

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Ecole Nationale Polytechnique**



**Département Génie Mécanique**

**Laboratoire de Génie Mécanique et de Développement**

**Mémoire de master**

**Pour l'obtention du diplôme de master en Génie Mécanique Energétique**

**Moteurs Thermiques Propres à Hydrogène**

**Réalisé par :**

**Mohammed Nadjib HAMLAOUI**

**Sous la direction de :**

**M. Saïd RECHAK (Professeur, ENP Alger)**

**M. Arezki SMAILI (Professeur, ENP Alger)**

**M. Mohamed BENBRAIKA (Docteur, ENP Alger)**

**Présenté et soutenu publiquement le 28/06/2016**

**Composition du Jury :**

<b>Président</b>	<b>M. Brahim GUERGUEB, Docteur ENP Alger</b>
<b>Promoteur</b>	<b>M. Saïd RECHAK, Professeur ENP Alger</b>
<b>Promoteur</b>	<b>M. Arezki SMAILI, Professeur ENP Alger</b>
<b>Promoteur</b>	<b>M. Mohamed BENBRAIKA, Docteur ENP Alger</b>
<b>Examineur</b>	<b>M. Mohamed BOUBAKEUR, Docteur ENP Alger</b>

**-ENP 2016-**

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Ecole Nationale Polytechnique**



**Département Génie Mécanique**

**Laboratoire de Génie Mécanique et de Développement**

**Mémoire de master**

**Pour l'obtention du diplôme de master en Génie Mécanique Energétique**

**Moteurs Thermiques Propres à Hydrogène**

**Réalisé par :**

**Mohammed Nadjib HAMLAOUI**

**Sous la direction de :**

**M. Saïd RECHAK (Professeur, ENP Alger)**

**M. Arezki SMAILI (Professeur, ENP Alger)**

**M. Mohamed BENBRAIKA (Docteur, ENP Alger)**

**Présenté et soutenu publiquement le 28/06/2016**

**Composition du Jury :**

<b>Président</b>	<b>M. Brahim GUERGUEB, Docteur ENP Alger</b>
<b>Promoteur</b>	<b>M. Saïd RECHAK, Professeur ENP Alger</b>
<b>Promoteur</b>	<b>M. Arezki SMAILI, Professeur ENP Alger</b>
<b>Promoteur</b>	<b>M. Mohamed BENBRAIKA, Docteur ENP Alger</b>
<b>Examineur</b>	<b>M. Mohamed BOUBAKEUR, Docteur ENP Alger</b>

**-ENP 2016-**

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste projet de master à :*

- *Mon cher papa et ma chère maman qui m'ont bien éduqué, qui ont veillé à ma réussite et pour que je devienne un homme de principe et parmi l'élite du pays.*
- *Mon grand-père maternel « BENKARA Moustepha Mahmoud », qu'Allah l'accueille dans son vaste paradis, lui qui m'a montré la voie de la réussite, m'a éduqué et m'a orienté vers la meilleure et grande école d'Algérie.*
- *Mon grand-père paternel « Hamlaoui Cherif », qu'Allah l'accueille aussi dans son vaste paradis et aussi à ma grande mère « BOUAROUDJ Zineb » qu'Allah la protège.*
- *Toute ma famille (mes sœurs, mes oncles, mes tantes.) et à tous mes amis et à toutes les personnes qui ont cru en moi et qui m'ont soutenu durant toutes mes études.*
- *Mon adorable petit frère Rabah Zakaria, qu'Allah lui montre le chemin de la réussite.*
- *Et n'oublions pas surtout toute la promo Génie Mécanique 2013-2016 « El Chikh, Babaha, El fariha..... »*

*MOHAMMED NAJJIB HAMLAOUI*



---

## *Remerciements :*

*Je remercie avant tout Allah le tout puissant de m'avoir donné la foi, la santé et la volonté de mener à bien notre projet et je prie sur son prophète Mohammad Salla Allahu allayhi wala salam*

*Je remercie chaleureusement mes promoteurs Professeur Arezki SMAILL, Professeur Saïd RECHAK, Docteur Mohamed BENBRAÏKA dont le rôle fut primordial. Au-delà de leurs précieux conseils scientifiques, je retiendrai longtemps leurs grandes qualités humaines, la confiance qu'ils m'ont accordée ainsi que leur disponibilité permanente. Sans eux, ce travail n'aurait pas la même saveur.*

*Je remercie aussi les membres du jury, le président de jury Brahim GUERGUEB et l'examinateur Mohamed BOUBAKEUR, d'avoir pris le temps et le soin de lire mon document.*

*Mes remerciements vont également à tous les enseignants de l'École Nationale Polytechnique. Merci d'avoir donné autant de vos personnes pour notre formation.*

*Enfin, J'adresse mes plus sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué à petite ou grande échelle, de près ou de loin à la réalisation de ce projet.*

