



UNIVERSITÉ DE GENÈVE  
CENTRE UNIVERSITAIRE D'ÉTUDE  
DES PROBLÈMES DE L'ÉNERGIE

## L'HYDROGÈNE, FUTUR VECTEUR ÉNERGÉTIQUE ?



**Actes**  
**de la 15<sup>ème</sup> Journée du Cuepe**  
**Colloque du cycle de formation du Cuepe 2004-2005**

édités par  
Pierre Hollmuller, Bernard Lachal,  
Franco Romerio, Willi Weber, Jean-Marc Zraggen

Mai 2005



Actes  
de la 15<sup>ème</sup> Journée du Cuepe  
Colloque du cycle de formation du Cuepe 2004-2005

## **L'HYDROGÈNE, FUTUR VECTEUR ENERGÉTIQUE ?**

édités par  
Pierre Hollmuller, Bernard Lachal,  
Franco Romerio, Willi Weber, Jean-Marc Zraggen

Mai 2005

Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie (CUEPE)  
Battelle – Bâtiment A  
Route de Drize 7, CH – 1227 Carouge / GE  
Tél : 022 379 0661, Fax : 022 379 0639  
[www.cuepe.ch](http://www.cuepe.ch)





## TABLE DES MATIERES

Avant propos	1
<i>Les innovations émergentes de l'économie de l'hydrogène : quelles nécessités et incertitudes en 2005 ?</i>	3
B. Bourgeois, Université Pierre Mendès France	
<i>Entre énergie primaire et énergie utiles : quelques réflexions sur le vecteur hydrogène et les filières énergétiques</i>	17
P. Hollmuller, CUEPE, Université de Genève	
<i>Stockage de l'hydrogène et risques</i>	27
J.-M. Joubert, F. Cuevas, M. Latroche, A. Percheron-Guégan, CNRS	
<i>La maison solaire énergétiquement autarcique de Fribourg en Brisgau et les conséquences pour la fourniture en énergie des résidences actuelles</i>	43
B. Sicre, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE	
<i>Hydrogène et mobilité. Etat de l'art et contribution de la recherche en Suisse</i>	53
A. Wokaun, Paul Scherrer Institut	
<i>Hydrogen. A viable solution to all energy problems ?</i>	71
R. Dall'Ara, P. Rossi, AccaGen SA and AET	
<i>Hydrgen energy : Can we help ? An industrial perspective</i>	81
L. Allidières, Air Liquide	
Programme de la Journée	99
Liste des participants	101



## AVANT PROPOS

Les systèmes énergétiques basés sur l'hydrogène séduisent par leurs avantages, qui cadrent bien avec le souci public concernant les émissions polluantes et le changement climatique. Le carburant hydrogène est efficace et il est perçu comme une énergie renouvelable et propre. On se réjouit de la vapeur d'eau inoffensive qui sort du pot d'échappement mais l'on oublie que l'hydrogène n'est pas une énergie primaire et qu'il doit donc d'abord être produit.

Or production et transport de l'hydrogène ne sont pas sans problèmes. L'essentiel de la production actuelle se fait par réformage de sources fossiles et libère autant de CO<sub>2</sub> sinon plus que l'utilisation directe de ces sources. On peut également produire de l'hydrogène par électrolyse, avec des énergies renouvelables comme le soleil et le vent, ce qui permet de stocker l'énergie produite au gré des cycles naturels pour l'utiliser au moment nécessaire. Le même genre de raisonnement s'applique par ailleurs au stockage d'électricité nucléaire.

Tout autant que la question de sa production, c'est la question de son utilisation qui pose un véritable défi. Il est vrai que l'hydrogène peut tout aussi bien être utilisé comme combustible ou carburant, pour produire de la chaleur ou de l'énergie mécanique, que pour produire directement de l'électricité, via une pile à combustible – sans rejet direct de CO<sub>2</sub>. Mais nos usages énergétiques, qu'ils soient stationnaires ou mobiles, sont extrêmement variés: chauffage, processus industriels, transport...

Enfin, pour savoir si les technologies d'hydrogène actuelles et futures ont une chance de remplacer les agents énergétiques fossiles, il est non seulement nécessaire de prendre en compte toute la chaîne production – stockage – transport – utilisation, mais encore d'évaluer le temps et le capital requis pour installer l'infrastructure nécessaire.

Quels sont les potentiels mais également les limites du vecteur énergétique hydrogène? Où doit-on utiliser ses avantages spécifiques de la façon la plus efficace et la plus judicieuse, pour qu'il puisse prendre sa place dans le marché énergétique? Quelles seraient les implications de son émergence sur l'organisation du secteur de l'énergie?

Ce colloque propose d'éclairer ces questions, par l'apport de conférenciers impliqués dans la recherche de pointe comme dans l'étude de systèmes pilotes, ou encore dans la commercialisation de cette technologie émergente.



## **Les innovations émergentes de l'économie de l'hydrogène : quelles nécessités et incertitudes en 2005 ?**

**(version provisoire)**

Bernard Bourgeois  
9 Chemin de la Souchière  
F – 38330 Montbonnot  
bourgeois.b@wanadoo.fr

### **Introduction**

Le thème de l'économie de l'hydrogène est devenu dans ces cinq dernières années l'une des questions les plus débattues dans les milieux spécialisés de l'énergie. Cependant les annonces optimistes de son émergence prochaine à partir du début de sa commercialisation dans des applications énergétiques ont été soit démenties par les faits, soit simplement décalées dans le temps, du fait notamment des performances encore insuffisantes de ces technologies. Pour autant l'anticipation de nouveaux systèmes énergétiques, plus conviviaux pour l'environnement naturel, comprenant une place importante de l'hydrogène-énergie, ne semble pas faiblir, du moins si on s'en tient à la rivalité apparente entre Etats-Unis, Japon et Union Européenne dans leurs programmes de R&D sur l'hydrogène et les piles à combustible.

Ce papier propose quelques éléments de discussion sur les « nécessités » et les « incertitudes » de l'émergence de l'économie de l'hydrogène. On commence cette présentation du débat à partir du rappel d'une position « extrême » de C. Marchetti sur une certaine forme de nécessité de l'économie de l'hydrogène. Puis on identifie la nature des innovations techniques et non-techniques qui paraissent indispensables à l'élaboration de cette émergence, et à son adoption à grande échelle. Enfin on s'interroge sur les incertitudes pesant sur la construction des sentiers de transition menant à cette adoption de masse.

### **1. La nécessité historique d'une prochaine domination des systèmes énergétiques par l'énergie nucléaire et l'hydrogène selon C. Marchetti**

Les systèmes énergétiques définis par l'ensemble des opérations de production/extraction, transport, distribution et de conversion des formes d'énergie primaire, puis de leur consommation dans différents usages sont une des composantes importantes des systèmes économiques de chaque pays. Ces systèmes énergétiques sont donc une combinaison :

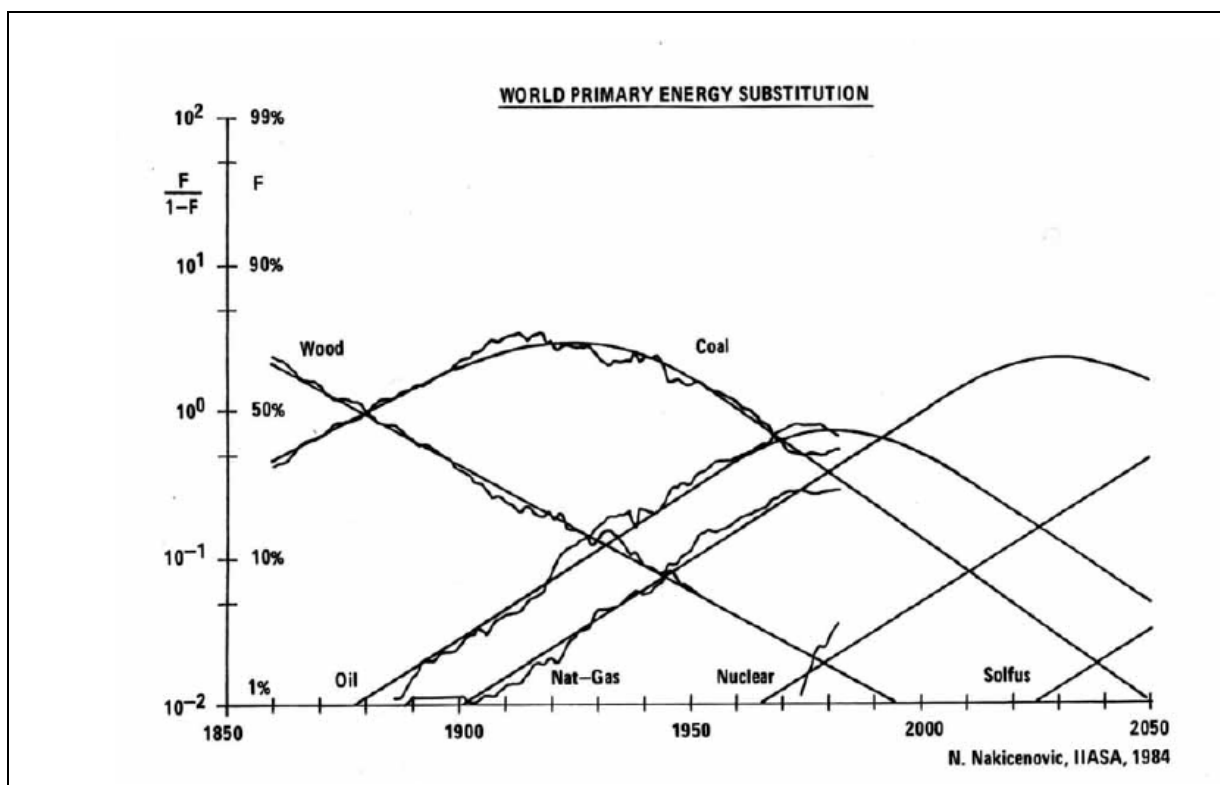
- d'infrastructures souvent très capitalistiques, à longue durée de vie, résultant des décisions d'investissement structurant,
- de mobilisation de différentes ressources énergétiques naturelles renouvelables et non renouvelables qui se traduisent aux différents stades de ce système par des impacts environnementaux longtemps ignorés ou minimisés,
- de comportements humains et institutionnels pesant sur les règles d'utilisation de ces équipements et de mobilisation différenciée dans le temps et l'espace de ces formes d'énergie.

Une représentation simplifiée de ce système complexe peut être donnée à partir d'un graphe reliant l'extraction des énergies primaires aux utilisations finales, et même jusqu'à l'énergie

utile obtenue dans ces opérations de consommation. J.M. Martin (2000, p.22) donne un type de représentation des systèmes énergétiques contemporains.

Mais cette vision statique du système énergétique doit être complétée par une analyse de ses dynamiques de long terme, avec comme question sous-jacente celle de l'identification de lois éventuelles d'évolution en longue période que les sociétés et nations auraient intérêt à connaître et dont elles auraient éventuellement à s'inspirer dans leurs décisions d'investissements de long terme.

Plusieurs auteurs se sont intéressés à cette question, en particulier les analystes de systèmes énergétiques Nakicenovic, Grubler et Marchetti lors de leurs travaux à l'IIASA dans les années 1980 et 1990. Ils ont souvent décrit cette dynamique à partir d'équations de Lotka-Volterra représentant l'évolution de la part de marché des différentes formes d'énergie primaire dans les 150 dernière années, y compris le début de pénétration de l'énergie nucléaire à partir du milieu des années 1980, et même la prévision d'une nouvelle courbe de pénétration de l'énergie solaire et de la fusion à partir de l'année 2025 (Cf figure 1).



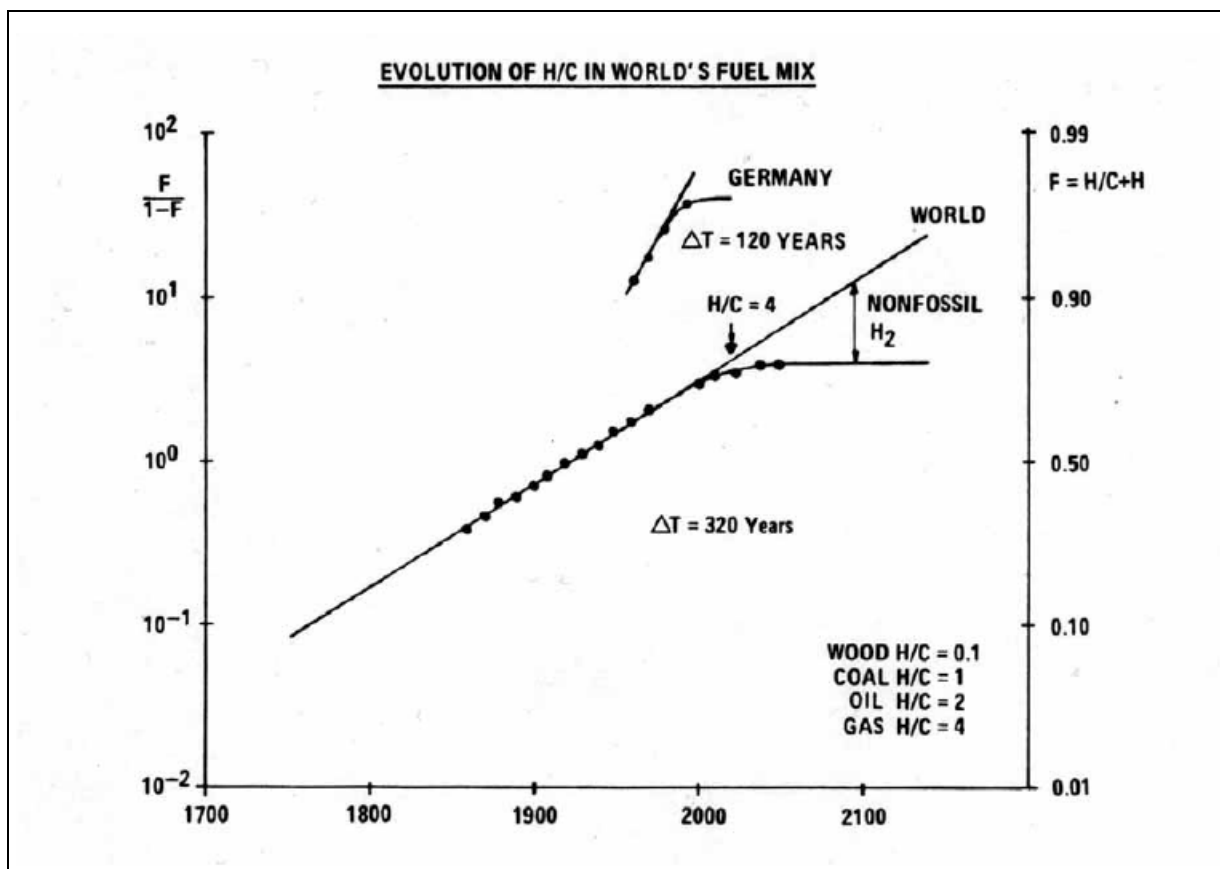
Source : Nakicenovic, 1984

Figure 1 : Part relative des différentes formes d'énergie primaire à l'échelon mondial de 1850 à 2050

De cette évolution sur longue période, Marchetti (1986) en tire une autre conclusion sur la pénétration future de l'hydrogène.

A partir du constat que dans la substitution de très long terme (200 ans) du bois par le charbon, puis du charbon par le pétrole, et enfin du pétrole par le gaz naturel, le ratio hydrogène/carbone a augmenté constamment, respectivement en moyenne de 0,1 (bois- $(H_2O)_C$ ) à 1 (charbon- $(HC)_n$ ) puis 2 (pétrole  $(CH_2)_n$ ) et enfin 4 (gaz naturel- $(CH_4)_n$ ),

Marchetti en déduit que la composition moyenne de ces ressources énergétiques primaires est de plus en plus « hydrogénée », et que tout se passe comme s'il y avait une sorte de concurrence darwinienne entre le carbone et l'hydrogène tendant à la substitution du premier par le second en longue période.



Source : Marchetti C. (2005)

Figure 2 : Evolution du ratio H/C dans le mix des énergies primaires (1860-2000) ou la tendance séculaire à la décarbonisation

Mais cette hydrogénisation croissante des ressources en énergie primaire continue de s'accompagner de fortes émissions de CO<sub>2</sub> qui posent le problème du changement climatique, à l'exception du début de pénétration de l'énergie nucléaire. L'auteur souligne que dès la fin des années 1960, il proposait que l'hydrogène soit produit par une décomposition thermochimique de l'eau, à partir d'un apport de chaleur haute température des réacteurs nucléaires. L'émergence de l'hydrogène pur comme vecteur énergétique central ne fait aucun doute : « *If we take figure 2, we see that around year 2000 even the penetration of methane cannot hold the secular trend of hydrogen substituting carbon so that a source of hydrogen of non fossil origin is called in. Water splitting with nuclear or solar could perfectly match* ». (Marchetti, 2005, p.4).

Cette vision de la nécessité historique de l'émergence de l'hydrogène-énergie, et de sa production de masse à partir de l'énergie nucléaire s'appuie sur une représentation déterministe des substitutions technologiques, qui n'est nuancée que par la reconnaissance d'une certaine indétermination sur la date historique du début du nouveau cycle : « *Because my previous analysis had shown that technological substitution has a life of his own* (souligné par nous), *I concentrated on the introduction of new technologies that in due time may*

*produce the desired effect* » ( Marchetti, op.cit. p.3). Cette nécessité est fondée par l'auteur sur le fait que « *The logistics used to fit the current technological substitutions are usually predictive* » ( op.cit. p.4).

Après le concept d'une diffusion d'une innovation dans sa niche selon une courbe logistique, Marchetti (1994) ajoute, dans son analyse des innovations technologiques, un deuxième concept fondateur d'une inscription de la plupart des innovations dans une dynamique cyclique de long terme : « *The second concept is that our Western societies operate in a pulsed way, with a period of about 55 years. Most innovations start and saturate inside of these time boxes. It can restart and saturate at higher level during the following time box. Our box ends around 1995 (it started in 1940) and that is why all markets look saturated.* »

D'où nos deux questions : l'émergence et le développement de « l'économie de l'hydrogène » relèvent-ils d'une nécessité historique, et cette nécessité historique relève-t-elle d'une logique mathématique de diffusion épidémique d'innovations technologiques se substituant aux techniques existantes, avec référence ou liaison possible pour les technologies innovantes les plus importantes aux différents cycles de croissance économique de long terme de Kondratieff avec une périodicité de 50/55ans ?

