène. Des stratégies de combustion adaptées comme l'utilisation de mélange pauvre (excès d'air important) permettent de limiter la température dans la chambre de combustion, et donc la formation d'oxydes d'azote (NO_x) à quelques ppm.

Il est possible de conserver la même puissance à l'hydrogène ou à l'essence en limitant les émissions de NOx. En mélange pauvre, la puissance du moteur étant diminuée d'un facteur de 2 environ, un compresseur est nécessaire (compresseur volumétrique chez Ford (Stockhausen, 2002 ; Tang, 2002), turbo-compresseur sur la Toyota Prius de Quantum). En mélange stœchiométrique (combustion complète sans excès d'air), la solution post-traitement avec pot catalytique 3 voies permet de limiter les émissions de NOx. BMW (Freyman, 2003) utilise les deux stratégies : mélange pauvre à charge partielle, mélange stœchiométrique à forte charge.



BMW 740Hi

Une autre stratégie consiste à moduler la quantité de recirculation de gaz d'échappement en fonction de la charge du moteur (essais réalisés à l'Université de Gand).

1.4. Les moteurs à combustion interne à l'hydrogène constituent une solution de transition vers la pile à combustible (PAC)

L'utilisation d'hydrogène dans les moteurs à combustion interne est une technologie immédiatement disponible utilisant des matériels commerciaux. La pile à combustible (PAC), quant à elle, nécessite encore des développements pour intégrer l'automobile : coût (en particulier, le catalyseur platine qui coûte 40 \$/gramme), durée de vie, tolérance aux impuretés de l'hydrogène et aux polluants présents dans l'air, démarrage à froid, refroidissement (lié aux faibles températures de fonctionnement), chauffage de l'habitacle, susceptibilité à la pollution de l'air (notamment le CO).



Utim Car (H2 Développement)

La technologie H2-MCI est immédiatement utilisable par les conducteurs qui ressentent les mêmes sensations de conduite qu'un véhicule classique, un atout que met en avant BMW. De plus, le moteur à combustion interne n'exige pas un hydrogène de haute pureté. Il permet d'associer l'hydrogène en mélange avec le gaz naturel (H-CNG ou Hythane[®]) ou en parallèle avec des carburants classiques (« injection pilote » essence ou Diesel), tout en améliorant leurs performances environnementales.

La technologie H2-MCI partage avec celle de la pile à combustible des problèmes liés au développement du carburant hydrogène :

- Absence d'infrastructure de remplissage
- Difficulté du stockage de l'hydrogène à bord
- Absence de normes et de règlements (homologation)
- Acceptation du public du carburant hydrogène

La mise en œuvre rapide de véhicules H2-MCI permettra donc de lever ces obstacles et de préparer l'arrivée de la PAC. Il existe donc des synergies dans le développement des technologies H2-MCI et PAC permettant de surmonter les verrous techniques et non techniques de l'utilisation de l'hydrogène dans les transports.

1.5. La différence de rendement global entre les moteurs à combustion interne à l'hydrogène et les piles à combustibles se resserre

Les véhicules à pile à combustible bénéficient en théorie d'un rendement élevé, compris entre 50 et 60%. Mais les rendements annoncés sont le plus souvent ceux du « cœur de pile » sans prendre en compte les auxiliaires (refroidissement, chauffage de l'habitacle).

Les essais comparatifs menés au Japon montrent que les écarts de rendements entre les véhicules à pile à combustible (PAC) et les véhicules hybrides essence/électricité sont très faibles. Les essais de terrain réalisés dans le cadre du programme européen CUTE de démonstration de bus à pile à combustible ont donné des rendements de la chaîne globale de l'ordre de 25 à 30%. A charge partielle, le rendement de la PAC est élevé.

Le potentiel d'amélioration du moteur H2-MCI (hybridation, injection directe) doit encore resserrer ce différentiel de rendement.



1.6. De nombreux pays engagés dans le développement de l'hydrogène dans les transports font aujourd'hui appel à la technologie H2-MCI

Après de premières expériences dans les années 80, la technologie H2-MCI connaît aujourd'hui un regain d'intérêt, la PAC tardant à tenir ses promesses dans les fortes puissances. Les pays émergents comme la Chine et l'Inde font le choix de la technologie H2-MCI comme technologie plus facilement maîtrisable et plus rapidement généralisable.