---

## Table des matières

<i>Dédicace</i> .....	3
Table des matières .....	5
Liste des figures : .....	6
Liste des tableaux : .....	6
Abréviation : .....	7
Introduction .....	8
Chapitre 1 : Etat de l'art sur les moteurs thermiques à hydrogène .....	9
1.1 L'hydrogène comme combustible alternatif dans les moteurs à combustion interne .....	9
1.2 Evolution de la technologie des moteurs à combustion interne à Hydrogène .....	10
1.3 Les avantages et les inconvénients de l'utilisation d'hydrogène dans les moteurs à combustion interne .....	12
1.4 Les Problèmes des moteurs à combustion interne à l'hydrogène et de la pile à combustible (PAC) : .....	13
1.5 Les technologies de stockage d'hydrogène [7] .....	14
□ Stockage moléculaire («Éponges à hydrogène») .....	16
□ Les normes du choix des réservoirs (Stockage Gazeux) .....	17
1.6 Beaucoup de pays engagés dans le développement de l'hydrogène dans les transports font appel à la technologie H2-MCI .....	18
1.7 La technologie H2-MCI avec les mélanges hydrocarbures/hydrogène .....	19
1.8. Développement récent .....	21
1.9 Exemples de réalisations .....	24
1.10 Le futur de la technologie H2-MCI .....	27
Conclusion .....	29
Bibliographie .....	30

## Liste des figures :

Figure 1.1 Moteur Ford H2-MCI

Figure 1.2 Test d'un véhicule H2-MCI

Figure 1.3 BMW 740Hi

Figure 1.4 Utim Car (H2 Développement)

Figure 1.5 Réservoir d'hydrogène liquide de Linde, Museum Autovision, Altlußheim, Germany

Figure 1.6 Premier moteur à combustion interne hybride à hydrogène dans le monde (HHICE)

Figure 1.7 Réservoir H2 à la place du réservoir essence

Figure 1.8 Atelier de Quantum (Irvine, Californie)

Figure 1.9 Moteur Triton V10 6,8 l (225 CV à 4 000 tr/mn)

Figure 1.10 Positionnement de l'hydrogène dans le concept de propulsion des bus MAN

Figure 1.11 Projet Althytude

Figure 1.12 Projet ultimcar

## Liste des tableaux :

Tableau 1.1 : Pourcentage d'hydrogène contenu (en masse)

Tableau 1.2 : Tableau comparatif des IDP

Tableau 1.3 : développement récent en Asie

Tableau 1.4 : développement récent en Europe

Tableau 1.5 : développement récent en Amérique du Nord

Tableau 1.6 : Derniers développements récent dans le monde

## **Abréviation :**

H<sub>2</sub>-MCI : Moteur à combustion interne à hydrogène.

PAC : Pile à combustible.

GNC : Gaz Naturel Carburant.

IDP : Indice de performance.

Hythane : Mélange GNC/Hydrogène

**ملخص:** الهدف من هذا العمل القيام بحث مكتبي عميق الذي يتضمن ادماج غاز الهيدروجين داخل المحرك الحراري دا الاحتراق الداخلي كوقود ثانوي، لقد قمنا بالتحدث عن نقاط قوة وضعف هذا المحروق ووجدنا انه وقود نقي لا ينتج عن احتراقه الا بخار الماء ولكن هذه التكنولوجيا صعبة جدا للتحكم وذلك بسبب الحجم الذري الصغير للهيدروجين وسرعة اشتعاله. وقد تم وضع عدة مشاريع في الدول المتقدمة للعثور على حلول تمكن من تسهيل استعمال الهيدروجين داخل المحركات.

**الكلمات المفتاحية:** المحرك الحراري دا الاحتراق الداخلي، وقود ثانوي، تكنولوجيا

**Abstract:** the purpose of the present research work is to present an indepth bibliographic study about the integration of the hydrogen as an alternative fuel in the internal combustion engine. Advantages and disadvantages of the hydrogen fuel are presented. We end up that even though the hydrogen is a pure fuel, its combustion results in the water steam. This technology is very complicated to control because of the small size of its molecule and its low energy of activation. So many research projects are in contant evolution to find solutions to control its safety and to reduce investments.

**Keyword:** internal combustion engine, alternative fuel, hydrogen technologies.

**Résumé :** le but de ce travail est de faire une étude bibliographique concluante sur l'intégration de l'hydrogène comme combustible alternatif dans les moteurs thermique à combustion interne, on a montré les avantages et inconvénients de ce type de carburant, et que l'hydrogène est un combustible pur dont sa combustion ne donne que de la vapeur d'eau mais sa technologie est très difficile à maitriser car il a des molécules très petites et une énergie d'activation très faible. Plusieurs projets ont été lancés dans les pays développés afin de pouvoir trouver les solutions pour que l'utilisation de l'hydrogène soit simple et bon marché.

**Mot clé :** hydrogène, combustible alternatif, moteur thermique à combustion interne, carburant, combustion, vapeur d'eau, technologie, énergie d'activation, molécules.



## **Introduction**

Au cours des premières années de développement du secteur de l'automobile, la puissance et la fiabilité du moteur étaient les préoccupations majeures des motoristes. Cependant au cours de ces trois dernières décennies, la réglementation sur les émissions et l'épuisement des ressources pétrolières ont suscité une attention particulière sur la nécessité du développement de conceptions propres et efficaces de moteurs. Il est très clair maintenant que les moteurs conventionnels sont sujets à quelques difficultés dans l'amélioration du rendement tout en réduisant les émissions.