## **2. Les promesses de « l'économie de l'hydrogène » et la nature des innovations associées à son émergence**

2.1. Il ne fait plus guère de doute que les changements à apporter aux systèmes énergétiques du futur ne pourront être que des changements structurels du fait de la nature des nouvelles contraintes que ces systèmes devront respecter. Ces exigences commencent à être bien connues, à défaut d'être prises effectivement en compte dans les décisions d'investissements et les comportements des acteurs de ces systèmes. Deux contraintes sont annoncées.

- La raréfaction des ressources énergétiques fossiles, en particulier des hydrocarbures liquides, est reconnue de plus en plus largement, même si sa connaissance précise (données quantitatives et qualitatives informées sur les ressources et leur répartition), ses manifestations extérieures les plus visibles notamment par les fluctuations du prix du pétrole, et ses modalités géo-politiques continuent d'être largement débattues. Les « preuves » avancées par certains d'une soudaine hausse des prix mondiaux du pétrole comme un signe de l'imminence de cette raréfaction n'emportent pas complètement la conviction en soi, quand on se rappelle l'impact des mécanismes de court-terme, voire d'ultra-court-terme qui domine le marché pétrolier, et le sous-investissement manifeste des pays de l'OPEP et des grandes compagnies pétrolières dans la création de nouvelles capacités de production. Pour autant cette phase de sous-investissement ne peut masquer la prochaine arrivée du pic de production dans les zones non-OPEP (entre 2008 et 2010), et les probables comportements de précaution des pays à réserves longues après cet évènement. Cependant même si le progrès technique peut encore repousser cette date fatidique du pic de production mondiale (pétroles lourds, augmentation du taux de récupération), la perspective d'une augmentation encore importante des approvisionnements en hydrocarbures liquides se heurte à la contrainte des émissions de gaz à effet de serre.
- Le changement climatique est une préoccupation mondiale encore très inégalement partagée. Elle est à la fois plus récente et plus décisive sur l'avenir des systèmes énergétiques dans la mesure où notre dépendance à l'égard des ressources énergétiques en carbone fossile est grande, voire quasi-totale dans le secteur clé des transports. Comme



dans le problème de la raréfaction des ressources fossiles, une controverse entre scientifiques s'est développée il y a une dizaine d'années. Au prétexte que tous les mécanismes du changement climatique n'étaient pas connus, certains niaient ou minimisaient la responsabilité des activités humaines dans l'enclenchement de perturbations climatiques significatives à l'échelon mondial. Le 14 Avril 1992, deux cents soixante quatre scientifiques, dont cinquante deux Prix Nobel, dans leur « Appel de Heidelberg » critiquaient ces croyances, et leur idéologie sous-jacente :

*« Toutefois, nous nous inquiétons d'assister, à l'aube du XXI<sup>e</sup> siècle, à l'émergence d'une idéologie irrationnelle qui s'oppose au progrès scientifique et industriel et nuit au développement économique et social.*

*Nous affirmons que l'état de nature, parfois idéalisé par des mouvements qui ont tendance à se référer au passé, n'existe pas et n'a probablement jamais existé depuis l'apparition de l'homme, dans la biosphère, dans la mesure où l'humanité a toujours progressé en mettant la nature à son service, et non l'inverse ».*

Cette controverse est aujourd'hui en voie d'extinction, dans la mesure où personne ne peut nier cette responsabilité, après la diffusion des nombreux travaux de l'IPCC, même si les débats ouverts par la deuxième partie de cette citation ne peuvent être contestés facilement.

2.2. Face à ces deux contraintes tendant à réorienter la dynamique des systèmes énergétiques dans une nouvelle direction de développement durable, il est peu contestable que la quasi-totalité des systèmes énergétiques nationaux doivent entamer une série longue de changements structurels. Ces changements structurels passe par des innovations techniques, des innovations de comportements, des innovations institutionnelles qui combinées les unes aux autres annoncent l'émergence d'un nouveau « paradigme technico-économique ». Dans cette mutation probable et souhaitable des systèmes énergétiques, la proposition d'une « économie de l'hydrogène » est l'une de celles qui est la plus débattue dans ces cinq dernières années. Que recouvre cette notion ?

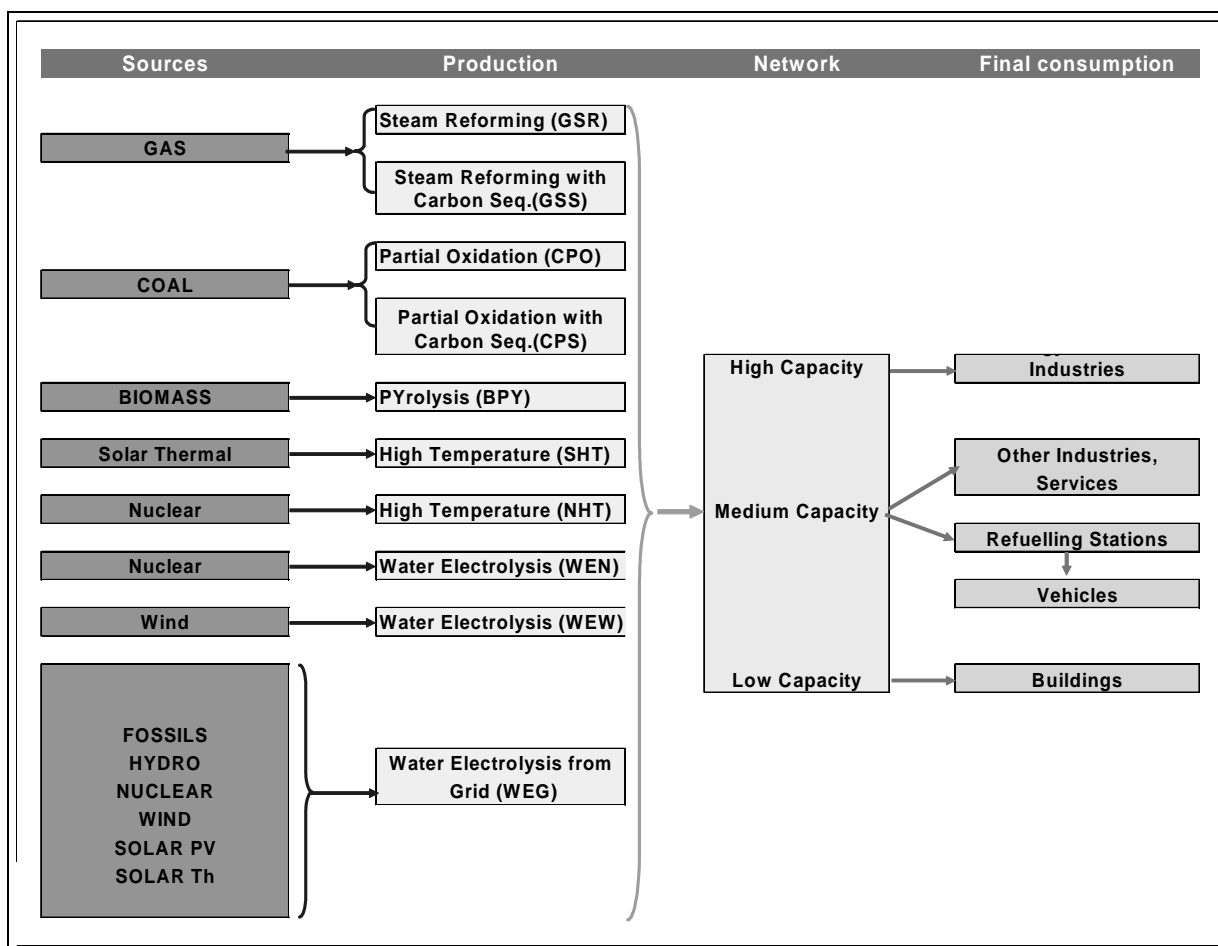
En simplifiant, cette économie de l'hydrogène regroupe les deux dispositifs techniques suivants. D'une part, l'hydrogène étant une énergie secondaire au même titre que l'électricité, il faut mobiliser et convertir des énergies primaires pour produire cette forme d'énergie, qu'il s'agit de transporter, distribuer et éventuellement stocker avant de la mettre à disposition du consommateur. D'autre part il s'agit à ce stade de convertir cette forme d'énergie finale en service énergétique, soit sous forme d'électricité pour des usages mécaniques, soit sous forme de chaleur pour des usages de chauffage, voire de traitements thermiques.

On soutiendra ici que l'émergence et la généralisation éventuelle à grande échelle de ces deux dispositifs passe par l'émergence et la généralisation de discontinuités scientifiques, technologiques, et sociales. Les économistes utilisent plusieurs termes<sup>1</sup> pour qualifier ces discontinuités, avec des sens voisins : innovations radicales, majeures, ou plus récemment « perturbatrices » (disruptives) (Christensen C.M., 1997). Les innovations « perturbatrices » sont des technologies qui ont les propriétés simultanées d'avoir des performances surpassant rapidement et indiscutablement les performances des technologies établies qui sont en concurrence, et qui offrent des avantages spécifiques trouvant une valorisation dans les marchés actuels et futurs. Les innovations radicales ou majeures, que suppose une économie

---

<sup>1</sup> Pour une discussion de ces notions cf JM Martin ,2000, p.18-23

de l'hydrogène adoptée par définition à grande échelle, concernent deux domaines différents : d'une part l'insertion dans les systèmes énergétiques existants d'un sous-système reposant sur la production, le transport, le stockage et la distribution de l'hydrogène-énergie, d'autre part sur une technique entièrement nouvelle pour les systèmes énergétiques, celle de la conversion électrochimique de l'hydrogène dans des piles à combustible (cf Figure 3 pour une représentation simplifiée). On peut naturellement trouver des représentations bien plus détaillées de ce nouveau système énergétique, par exemple dans les travaux du Los Alamos National Laboratory sur le modèle Markal (4500 technologies identifiées).



Source : Criqui P., Mima S., 2005

Figure 3 : La représentation simplifiée du système hydrogène dans le modèle POLES

On pourra objecter que ni les procédés de conversion de charbon ou de gaz naturel en hydrogène, ni même le recours aux technologies de piles à combustible ne peuvent être qualifiées d'innovations radicales en 2005, du fait que les unes et les autres pré-existaient à cette date, soit avec l'hydrogène-chimie ou même la propulsion de lanceurs (moteurs cryotechniques), soit dans des applications marginales pour les piles à combustible embarquées dans les navettes spatiales. Nous soutiendrons une position contraire dans la mesure où l'émergence d'un nouveau vecteur énergétique à grande échelle, l'hydrogène-énergie, dans les systèmes énergétiques existants d'une part, et l'utilisation des piles à combustible comme procédé de production d'électricité en concurrence avec tous les procédés existant sur le marché de l'énergie d'autre part impliquent des changements techniques et institutionnels substantiels pour en assurer leur pérennité. A la limite selon ses

promoteurs les plus enthousiastes, l'économie de l'hydrogène a vocation à se substituer totalement au système énergétique existant. Il faut naturellement ajouter que pour parvenir à satisfaire les exigences d'un système énergétique cohérent avec l'objectif de développement durable, cela suppose que la production de l'hydrogène d'abord obtenue par conversion des énergies primaires fossiles classiques (charbon, pétrole, gaz naturel) soit accompagnée de dispositifs de capture puis de stockage du CO<sub>2</sub> produit, puis dans un deuxième temps résulte de la conversion des énergies primaires renouvelables (soleil, vent, biomasse, algues), et/ou d'une séparation thermo-chimique de l'eau par la chaleur nucléaire avec ou sans des procédés chimiques intermédiaires. Au total l'impact à terme d'une économie de l'hydrogène réussie devrait être au moins du même ordre de grandeur que celui du système électrique lorsqu'il a commencé à apparaître au début du XX<sup>ème</sup> siècle, c'est-à-dire structurant d'un nouveau système technique et social.

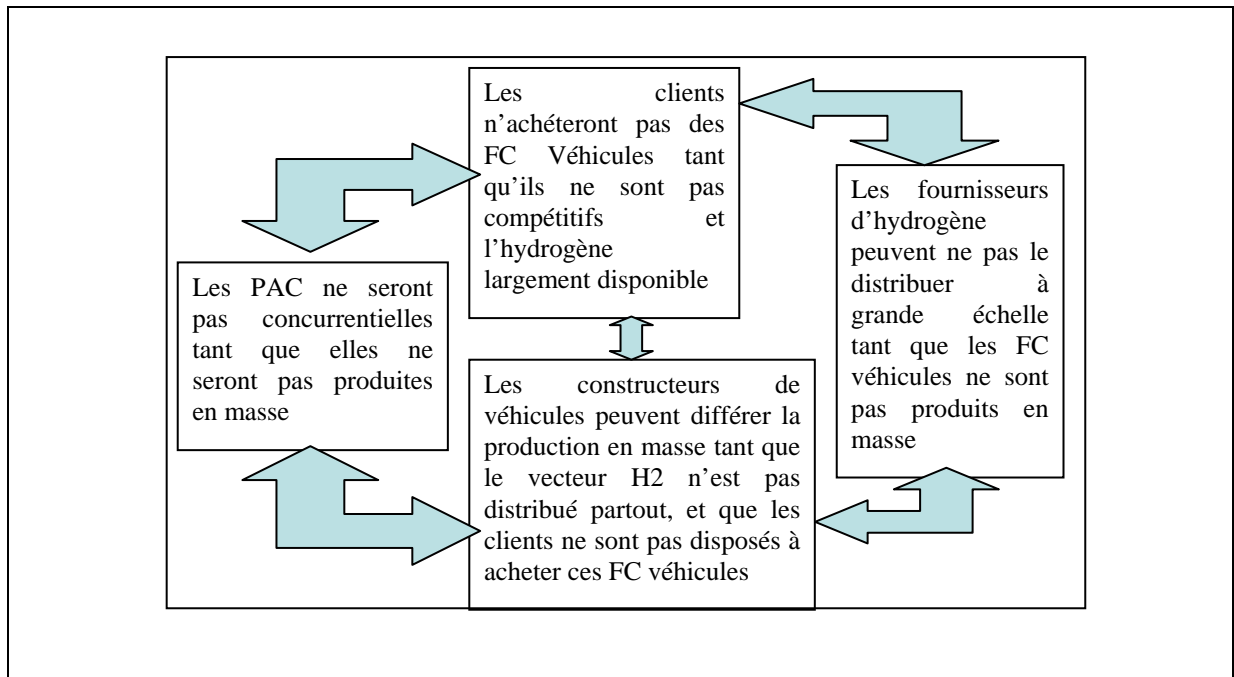
### **3. Les incertitudes sur l'adoption de masse de « l'économie de l'hydrogène » : quels sentiers de transition ?**

Les promesses et potentialités de l'hydrogène-énergie et des piles à combustible apparaissent immenses. Comment les concrétiser dans nos systèmes énergétiques ? Il faut pour répondre à cette question oser se poser celle du comportement des consommateurs face à ces technologies. Ou en d'autres termes se demander comment ces nouvelles technologies auront une chance d'être adoptées en masse, et comment les inventions et nouvelles connaissances scientifiques et techniques peuvent se transformer en « innovation » au sens des économistes ?

La question est légitime quand on se rappelle les écarts de performance et de compétitivité existant en 2005 avec les technologies concurrentes, qui, il est vrai, n'offrent pas les mêmes services énergétiques et environnementaux. On peut donner à ce sujet les ordres de grandeur suivants : le kW électrique crête d'une PEMFC se situe en 2003 autour de 3000 \$/kW crête contre 35 \$/kW pour les moteurs à combustion interne. Le coût de production de l'hydrogène au kWh aurait un facteur quatre à gagner par rapport à celui des énergies conventionnelles. Le remplissage et les modalités de stockage de l'hydrogène dans des réservoirs embarqués de véhicule sont nettement plus complexes et coûteuses que celles existant aujourd'hui avec les carburants pétroliers liquides. La fiabilité et la durée de vie des piles SOFC restent questionnables (12000 h selon certaines sources américaines) par rapport à celles des turbines à gaz à cycle combiné.

D'où la question qui domine les anticipations des grands décideurs publics et privés dans le domaine de l'énergie : à quelles conditions peut-on réduire et même inverser ces écarts de performance, ou en d'autres termes comment peut-on atteindre la compétitivité des technologies de l'économie hydrogène, qui constitue une condition sine-qua non de leur adoption en masse ?

Quand on essaie de comprendre les différents blocages qui empêchent la diffusion des innovations de PAC/H<sub>2</sub> dans le domaine des transports, on trouve certes les performances encore insuffisantes de ces technologies et leur coût nettement plus élevé que celui des technologies concurrentes. Mais on s'aperçoit aussi que ces blocages ou barrières sont liés les uns aux autres et forment un système qu'il apparaît impossible de surmonter (Figure 4).



Source : auteur, d'après Maria Curry-Nkansah (2004)

Figure 4 : Les barrières à l'adoption des PAC pour les usages de transport automobile dans l'environnement de sélection du début du XXIème siècle

Pourquoi ? Parce que dans cet exemple des transports on prend conscience qu'elles sont de nature systémique, dans la mesure où elles sont une combinaison de barrières économiques et non économiques, et que des mécanismes économiques se cumulent pour rendre cette adoption de masse « impossible » dans les conditions actuelles.

Pour espérer y parvenir, il faut supposer des changements structurels des discontinuités dans plusieurs domaines. On soutiendra l'hypothèse selon laquelle il faut combiner les changements structurels dans l'environnement de sélection de ces technologies hydrogène, et des discontinuités technologiques et scientifiques pour atteindre une adoption de masse de ces mêmes technologies.