World's first Hydrogen Hybrid Internal Combustion Engine (HHICE)

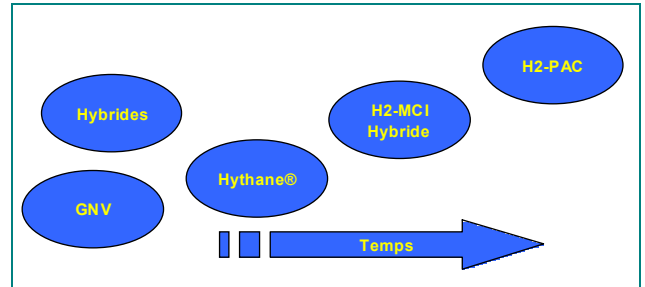
Le programme HyFleets qui fait suite à CUTE à partir de 2006 prévoit d'utiliser à Hambourg des bus H2-MCI (Neoman Bus group, 2005). La Norvège avec son programme Hynor de route hydrogène se tourne vers les véhicules H2-MCI est prévoit d'acheter 60 Prius hydrogène chez Quantum. La situation est comparable en Californie. Quant à BMW, la fabrication d'une présérie de la Série 7 hydrogène est lancée pour 2007-2008.

Témoins de cet intérêt, un symposium « *Hydrogen and Internal Combustion Engines* » était organisé en Février 2006 en Californie et le dernier congrès mondial SAE (Society of Automotive Engineers) aux USA en Avril 2006 intégrait une session technique spéciale « *Hydrogen IC Engines* ». En Europe, l'Université de Graz (Autriche) organise, en Septembre 2006, le « *1st International Symposium on Hydrogen in Internal Combustion Engines* ».

1.7. Avec la technologie H2-MCI, l'hydrogène peut s'appuyer sur l'expérience du gaz naturel véhicules (GNV)

La technologie H2-MCI est très proche de celle utilisée couramment dans les moteurs GNV. Une transition réaliste vers l'hydrogène pur consiste à mélanger de l'hydrogène au gaz naturel (mélange appelé Hythane®) ce qui permet d'augmenter les performances du GNV (meilleure combustion) tout en bénéficiant des infrastructures GNV existantes. Le projet Althytude lancé par Gaz de France en 2005 sur Dunkerque et Toulouse développe cette technologie.

Il est donc possible de concevoir une « feuille de route » vers la pile à combustible (PAC) s'appuyant d'une part sur le GNV et l'Hythane®, d'autre part sur la technologie hybride et dans laquelle la technologie H2-MCI joue un rôle important à court et moyen terme.



Feuille de route H2-MCI et PAC

2. Développements récents (2000 – 2006)

2.1. EUROPE

| | | |
|-----------|-----------------------|---|
| Allemagne | Hambourg | L'opération HyFleet succède à CUTE en 2006 et prévoit 14 bus MAN hydrogène à combustion interne. Total mettra en place l'infrastructure de remplissage. |
| | Munich | BMW annonce pour 2008 la mise sur marché d'environ d'une présérie de BMW Série 7 hydrogène. |
| | Aix la Chapelle | Le Centre de Recherche de Ford Europe (Aachen) présente en Juillet 2004 une Ford Focus hydrogène et moteur à combustion interne. |
| Belgique | Bruxelles | Un appel d'offres est lancé par Bruxelles fin 2005 pour la fourniture de 30 bus Hythane [®] . |
| | Gand | La société Hydrothane propose des bus Hythane [®] (2005). |
| Danemark | Hurup Thy | Le Folkecentre convertit une Ford Focus à l'hydrogène pur en 2003. |
| France | Dunkerque et Toulouse | Gaz de France lance en 2005 « Althytude », démonstration de bus utilisant un mélange d'hydrogène et de gaz naturel à Dunkerque et Toulouse. |
| | Lille | H2 Développement convertit un véhicule à l'hydrogène pur. |
| Italie | Venise | Dans le cadre du projet « Hydrogen Park » à Venise, il est prévu des bus Hythane [®] . |
| | Turin | Fiat présente au Salon de Genève en Mars 2006 une Fiat Panda Multi-Eco. Le Centre de Recherche de Fiat développe l'Hythane [®] pour les bus Irisbus/Ivéco (projet Althytude en France, 2006). |
| Norvège | Stavenger | Hynor (Norwegian Hydrogen Corridor, 7 stations hydrogène) a annoncé l'acquisition de 60 Toyota Prius (Quantum) lors du séminaire franco-norvégien « Hydrogène et Transport » en Novembre 2005. |
| | Utsira | En juillet 2004, Norsk Hydro installe deux éoliennes, un électrolyseur et un moteur à combustion interne hydrogène (55 kW) ainsi qu'une pile à combustible (10 kW). |
| | Oslo | La Fondation Bellona présente en 2005 un Mercedes Sprinter converti à l'hydrogène par MCI (ex-projet WEIT à Hambourg). |
| Suède | Malmö | Sydkraft (E-On) met en place en 2003 une station Hythane (8% et 20% d'hydrogène dans du gaz naturel) pour alimenter des bus Volvo. |