Un grand nombre de travaux de recherche ont été menés dans le but d'identifier des sources d'énergies de substitution plus écologiques que les produits pétroliers conventionnels.

L'Hydrogène avec son potentiel de production de source infinie, et ses caractéristiques de «combustion propre» et de haut rendement énergétique, offre une alternative tout à fait prometteuse pour remédier aux problèmes liés aux combustibles fossiles.

Bien que l'utilisation de l'hydrogène dans les véhicules à pile à combustible (qui permettent une meilleure efficacité de conversion énergétique et zéro émission de gaz polluants) soit l'objectif ultime d'une mobilité durable, une grande attention doit être consacrée à une technologie de transition avec l'utilisation de l'hydrogène comme carburant pour alimenter les moteurs à combustion interne.

Ce présent travail est une étude bibliographique approfondie sur l'utilisation de l'hydrogène dans les moteurs à combustion interne.

Tout d'abord, on a défini l'état de la technologie où on a commencé par la possibilité d'utilisation de l'hydrogène dans les moteurs à combustion interne. Puis on a parlé sur l'évolution de cette technologie durant le temps, ensuite, on a présenté les avantages et les inconvénients de l'hydrogène dans les moteurs thermique à hydrogène et aussi on a mentionné que les moteurs H2-MCI forment une transition vers la technologie de pile à combustion. Ensuite, on a parlé de la technologie permettant le stockage de ce type de combustible puis les pays engagés sur le développement de ce type de combustible, enfin sur les mélanges hydrocarbures/hydrogène.

Après la définition de la technologie, on a parlé du développement récent de cette dernière dans les trois continents Amérique du nord, Asie, Europe entre la période (2000-2015), ensuite on a cité quelques exemples de réalisation et enfin on a présenté quelques-uns des importants projets mis au point afin de pouvoir la développer.

## Chapitre 1 : Etat de l'art sur les moteurs thermiques à hydrogène

### 1.1 L'hydrogène comme combustible alternatif dans les moteurs à combustion interne

L'utilisation de l'hydrogène comme carburant dans un moteur à combustion interne (H<sub>2</sub>-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 à essences (bi-fuel 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).



Figure 1.1 Moteur Ford H<sub>2</sub>-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 termes 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  $\text{NO}_x$  de quelques ppm (Natkin, 2003).



Figure 1.2 Test d'un véhicule H<sub>2</sub>-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 Evolution de la technologie des moteurs à combustion interne à Hydrogène**

Dans la première génération de MCI à allumage commandé à hydrogène, un carburateur à gaz du type venturi a été utilisé. Avec ce type de moteur, un grand volume de mélange combustible-air est introduit dans le collecteur d'admission. Pour éviter les retours de la flamme, le moteur devait fonctionner en mélange pauvre, ce qui se traduisait par une faible puissance.

Pour la deuxième génération, les technologies des moteurs à essence à allumage commandé ont été adaptées aux moteurs à hydrogène : port d'injection séquentielle multipoint et contrôle électronique du moteur. Une stratégie d'injection tardive d'hydrogène est utilisée, de sorte que l'air admis refroidit le collecteur d'admission ainsi que la chambre de combustion avant l'injection d'hydrogène. Cependant, même avec une injection tardive le mélange stœchiométrique n'est pas toujours possible et la puissance est inférieure à celle d'un moteur à essence correspondant [1].

Pour la troisième génération, à des charges élevées, le mélange est maintenu stœchiométrique. Une recirculation des gaz d'échappement est utilisée pour éviter les retours de flamme. A ce mélange stœchiométrique un catalyseur peut être employé pour diminuer les émissions des  $\text{NO}_x$ . Avec un turbocompresseur et échangeur air/air (intercooler) une puissance similaire ou supérieure à celle d'un moteur à essence est obtenue.

Enfin, pour la quatrième génération, la recherche se focalise sur l'injection directe de l'hydrogène dans les moteurs à allumage commandé. La puissance d'un véhicule alimenté en hydrogène par injection directe est supérieure de :

- 20% par rapport à celui alimenté par de l'essence utilisant la même technologie ;
- D'autres adaptations doivent être effectuées sur le MCI à allumage commandé traditionnel pour améliorer la conception telles que :
- L'utilisation d'un turbocompresseur pour augmenter l'apport d'air,
- L'intégration d'appareils de contrôles moteurs plus sophistiqués,
- L'application d'un revêtement spécial du tube d'échappement résistant à l'eau,
- L'utilisation de matériaux spécifiques pour quelques éléments du moteur qui ont un contact direct avec l'hydrogène.

Ceci fait que le coût d'un MCI à Hydrogène est 1,5 fois supérieure à celui d'un MCI à essence.

Toutefois, la tendance actuelle en matière de conception du moteur sur les principales adaptations recommandées pour l'utilisation de l'hydrogène comme carburant, se focalisent sur les trois points suivants [2] :

- Changement d'injecteurs : La faible densité de l'hydrogène nécessite de plus grands volumes de carburants qui sont injectés dans un court laps de temps. Les travaux de recherches sur cette question ont montré que les injecteurs de gaz naturel peuvent être modifiés pour fonctionner à l'hydrogène comme combustible.