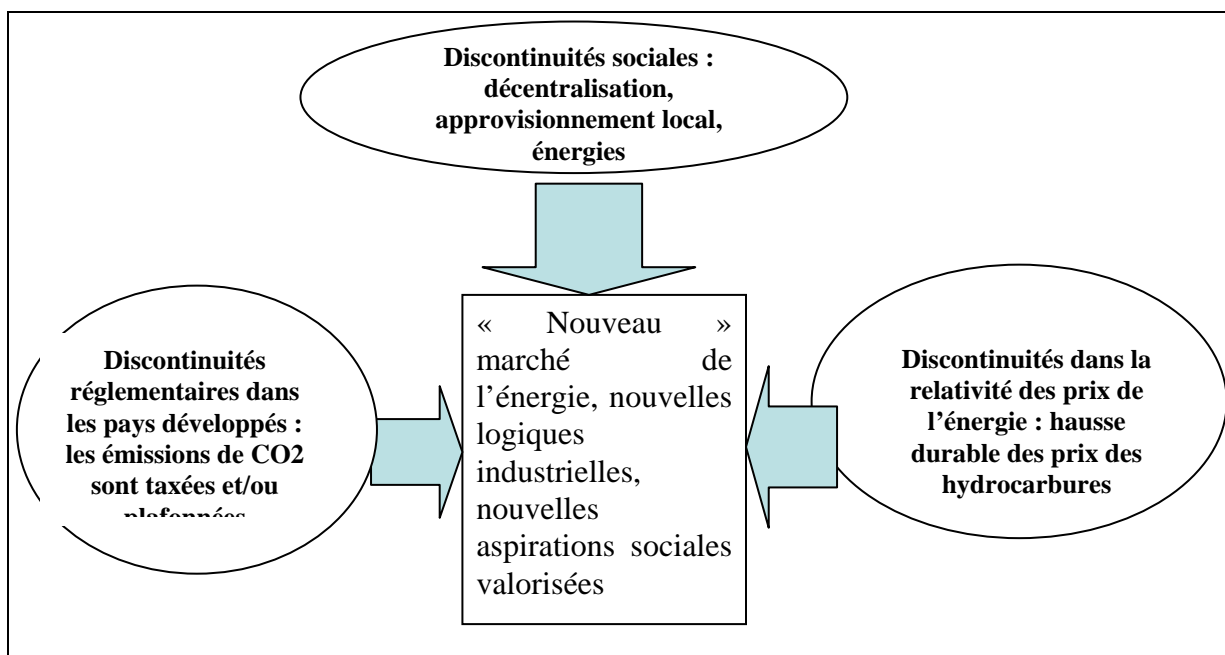
### 3.1. L'anticipation et l'occurrence d'un nouvel environnement de sélection favorable à l'adoption de l'économie de l'hydrogène

Il faut commencer par rappeler qu'une technologie a d'autant plus de chances d'être adoptée que ses caractéristiques de performances, les services énergétiques fournis, sont en cohérence ou adéquation avec les caractéristiques de l'environnement de sélection. La hauteur des performances technico-économiques intrinsèques de la technologie joue également un rôle décisif par rapport à celles des technologies concurrentes.

La notion d'environnement de sélection est plus large que celle de marché. La définition qu'en donne R.Kemp est très explicite à ce sujet. « *Selection environment – a more general term than market demand, is used because the importance of the historical socio-economic context in the selection of innovation; and because technology needs to be incorporated into a larger technical and socioeconomic system which has evolved in the process of development : the key problem for new technologies is that of compatibility with this system. It is defined by the capital outlays, physical infrastructure, supplier-user linkages, production routines, skills, technical standards, government rules, norms, people's preferences and beliefs. Think to all*

*existing technical, economic and institutional interrelationships that may hinder the adoption and use of a new technology. Whereas economists use the concept of a demand curve, describing the relationship between quantities demanded and purchase price, we prefer the term 'selection environment', which brings out the systematic nature of technology and economy, the transfer of knowledge and information that are necessary for exchange to take place, social processes of habitation and taste formation, and political factors in the selection of an innovation. The important point here is that a technology needs to be incorporated into a larger technical and socioeconomic system which has evolved in the process of development » (Kemp, Futures 1994, p.1031).*

Tant que les avantages spécifiques H2/PAC (convivialité pour l'environnement, modularité, énergie décentralisée, support pour les énergies renouvelables) ne sont pas valorisés dans le marché énergétique actuel, il paraît très difficile d'anticiper cette compétitivité par la seule amélioration des performances des technologies H2/PAC. L'émergence d'un environnement de sélection favorable serait donc (figure 5) un environnement dans lequel les prix de l'énergie fossile, en particulier des hydrocarbures seraient durablement élevés, les émissions de CO2 taxées et/ou plafonnées, les budgets de R&D énergie repartiraient à la hausse, les consommateurs d'énergie exprimeraient une préférence pour les systèmes décentralisés fonctionnant à partir d'énergies renouvelables, ou de manière symétrique n'auraient plus de réticence à l'égard d'approvisionnements nucléaires massifs.



Source : auteur

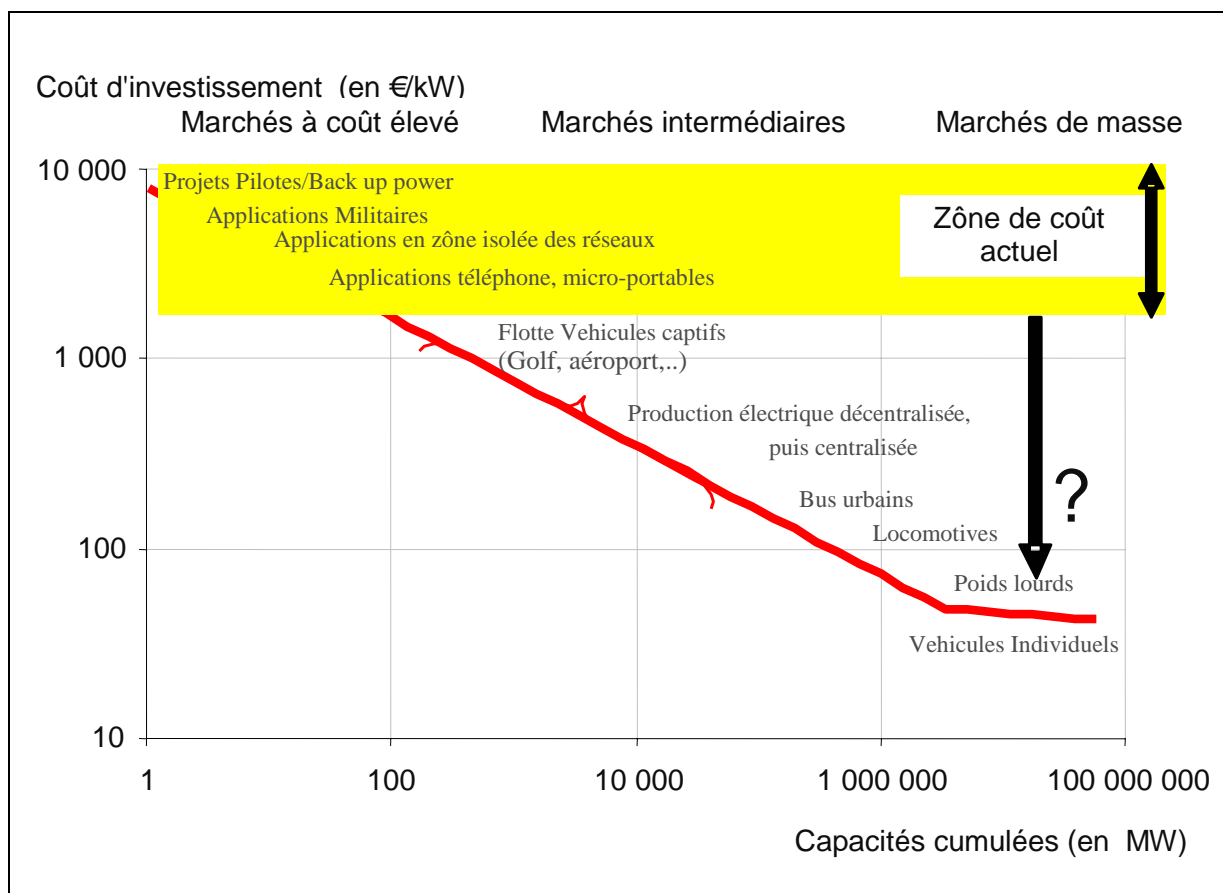
Figure 5 : Un environnement de sélection favorable aux technologies H2/PAC

Cette analyse d'un nouvel environnement de sélection favorable aux technologies H2/PAC mériterait d'être développée. Mais l'ignorance de ce lien entre le développement de technologies radicalement nouvelles et celui d'environnement de sélection adapté conduit à des incohérences. Un exemple peut être donné avec la politique américaine qui d'un côté engage une politique résolue de soutien à la recherche et le développement de l'hydrogène et des PAC, mais de l'autre se refuse à envisager, jusqu'à aujourd'hui, la mise en œuvre de

contrôle des émissions de CO<sub>2</sub>, et donc de pénalisation explicite pour la consommation de ressources énergétiques fossiles carbonées.

### 3.2. L'anticipation et l'occurrence de changements techniques majeurs (les innovations de rupture ou de percée technologique)

Mais si ce changement d'environnement de sélection semble constituer une condition nécessaire, elle n'est pas suffisante : encore faut-il obtenir une augmentation substantielle, un saut, dans les performances des technologies H<sub>2</sub>/PAC. Il faut en outre supposer que cette progression ne soit pas remise en cause par une soudaine, et inattendue, percée des technologies concurrentes, par exemple dans les batteries et le stockage de l'électricité qui pourraient redonner un avantage décisif au vecteur électricité.



Source : Criqui P., Mima S., 2003

Figure 6 : La représentation d'une transition ininterrompue des niches initiales aux marchés de masse

Pour atteindre ces nouvelles performances à des coûts nettement inférieurs à ceux d'aujourd'hui, la solution n'est connue que dans des termes très généraux : il faut combiner des apprentissages par la R&D pour découvrir des dispositifs ou matériaux nouveaux plus performants, et il faut en réduire les coûts en suivant des courbes d'expérience, c'est-à-dire en faisant de l'apprentissage par l'expérience. Mais les lois gouvernant la vitesse et la profondeur de ces deux types d'apprentissages nous sont inconnues dans le cas des

innovations radicales, ou de rupture. Deux attitudes générales sont possibles face à cette ignorance (momentanée) :

- soit on suppose que ces apprentissages sont progressifs et continus (la théorie des niches et des courbes d'apprentissage linéaire) ,
- soit on suppose des discontinuités de différentes natures, en général imprévisibles, mais dont la réalisation est nécessaire pour autoriser l'adoption de masse.

### 3.2.1. La vision dominante des apprentissages technologiques continus : une transition ininterrompue des niches initiales aux marchés de masse

Elle peut être représentée dans la figure 6 montrant comment l'apprentissage cumulé permet(trait) de réduire les coûts d'investissement des PAC, et de trouver progressivement des marchés ayant une valorisation inférieure et des débouchés plus importants.

Mais S.Mima souligne que cette représentation omet la prise en compte des coûts de l'H<sub>2</sub>, et que par ailleurs le « *déterminisme* » des améliorations technologiques fait problème.

### 3.2.2. Les discontinuités scientifiques et technologiques préalables à l'occurrence des innovations de rupture

La visibilité des coûts futurs des PAC est faible parce que les lois de l'apprentissage des technologies correspondantes nous sont aujourd'hui encore inconnues.

Selon le directeur du LEPMI à Grenoble, Eric Vieil, cette ignorance est notamment d'origine scientifique. Son argumentation part du constat qu'en plus de 150 ans les progrès sur les piles à combustible ont été faibles. Deux facteurs peuvent expliquer selon lui cette réalité. D'une part sous la pression d'objectifs à court terme les fonds de R&D ont été orientés vers la création de prototypes de démonstration, alors que dans la chaîne pile-stack-cellule-matériaux, les performances insuffisantes des matériaux à la base de celles de tous les autres niveaux aval, n'ont pas reçu une attention et un soutien suffisants. D'autre part les lois de relations entre les propriétés, la composition et la structure de ces matériaux utilisés dans le fonctionnement de ces piles, sont à découvrir, avec l'objectif d'obtenir des sauts de performance.

Cette visibilité des coûts futurs est faible parce que de nombreuses et importantes percées technologiques sont nécessaires dans les recherches de base. Un rapport de l'Office of Science du DOE (2004) montre d'abord l'étendue des spécialités scientifiques concernées : les nanosciences, la catalyse, la modélisation, la simulation, les bio-sciences, etc. Il pointe ensuite la nécessité de percées technologiques dans cinq « *critical basic research areas* » pour la mise en œuvre de l'économie de l'hydrogène :

- nouveaux matériaux pour le stockage de l'hydrogène,
- membranes pour la séparation, la purification, et le transport des ions,
- conception (design) de catalyseur à une nano-échelle,
- hydrogène d'origine solaire.

### ***Propos d'étape sur les discontinuités majeures***

En résumé, les quatre hypothèses suivantes peuvent être formulées sur ces discontinuités.

- Hypothèse 1 : Les stratégies d'expérimentation technologique, sociale et industrielle dans des niches d'applications favorables sont nécessaires : mais sans les discontinuités scientifiques évoquées, elles ne seront pas suffisantes à déclencher l'adoption de masse
- Hypothèse 2: Réciproquement des sauts de performance technologiques auront probablement besoin d'être confortés par des changements substantiels de relativité des prix de l'énergie et/ou d'attitude sociale, c'est-à-dire d'environnement de sélection.
- Hypothèse 3: Sans discontinuité technologique, et sans prise en compte des externalités énergétiques négatives, des attitudes sociales volontaristes ne pourront pas être soutenables à grande échelle : une validation par les mécanismes de marché, structurellement modifié, reste nécessaire pour une adoption de masse des PAC et de l'H2.
- Hypothèse 4 : une simultanéité dans le temps de ces trois discontinuités ne paraît pas être une condition sine qua-non de déclenchement d'une nouvelle dynamique, bien qu'une co-évolution vertueuse puisse s'engager entre les hypothèses H1 et H2.

### **Conclusion**

Marchetti démontre que les lois de la diffusion épidémique rendent compte de la succession passée des ressources énergétiques primaires successivement dominantes dans le passé, avec une périodicité de 50/55 ans liée à celle des cycles de Kondratieff. Peut-on s'appuyer sur ces lois ou régularités statistiques pour prédire l'émergence d'une nouvelle vague d'innovations radicales, en particulier dans le cas de l'économie de l'hydrogène ? On peut en douter pour plusieurs raisons, notamment parce que ex-ante la prévisibilité scientifique de ces discontinuités est impossible dans l'état actuel de nos connaissances.

Un point de vue intermédiaire est défendu par le président de l'Association Française pour l'Hydrogène, Thierry Alleau (2005). Il reprend, lui aussi, l'argument de la nécessité d'une économie de l'hydrogène, mais tempéré par la reconnaissance d'une indétermination sur le calendrier de sa mise en oeuvre lorsqu'il déclare : « *L'hydrogène-énergie, c'est pas gagné, mais ça le sera un jour, forcément !* », en faisant de la stratégie future des pétroliers et des gaziers et du calendrier de mise en route à l'échelon mondial de « *quota évolutif et régulièrement croissant de séquestration de CO2* » les deux sources majeures d'incertitude. La majorité des économistes continuent de rencontrer beaucoup de difficultés pour trouver dans leurs scénarios des sentiers de transition faisables et/ou crédibles. Dans leur nouveau scénario de référence pour l'échéance de 2050, l'équipe Poles de l'EPE n'arrive à identifier à l'échelon mondial une contribution possible de l'hydrogène qu'à hauteur de 350 Mtep sur une consommation mondiale de 22 600 Mtep. Ces résultats limités sont-ils dus aux limites intrinsèques des efforts de modélisation énergétique à long et très long terme qui ne peuvent intégrer de manière rigoureuse qu'avec difficulté des changements discontinus, ou aux incertitudes irréductibles pesant sur la date d'occurrence des innovations radicales, ou même sur leur occurrence ? Peut-on au contraire déduire d'une nécessité normative, celle du changement de nos systèmes énergétiques pour des raisons de protection environnementale, une nécessité « objective » garantissant l'émergence à grande échelle de l'économie de l'hydrogène ? Peut-on penser que d'autres scénarios énergétiques moins carbonés restent faisables en longue période ? Ce débat restera ouvert encore longtemps.



## Références bibliographiques

Alleau T., 2005, "L'hydrogène-énergie, c'est pas gagné !", Editorial des « Nouvelles de l'hydrogène énergie », Supplément Energie Plus N° 342 su 15 Mars 2005, p.15

Avadikyan A., Cohendet P., Héraut J.A.(Eds.) 2003, The Economic Dynamics of Fuel Cell Technologies, Springer , 237 p.

Bourgeois B., Mima S., 2003, Rationales for co-operation between firms and States within an emerging radical innovation, Chapter 3, In Avadikyan et al.(2003)

Criqui P., Mima S., 2003, The future of fuel cells in a long term inter-technology competition framework, Chapter 2, In Avadikyan et al.(2003)

Criqui P., Mima S., 2005, Modelling of the hydrogen economy and infrastructure in POLES, CASCADE-MINTS 1 year Meeting ,WP 1.1 - Task 1.1.1, Manheim 19 April 2005, 39 p.

Kemp, René, 1994, Technology and the transition to environmental sustainability. The problem of technological regime shifts, Futures, vol. 26, nr. 10, pp. 1023-1046.

Curry-Nkansah M., 2004, Creating a Hydrogen Economy: Challenges and Opportunities, Conférence annuelle de l'IAAE, Washington, DC, 7-10 Juillet 2004- <http://www.usaee.org>

Marchetti C., 1986, The future of hydrogen, An Analysis at World Level, with special Look at Air Transport, May 1986, IIASA, Working Paper-86-25, Invited paper presented at the Hydrogen Link Conference of the Hydrogen Industry Council, Montreal , March 24-26, 1986  
<http://www.cesaremarchetti.org/archive/scan/MARCHETTI-027.pdf>

Marchetti C., 2005, On Decarbonization: Historically and Perspectively, Interim Report IR-05-XXX, IIASA, Approved by Leen Hordijk, Director, January 2005, Prepared for HYDROFORUM 2000, Munich, 11-15 September 2000, URL: Cesare Marchetti (marchetti@iiasa.ac.at), <http://www.cesaremarchetti.org/archive/electronic/ir-decarb.pdf>

Martin, J.M., 2000, Le changement des technologies de l'énergie : genèse, modalités et hypothèses explicatives, Chapitre 1 pp. 17-61, in Bourgeois.B, Finon D., Martin J.M., 2000, Energie et Changement Technologique- Une approche évolutionniste, Economica, Paris, 490p.

US DOE, 2004, Hydrogen Posture Plan, An Integrated Research, Development and Demonstration Plan, 46p. Basic Energy Sciences Report, <http://www.sc.doe.gov/bes/hydrogen.pdf>



## **Entre énergie primaire et énergie utile : quelques réflexions sur le vecteur hydrogène et les filières énergétiques**

Pierre Hollmuller  
Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie (CUEPE)  
Université de Genève  
e-mail : pierre.hollmuller@cuepe.unige.ch

### **1. Le mythe du combustible propre**

Les annonces récurrentes d'un moteur propre, avec pour seul rejet de la vapeur d'eau, sont fascinantes. Outre le fait d'une « combustion » propre, l'hydrogène possède quelques autres attraits particuliers qui le rende d'autant plus séduisants : le plus simple des éléments chimiques, le plus léger des gaz, le plus abondant des éléments de l'univers, le plus calorifique des combustibles (en J/kg, mais attention au volume...)