2.2. AMERIQUE DU NORD

| | | |
|------------|------------|--|
| Etats-Unis | Californie | L'AQMD lance un programme de 35 Toyota Prius hydrogène dans un appel à projets remporté par Quantum . Elles sont utilisées dans différentes villes californiennes (Riverside, Santa Anna, Irvine...) depuis début 2006. |
| | Californie | La ville de Barstow lance un projet Hythane [®] (Mai 2006) |
| | Californie | Westport livre en 2003 un moteur d'autobus à hydrogène/gaz naturel (20% H2) à « SunLine Transit » (Californie). |
| | Californie | ISE Corporation vend un bus HHICE (hybride hydrogène pur) équipé d'un Ford V10. |
| | Colorado | La ville de Fort Collins installe en 2005 une station Hythane [®] pour alimenter des minibus 12 places. |
| | Colorado | Etec transforme un Ford à l'hydrogène avec Roush (2005). |
| | Floride | Ford annonce en 2005 une commande de huit navettes E-450 hydrogène dans le cadre du projet H2 Florida. Deux autres seront aussi livrés en Californie (2006). |
| | Iowa | Hydrogen Engine Center développe depuis 2003 une gamme de moteurs Ford convertis à l'hydrogène pur (application stationnaire dans les aéroports). |
| | Nevada | En 2006, la société City Engines propose une gamme de moteurs de bus Hythane (30% H2). |
| | Vermont | Le projet « evermont » achète fin 2005 une Toyota Prius hydrogène de Quantum. |
| Canada | Vancouver | Westport convertit 5 bus à l'Hythane pour la compagnie de transport du Grand Vancouver (Transit). |
| | Gatineau | La Ville de Gatineau au Québec lance début 2006 un projet Hythane avec E-H2. |

2.3. ASIE

| | | |
|-------|-------|--|
| Chine | Pékin | La société américaine Hythane de Denver annonce en janvier 2006 la signature d'un accord avec la Chine pour 10 000 bus Hythane dans le cadre des Jeux Olympiques de 2008. |
| Inde | | International Tractors Ltd reçoit une aide en Janvier 2006 pour construire 500 tricycles à moteur à combustion interne, développés par Banaras Hindu University. |
| | | Bajaj et ECD (USA) présentent un rickshaw hydrogène MCI en 2005. |
| Japon | | Mazda vend en leasing à deux entreprises japonaises deux Premacy hydrogène hybride à moteur rotatif (2006). |

3. Exemples de réalisations

3.1. Exemple 1 : Voiture Prius hydrogène de Quantum Technologies (Californie)

En 2004, la conversion d'une Toyota Prius à l'hydrogène (Geiss, 2004) a montré des performances équivalentes à celles du moteur d'origine, sans intervenir sur la partie hybride du moteur et en installant un turbo-compresseur et sans impliquer Toyota dans sa conversion.



Réservoir H₂ à la place du réservoir essence

Cette Toyota Prius est développée par Quantum Technologies (Californie) : il s'agit d'un véhicule mono-carburant hydrogène pur d'une autonomie de 120 km). 35 véhicules ont été fournis en Californie (contrat AQMD) et une soixantaine sont en discussion avec la Norvège (Hynor, 15 commandés en Mai 2006).



Atelier de Quantum (Irvine, Californie)

Les émissions mesurées sont extrêmement faibles : 0,005 g/km pour les NO_x et 0,43 g de CO₂ par km (contre 107 g CO₂ pour la Prius essence).

Quantum travaille aussi au développement d'un Ford Escape Hybride à l'hydrogène pour 2006-2007.

3.2. Exemple 2 : Minibus Ford E-450

Ford a développé en 2005 un minibus E-450 à l'hydrogène pur. Il s'agit d'un bus de 12 places.

Le minibus utilise un moteur Ford Triton V10. Le moteur est suralimenté (compresseur volumétrique) avec refroidissement intermédiaire.