- Un meilleur contrôle de la température : En raison de la vitesse de combustion élevée de l'hydrogène, comparée à celle de l'essence et du diesel.
- Mélanges : Il est recommandé d'utiliser la combustion de l'hydrogène en présence d'hydrocarbures, dans une première étape d'introduction de l'hydrogène comme combustible. Le mélange léger (environ 5 - 10% du volume du mélange) d'hydrogène peut être le point initial pour un remplacement progressif des combustibles classiques et 42% par rapport à un moteur à hydrogène utilisant un carburateur [3].

Il est à noter qu'en laboratoire, la puissance d'un MCI fonctionnant à l'hydrogène et utilisant une combinaison de plusieurs technologies a atteint 80% de plus que celle d'un moteur à essence. Le redimensionnement de la chambre de combustion et l'utilisation d'injection à haute pression peuvent mener à une augmentation de l'efficacité de plus de 120% [3].

Il est aussi important de signaler que la combustion de l'hydrogène en mélange pauvre, la réduction des temps d'injection, le retard à l'allumage, l'utilisation de taux de compression supérieur à 12:1 (plus élevé que celui de l'essence) et l'utilisation des techniques de recirculation des gaz d'échappement peuvent réduire les émissions de NO<sub>x</sub> et éviter le phénomène d'anomalie de combustion.

### **1.3 Les avantages et les inconvénients de l'utilisation d'hydrogène dans les moteurs à combustion interne**

L'utilisation de l'hydrogène comme carburant dans les moteurs à combustion interne offre plusieurs avantages :

- Son utilisation ne connaît pas les mêmes problèmes que ceux des carburants liquides, tels que le bouchon de vapeur (vapor lock), la vaporisation insuffisante, le mélange pauvre, ...etc.
- Lorsque il est brûlé, son principal produit de combustion est l'eau, de ce fait il ne génère pas de produits toxiques tels que les hydrocarbures, le monoxyde de carbone ou le dioxyde de carbone, l'oxyde de soufre et les acides organiques.
- Il a un très large domaine d'inflammabilité (de 4 à 75% en volume) et peut donc être brûlé avec une large gamme de mélanges air-carburant. De ce fait, le fonctionnement en mélange pauvre est possible, ce qui offre une économie de carburant, une réaction de combustion plus complète [1] ainsi qu'une température de combustion finale plus faible. La quantité de polluants émis dans les gaz d'échappement tels que les oxydes d'azote est ainsi réduite.
- Il a une énergie d'allumage (énergie minimale d'inflammation) très faible, ce qui permet d'enflammer les mélanges pauvres et assurer un allumage rapide.

Cependant, l'utilisation de l'hydrogène comme carburant a des inconvénients :

- La faible énergie d'allumage signifie que les gaz chauds et les points chauds dans le cylindre peuvent servir de sources d'allumages prématurés au cours de la course d'admission. Ceci se traduit par les phénomènes de préallumage et d'auto-allumage qui conduisent à l'apparition de cliquetis (vibrations des parois de la chambre de combustion) et de retour de flamme (ou back flash) [2].

- De plus l'hydrogène a une courte distance de propagation de la flamme, plus petite que celle de l'essence. Par conséquent, les flammes d'hydrogène se propagent près de la paroi du cylindre et de l'injecteur. La tendance de retour de flamme peut alors augmenter et par conséquent, une flamme du mélange hydrogène-air passe plus facilement à travers une vanne d'admission presque fermée que les flammes des hydrocarbures – air [2].

Ces anomalies de combustion, dont le retour de flamme fait partie, ont été l'obstacle le plus important dans le développement des moteurs à hydrogène. De ce fait, la suppression de la combustion anormale dans les moteurs à hydrogène s'est avérée être un défi de taille associé à son exploitation [1]. Les mesures prises pour éviter ce phénomène ont des implications importantes pour la conception des moteurs, la formation du mélange et le contrôle de charge.



Figure 1.3 BMW 740Hi

#### **1.4 Les Problèmes des moteurs à combustion interne à l'hydrogène et de 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).



Figure 1.4 Ultim 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<sup>®</sup>) 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 Les technologies de stockage d'hydrogène [7]

La nature fortement inflammable de l'hydrogène en présence de l'oxygène de l'air fait fréquemment craindre les risques d'explosion lorsqu'il est stocké en quantité. Les catastrophes

qui ont touché des dirigeables gonflés à l'hydrogène, comme le Hindenburg, ont marqué les esprits. On notera cependant que l'hydrogène est particulièrement volatil et se dissipe rapidement en cas de fuite, et que s'il entre aisément en combustion, les véritables explosions sont particulièrement rares.

A ce jour, trois grandes voies de stockage d'hydrogène à bord d'un véhicule sont envisagées :

- Le stockage comprimé gazeux
- Le stockage liquide
- Le stockage moléculaire

➤ **Stockage gazeux (pression élevée)**

Le stockage gazeux sous forme « comprimé » (actuellement 350 bars) permet d'atteindre une densité massique satisfaisante avec des réservoirs composites. La densité volumique de stockage reste faible : une pression de 700 bars est inévitable pour rendre la technologie compétitive.