Il est parfois également associé à un certain nombre d'images négatives, parmi lesquelles sa large bande d'inflammabilité / explosibilité, ou la référence à la bombe à hydrogène (à tort, celle-ci relevant de la fusion nucléaire, qui n'a rien à voir avec la combustion).

Mais le problème majeur est le suivant : on passe souvent sous silence le fait qu'avant d'être utilisé l'hydrogène doit être produit (à partir d'une énergie primaire), puis distribué et stocké : il s'agit d'un vecteur énergétique et non d'une ressource énergétique !

A ce titre on peut d'ores et déjà se demander si une éventuelle économie de l'énergie verra la naissance d'hydrogène labellisé (comme on le voit actuellement pour l'électricité, en soit aussi propre que ne l'est l'hydrogène).

### **2. L'exemple de la maison Friedli**

A titre d'illustration nous commencerons par présenter une installation de production d'hydrogène à partir d'électricité photovoltaïque – la voie royale (propre et coûteuse) de la chaîne de production / stockage / utilisation d'hydrogène.

#### ***Description de l'installation***

Les quelques rares installations développées jusqu'ici pour tester la production et le stockage d'électricité photovoltaïque par électrolyse, l'ont été par des institutions publiques (universités, agences nationales de l'énergie) ou des compagnies électriques, bénéficiant d'un important subventionnement public [IEA, 2000]. L'installation analysée ici [Hollmuller et al., 2000] a essentiellement été réalisée à partir de composants commercialisés. Vraisemblablement la première à avoir été financée par un privé (M. Markus Friedli, CH-3436 Zollbrück i. E.), elle fonctionne depuis 1991 et est et l'une des rares sinon l'unique au monde à être utilisée de façon domestique.

L'agencement schématique de l'installation ainsi que les flux qui la traversent sont représenté sur la figure 1. Le champ photovoltaïque transforme la radiation solaire en énergie électrique qui, conditionnée par un transformateur DC/DC, est soit transformée en hydrogène par l'électrolyseur, soit stocké en batteries pour l'alimentation du réseau domestique, soit encore injecté dans le réseau publique (via un onduleur). Celui-ci fourni par ailleurs l'énergie

électrique auxiliaire nécessaire au fonctionnement de la régulation, du purificateur et du compresseur d'hydrogène, et peut en principe également servir de source pour l'électrolyseur (via un redresseur AC/DC). Une partie de la production d'hydrogène est utilisée dans le processus de purification et est évacuée vers l'extérieur, alors que la partie récupérée est transférée vers un ballon de stockage intermédiaire, d'où il est comprimé dans un stock d'hydrures métalliques. Celui-ci est connecté à une cuisinière ainsi qu'à un second stock d'hydrures situé dans un minibus modifié pour l'usage bicomcombustible (hydrogène/essence). L'eau du réseau sert à la fois à l'alimentation et au refroidissement de l'électrolyseur, alors que les autres pertes thermiques du système sont absorbées directement par l'air ambiant.

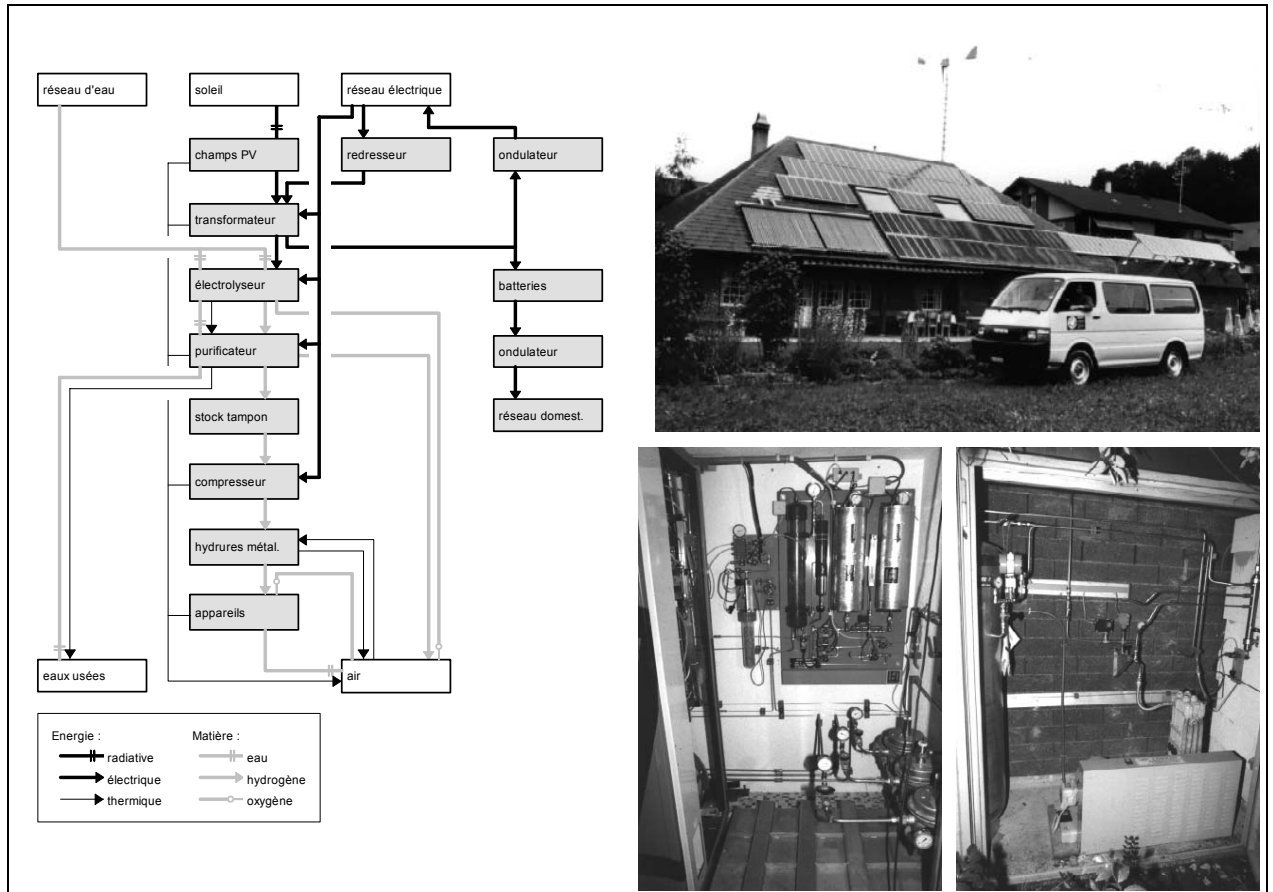


Figure 1 : Installation Friedli, schéma des flux d'énergie et de matière et photo des principaux composants : a) Champs photovoltaïque et minibus ; b) Local d'électrolyse comprenant électrolyseur (à g. de la photo), purificateur (au mur) et stock d'hydrures (au sol) ; c) Local de compression avec stock tampon (perceptible sur la g. de la photo) et compresseur (au sol).

### Efficacité et potentiel de production annuelle

Le potentiel de production instantanée se déduit de l'analyse des sous-systèmes et peut être représenté de façon désagrégée sur un diagramme entrée-sortie (Figure 2). On y voit la production photovoltaïque brute (sortie champs PV) et nette (sortie transformateur DC/DC) ainsi que la production d'hydrogène brute (sortie électrolyseur) et nette (sortie purificateur) en fonction de l'ensoleillement. Les efficacités de transformation sont les suivantes :

- Production photovoltaïque (PV brut) : 8.9 % de base, avec une chute de 2 % par kW/m<sup>2</sup> d'ensoleillement (perte d'efficacité due à l'échauffement des panneaux).
- Transformateur DC/DC (PV net) : 96 % dès le seuil inférieur d'enclenchement de l'électrolyse.
- Electrolyse (H<sub>2</sub> brut) : 66 % au seuil d'enclenchement inférieur, chutant à 60% en plein régime (surtensions anodiques et cathodiques, ainsi que pertes ohmiques).
- Purification (H<sub>2</sub> net) : 92 %, par perte d'hydrogène utilisé pour la régénération de l'unité.

A cette cascade de pertes s'ajoute la consommation électrique du compresseur (7.6% du contenu énergétique de l'hydrogène).

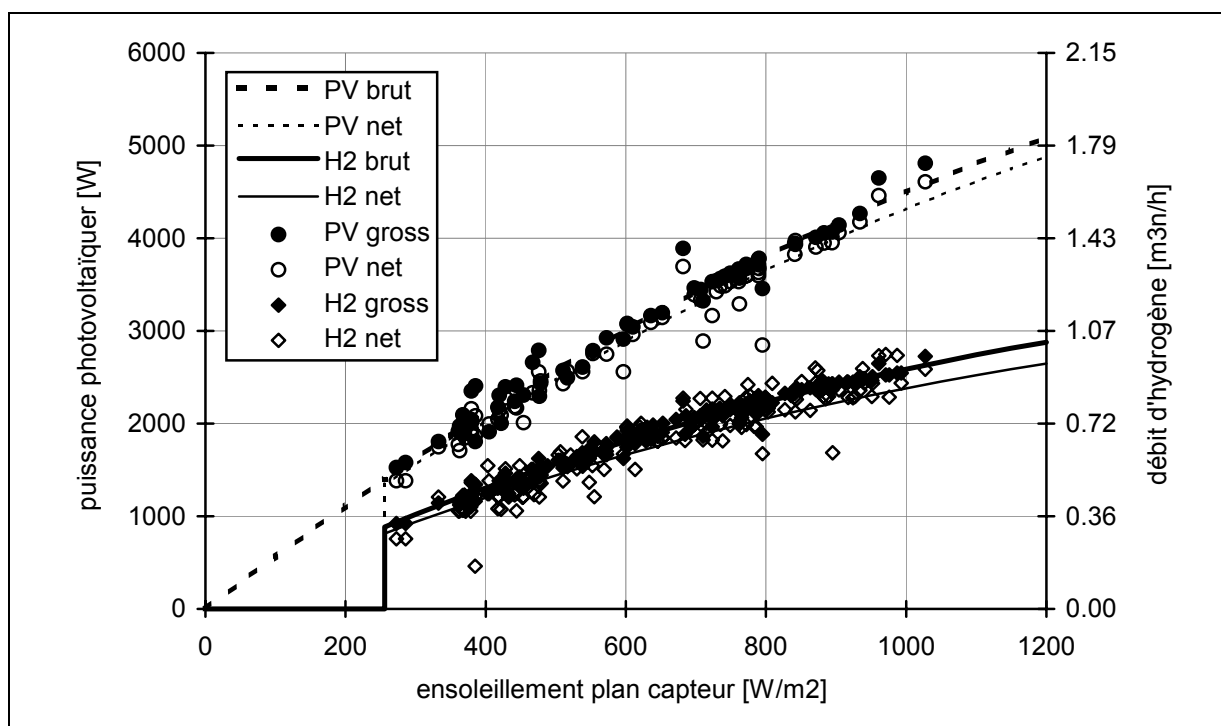


Fig. 2 : Installation Friedli, production instantanée en fonction de l'ensoleillement (points : mesures par pas de 5 minutes ; traits : régressions).

Ainsi, dans l'hypothèse où la filière électrolyse se trouvait être prioritaire sur le stockage en batteries, la production annuelle se décomposerait comme suit. A partir des 293 GJ de rayonnement annuel sur les 65 m<sup>2</sup> de capteurs (4020 MJ/m<sup>2</sup>.an), quelques 24.5 GJ (23.5 GJ après le transformateur) se retrouveraient sous forme électrique, correspondant à une efficacité photovoltaïque brute de 8.4 %. De ceux-ci, seuls 18.6 GJ seraient suffisamment puissants pour l'électrolyse. Des 4.9 GJ restants, 3 GJ seraient nécessaires au fonctionnement des auxiliaires.

Finalement, les 18.6 GJ utilisés pour séparer l'eau produiraient 1150 Nm<sup>3</sup> d'hydrogène (11.5 GJ), dont 1050 Nm<sup>3</sup> (10.6 GJ) subsisteraient après purification, correspondant environ à 300 litres d'essence.

La fraction d'énergie photovoltaïque brute finalement stockée sous forme d'hydrogène s'élèverait ainsi à 43 %, si bien que l'efficacité globale du système pour transformer le rayonnement solaire en énergie chimique pour stockage saisonnier serait de 3.6 % (0.43 x

0.084) : ce qui est environ 30 fois supérieur au stockage par photosynthèse de la forêt suisse (non compris l'énergie nécessaire à l'exploitation).

On le voit, bien que l'efficacité de transformation de l'énergie solaire via cette méthode « high-tec » soit bien plus efficace que des méthodes agraires, et sans même parlé du coût financier de l'opération, le potentiel de production reste limité :

- Utilisée dans le moteur thermique du minibus, cette production donnerait une autonomie annuelle de 4200 km.
- Le surplus électrique de 1900 MJ ne suffirait guère à couvrir les besoins électriques de la maison, et les besoins en chaleur (chauffage et eau chaude) devraient continuer à être assurés par la chaudière à bois (ce qui est possible dans une région rurale comme celle de l'Emmenthal).

### 3. Multiples filières, multiples acteurs

#### *Production d'hydrogène*

##### *Electrolyse*

Ainsi que cela a été mis en évidence pour la maison Friedli, l'électrolyse de l'eau ( $2\text{H}_2\text{O} + \text{électricité} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$ ) permet le stockage d'énergie électrique, sous une forme chimique stable qui, le moment voulu, peut à nouveau être transformée en électricité ou en chaleur. Cette forme de stockage s'avère utile :

- Lorsqu'il y a contrainte temporelle, c'est-à-dire lorsque la production électrique n'est pas en phase avec les besoins.
- Lorsqu'il y a contrainte spatiale, c'est-à-dire lorsque la production a lieu loin des centres de consommation.

Le potentiel de stockage d'électricité par électrolyse concerne donc la majorité des énergies renouvelables, soit parce qu'elles sont intermittentes (solaire, éolien), soit au contraire parce qu'elles ont un potentiel de production constant, qu'il y aurait avantage à exploiter également pendant les heures creuses de consommation (hydraulique au fil de l'eau, géothermie). A l'heure actuelle il faut cependant garder en tête que :

- Le développement massif des nouvelles énergies renouvelables se heurte à des coûts encore souvent élevés, auxquels il n'est guère envisageable, à moyen terme, d'ajouter les coûts en capital et les pertes de rendement dû à l'électrolyse et au stockage.
- Avec le très faible taux de pénétration actuel de ces énergies, une énorme marge de manœuvre existe encore à moyen terme pour absorber l'électricité renouvelable directement dans le réseau électrique, avec de taux de pénétration pouvant atteindre les 20 à 30% [Grub, 1991, cité et résumé par Lachal, 2003].
- Les projets de production d'hydrogène solaire dans les déserts, afin de transporter l'énergie captée vers les grands centres de consommation, se heurtent par ailleurs au problème du transport. Tout comme pour d'autres types de projets utopiques d'approvisionnement du Nord par voie d'électricité renouvelable produite dans le Sud, par exemple via des lignes de courant continu [Czisch], ce genre de projet pose des questions fondamentales d'échange commerciaux avec les dites régions et de leur propre développement économique / énergétique.

L'autre grand candidat à l'électrolyse est évidemment l'énergie nucléaire. Peu modulable, elle trouverait également moyen, via l'hydrogène, d'être stockée en heure creuse et d'être développée au-delà de la production en ruban destinée à la consommation de base. A condition bien entendu que l'acceptabilité sociale de cette forme d'énergie soit acquise.

### *Reformage*

A l'heure actuelle, la méthode de production d'hydrogène la plus courante est cependant le reformage du gaz naturel, essentiellement composé de méthane, qui consiste à dissocier ce dernier grâce à de la vapeur d'eau ( $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{chaleur} \rightarrow 4\text{H}_2 + \text{CO}_2$ ). Il s'agit d'une technique bien maîtrisée et communément utilisée, avec un rendement énergétique élevé, de l'ordre de 80%. Bien que ce ne soit actuellement pas le cas, utilisée en mode de production stationnaire cette technique permettrait en principe le captage à la source du  $\text{CO}_2$ . A terme, elle ne régèlerait cependant pas l'épuisement des réserves fossiles.

On trouvera une description plus détaillée de cette filière dans un autre article de ces actes [Allidières, 2005].

### *Autres méthodes*

Un ensemble d'autres méthodes de production d'hydrogène sont actuellement au stade de l'expérimentation, parmi lesquelles nous citerons :

- La gazéification de la biomasse.
- La décomposition thermochimique de l'eau (à partir de centrales solaire thermiques, ou de centrales nucléaire de nouvelle génération).
- La production biologique, certaines bactéries et algues dissociant l'eau en utilisant la lumière.

Bien qu'elles suscitent de réels espoirs, il est actuellement encore difficile de prévoir leur chances de réussite, ainsi que les bilans énergétiques globaux associés.

### *Stockage et distribution*

Selon les contraintes liées à son rythme de production, à son transport et à son utilisation, différentes méthodes de stockage de l'hydrogène sont envisageables (compression, liquéfaction, stockage en hydrures), chacune avec ses propres avantages et inconvénients [Joubert, 2005]. Etant donné la très faible densité de l'hydrogène, elles font les unes et les autres l'objet de consommation énergétique non négligeables.

Dans le cas d'une méthode de production centralisée se pose enfin la question du transport et de la distribution de l'hydrogène (par pipeline, bateaux ou camions), pour lequel d'importants investissements doivent également être engagés.

### *Utilisation : chaleur et électricité*

Au bout de la filière se trouve enfin la transformation de l'hydrogène en énergie utile. Par rapport au moteur thermique, tel celui utilisé dans le minibus Friedli, la pile à combustible détient trois avantages de taille : elle (re)produit directement de l'électricité (par recombinaison « contrôlée » de l'hydrogène et de l'oxygène), elle possède une efficacité à peu près constante (qui ne chute quasiment pas en baisse de régime), et elle est silencieuse. Pourtant :

- La pile à combustible se trouve encore en phase de développement, surtout pour prolonger sa durée de vie.
- Tout comme pour l'électrolyse, l'efficacité de la pile à combustible reste réduite, de l'ordre de 50%, le solde étant dissipé sous forme de chaleur

Pour cette dernière raison, il semblerait à priori utile de développer le marché de la pile à combustible en mode de cogénération électricité / chaleur, par exemple dans l'habitat. Cette approche permettrait par la même de s'affranchir de contraintes de place et de poids liées aux applications mobiles. C'est pourtant principalement dans ce deuxième créneau qu'est annoncé le développement de cette technologie...