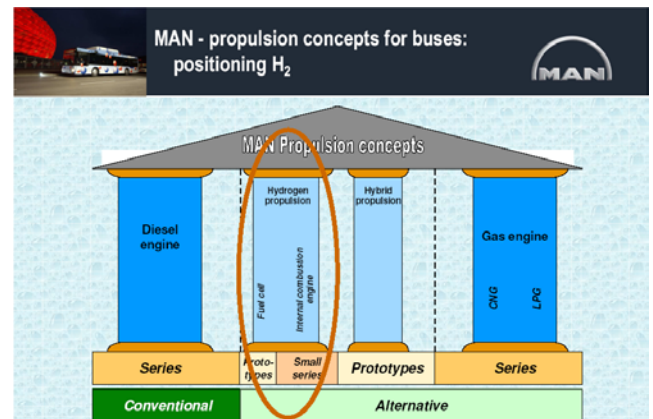


Moteur Triton V10 6,8 l (225 CV à 4 000 tr/mn)

Ford a aussi présenté le « Super Chief » utilisant trois carburants : essence, éthanol et hydrogène pur.

3.3. Exemple 3 : Bus MAN (Allemagne)

La stratégie devMAN dans le domaine de la propulsion hydrogène est de développer en parallèle la pile à combustible (prototypes) et la technologie H₂-MCI (petite série).



Le bus MAN est proposé à un surcoût d'environ 50% par rapport à un bus conventionnel. Il doit être utilisé dans le projet HyFleet en 2006 (projet de 20 bus à Berlin en coopération avec TOTAL, BVG et Vattenfall Europe).

Deux types de bus ont été développés, utilisant des stratégies de combustion différentes :

- bus urbain H₂ équipé d'un moteur atmosphérique de 150 kW (H2866 UH01) stœchiométrique avec recirculation des gaz d'échappement et catalyse 3 voies,
- bus urbain H₂ équipé d'un moteur turbo-comprimé de 200 kW (H2876 LUH01) fonctionnant en mélange pauvre.

4. Le futur de la technologie H2-MCI

C'est autour de la technologie H2-MCI qu'ont été lancés les deux premiers projets de démonstration hydrogène en France dans le domaine des transports :



Le projet **Althytude** avec la démonstration de bus alimentés par un mélange de gaz naturel et d'hydrogène produit localement sur Dunkerque et Toulouse (www.althytude.info) ;



Le projet **Ultim Car** avec la réalisation d'un véhicule utilitaire léger transformé à l'utilisation d'hydrogène pur tout en conservant les fonctionnalités essence (www.h2-developpement.fr)

Ces projets vont permettre d'acquérir de l'expérience dans cette technologie tout en préparant le contexte réglementaire (production locale d'hydrogène, introduction de nouveaux carburants) et social (acceptation du public). C'est en réalisant des projets de terrain, comme le font la plupart des pays étrangers, que se développera l'hydrogène et ces projets de terrain utiliseront aussi la technologie H2-MCI.

Au-delà des projets de démonstration, les actions de recherche et de développement sont à développer pour optimiser la technologie H2-MCI. Les travaux de la Plateforme HEET (Hydrogène, Energie, Environnement et Transports) en région Nord-Pas de Calais ont permis de faire émerger trois grands domaines de R&D :

- Energétique et combustion, pour une connaissance fine des processus de combustion et la définition de stratégies de combustion adaptée ;
- Contrôle-commande des moteurs, dédiés à l'utilisation de carburants gazeux type hydrogène, biogaz ou mélanges de gaz naturel et d'hydrogène ;
- Diagnostic et management de la sécurité du véhicule, prenant en compte les spécificités de l'hydrogène.

5. Références

- Andersson T., "Hydrogen Addition For Improved Lean Burn Capability on Natural Gas Engine", Svenskt Gastekniskt Center, Rapport 134, 2003
- Cecil W. "On the Application of Hydrogen Gas to Produce a Moving Power in Machinery; with a Description of an Engine which is Moved by the Pressure of the Atmosphere, upon a Vacuum Caused by Explosions of Hydrogen and Atmospheric Air", Trans. Cambridge, Philos. Soc., 1:217, 1822
- Beckmann W. "Hydrogen as a Fuel for Internal Combustion Engines", University of Applied Science Stralsund, Interdisciplinary Seminar of the DAAD-PHD-Programme, April 2004
- Berckmüller M. et al., "Potentials of a charged SI hydrogen engine", SAE, paper nr 2003-01-3210, 2003
- City Engines Inc., "HCNG is the path to the Hydrogen Economy", 2005 – www.cityengines.com
- ETA (Electric Transportation Applications), "HICEV AMERICA: Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicle (HICEV) Technical Specifications", Revision 0, November 1, 2004
- Delorme T. et all., "Modeling and Experiments of the Effect of Hydrogen Blending in Natural Gas Fuelled Engines : Retreat of the Lean Limit", Clean Air V, 12-15 Juillet 1999, Lisbonne
- Ford Motor Company, "Ford Unveils Hydrogen-Powered Shuttle Bus", Press Release, Detroit, Oct. 6, 2004
- Freymann R., "The State of Art and Future Perspectives of Application of Hydrogen I.C. Engines", Engines of Sustainable Development International Conference, ESD 2003, Napoli, 11th - 12th Dec. 2003
- Geiss R. et all., "Hydrogen-Fueled Hybrid: Pathway to a Hydrogen Economy", SAE, paper nr 2004-01-0060, 2004
- HICE Symposium, "Hydrogen Internal Combustion Engine Symposium", San Diego, 22 Feb. 2006
- Hoekstra R.L., Collier K. and Mulligan N., "Demonstration of hydrogen mixed gas vehicles", 10th World Hydrogen Energy Conference, Cocoa Beach, Proceedings, Vol. 3, 1994, pp. 1781-1796
- Karim G., "Hydrogen as a spark ignition engine fuel", International Journal of Hydrogen Energy, 28, p. 569– 577, 2003
- King R.O. et Rand, M., "The Hydrogen Engine", Canadian Journal of Technology, 33:445-469, 1956