Figure 1.5 : Réservoir d'hydrogène liquide de Linde, Museum Autovision, Altlußheim, Germany



### ➤ **Stockage Liquide**

Le stockage liquide à 20 K (-253°C) sous une pression de 10 bars permet d'atteindre des densités volumique et massique intéressantes mais nécessite des réservoirs à l'isolation thermique particulièrement poussée pour minimiser l'évaporation.

En plus, l'hydrogène étant le plus petit élément chimique, son stockage nécessite l'utilisation de matières spéciales empêchant toute fuite. Cette propriété de traverser les éléments implique d'énormes précautions, ne permettant pas de rentabiliser aisément son utilisation. Cette technique est surtout utilisée dans le domaine spatial.

### ➤ **Stockage moléculaire («Éponges à hydrogène»)**

C'est l'un des axes de recherche prometteurs qui va permettre d'utiliser l'hydrogène pour les voitures.

Le stockage sur des substrats sous forme absorbée, surtout sur des hydrures métalliques, présente une densité volumique particulièrement intéressante mais une densité massique faible. En plus, la cinétique, la température et la pression de cyclage restent des points durs à maîtriser.

Quelques équipes à travers le monde étudient la piste des hydrures métalliques. Ces alliages sont en effet, capables d'absorber et de stocker l'hydrogène, à l'image d'une éponge, de manière stable et sûre. Seulement, on connaît particulièrement mal les mécanismes qui autorisent ces composés d'absorber l'hydrogène gazeux. Un mystère que l'équipe de Klaus Yvon, professeur au Laboratoire de cristallographie de l'Université de Genève, a réussi à éclaircir grâce à une étude soutenue par le Fonds National Suisse (FNS) et parue récemment dans la revue *Physical Review Letters* [7].

L'alliage métallique  $\text{LaMg}_2\text{Ni}$  (lanthane, magnésium, nickel) est un conducteur électrique, en présence d'hydrogène ( $\text{H}_2$ ), il forme l'hydrure métallique  $\text{LaMg}_2\text{NiH}_7$  qui, lui, est un isolant. Cette propriété pourrait en faire un détecteur d'hydrogène efficace et à bon marché.

En plus, les chercheurs ont enfin compris le mécanisme d'absorption pour ce type d'hydrures qui peuvent contenir une plus grande densité d'hydrogène que l'hydrogène liquide lui-même.

Enfin, un hydrure métallique a été trouvé par les allemands en 2003 pour construire un réservoir pour un sous-marin militaire à hydrogène. Comme l'ensemble des hydrures, ce réservoir

allemand chauffe en stockant de l'hydrogène et refroidit en libérant l'hydrogène. Pour conclure, cet hydrure est lourd, cher et complexe à créer. Néanmoins des sous-marins allemands et bientôt grecs fonctionnent grâce à ce type de stockage.

Capacité de stockage de certains hydrures.

Tableau 1.1 Pourcentage d'hydrogène contenu (en masse)

Hydrure	Pourcentage d'hydrogène contenu (en masse)
$\text{LaNi}_5\text{H}_{6,5}$	1,4 %
$\text{ZnMn}_2\text{H}_{3,6}$	1,8 %
$\text{TiFeH}_2$	1,9 %
$\text{KH}$	2,5 %
$\text{Mg}_2\text{NiH}_4$	3,6 %
$\text{VH}_2$	3,8 %
$\text{NaH}$	4,2 %
$\text{CaH}_2$	4,8 %
$\text{MgH}_2$	7,6 %
$\text{LiH}$	12,7 %

➤ **Les normes du choix des réservoirs (Stockage Gazeux)**

La norme en vigueur impose que les réservoirs soient dimensionnés pour atteindre une pression d'éclatement égale à trois fois la pression de service. Pour de telles pressions, on parle de réservoirs hyperbares, classés en quatre catégories :

- Type I : réservoir entièrement métallique,
- Type II : réservoir métallique avec un frettage composite en fibres de verre sur la partie cylindrique.
- Type III : réservoir composite (à fibres d'aramide, de verre ou de carbone) associé à un liner métallique.
- Type IV : réservoir composite (à fibres de carbone) avec un liner polymère.

Les réservoirs de type IV qui ont été choisis pour leur indice de performance élevé. En effet, l'indice de performance (IDP) d'un réservoir peut être défini par la relation suivante [8] :

$$\text{IDP} = \frac{\text{pression de service} \times \text{volume du réservoir}}{\text{masse du réservoir}}$$

A titre comparatif, le tableau 1.2 permet de comparer l'IDP de différents réservoirs.