#### **4. L'ancien et le nouvel hydrogène**

Avant de s'hasarder vers le futur d'une éventuelle société de l'hydrogène, nous rappellerons l'histoire et le statut actuel du vecteur énergétique hydrogène [Weber, 1991].

##### *Hier, vecteur énergétique*

Il n'est pas inutile de rappeler que l'hydrogène a déjà vécu une histoire importante en tant que vecteur énergétique. Celle-ci a commencé peu après la découverte de l'élément chimique par Cavendish, en 1766, et avant même qu'il soit baptisé par Lavoisier, en 1787.

Dès 1780, on fit passer de la vapeur d'eau au travers de charbon ardent, avec pour résultat un gaz constitué à 50% d'hydrogène (H<sub>2</sub>), à 40% de monoxyde de carbone (CO) et à 10% de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et azote (N<sub>2</sub>). A la même époque on commença à produire du gaz de ville, par distillation sèche du charbon, avec pour résultat un gaz constitué à 50% d'hydrogène, à 30% de méthane (CH<sub>4</sub>), à 10% de monoxyde de carbone et autres. Ces deux procédés furent abondamment utilisés pour distribuer de l'énergie dans les maisons et les manufactures, ainsi que pour l'éclairage public.

Lors de l'introduction du gaz naturel, dès 1960, ce dernier fut d'abord mélangé au gaz de ville, qu'il évinça rapidement : constitué presque exclusivement de méthane, il est plus économique, plus propre, et ne présente pas les risques d'asphyxie liés au monoxyde de carbone.

##### *Aujourd'hui, matière première pour l'industrie chimique et pétrolière*

La production actuelle d'hydrogène est de l'ordre de 550 milliards de m<sup>3</sup> par an [Agator et Lucchese, 2004], correspondant à environ 130 Mtep, soit 1.5% de la consommation d'énergie primaire au niveau mondial. Cependant cet hydrogène est essentiellement utilisé pour ses propriétés chimiques :

- dans les usines d'ammoniac (NH<sub>3</sub>), qui absorbe 50% de la production, essentiellement pour la fabrication d'engrais.
- dans l'industrie pétrolière, qui en consomme quelques 25%, en particulier pour la désulfuration des produits pétroliers.
- dans divers autres processus, allant de l'industrie alimentaire à celle de l'électronique.

La quasi-totalité de cet hydrogène est lui-même obtenu à partir par reformage de produits pétroliers. En raison de son coût élevé, la production à partir d'électrolyse est pour l'instant



réservé à un marché de niche, essentiellement lorsqu'un hydrogène de grande pureté s'avère nécessaire.

## **5. La difficulté de s'imposer sur un marché existant : l'exemple de l'automobile**

Nous l'avons vu, le développement d'une hypothétique économie de l'hydrogène se confrontera à un ensemble de choix et de percées technologiques inhérents à la complexité de la filière. Mais, plus encore, elle se confronte au système énergétique existant qui, s'il est sous pression pour cause d'appauvrissement des réserves et de saturation en polluants, n'en demeure pas moins techniquement mature et économiquement efficient, si bien qu'une rupture radicale semble aujourd'hui encore hasardeuse [Bourgeois, 2005]

Nous illustrerons ce propos à la lumière d'une étude comparative, à moyen terme (20 – 50 ans), des efficacités globales et des modes de pénétration possible des voitures à hydrogène et des voitures hybrides [Dessus, 2002].

### ***Horizon temporel, but et méthode***

Le cadre proposé dans cette étude est le suivant :

- Horizon 2015-2020, en supposant résolus les problèmes techniques et atteintes les performances annoncées par les constructeurs.
- Comparaison de différentes filières / techniques pour le groupe moto-propulseur (transformation du carburant en énergie mécanique) : moteur thermique amélioré ou moteur hybride (production d'électricité à bord, via pile à combustible ou via moteur thermique). Le moteur électrique pur (avec recharge à partir du réseau) n'est pas considéré, car temps de recharge et poids des batteries prohibitifs.
- Analyse des filières de production / transport / distribution des divers carburants : a) essence, diesel, gaz naturel ; b) hydrogène produit via méthane / méthanol c) hydrogène produit via électricité fossile et électrolyse. N'est pas considéré l'hydrogène produit par électricité nucléaire ou renouvelable, qui est jugé ne pouvoir ni techniquement ni économiquement être produit en quantités suffisantes d'ici à une vingtaine d'année.

### ***Comparaison des filières***

Sont alors analysées les rendements escomptés du groupe moto-propulseur et des filières de production des carburants, en se basant sur des chiffres faisant large consensus :

- Performances énergétiques du groupe moto-propulseur, sur un cycle d'usage normalisé (mix de trajets ville et campagne) : 20 à 25% pour le moteur thermique ; 35 à 40% pour le moteur hybride thermique ; 40 à 55% moteur hybride par pile à combustible.
- Production / transport / distribution du carburant : 85 à 90% pour l'essence ou le diesel ; 40 à 60% pour la production d'hydrogène à partir de méthane ou méthanol ; 15 à 25% pour la production d'hydrogène à partir d'électricité fossile.
- Globalement : des résultats groupés (situées entre 15 et 30%) pour les moteurs thermiques améliorés, les moteurs hybrides via pile à combustible et les moteurs hybrides à moteur thermique. A noter cependant que les voitures exploitant la pile à combustible sont encore au stade du prototype et actuellement loin des performances annoncées pour 2010, alors que les voitures hybrides à moteur thermique sont déjà sur le marché. Tous les progrès sur

la technologie du moteur thermique sont immédiatement applicables à ce type de moteur hybride, et la filière peut pénétrer dans le parc en utilisant les infrastructures existantes.

### ***Bilan***

Il en ressort les réflexions suivantes :

- Etant donné le développement parallèle des deux filières hybrides (pile à combustible et moteur thermique), avec des efficacités globales similaires, il s'agirait de développer prioritairement tout ce qui leur est commun : moteurs à transmission électrique, allègement des batteries tampons, etc.
- Au niveau de la filière hydrogène, il faudrait accorder autant de d'intérêt aux recherches sur l'amont de la filière hydrogène (en particulier sur l'amélioration des reformeurs), que sur l'amélioration des piles (ce d'autant plus que ces progrès se répercuteront directement sur les applications dans l'habitat).
- Il faut, en parallèle, poursuivre l'effort actuel d'amélioration des filières classiques (essence et diesel), qui n'ont pas dit leur dernier mot du point de vue de la consommation d'énergie et de la pollution locale.
- Quoiqu'il en soit, eu égard au temps nécessaire pour le renouvellement du parc de voitures, si la croissance du parc se poursuit au rythme actuel, le progrès technique ne suffira pas à faire baisser les émissions de gaz à effet de serre dans les proportions requises par la convention sur le climat. En parallèle aux efforts sur les technologies de l'automobile, il faut donc absolument trouver des moyens de limiter la croissance des besoins de mobilité individuelle et s'engager dans une politique volontariste de transports collectifs, en particuliers par rail.

Finalement, cette étude illustre bien la complexité est la nécessité d'analyses globales, allant de l'énergie primaire à l'énergie utile.

## **6. Conclusions**

Si les systèmes énergétiques basés sur l'hydrogène séduisent, il ne faut pas perdre de vue que l'hydrogène n'est pas une énergie primaire et qu'il doit d'abord être produit, ce qui n'est pas sans problème :

- La voie de production via reformage du gaz naturel avec capture du CO<sub>2</sub> est intéressante et pourrait ouvrir le chemin. A long terme, elle ne résoudra cependant pas le problème de l'épuisement des réserves.
- La production idéale, via électricité renouvelable et électrolyse, restera encore longtemps hors de portée, tout d'abord à cause des coûts de cette forme d'énergie, mais également parce que celle-ci peut être encore largement absorbée par le réseau électrique.
- Reste la voie du nucléaire, qui pourrait bénéficier de l'introduction massive de taxes sur le CO<sub>2</sub>. Cette voie comporte cependant les importants problèmes de déchets que l'on connaît.

Ainsi, face à l'engouement généralisé, qui se concentre actuellement surtout sur la queue de la filière, il est important de décrypter le jeu des divers lobbies impliqués.

Bien que la ou les filières hydrogène – voire même des parties de ces dernières – soient indubitablement d'intérêt majeur, un important travail reste à faire au niveau des développements techniques. Ces derniers devront se confronter aux filières parallèles, notamment celles qui prédominent les systèmes énergétiques actuels. Dans cet esprit, il est important de ne pas se laisser piéger par une idéologie de monoculture scientifique et technique.

Enfin, il est primordial de ne pas perdre de vue l'aspect « prestation » des systèmes énergétiques, en opposition à leurs aspects « production », et de promouvoir au mieux l'ensemble des actions allant dans le sens de la sobriété énergétique. A cet égard, il n'est pas inutile de rappeler que même une hypothétique énergie totalement propre et gratuite entraînerait une dégradation de l'environnement, ne serait-ce que par l'utilisation des ressources naturelles.

## **Bibliographie**

Agator J.-M. et Lucchese P., 2004, *De l'hydrogène chimique à l'hydrogène énergétique*, Clefs CEA n°50 - L'hydrogène, les nouvelles technologies de l'énergie, CEA/Direction de la communication et des affaires publiques, Paris.

Anvélaout R., 2005, *Un mythe à couler : le moteur à eau*, La décroissance no 26, avril 2005.

Czisch G., *Least-Cost European/Transeuropean Electricity Supply Entirely with Renewable Energies*, Institut für Solare Energieversorgungstechnik (ISET), Kassel, Germany.

Dessus B., 2002, *L'idée est belle, la réalité têtue*, in : *La voiture à hydrogène*, Dossier Sciences et Société, La Recherche no 357.

Grubb M. J., 1991, *The integration of renewable electricity sources*, Energy Policy, Volume 19, Issue 7, September 1991, Pages 670-688.

Grumberg P. et Julien E., 2003, *Le pétrole, et après ? Comment l'hydrogène pourrait sauver le monde*, Science et Vie no 1025.

Hollmuller P., Joubert J.-M., Lachal B. and Yvon K., *Evaluation of a 5kWp photovoltaic hydrogen production and storage installation for a residential home in Switzerland*, International Journal of Hydrogen Energy, 25, 2000, pp. 97-109.

Hunziker S., 1999, *Hydrogen and transportation - a case study based on data gathered from a prototype hydrogen car*, Diplôme, Université de Genève.

IEA, 2000, *Case Studies of Integrated Hydrogen Energy Systems*, IEA Agreement on the Production and Utilization of Hydrogen, Task 11, Final Report, International Energy Agency.

Lachal B., 2003, *Quelques controverses sur les énergies renouvelables*, in : *L'énergie, controverses et perspectives*, éd : B. Lachal et F. Romerio, Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie, Genève, ISBN 2-940220-03-4.

Orselli J. et Chanaron J.-J., 2002, *A qui profite le spectacle ?*, in : *La voiture à hydrogène*, Dossier Sciences et Société, La Recherche no 357.

PSI, 2004, *Hydrogène, rayon d'espoir: que peut-on en attendre vraiment?*, Le point sur l'énergie no 12, Paul Scherrer Institute, CH – Villigen.

Weber R., 1991, *Der sauberste Brennstoff, Der Weg zur Wasserstoff-Wirtschaft*, Zweite aktualisierte und erweiterte Auflage, Ed. Olynthys, CH – Oberbözingen.



## Stockage de l'hydrogène et risques

J.-M. Joubert, F.Cuevas, M. Latroche et A. Percheron-Guégan  
Laboratoire de Chimie Métallurgique des Terres Rares  
Institut des Sciences Chimiques Seine Amont  
Centre National de la Recherche Scientifique  
F – 94320 Thiais Cedex  
e-mail : jean-marc.joubert@glvt-cnrs.fr

### Introduction

On parle de plus en plus de systèmes basés sur l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique de façon à répondre de manière satisfaisante aux problèmes posés, d'une part, par la future pénurie en énergie fossile et, d'autre part, par les émissions de gaz à effet de serre. Outre les problèmes associés à la production de l'hydrogène qui n'existe pas à l'état libre dans la nature, il convient de savoir le stocker de façon dense et sûre. Quel que soit le mode de production de l'hydrogène (par reformage, par électrolyse ...), quelle que soit l'utilisation du gaz (pile à combustible, moteur thermique ...), quelle que soit l'ampleur du développement économique (de la simple utilisation ponctuelle au développement d'une hypothétique civilisation de l'hydrogène), il faudra bien répondre aux problèmes posés par le stockage de ce gaz peu dense et explosif. De nombreux moyens de stockage ont été envisagés pour l'hydrogène et sont actuellement en concurrence : le stockage gazeux sous pression, le stockage cryogénique sous forme liquide, le stockage solide dans des hydrures et des matériaux adsorbants. Nous décrirons ces différents procédés en appréciant dans chacun des cas les avantages et les inconvénients ainsi que les problèmes liés aux pertes énergétiques et à la sécurité du stockage. D'autres publications de revue sur le sujet sont disponibles [1-3].

### Données techniques sur l'hydrogène

L'hydrogène est le plus léger des gaz avec une masse moléculaire de 2 g/mol. Il a, par conséquent, la densité la plus faible. A température et pression ambiante 1 kg d'hydrogène représente 12.2 m<sup>3</sup>. Si on estime les besoins pour un véhicule à 5 kg d'hydrogène, on comprend alors tout l'intérêt de la recherche d'un stockage de haute densité. Ce gaz présente un écart significatif à l'idéalité dès qu'on le comprime au delà de 100 bar. Des modèles permettent de décrire ces écarts [4]. C'est, après l'hélium, le gaz ayant la plus faible température d'ébullition (-253°C ou 20 K).

L'intérêt immense suscité par l'hydrogène vient du fait qu'il a le meilleur rapport énergie/poids de tous les combustibles (Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) de 120 MJ/kg contre 45 MJ/kg pour l'essence) et par la nature écologique du produit de combustion (la vapeur d'eau). On peut cependant modérer ce propos en insistant sur le fait qu'une grande partie de l'énergie peut être consommée lors du stockage, ou de la restitution de l'hydrogène et par le fait que la combustion d'hydrogène dans l'air produit systématiquement une quantité non négligeable de NOx. Cependant, ces émissions ne se produisent pas si l'hydrogène est utilisé au sein d'une pile à combustible.

L'hydrogène est le plus inflammable et le plus explosif des gaz et à cause du faible rayon de sa molécule, il fuit ou diffuse très facilement. C'est aussi le plus volatil, ce qui représente un avantage du point de vue de la sécurité car il se dissipe rapidement (il est 14 fois plus léger

que l'air). Un des dangers associés à la flamme de l'hydrogène est qu'elle est très chaude (de l'ordre de 3000°C) et invisible.

L'hydrogène, en dépit de l'aspect "énergie propre", bénéficie d'une mauvaise réputation auprès du grand public. Ceci à cause de facteur psychologique lié à la nature explosive du gaz et au poids d'accidents passés (l'accident du ballon dirigeable Hindenburg en étant le plus connu - à tort, car l'hydrogène n'était pas responsable de la catastrophe). Cette situation de blocage devrait être peu à peu modifiée auprès du grand public par des opérations de démonstration bien menées et la mise en place de normes de sécurité adéquates. L'hydrogène est en effet reconnu pour être au moins aussi sûr que d'autres combustibles comme le gaz naturel et l'essence.

### **Stockage gazeux**

Le stockage du gaz hydrogène sous pression dans un réservoir en acier est une technique éprouvée depuis de nombreuses années et largement répandue de nos jours dans le monde industriel. Le réservoir est en général constitué d'une bouteille cylindrique en acier de type 304L ou 316L permettant des pressions de stockage de l'ordre de 200 à 250 bar. Toutefois, cette technologie est fortement pénalisée par le poids des bouteilles. A température ambiante, la capacité volumique est de l'ordre de 14 g/dm<sup>3</sup> sous 200 bar. Compte tenu des problèmes de fragilisation de l'acier induits par l'hydrogène, les parois doivent être suffisamment épaisses et résistantes. Toute augmentation de pression entraîne aussi un accroissement de la masse de l'enveloppe limitant ainsi tout développement futur de cette technique [5].

La solution innovante pour le stockage sous pression vient aujourd'hui des structures en fibres bobinées et en résine qui permettent d'atteindre des pressions de stockage beaucoup plus élevées tout en réduisant la masse de l'enveloppe. Actuellement, des pressions de service de 350 bar sont couramment proposées et les recherches s'orientent vers des pressions encore plus importantes de l'ordre de 700 à 800 bar. Dans ces conditions, des capacités volumiques de l'ordre de 40 g/dm<sup>3</sup> sont obtenues et des capacités massique de plus de 10 % pour le système complet sont envisageables [6]. La structure d'un réservoir composite en fibre et résine est plus complexe que celle d'un réservoir en acier [7, 8]. Au moins trois enveloppes sont utilisées qui remplissent chacune une fonction différente.

- l'enveloppe interne. Cette paroi joue un rôle d'étanchéité vis-à-vis du gaz. Compte tenu des très fortes pressions et des propriétés de diffusion de l'hydrogène à travers la paroi, le choix du matériau s'avère crucial. L'aluminium est couramment utilisé car il est léger, facile à mettre en œuvre et peu sensible aux phénomènes de fragilisation par l'hydrogène. Cette enveloppe ne participe pas à la tenue mécanique du réservoir mais doit toutefois supporter les fortes contraintes induites par les variations de charge lors des cycles de remplissage et d'utilisation. Pour remplacer l'aluminium, certaines recherches s'orientent vers des matériaux polymères tels que les polyéthylènes à haute densité. Ces matériaux sont encore plus légers que le métal, résistants aux contraintes, faciles à travailler et peu coûteux mais ils souffrent encore du fait qu'ils sont notablement plus perméables à l'hydrogène que l'aluminium.
- la structure travaillante. C'est cette enveloppe qui assure la tenue mécanique du réservoir. Elle est obtenue en bobinant un réseau continu de fibres de carbone ou de verre enrobées d'une résine thermodurcissable ou thermoplastique directement sur l'enveloppe interne. Ce bobinage s'effectue par mise en rotation de l'enveloppe interne et par un balayage d'aller et de retour des fibres selon un angle donné jusqu'au recouvrement total. On peut ainsi

réaliser une structure composite de plusieurs couches recouvrantes avec des angles différents (Figure 1). Une phase de cuisson permet ensuite la polymérisation de la résine et termine la phase d'élaboration.

- l'enveloppe externe. Cette paroi extérieure joue un rôle de protection contre les agressions externes telles que l'humidité, les chocs ou les frottements qui peuvent venir user la fibre de carbone ou de verre et fragiliser le réservoir localement. Cette enveloppe est le plus souvent réalisée en fibre de verre bon marché et peut être complétée par une épaisseur en mousse.