- Koyanagi, K., et. al., "Study on Mechanism of Backfire in Hydrogen Engines", SAE Paper 942035, 1994
- Leduc P. et all., "Downsizing of Gasoline Engine: an Efficient Way to Reduce CO2 Emissions", Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP, Vol. 58, No. 1, pp. 115-127, 2003
- Mazda Motor Corp., "Mazda to lease gasoline-hydrogen car in Japan - Car's rotary engine will be able to burn either gasoline or hydrogen", Tokyo, Feb. 15, 2006
- Natkin R. et all., "Hydrogen IC Engine Boosting Performance and NOx Study", SAE, paper nr 2003-01-0631, 2003
- Neoman Bus Group, "Hydrogen combustion engines from MAN: today's step into the future of mobility", Press Information, Rome, 6 Juin 2005
- Stockhausen W., Natkin R. "Ford P2000 Hydrogen Engine Design and Vehicle Development Program", SAE Paper 2002-01-0240, 2002
- Norbeck J. et all., "Development and Evaluation of a Hydrogen Fuel Power Plant for a Hybrid Electric Vehicle", Univ. of California, CERT, 1997
- Oehmichen, M., "Wasserstoff als Motortreibmittel. In Deutsche Kraftfahrtforschung", 68, VDI-Verlag GMBH, Berlin, 1942
- Quantum Technologies, "Quantum Delivers First Vehicles of Hydrogen Hybrid Fleet to Santa Ana", Press Release, Irvine, CA, Jan. 26, 2006
- Shioji M. et all., "Knock Characteristics and Performance in an SI Engine With Hydrogen and Natural-Gas Blended Fuels", SAE, paper nr 2004-01-1929, 2004
- Sierens R. et all., "An overview of hydrogen fuelled internal combustion engines", Proceedings International Hydrogen Energy Congress and Exhibition IHEC 2005, Istanbul, Turkey, 13-15 July 2005
- Swain, M.R., et. al., "Hydrogen Engine Data-base Summary", SAE Paper 839089, 1983
- Tang X., "Ford P2000 Hydrogen Engine Dynamometer Development", SAE, paper nr 2002-01-0242, 2002
- Verhelst S., "A Study of the Combustion in Hydrogen- Fuelled Internal Combustion Engines", PhD Thesis, Department of Flow, Heat and Combustion Mechanics, Ghent University, 2005



La **plateforme HEET** dans la région Nord-Pas de Calais a pour objectif de coordonner les efforts de centres de recherche et d'entreprises déjà engagés dans la filière de l'utilisation de l'hydrogène dans les moteurs à combustion interne, de promouvoir leurs actions et de participer aux programmes européens et nationaux.

La plateforme s'est constituée autour des partenaires déjà engagés dans des recherches sur l'hydrogène en région Nord-Pas de Calais :

- Entreprises : Gaz de France, Air Liquide, H2 Développement, Horizon GPL
- Centres de recherche et développement : Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, Université des Sciences et Technologies de Lille (Lille I), CNRS, Centrale Lille, Mines de Douai, CRITT M2A, GRAISyHM
- Organismes publics : Région Nord-Pas de Calais, Communauté Urbaine de Dunkerque, Ville de Valenciennes

La mise en place de la plateforme HEET est soutenue par le Conseil Régional Nord-Pas de Calais, la Délégation Régionale à la Recherche et à la Technologie et l'Europe (Actions Innovatrices FEDER). La plateforme est ouverte à toutes les entreprises et tous les centres de recherche intéressés par cette thématique.