Tableau 1.2 Tableau comparatif des IDP [8]

	Fibres de verre + liner aluminium (type III)	Fibres aramide + liner aluminium (type III)	Fibres de carbone + liner polymère (type IV)
IDP par rapport à un réservoir de type I en aluminium	+75%	+150%	+278%

### ➤ Optimisation du poids des réservoirs

L'utilisation des réservoirs de stockage d'hydrogène dans le domaine de l'automobile oblige les concepteurs à minimiser son coût. La fibre de carbone constituant au moins la moitié du prix du réservoir, l'optimisation consiste à réduire la masse de composite tout en gardant les performances à l'éclatement [9]. A iso-procédés et iso-matériaux, les paramètres d'optimisation retenus sont :

- le nombre total de plis
- le séquençage, c'est à dire l'alternance et le nombre de couches hélicoïdales et circonférentielles
- les angles d'enroulement

Les caractéristiques matériaux, paramètres essentiels dans une optimisation structurelle composite, sont figés dans cette étude. L'objectif de l'optimisation étant la masse du réservoir, les contraintes fixées dans cette étude, sont :

- une pression minimale d'éclatement
- la localisation de la rupture finale (en partie cylindrique)

## 1.6 Beaucoup de pays engagés dans le développement de l'hydrogène dans les transports font 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.



Figure 1.6 Premier moteur à combustion interne hybride à hydrogène dans le monde (HHICE)

Le programme HyFleets qui est 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 a été lancée pour 2007-2008. Témoins de cet intérêt, un symposium « Hydrogen and Internal Combustion Engines » était organisé en Février 2006 en Californie et un 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) a organisé, en Septembre 2006, le « 1<sup>st</sup> International Symposium on Hydrogen in Internal Combustion Engines »

### **1.7 La technologie H2-MCI avec les mélanges hydrocarbures/hydrogène**

L'hydrogène peut être utilisé avantageusement dans les moteurs à combustion interne comme additif à un carburant hydrocarboné. En effet, la faible limite d'énergie d'allumage et la grande vitesse de combustion de l'Hydrogène contribuent à améliorer la combustion du mélange hydrogène/hydrocarbures, réduisent l'effet de l'anomalie de combustion tout en améliorant les performances et l'économie du carburant et réduisent aussi les émissions polluantes. En ce qui

concerne la puissance, l'hydrogène augmente la densité énergétique du mélange aux limites pauvres avec l'augmentation du rapport hydrogène-carbone et améliore ainsi le couple à plein régime.

Cependant, la faible densité de l'hydrogène gazeux rend le stockage simultané de ce dernier avec un combustible liquide dans un même réservoir impossible. En effet l'hydrogène se concentre au-dessus du carburant liquide ce qui écarte toute possibilité de formation du mélange. En outre, les combustibles liquides sont stockés à des pressions relativement faibles laissant peu de place à l'ajout d'hydrogène. D'autre part, le point d'ébullition de l'hydrogène liquide provoquerait le gel des autres carburants, ce qui exclut toute possibilité de stockage dans un même réservoir.

Néanmoins, l'hydrogène peut être utilisé en conjonction avec les combustibles liquides denses comme l'essence, l'alcool ou le diesel à condition que chacun soit stocké séparément et mélangé à l'état gazeux immédiatement avant l'allumage. Dans ces cas, les réservoirs doivent être dimensionnés pour s'insérer dans les espaces non utilisés sur le véhicule.

Toutefois, il est aussi difficile d'utiliser l'hydrogène en conjonction avec d'autres combustibles qui ont également besoin de systèmes de stockage volumineux, tels que le propane.

L'hydrogène est le plus souvent mélangé au gaz naturel carburant (GNC) à haute pression parce que les deux gaz peuvent être stockés dans le même réservoir ; le gaz formé à partir du mélange est appelé HCNG ou Hythane. En général, ce type de véhicules fonctionnent en bicarburation (essence/HCNG) et ont tendance à utiliser un seul combustible.

Un mélange H<sub>2</sub>/GNC à 8% de volume d'hydrogène peut être utilisé directement dans les véhicules GNC actuels sans aucune modification du système d'injection de carburant ou des points de réglage du moteur.

Un mélange de H<sub>2</sub>/GNC à 20% de volume d'hydrogène présente plus d'avantages environnementaux. Des études ont montré que les émissions sont réduites de plus de 20% par rapport au GNC pur pour ce type de fonctionnement [1]. Cependant, ce mélange plus lourd en hydrogène dans le gaz naturel comprimé ne peut être utilisé directement dans un MCI. Une modification du moteur, de l'allumage et de l'injection de carburant sont nécessaires pour un fonctionnement optimal. Une vérification de la sécurité globale du système de carburant doit être effectuée [5]. Des mélanges de plus de 20% de volume d'hydrogène dans le gaz naturel peuvent réduire davantage les émissions mais plus de modifications dans le moteur sont nécessaires. En effet, pour des pourcentages d'hydrogène supérieur à 30-40% du volume,

d'importants phénomènes de corrosion peuvent se produire [4]. En conséquence, les modifications requises pour les véhicules sont essentiellement relatives à la configuration du système de contrôle qui doit être différente et à certains matériaux en contact direct avec l'hydrogène.