Figure 1 : photographies de stocks d'hydrogène 700 bar [7, 8]. a) banc de bobinage croisé de la fibre de carbone, b) réservoirs après polymérisation de la résine.

Il est important de noter que les réservoirs sont en général constitués d'une partie centrale tubulaire et de deux calottes hémisphériques soudées permettant de refermer les extrémités du tube (Figure 1). La liaison de ces trois pièces représente en général un point faible de ce type de réservoir et un effort particulier est fait pour renforcer la structure à ce niveau.

Il faut comparer l'énergie spécifique de l'hydrogène à la quantité d'énergie nécessaire pour mettre en œuvre son stockage. Pour le gaz comprimé, on évalue cette quantité entre 5% et 17% du PCI de l'hydrogène pour une pression de 700 bar selon que le processus est isotherme, ce qui est difficilement réalisable, ou adiabatique [9, 10]. Enfin, le stockage sous pression doit impérativement être évalué en fonction des risques d'utilisation, particulièrement dans le cas de réservoirs embarqués. Cela suppose une série de tests d'homologation impliquant la validation du système de stockage en fonction de divers scénarii accidentels tels que la fuite de gaz, le crash, le feu, un impact, ainsi que la mesure de la résistance à la corrosion et du comportement en cyclage et en fatigue.

### Stockage liquide

L'hydrogène se liquéfie en dessous de 20 K à pression atmosphérique. Dans ces conditions, le liquide est 800 fois plus dense que le gaz à température ambiante et selon le type de réservoir cryogénique utilisé une capacité massique de l'ordre de 6.5 % est obtenue pour le système complet. Les procédés de liquéfaction du gaz font appel à des techniques assez complexes qui associent apport de froid et détente adiabatique. La première liquéfaction de l'hydrogène a été obtenue par Claude en utilisant un cycle se répartissant en plusieurs étapes. Le gaz est tout

d'abord refroidi depuis l'ambiante jusqu'à 230 K par un groupe frigorifique mécanique puis jusqu'à 80 K en utilisant un échangeur à azote liquide. L'hydrogène subit alors des cycles de compressions détentes qui permettent encore d'abaisser sa température avant d'être soumis à une détente de Joule-Thompson qui conduit à la liquéfaction. D'autres procédés peuvent être envisagés comme le cycle de Brayton qui utilise de l'hélium liquide dont la température de liquéfaction est inférieure à celle de l'hydrogène ou la réfrigération par cycles magnétothermiques [5].

Bien que présentant une bonne capacité volumique de 70 g/dm<sup>3</sup>, le stockage liquide pose un certain nombre de problèmes difficiles à résoudre. En premier lieu, ce procédé nécessite des réservoirs cryogéniques à très forte isolation thermique ce qui pénalise à la fois le volume et le poids de ce mode de stockage et ne permet pas d'empêcher les pertes thermiques inévitables à 20 K. D'autre part, pour des raisons de sécurité évidentes, les réservoirs sont conçus avec une architecture "ouverte" contrôlant une éventuelle montée en pression du système en cas de vaporisation du gaz. Ceci se traduit par des pertes importantes par évaporation d'une partie de l'hydrogène (phénomène de boil-off) qui peut atteindre 1% par jour. Ce phénomène n'est pas non plus sans conséquence sur la sécurité pour les systèmes de stockage utilisés en milieux confinés. Enfin, le coût énergétique de la liquéfaction est très important. Il dépend essentiellement de la capacité de production de l'usine de liquéfaction mais peut atteindre 50% du PCI de l'hydrogène ce qui rend ce système de stockage peu rentable sur le plan énergétique [9, 10].

## Stockage solide

### *Les hydrures métalliques interstitiels*

De nombreux métaux, alliages et composés intermétalliques ont la propriété de stocker l'hydrogène avec de bonnes propriétés en termes de sécurité, de rendement énergétique et de stockage à long terme. Cependant, pour pouvoir répondre aux applications, ils doivent présenter une grande capacité, une bonne réversibilité et une grande réactivité.

On représente généralement les propriétés de stockage d'un métal ou d'un composé intermétallique en traçant à une température donnée la caractéristique pression-composition (Figure 2). Deux cas de figures peuvent être distingués quand on accroît la concentration en hydrogène dans le système : (a) l'hydrogène est dissout dans la phase présente, (b) la phase est saturée en hydrogène et une transition de phases se produit entre une phase pauvre en hydrogène ( $\alpha$ ) et une phase riche en hydrogène ( $\beta$ ). En accord avec la règle des phases, la pression d'hydrogène est constante tant que la transformation n'est pas achevée ce qui donne lieu à un plateau de pression sur la courbe pression-composition. L'absorption est un processus exothermique. En conséquence, la courbe pression-composition se décale vers les pressions plus hautes quand la température augmente. Dans la plupart des cas, la réaction est réversible ce qui a pour conséquence qu'une diminution de la pression conduit à la désorption du matériau.

Bien sûr, plusieurs écarts à cette représentation idéale peuvent apparaître dans un système réel comme une pente sur le plateau ou un comportement différent entre l'absorption et la désorption appelé hystérèse (la pression de désorption est alors toujours inférieure à celle d'absorption). Les contraintes internes considérables générées par l'insertion dans le réseau métallique d'environ un atome d'hydrogène par atome métallique conduit généralement à la



pulvérisation du matériau de sorte que les matériaux utilisés se présentent toujours sous forme de poudre.

De nombreux composés sont connus pour leurs propriétés d'absorption et sont listés dans les références [11, 12] ou sur <http://hydpark.ca.sandia.gov/>. La plupart d'entre eux sont des composés intermétalliques formés par l'association d'un élément présentant une forte affinité pour l'hydrogène, c'est-à-dire formant un hydrure stable (élément A : alcalin, alcalino-terreux, métal de transition de début de période, terre rare ou actinide) et d'un élément présentant une faible affinité pour l'hydrogène, c'est-à-dire ne formant des hydrures que sous très haute pression (élément B : métal de transition de milieu ou de fin de période, élément p). Cependant, quelques éléments comme Mg, V et Pd présentent des caractéristiques similaires à celles des composés intermétalliques. Les familles les plus connues de composés sont présentées dans le Tableau 1.

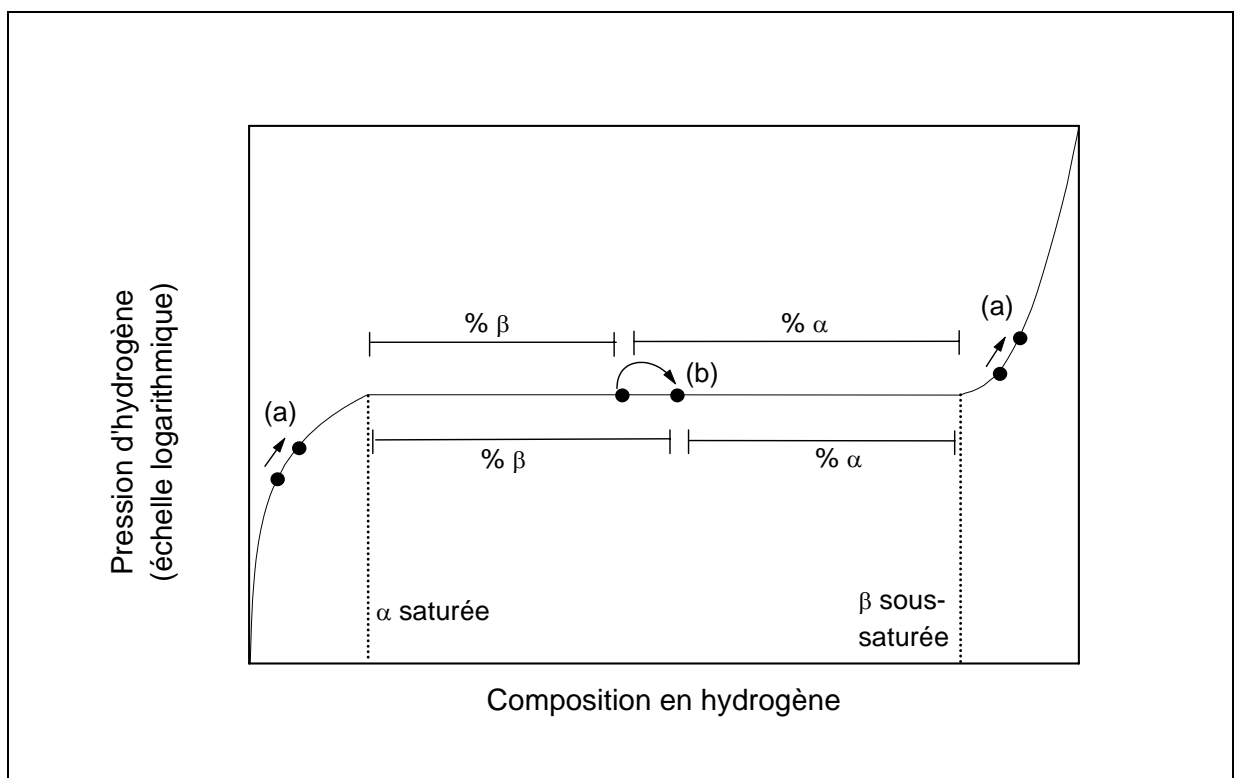


Figure 2 : représentation classique des propriétés d'absorption d'hydrogène par un hydrure métallique (isotherm pression-composition). Deux processus peuvent se produire quand la concentration en hydrogène augmente. (a) L'hydrogène est dissout en solution solide, la transformation est continue, une phase solide est mise en jeu ( $\alpha$  ou  $\beta$ ), la pression varie avec la composition en hydrogène dans la phase. (b) la limite de solubilité est atteinte, l'augmentation de la composition en hydrogène provoque une transition de phases discontinue, deux phases sont présentes ( $\alpha$  et  $\beta$ ), la composition en hydrogène dans le système est égale à la moyenne des compositions des deux phases pondérée par la quantité relative de chacune des phases, la pression est constante (plateau) tant que les deux phases sont en équilibre.

Tableau 1 : propriétés de stockage de l'hydrogène de quelques hydrures métalliques interstitiels.

Composé	Structure	Capacité (H/atome métallique)	Capacité massique (% massique)	Capacité volumique (g/dm <sup>3</sup> )	Référence
LaNi <sub>5</sub>	CaCu <sub>5</sub>	1.1	1.5	100	[13]
phases de Laves (Zr,Ti)(Mn,V,Cr,Ni) <sub>2</sub>	C14 ou C15	1-1.3	1.5-2	100	[14]
TiFe	CsCl	1	1.9	100	[15]
Mg <sub>2</sub> Ni	Mg <sub>2</sub> Ni	1.3	3.6	90	[16]
Mg	Mg	2	7.7	100	[17, 18]

Une comparaison détaillée entre les différents systèmes a été faite [11, 12]. Une distinction grossière peut être faite entre les hydrures de capacité moyenne qui ont une pression de plateau supérieure à 1 bar à température ambiante et une cinétique rapide (composés dérivés de LaNi<sub>5</sub>, de TiFe, phases de Laves) et les hydrures de grande capacité qui ne peuvent fonctionner qu'à température élevée, sont peu réversibles et/ou ont un mauvais comportement cinétique ou d'activation (Mg<sub>2</sub>Ni, Mg ou alliages de V). Jusqu'à maintenant, aucun composé n'est connu qui combine une capacité réversible supérieure à 2.5 % massique proche de la température ambiante avec une cinétique acceptable.

Les paramètres les plus pertinents permettant de définir un bon matériau de stockage de l'hydrogène sont reliés aux propriétés thermodynamiques d'absorption, définie par la mesure dans des conditions d'équilibre des courbes pression-composition définies ci-dessus. Le plus important est la capacité de stockage sous une pression donnée qui devrait être aussi grande que possible. Beaucoup parmi les composés cités précédemment n'atteignent pas une capacité de 2 % massique à cause de leur grande masse molaire. Cependant, la capacité volumique de stockage est intéressante puisque des densités jusqu'à une fois et demi supérieures à celle de l'hydrogène liquide peuvent être aisément obtenues. La pression de plateau à la température d'utilisation du réservoir détermine la pression d'utilisation du système, avec la caractéristique déterminante qu'une grande quantité d'hydrogène peut être stockée et déstockée dans un faible domaine de variation de la pression. Pour cette raison, l'hystérèse dans les courbes pression-composition doit être aussi faible que possible. C'est aussi parce qu'elle est l'indication que certains processus irréversibles se produisent qui doivent être évités de façon à maintenir la stabilité à long terme des propriétés de stockage. La pente du plateau est, quant à elle, principalement reliée à des inhomogénéités de composition du composé métallique qui doivent aussi être minimisées.

A côté des caractéristiques thermodynamiques, la cinétique joue également un rôle important. Non seulement la cinétique de la réaction d'hydrogénation mais aussi la cinétique dans les premiers cycles d'hydrogénation (activation) ou après un cyclage prolongé ainsi que la sensibilité du matériau aux impuretés du gaz, doivent être considérées. Le vieillissement du matériau est un aussi un facteur déterminant, pas seulement du point de vue de la diminution de la cinétique en cyclage. La capacité de stockage elle-même peut être sérieusement affectée après plusieurs centaines de cycles, ainsi que la caractéristique pression-composition (pression de plateau et pente). Ces phénomènes de vieillissement sont principalement causés l'existence de processus irréversibles comme la création de défauts (principalement des dislocations), l'amorphisation du matériau ou sa décomposition (disproportionation). Ce dernier phénomène est dû à l'instabilité thermodynamique de la plupart des phases hydrures qui résulte en la décomposition du composé intermétallique AB<sub>n</sub> en l'élément B et l'hydrure AH<sub>x</sub>. Enfin, le coût de l'alliage doit aussi être pris en compte dans le cadre du développement

industriel des hydrures pour le stockage d'hydrogène, ce qui limite l'utilisation d'éléments comme le vanadium, le cobalt ou, dans une moindre mesure, du zirconium.

Une des principales propriétés des composés intermétalliques utilisés comme matériaux de stockage est la possibilité d'améliorer les propriétés à une application donnée par substitution des éléments. Les substitutions peuvent modifier la pression de plateau sur plusieurs ordres de grandeur ce qui permet de concevoir différents matériaux travaillant dans des conditions très différentes. Des paramètres comme la capacité d'absorption, la cinétique, le coût de l'alliage et le comportement en vieillissement (la perte de capacité en cyclage) peuvent eux aussi être profondément modifiés par la substitution [19].

En plus de la faible capacité massique, un des problèmes associés à l'utilisation des hydrures reste la chaleur liée aux réactions d'absorption et de désorption. Celle-ci représente environ 25% de PCI de l'hydrogène stocké. Ceci implique une bonne gestion des phénomènes de transfert thermique avec l'extérieur, voir la mise en place d'un système de chauffage pour la désorption et de refroidissement pour l'absorption de façon à ne pas pénaliser la cinétique.

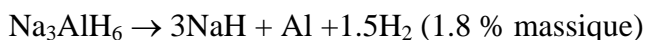
Concernant la sécurité, il faut mentionner les avantages liés à un système fonctionnant à basse pression et à température ambiante. D'autre part, le fait que la désorption se fasse selon un processus endothermique a toujours été présenté comme un avantage. En revanche, il faut prendre en compte la possible toxicité des métaux (particulièrement en poudre) et la pyrophoricité des matériaux.

### ***Les hydrures métalliques complexes***

Les hydrures métalliques complexes sont des composés pour lesquels les atomes d'hydrogène établissent des liaisons covalentes ou ioniques avec les atomes métalliques voisins [20, 21]. Ce type de liaison contraste avec celui mis en jeu dans les hydrures métalliques interstitiels décrits précédemment où l'interaction hydrogène-métal est de type métallique. Les hydrures métalliques complexes peuvent être classés dans deux familles : les hydrures complexes de métaux de transition, comme  $\text{BaReH}_9$  et  $\text{Mg}_2\text{FeH}_6$ , et les hydrures complexes de métaux autres que ceux de transition, comme  $\text{NaAlH}_4$  et  $\text{LiBH}_4$ . En ce qui concerne les propriétés de stockage (Tableau 2), la première famille possède des rapports hydrogène/métal très élevés ( $\text{H/M} = 4.5$  pour le  $\text{BaReH}_9$ ) ainsi qu'une forte capacité volumique ( $150 \text{ g/dm}^3$  dans  $\text{Mg}_2\text{FeH}_6$ ). En revanche, ces hydrures sont thermodynamiquement assez stables. Pour atteindre une pression de désorption de 1 bar d'hydrogène, des températures supérieures à  $300^\circ\text{C}$  sont habituellement nécessaires. Pour les hydrures complexes de métaux autres que ceux de transition, des températures de désorption plus modérées sont suffisantes. Ainsi, des conditions plus proches des conditions normales de pression et de température sont obtenues pour l'alanate de sodium  $\text{NaAlH}_4$ , l'hydrures complexe le plus intéressant pour le stockage réversible de l'hydrogène.

Les alanates appartiennent à la famille des hydrures métalliques complexes de métaux autres que ceux de transition. Ils peuvent être définis par la formule générale  $\text{A}_x[\text{Al}_y\text{H}_z]$ , où A est un alcalin (Li, Na) ou une terre alcaline (Mg, Ca). Ils sont constitués habituellement d'un anion complexe  $[\text{AlH}_4]^-$  dont la charge négative est compensée par le cation. Les atomes d'hydrogène sont liés de façon covalente à Al selon une configuration tétraédrique.

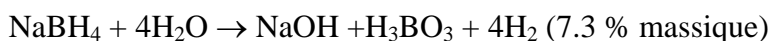
La désorption de l'hydrogène par les alanates a lieu en deux étapes. Ainsi, dans le cas de l'alanate de sodium, ayant une capacité massique de 5.5 % massique, la désorption se produit selon les étapes suivantes :



Ce composé possède des propriétés thermodynamiques favorables pour le stockage réversible de l'hydrogène. La première étape de désorption libère de l'hydrogène à pression atmosphérique à 33°C, et la deuxième à 110°C [22]. La décomposition de l'hydruure de sodium donnerait 2 % massique supplémentaires mais n'est pas possible dans une gamme raisonnable de température. La ré-hydrogénation de l'alanate de sodium pur nécessite des conditions de charge sévères (300°C, 400 bar) [23, 24], ce qui a écarté ce composé pendant très long temps comme candidat au stockage réversible de l'hydrogène. Néanmoins, il a été montré que la réaction de chargement en hydrogène peut se faire dans des conditions beaucoup plus douces après ajout d'environ 3% molaire d'un catalyseur à base de titane [25].