Des études récentes ont montré que les coûts des carburants H2/GNC à 10% et 20% de volume d'hydrogène sont plus élevés que ceux du gaz naturel carburant pur. Cette augmentation, qui est environ de 8% et 15% respectivement, est accompagnée d'une importante réduction de polluants [5]. Une contribution rapide au développement de cette filière peut être réalisée. Ceci peut se faire en adaptant les stations existantes d'approvisionnement de GNC pour fournir le HCNG avec une ligne locale de production d'hydrogène de capacité limitée [6]

### 1.8. Développement récent

➤ **2000-2006**

- **Asie**

Tableau 1.3 développement récent en Asie [13]

Chine	Pékin	La société américaine Hythane de Denever a annoncé en janvier 2006 la signature d'un accord avec la chine pour 10000 bus Hythane dans le cadre des jeux Olympiques de 2008
Inde		International Tractors Ltd a reçu 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 entreprise japonaise deux Premacy hydrogène hybride à moteur rotatif (2006)

- Europe

Tableau 1.4 Développement récent en Europe [13]

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 a annoncé 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 Hydrocarbure propose des bus Hythane (2005)
Danemark	Hurup Thy	Le Folkecentre a convertit une Ford Focus à l'hydrogène pur en 2003
	Dunkerque et Toulouse	Gaz de France a lancé en 2005 « Althytude », démonstration de bus utilisant un mélange d'hydrogène et de gaz naturel à Dunkerque et Toulouse
France	Lille	H2 Développement a 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 a présenté 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
	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 a présenté en 2005, un Mercedes Sprinter converti à l'hydrogène par MCI (ex-projet WEIT à Hambourg).

- **Amérique du nord**

Tableau 1.5 Développement récent en Amérique du Nord [13]

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% H <sub>2</sub> ) 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 a installé en 2005 une station Hythane pour alimenter des minibus 12 places
	Colorado	Etec a transformé un Ford à l'hydrogène avec Roush (2005)
	Floride	Ford a annoncé en 2005 une commande de huit navettes E-450 hydrogène dans le cadre du projet H <sub>2</sub> Florida. Deux autres ont été 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 % H <sub>2</sub> )
Canada	Vancouver	Westport convertit 5 bus à l'Hythane pour la compagnie de transport du grand Vancouver (Transit).



➤ **2007-2015**

Tableau 1.6 Derniers développements récent dans le monde [11,12]

<b>2007</b>	<b>BMW</b> a fait le test d'une nouvelle voiture de luxe appelé BMW hydrogen 7 qui a pu atteindre 310 km/h
<b>2008</b>	Ford Motor Company of Canada Limited mise à l'essai dans la vie courante de bus-navettes à moteur à combustion interne, alimentés à l'hydrogène
<b>2013</b>	<b>Toyota</b> a mis en place d'une voiture Mirai qui a une autonomie de 650 km
<b>2014</b>	Honda, Hyundai, Toyota la mise en place d'un projet commun afin de réaliser des voitures à utilisation à domicile d'ici 2017
<b>2015</b>	Hyundai lance la première voiture de série à hydrogène livrable en Suisse

### 1.9 Exemples de réalisations

#### 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 turbocompresseur et sans impliquer Toyota dans sa conversion.



Figure 1.7 Réservoir H<sub>2</sub> 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).



Figure 1.8 Atelier de Quantum (Irvine, Californie)

Les émissions mesurées sont extrêmement faibles : 0,005 g/km pour les  $NO_x$  et 0,43 g de  $CO_2$  par km (contre 107 g  $CO_2$  pour la Prius essence). Quantum travaille aussi au développement d'un Ford Escape Hybride à l'hydrogène pour 2006-2007.

### **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.



Figure 1.9 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.

### 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).

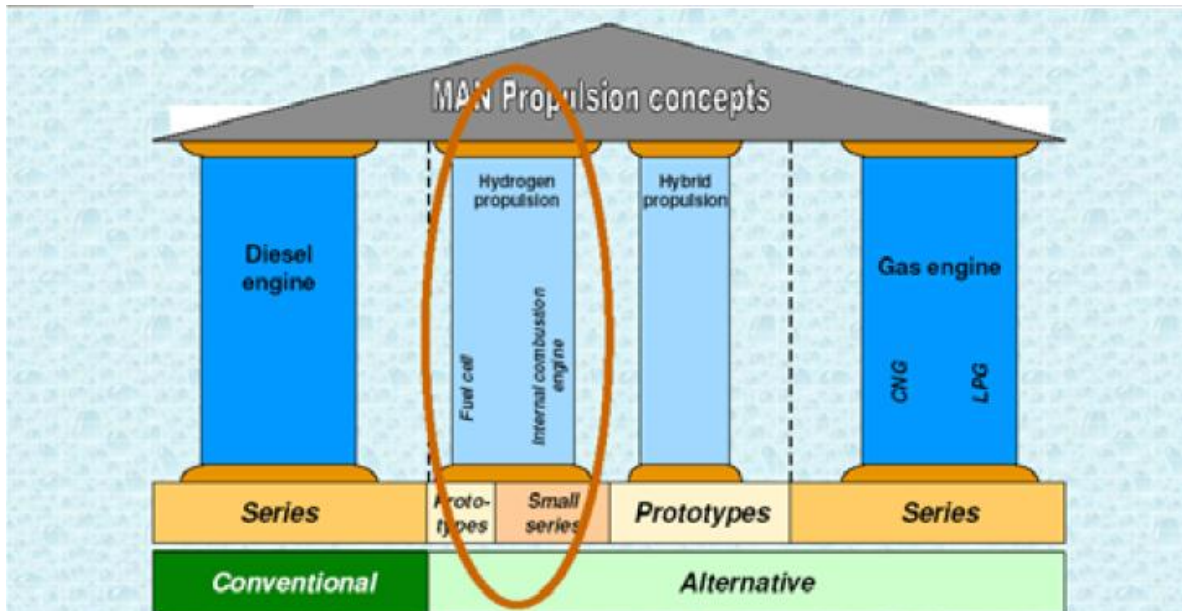


Figure 1.10 : Positionnement de l'hydrogène dans le concept de propulsion des bus MAN