Les travaux de recherche menés dans le domaine des hydrures complexes visent à l'amélioration des propriétés thermodynamiques et cinétiques. En ce qui concerne la thermodynamique, des substituants élémentaires sont prospectés pour adapter les pressions et les températures de désorption aux contraintes des applications. Cette tâche s'avère cependant beaucoup plus complexe que pour les hydrures métalliques interstitiels. En termes cinétiques, l'activité principale est consacrée à comprendre le mécanisme catalytique. Cette recherche doit aboutir au développement de catalyseurs plus performants. La sécurité est aussi un sujet à prendre en compte car ces composés sont très réactifs vis-à-vis de l'eau et de l'air, spécialement après l'ajout du catalyseur.

Un autre domaine de recherche prometteur pour les hydrures complexes est la voie hydrolytique. Quelques hydrures métalliques légers libèrent de l'hydrogène par hydrolyse. Des quantités d'hydrogène très élevées sont obtenues puisqu'aussi bien l'hydrogène de l'hydruure que celui de l'eau est libéré. Le meilleur exemple est l'hydrolyse du borohydruure de sodium:



qui a fait l'objet d'un dépôt de brevet [26]. En pratique, le borohydruure de sodium est utilisé à l'état liquide sous forme d'une solution aqueuse de 25% de NaBH<sub>4</sub> et 2% NaOH. Quand cette solution est mise en contact avec un catalyseur de ruthénium, de l'hydrogène est libéré (5.3 % massique). On obtient alors une solution aqueuse de NaBO<sub>2</sub> comme résidu. L'inconvénient le plus important de ce procédé est que le stockage de l'hydrogène n'est pas réversible. La solution de métaborate de sodium obtenue doit être traitée dans un système externe assez onéreux pour revenir au borohydruure de départ.

Tableau 2 : propriétés de stockage de l'hydrogène dans quelques hydrures métalliques complexes.

Composé	Capacité (H/atome métallique)	Capacité massique* (% massique)	Capacité volumique (g/dm <sup>3</sup> )	Température de désorption à 1 bar (°C)	Référence
BaReH <sub>9</sub>	4.5	2.7	134	<100	[20]
Mg <sub>2</sub> FeH <sub>6</sub>	2	5.5	150	320	[20]
NaAlH <sub>4</sub>	2	7.5	94	33-110°C	[22, 27]
LiBH <sub>4</sub>	2	18.5	120	>300	[28]

\* Valeur théorique

Les imides et amides forment une famille proche de celle des hydrures complexes. Des propriétés très intéressantes pour le stockage de l'hydrogène ont été trouvées dans le système Li-N-H. Le nitrure métallique  $\text{Li}_3\text{N}$  stocke 9.3 % massique d'hydrogène à 255°C sous 3 bar de pression. La réaction a lieu en deux étapes :



La seconde étape (6.5 % massique) est réversible. Elle est caractérisée par un plateau de pression situé environ à 1 bar à 285°C [29]. La désorption d'hydrogène à partir de l'amide de lithium  $\text{LiNH}_2$  paraît avoir lieu avec la formation intermédiaire d'ammoniaque  $\text{NH}_3$ . Celui-ci réagit avec le  $\text{LiH}$  en formant l'imide de lithium  $\text{Li}_2\text{NH}$ . On affirme qu'en présence du catalyseur  $\text{TiCl}_3$ , la réaction entre  $\text{NH}_3$  et  $\text{LiH}$  est si rapide qu'aucune vapeur d'ammoniaque n'est libérée pendant la désorption [30]. En raison de la grande toxicité de l'ammoniaque, ces résultats doivent être confirmés pour garantir l'utilisation de ces composés pour le stockage réversible de l'hydrogène.

### *Stockage de l'hydrogène dans des adsorbants*

Le stockage de l'hydrogène peut s'effectuer par physisorption à basse température sur des matériaux présentant de grandes surfaces spécifiques. Le phénomène d'adsorption met en jeu de l'hydrogène moléculaire sans dissociation de la molécule de sorte que l'on ne peut pas à proprement parler d'hydrures. Les interactions sont de type Van der Waals et les énergies de liaison mises en jeu sont faibles ce qui ne peut conduire à des capacités significatives qu'à basse température (typiquement à la température de l'azote liquide) et sous des pressions parfois élevées. De plus, la capacité est très fortement dépendante de la surface spécifique développée dans le matériau. On observe en général une isotherme d'adsorption dite de type I ou de Langmuir qui correspond à la formation d'une monocouche simple et complète à la surface du matériau.

Différentes familles de matériaux peuvent être envisagées pour le stockage de l'hydrogène par adsorption à basse température (Tableau 3). Dans tous les cas, ces matériaux présentent des surfaces spécifiques élevées liées à la présence de volumes micro- ou nanométriques ou à un caractère fortement divisé. On peut citer:

- les charbons actifs. Ils sont obtenus par gazéification du charbon en phase vapeur à 1000°C, par activation chimique à l'acide phosphorique et carbonisation à 500°C ou par pyrolyse de polymères synthétiques (polyacrylonitrile). Ils sont constitués de plans de graphène très désorganisés développant ainsi de larges surfaces spécifiques.
- les nanotubes de carbone. Ils sont obtenus par arc électrique ou ablation laser. Ils sont formés de feuillets de graphite enroulés sur eux-mêmes sous forme de tubes simple ou multi-parois.
- les zéolithes. Ce sont des aluminosilicates utilisés dans l'industrie comme tamis moléculaires ou en catalyse pétrochimique. Ces matériaux présentent des diamètres de pores de l'ordre de 0.8 nm capables de retenir des molécules de gaz par adsorption.
- les organométalliques de type metal-dicarboxylate de benzène tel que  $\text{M}(\text{OH})(\text{O}_2\text{C}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CO}_2)$  ( $\text{M} = \text{Al}^{3+}, \text{Cr}^{3+}$ ). Leur structure forme des tunnels carrés infinis de l'ordre de 0.85 nm de côté.

- les réseaux organométalliques (Metal Organic Framework ou MOF) comme le MOF-5 de formule chimique  $Zn_4O(BDC)_3(DMF)_8(C_6H_5Cl)$  avec (BCD = 1,4 -dicarboxylate de benzène; DMF = dimethyl-formamide) dont la structure est formée de clusters de tétraèdres  $ZnO_4$  reliés ensemble par des groupements organiques conduisant à la formation de tunnels unidimensionnels en forme de losange de section  $7.8 \times 11.2 \text{ \AA}^2$ .

Tableau 3 : propriétés de stockage de l'hydrogène de différents matériaux adsorbant l'hydrogène.

	P (bar)	T (K)	Capacité massique (% massique)	Capacité volumique (g/dm <sup>3</sup> )	Surface spécifique (m <sup>2</sup> /g)	Référence
Charbons actifs	1	298	0.5	13		[31]
	1	77	2.1	55	2030	
Nanotubes de C	60	300	0.6	*		[3, 32]
	100	77	2		1315	
Zéolithe NaY	1	77	1.8	*	725	[31, 33]
Zéolithe ZSM-5	1	77	0.7		430	
Al(OH)(O <sub>2</sub> C-C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> -O <sub>2</sub> )	15	77	3	30	1100	[34]
Metal Organic Framework-5	1	77	4.5	9.5	2500-3000	[35]
	20	298	1	2.1		
	10	77	1.6	3.4	600	[36]
	67	298	0.2	0.34		
Hydrogène gazeux (pour comparaison)	10	77	100	3.1	-	
	70	300	100	5.6		

\* matériau dont la densité est inconnue

Des éléments comparatifs pour les différentes familles de matériaux cités sont donnés dans le Tableau 3. Ces matériaux ont l'avantage d'être de faible coût et de fonctionner à des pressions relativement modérées. Toutefois, leurs performances sont réduites en termes de densité massique. Ils ont de plus l'inconvénient de n'être utilisable qu'à très basse température, typiquement à celle de l'azote liquide.

Il est de coutume de parler de capacité de stockage en termes massiques pour les hydrures. Le fait est que c'est ce facteur qui est pénalisant pour les hydrures métalliques qui possèdent, par ailleurs, une densité de stockage volumique très intéressante. Dans le cas des systèmes à adsorption et, dans une moindre mesure, dans le cas de certains hydrures complexes, pour lesquels la densité du matériau peut être très faible, la mention de capacités massiques parfois spectaculaires n'a que peu d'intérêt pratique si les capacités volumiques sont peu intéressantes. On observe dans certains cas qu'elles sont même inférieures à celle de l'hydrogène gazeux à la même pression et à la même température. En d'autres mots, on stocke plus d'hydrogène dans un même volume sans y mettre le matériau de stockage, et cela avec une capacité massique inégalable de 100 %. Afin de pouvoir comparer les propriétés de stockage des adsorbants par rapport à d'autres systèmes, leurs capacités massiques et volumiques sont reportées dans le Tableau 3.

Des résultats spectaculaires ont été annoncés pour les nanostructures en carbone sans qu'aucun ne puisse être scientifiquement reproduit [32, 37-39]. Il existe une limite théorique à la physisorption en considérant une monocouche d'hydrogène sur une feuille de graphène développée qui est de 3 % massique. Les meilleures capacités attestées sur du carbone à très haute surface spécifique sont de l'ordre de 2 % massique par physisorption à 77 K [31] soit des capacités à peine supérieures à celle de LaNi<sub>5</sub> à température ambiante. La capacité de

stockage volumique est cependant 2 fois plus faible, ce qui limite fortement cette voie de stockage comme une solution d'avenir pour les applications.

Concernant les MOF, les résultats faisant état de 4.5 % massique sous 1 bar à 77 K et 1 % massique sous 25 bar à 300 K [35] n'ont pas été confirmés [36].

### **Avantages et inconvénients des différents systèmes**

Le stockage sous pression présente un certain nombre d'avantages. Il nécessite une relativement faible énergie pour comprimer le gaz à 700 bar (17% du PCI) et la technologie est aujourd'hui bien maîtrisée. Le remplissage d'un réservoir est très rapide et il existe déjà des réseaux de distribution du gaz sous pression en Europe. Toutefois ce procédé présente quelques inconvénients. On notera la faible densité volumique, car même comprimé à 700 bar, 1 l d'hydrogène n'équivaut du point de vue énergétique qu'à 0.2 l d'essence. D'autre part, la forme des réservoirs actuels est inadaptée à l'application automobile par exemple.

C'est la solution du stockage liquide qui est retenue et qui a fait ses preuves dans le domaine spatial et aéronautique. Les applications grand public semblent souffrir des inconvénients majeurs liés aux pertes thermiques et surtout à l'énergie consommée par la liquéfaction.

Les capacités volumiques de stockage de l'hydrogène sous pression, liquide ou dans un hydrure type (LaNi<sub>5</sub>) sont comparés Figure 3. Cette figure fait apparaître clairement le principal avantage d'un système à hydrure : la densité de stockage incomparable. A cela s'ajoute l'absence de besoin de compression ou de liquéfaction qui résulte en des pertes énergétiques allant typiquement de 10% à 50% de l'énergie spécifique de l'hydrogène, et avec un net avantage au niveau de la sécurité du système. Aucune perte énergétique n'est théoriquement associée au stockage sur hydrure car on stocke et on déstocke l'hydrogène à la même pression, pourvu que l'hystérèse soit peu importante, ce qui peut être ajusté par substitution. Un autre avantage substantiel est lié à la présence du plateau de pression qui permet qu'une grande quantité d'hydrogène puisse être stockée et récupérée dans un intervalle très restreint de pression. La valeur de cette pression peut être finement ajustée à une température donnée par une substitution adéquate, ainsi que la pente par un traitement thermique d'homogénéisation. Un autre trait intéressant, relié à la dépendance en température de la pression de plateau, est la possibilité d'effectuer du cyclage thermique à une pression constante (on stocke en refroidissant le composé, on déstocke en le chauffant). Enfin, les hydrures bénéficient de la possibilité d'une mise en forme mieux adaptée aux applications mobiles que le gaz sous pression ou que l'hydrogène liquide, bien que moins pratique que les systèmes à hydrolyse pour lesquels on conserve la technologie du réservoir à essence classique.



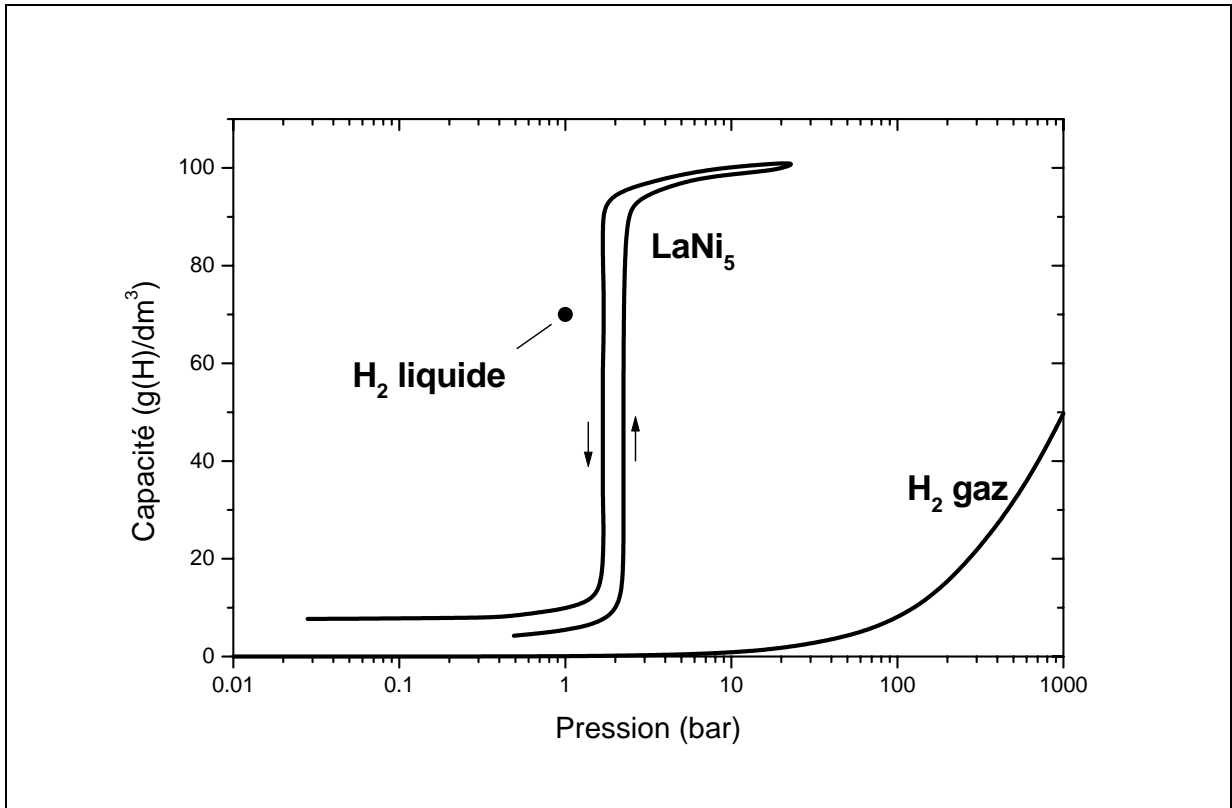


Figure 3 : capacité volumique en fonction de la pression pour les trois moyens de stockage gazeux liquide ou dans un hydrure (LaNi<sub>5</sub>).

En revanche, les hydrures sont pénalisés par leur poids. Les objectifs fixés autour de 6% massique semblent très difficiles à atteindre, ne serait-ce que par la contradiction thermodynamique entre des hydrures à grande capacité et à faible stabilité thermique. Un autre handicap majeur est lié à la gestion de la chaleur de transformation qui équivaut à environ 25% du PCI. Il faut fournir au système cette chaleur en désorption et être capable de l'évacuer pendant le remplissage du réservoir. Cette chaleur n'est bien sûr pas formellement perdue, contrairement à l'énergie nécessaire pour comprimer et liquéfier le gaz dans le cas du stockage sous pression ou liquide, mais doit être stockée dans l'intervalle ou suppléée par d'autres éléments du système (par exemple par une pile à combustible fonctionnant avec l'hydrogène déstocké). A cause de la limitation cinétique de la réaction chimique et de la valeur limitée du transfert thermique, un stock à hydrure nécessite, en principe, un temps de remplissage nettement plus important que les deux autres systèmes. Enfin, un autre inconvénient des hydrures est la variation de leur volume pendant les cycles de charge et décharge qui peut atteindre 25%. Ceci pose des problèmes de transfert thermique, de limitation de la capacité de stockage effective à cause de la création de volume libre et de contraintes mécaniques sur le réservoir.

## **Conclusion**

La possibilité de stocker l'hydrogène rend ce gaz particulièrement attractif par rapport à l'électricité qui est difficilement stockable. Encore faut-il pouvoir le stocker de façon dense et en toute sécurité. Trois moyens de stocker l'hydrogène ont été présentés qui montrent chacun des avantages et des inconvénients. Le choix du système n'est probablement pas universel et dépend bien sûr de l'application. Une application stationnaire sera moins contrainte par le poids du système, les applications spatiales ou aéronautiques moins contraintes par le coût énergétique. Des choix différents peuvent aussi être faits en fonction de la quantité stockée et du lieu de stockage (sur le lieu de production ou chez l'utilisateur final).

Une solution qui semble ne pas encore avoir été beaucoup explorée est l'association de plusieurs moyens de stockage. Concevoir un réservoir à hydrure à plus haute pression que celles utilisés actuellement (par exemple 200 bar) permet, par exemple, de valoriser le volume non occupé par l'hydrure tout en améliorant la conductivité thermique du système par la présence d'hydrogène gazeux ainsi que de pallier à d'éventuels défauts cinétiques du composé. Un autre type de réservoir fonctionnant sous pression modérée (par exemple 200 bar) et à basse température (par exemple à celle de l'azote liquide), permet d'obtenir une densité de stockage comparable au stockage 700 bar sans les inconvénients technologiques liés à ces fortes pressions et à des températures beaucoup plus faciles à maîtriser que celle de l'hydrogène liquide.

Quel que soit le mode de stockage choisi, le facteur risque existe et est une source de blocage des technologies liées à l'hydrogène. Dans notre société où le besoin de fiabilité et de sécurité est très grand, il n'est pas sûr que si l'on devait mettre en place aujourd'hui une société basée sur l'utilisation des hydrocarbures, ceux-ci recueilleraient un accueil très favorable. Avec des normes adéquates, des projets de démonstration convenablement menés, il est possible de convaincre le public, les industriels et les pouvoirs publics de la relative innocuité de l'hydrogène.