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.

### 1.10 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 :



Figure 1.11 Projet Althytude

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](http://www.althytude.info)) ;



Figure 1.12 Projet ultimcar

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](http://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.

## Conclusion

Notre travail est concentré sur l'intégration de l'hydrogène comme un combustible alternatif dans les moteurs thermique à combustion interne.

L'hydrogène est un gaz qui ne se trouve pas libre dans la nature, mais il a de nombreuses sources de production qui lui donnent la propriété d'une source d'énergie renouvelable.

D'après cette étude bibliographique concluante, on a trouvé qu'il est possible d'intégrer l'hydrogène comme combustible alternatif dans les moteurs thermiques à combustion interne.

Mais, comme l'hydrogène a une faible énergie d'activation qui mène au retour de la flamme de combustion et une molécule très petite qui le rend trop difficile à stocker, son intégration dans les moteurs à combustion interne est partielle dont il est préférable de le mélanger avec un hydrocarbure soit on le mélange avec un autre combustible alternatif comme le gaz naturel comprimé ou le brûlé en mode dual fuel avec un hydrocarbure liquide (essence, diesel).

L'hydrogène est un combustible de substitution, donc il est écologique en le brûlant il ne donne que de la vapeur d'eau et un faible taux d'émission des  $\text{NO}_x$ , donc en l'intégrant complètement dans les moteurs à combustion interne on va produire un moteur écologique.

De nombreux travaux de recherche ont été mis au point dans beaucoup de pays développés afin de pouvoir trouver les solutions pour pouvoir contrôler la technologie qui permet une utilisation sécurisée de ce combustible.

On peut conclure que l'hydrogène et les moteurs à hydrogène présentent une solution pour la diminution de la pollution en limitant les taux d'émission des  $\text{NO}_x$  et en gardant une certaine marge de puissance qui nous permet d'abandonner l'utilisation des carburants fossiles qui sont des carburants polluants.

## Bibliographie

- [1]- Amrouche F, et al., Toward hydrogen enriched natural gas “HCNG” fuel on the Algerian road, International Journal of Hydrogen Energy (2010), doi:10.1016/j.ijhydene.2010.07.042
- [2]- MA. Escalante Soberanis, AM. Fernandez. A review on the technical adaptations for internal combustion engines to operate with gas/hydrogen mixtures. International Journal of Hydrogen Energy (2009), doi:10.1016/j.ijhydene.2009.09.070.
- [3]- College of the desert. Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies: Rev 0, December 2001.
- [4]- Fethia Amrouche et coll., An Overview of Alternative Road Fuel: Hydrogen Compressed Natural Gas for Internal Combustion Engines. Premier Congrès International sur les Matériaux et l'Environnement «CIME 2010», Alger, du 05 au 07 Octobre 2010.
- [5]- Akansu SO, Dulger A, Kahraman N, Veziroglu TN. Internal combustion engines fuelled by natural gas/hydrogen mixtures. International Journal Hydrogen Energy 2004 ; 29:1527e39.
- [6]- Fethia Amrouche et coll., Hydrogen-Enriched Natural Gas: Valid Opportunity for dealing with sustainable development in Maghreb countries transportation sector. 1st International Symposium on Environment Friendly Energies in Electrical Applications (EFEEA'10), Ghardaia, 2-4 November, 2010, Algeria.
- [7]- Site Web ([http://www.super-soupape.com/moteur\\_a\\_hydrogene.php](http://www.super-soupape.com/moteur_a_hydrogene.php)).
- [8]- Aurélie. PILATO, caractérisation des structures composites bobinées épaisses, application à l'étude du comportement de réservoirs de stockage d'hydrogène, décembre 2011.
- [9]- D. Halm, Optimisation des réservoirs composites de stockage hyperbare de l'hydrogène: bilan du projet Osirhys IV, Lyon, 24 au 28 Août 2015
- [11]- Site Web (<http://www.hyundai.ch/fr/services/actualites/a-geneve,-hyundai-expose-ses-solutions-en-matiere-d%E2%80%99efficience-energetique-et-de-connectivite.html>).
- [12]- Site Web (<http://www.popularmechanics.com/cars/hybrid-electric/a10175/the-hydrogen-car-is-back-again-16528552/>).
- [13]- Kenneth Gillingham, hydrogène et moteur à combustion interne : Une technologie de transition réaliste Vers l'économie hydrogène, 2007.