## Bibliographie

- [1] Clefs CEA, 44 (2000-2001).
- [2] L. Schlapbach et A. Züttel, *Nature*, 414 (2001) 353–358.
- [3] A. Züttel, *Materials Today*, September (2003) 24–33.
- [4] H. Hemmes, A. Driessen et R. Griessen, *J. Phys. C: Solid State Phys.*, 19 (1986) 3571–3585.
- [5] C. Johnson, Association Française de l'Hydrogène, [www.afh2.org](http://www.afh2.org) (Fiches 4.1-4.4) (2003).
- [6] A. P. Niedzwiecki et A. R. Abele, Proc. of the 14th World Hydrogen Energy Conference, Montréal, Canada (2002).
- [7] D. Chapelle et D. Perreux, *Int. J. Hydrogen Energy*, Submitted (2004).
- [8] J. Rousseau, D. Perreux et N. Verdière, *Composites Sci. Techn.*, 59 (9) (1999) 1439-1449.
- [9] U. Bossel, B. Eliasson et G. Taylor, [www.evworld.com/library/h2economyFinalReport.pdf](http://www.evworld.com/library/h2economyFinalReport.pdf) (2003).
- [10] U. Bossel, *Renewable Energy World*, March-April (2004) 155-159.
- [11] G. Sandrock, *J. Alloys Compd.*, 293-295 (1999) 877-888.
- [12] R. C. Bowman, Jr. et B. Fultz, *MRS Bulletin*, 27 (9) (2002) 688–693.
- [13] C. Lartigue, A. Percheron-Guégan, J.-C. Achard et F. Tasset, *J. Less-Common Met.*, 75 (1980) 23–29.
- [14] D. Shaltiel, I. Jacob et D. Davidov, *J. Less-Common Met.*, 53 (1977) 117–131.
- [15] J. J. Reilly et R. H. Wiswall, *Inorg. Chem.*, 13 (1974) 218.
- [16] S. Orimo et H. Fujii, *Appl. Phys.*, A72 (2) (2001) 167–186.
- [17] J. Huot, G. Liang et R. Schulz, *Appl. Phys.*, A72 (2) (2001) 187-195.
- [18] J. Huot, M.-L. Tremblay et R. Schulz, *J. Alloys Compd.*, 356-357 (2003) 603-607.
- [19] R. C. Bowman, Jr., C. H. Luo, C. C. Ahn, C. K. Witham et B. Fultz, *J. Alloys Compd.*, 217 (1995) 185–192.
- [20] K. Yvon, *Chimia*, 52 (10) (1998) 613–619.
- [21] H. Kohlmann, *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, Third Edition, 9 (2002) 441–458.
- [22] K. J. Gross, G. J. Thomas et C. M. Jensen, *J. Alloys Compd.*, 330-332 (2002) 683-690.
- [23] T. N. Dymova, Y. M. Dergachev, V. A. Sokolov et N. A. Grechanaya, *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, 224 (3) (1975) 591 Engl. 556.
- [24] T. N. Dymova, N. G. Eliseeva, S. I. Bakum et Y. M. Dergachev, *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, 215 (1974) 1369 Engl. 256.
- [25] B. Bogdanovic et M. Schwickardi, *J. Alloys Compd.*, 253-254 (1997) 1–9.

- [26] S. C. Amendola, Process for synthesizing borohydride compounds, brevet américain 6524542 (2003).
- [27] F. Schüth, B. Bogdanovic et M. Felderhoff, *Chem. Commun.*, 20 (2004) 2249-2258.
- [28] A. Züttel, P. Wenger, S. Rentsch, P. Sudan, P. Mauron et C. Emmenegger, *J. Power Sources*, 118 (2003) 1-7.
- [29] P. Chen, Z. Xiong, J. Luo, J. Lin et K. L. Tan, *Nature*, 420 (2002) 302-304.
- [30] T. Ichikawa, N. Hanada, S. Isobe, H. Leng et H. Fujii, *J. Phys. Chem.*, B108 (2004) 7887-7892.
- [31] M. G. Nijkamp, J. E. M. J. Raaymakers, A. J. van Dillen et K. P. de Jong, *Appl. Phys.*, A72 (2001) 612-623.
- [32] M. Hirscher, M. Becher, M. Haluska, F. von Zeppelin, C. Chen, U. Dettlaff-Weglikowska et S. Roth, *J. Alloys Compd.*, 356-357 (2003) 433-437.
- [33] H. W. Langmi, A. Walton, M. M. Al-Mamouri, S. R. Johnson, D. Book, J. D. Speight, P. P. Edwards, I. Gameson, P. A. Anderson et I. R. Harris, *J. Alloys Compd.*, 356-357 (2003) 710-715.
- [34] G. Férey, M. Latroche, C. Serre, F. Millange, T. Loiseau et A. Percheron-Guegan, *Chem. Commun.*, (2003) 2976-2977.
- [35] N. L. Rosi, J. Eckert, M. Eddaoui, D. T. Vodak, J. Kim, M. O'Keeffe et O. M. Yaghi, *Science*, 300 (2003) 1127-1129.
- [36] B. Panella et M. Hirscher, *Adv. Mater.*, 17 (5) (2005) 538-540.
- [37] M. Hirscher, M. Becher, M. Haluska, A. Quintel, V. Skakalova, Y.-M. Choi, U. Dettlaff-Weglikowska, S. Roth, I. Stepanek et P. Bernier, *J. Alloys Compd.*, 330-332 (2002) 654-658.
- [38] A. Züttel, P. Sudan, P. Mauron, T. Kiyobayashi, C. Emmenegger et L. Schlapbach, *Int. J. Hydrogen Energy*, 27 (2002) 203-212.
- [39] M. Becher, M. Haluska, M. Hirscher, A. Quintel, V. Skakalova, U. Dettlaff-Weglikowska, X. Chen, M. Hulman, Y. Choi et S. Roth, *Comptes Rendus Physique*, 4 (9) (2003) 1055-1062.

## **La maison solaire énergétiquement autarcique de Fribourg en Brisgau et les conséquences pour la fourniture en énergie des résidences actuelles**

Benoit Sicre  
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE  
Heidenhofstr. 2  
D – 79110 Freiburg  
e-mail : sicre@ise.fraunhofer.de

### **Résumé**

Le projet de la maison solaire énergétiquement autarcique de Fribourg en Brisgau avait pour objectif de démontrer la faisabilité à échelle résidentielle de la fourniture d'énergie à base uniquement de rayonnement solaire et de prouver que l'hydrogène était un élément énergétique adapté pour le stockage d'énergie renouvelable. Pendant trois ans, les flux d'énergie de la maison individuelle habitée par trois personnes furent mesurés et analysés. Après une période de mise en marche et d'optimisation, la famille a pu vivre confortablement sans aucun apport d'énergie extérieur mais au prix d'une technique compliquée. En conclusion, l'autarcie énergétique est possible mais coûteuse. En effet, bien que d'utilisation facile, l'hydrogène pose des problèmes lors de sa production et de son transport. C'est pourquoi, les prototypes actuels de systèmes de chauffage à base de pile à combustible fonctionnent essentiellement à base de gaz naturel. Cette technique de micro-cogénération électricité-chaleur sur site a pour attrait un haut rendement énergétique, mais ne résout pas le problème de l'accroissement de la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Enfin les grands courants de la recherche en ce qui concerne la production décentralisée de l'hydrogène sont présentés à l'exemple de l'institut Fraunhofer pour les Systèmes Solaires ISE.

### **Introduction**

L'institut Fraunhofer pour les systèmes solaires ISE de Fribourg en Brisgau a testé entre 1992 et 1996 une maison solaire énergétiquement autarcique (MSEA) qui ne disposait à l'époque ni de raccordement au réseau électrique ni de raccordement au réseau à gaz. Les coûts de construction et de fonctionnement dépassant de loin les moyens financiers d'un propriétaire immobilier, ce projet a été réalisé dans le cadre d'un programme de R&D. Le besoin en énergie et en matériaux pour la construction de cette maison a été deux fois plus élevé que la normale. Bien que onéreuse, cette expérience a permis de mieux cerner les problèmes liés d'un côté à l'autosuffisance énergétique et d'un autre à l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique.

Cet exposé décrit tout d'abord le système énergétique de la maison solaire de Fribourg. Les différentes techniques de production, de stockage et d'utilisation de l'hydrogène vont être présentées. L'expérience fribourgeoise permet d'affirmer que l'hydrogène répond bien aux exigences d'une économie basée sur l'énergie solaire. Les doutes quant à la sécurité d'utilisation n'ont plus lieu d'être, car comme le montre le projet à Fribourg, l'utilisation de l'hydrogène n'est pas plus dangereuse que celle du gaz.

Cependant le problème majeur réside dans la production, la distribution et le stockage de l'hydrogène. Les nouveaux systèmes de chauffage basés sur les piles à combustible, fonctionnent tous, comme le montre la seconde partie de cet exposé, à base de gaz naturel.

La troisième partie se consacre à l'état de la technique et les tendances actuelles dans la recherche sur la production d'hydrogène à l'exemple du Fraunhofer ISE.

### **La Maison solaire énergétiquement autarcique**

La MSEA de Fribourg en Brisgau a été conçue et réalisée entre Septembre 1991 et octobre 1992 sous la direction du Fraunhofer ISE [1]. Cette maison a été exploitée sans raccord au réseau électrique et au réseau de gaz naturel jusqu'en 1996. A la fin de la phase de démonstration de la faisabilité du concept (en 1997), la maison a été raccordée aux réseaux de fourniture d'énergie.

#### ***Le concept***

Le concept de la MSEA se basait sur les principes de l'architecture passive solaire. La MSEA disposait de panneaux solaires thermiques, d'une isolation thermique transparente, de panneaux photovoltaïques (utilisation directe de l'électricité quand c'est possible, par exemple pour l'éclairage), d'un jeu de batteries (pour la fourniture des charges de pointe), de la production d'hydrogène et d'oxygène au moyen d'un électrolyseur à membrane pressurisée et de leur stockage dans des ballons pressurisés. L'hydrogène est utilisé pour la cuisson et le chauffage à air chaud des pièces (brûleur catalytique dans les deux cas). De plus, en hiver, une pile à combustible basse température (de type PEM) prenait le relais et fournissait chaleur et électricité à la maison. La maison couvrait donc ses besoins énergétiques uniquement à base de rayonnements solaires.

#### ***Description des installations techniques***

Le système de fourniture d'énergie à base de soleil et d'hydrogène présentait lors de la phase de démonstration les caractéristiques suivantes (voir Fig. 2):

- 30 m<sup>2</sup> de panneaux photovoltaïques à base de cellules monocristallines avec une puissance pic de 4,2 kWp,
- un jeu de 48 batteries au plomb avec 200 Ah chacune. Le système dispose d'une tension de 48V avec une capacité nominale de 20 kWh
- un onduleur sinusoïdal avec une puissance de 3 kW,
- un électrolyseur à membranes pressurisées conçu par le Fraunhofer ISE avec une puissance de 2 kW pour un courant de 90 A. La pression de travail atteint les 3 Mpa et la température se situe aux environs de 80 °C. La capacité de production d'hydrogène atteint les 1,2 m<sup>3</sup>/h et celle d'oxygène de 0,6 m<sup>3</sup>/h.
- une pile à combustible de type alcaline (30% KOH, avec des électrodes au nickel) puis par la suite de type PEM avec une température de travail aux environs de 70 °C et une puissance électrique de sortie de 0,5 kW,
- deux réservoirs à Gaz (hydrogène : 15 m<sup>3</sup>, 3Mpa, capacité :1436 kWh, oxygène : 7.5 m<sup>3</sup>, 3 Mpa),

- une cuisinière avec 4 brûleurs catalytiques développés par le Fraunhofer ISE avec une puissance thermique de 1 à 2,6 kW et un four électrique avec 230 V alternatif,
- un chauffage à air (brûleurs catalytiques à diffusion avec une puissance de 0,5 et 1,5 kW et doté d'un allumage automatique). Ces brûleurs ont été directement montés dans le canal de ventilation (approvisionnement en air frais).

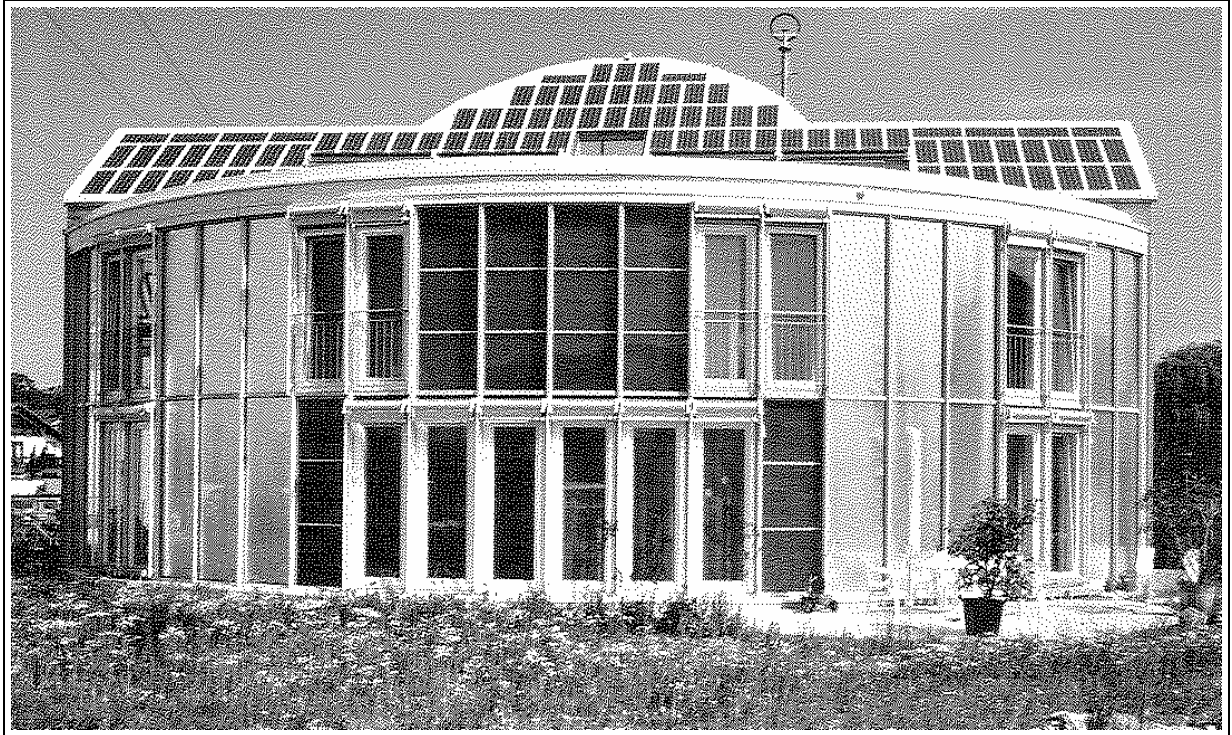


Fig. 1: La maison solaire énergétiquement autarcique de Fribourg en Brisgau (Source: [2]).

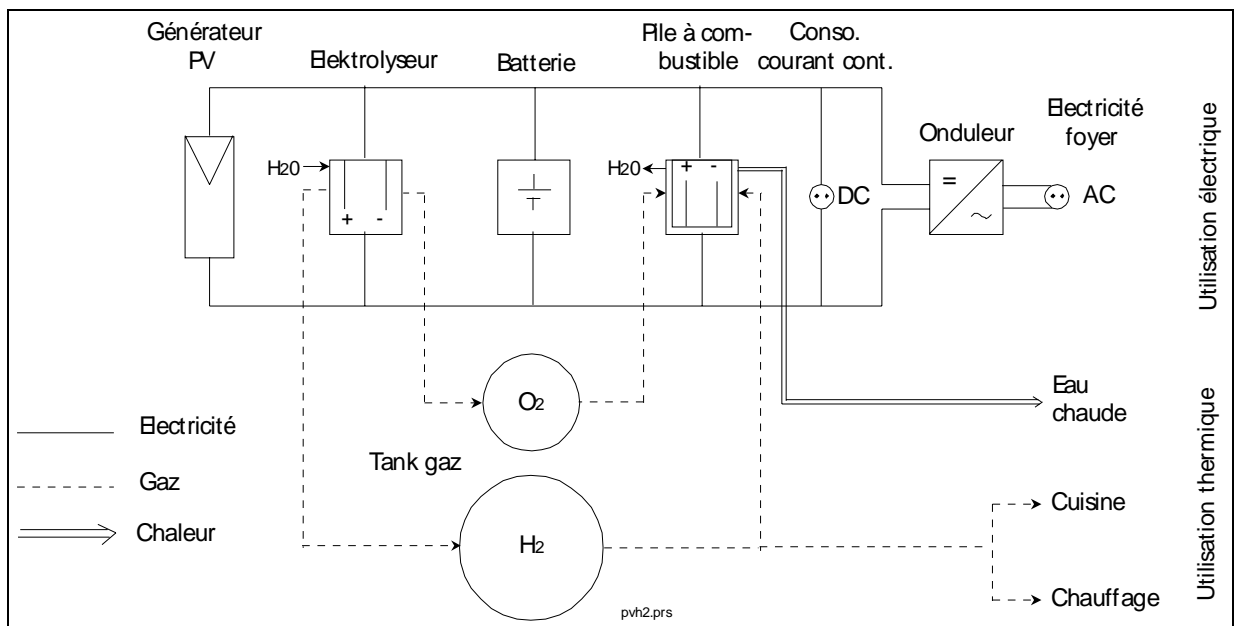


Fig. 2: Représentation schématique de l'installation énergétique de la maison solaire énergétiquement autarcique de Fribourg en Brisgau.

### Evaluation du système

Bien que les coûts financiers et énergétiques pour la réalisation de cette habitation furent bien plus élevés que dans le cadre d'un habitation classique, le projet a pu démontrer la faisabilité technique d'une autosuffisance énergétique complète à l'échelle résidentielle. La maison a été habitée en effet pendant deux ans par une famille de trois personnes. Ainsi, il a été possible de démontrer comment réduire de manière significative le besoin énergétique des bâtiments résidentiels. Ces résultats ont ouvert la voie à un nouveau standard de construction, la maison passive. Les maisons passives sont caractérisées par un besoin en chauffage très faible (inférieur à 10 W/m<sup>2</sup> de surface habitable) grâce à une excellent isolation thermique. Ainsi l'apport de chaleur aux pièces peut être réalisé uniquement par insufflage d'air chaud. Le besoin en chauffage annuel est alors inférieur à 15 kWh/m<sup>2</sup>.

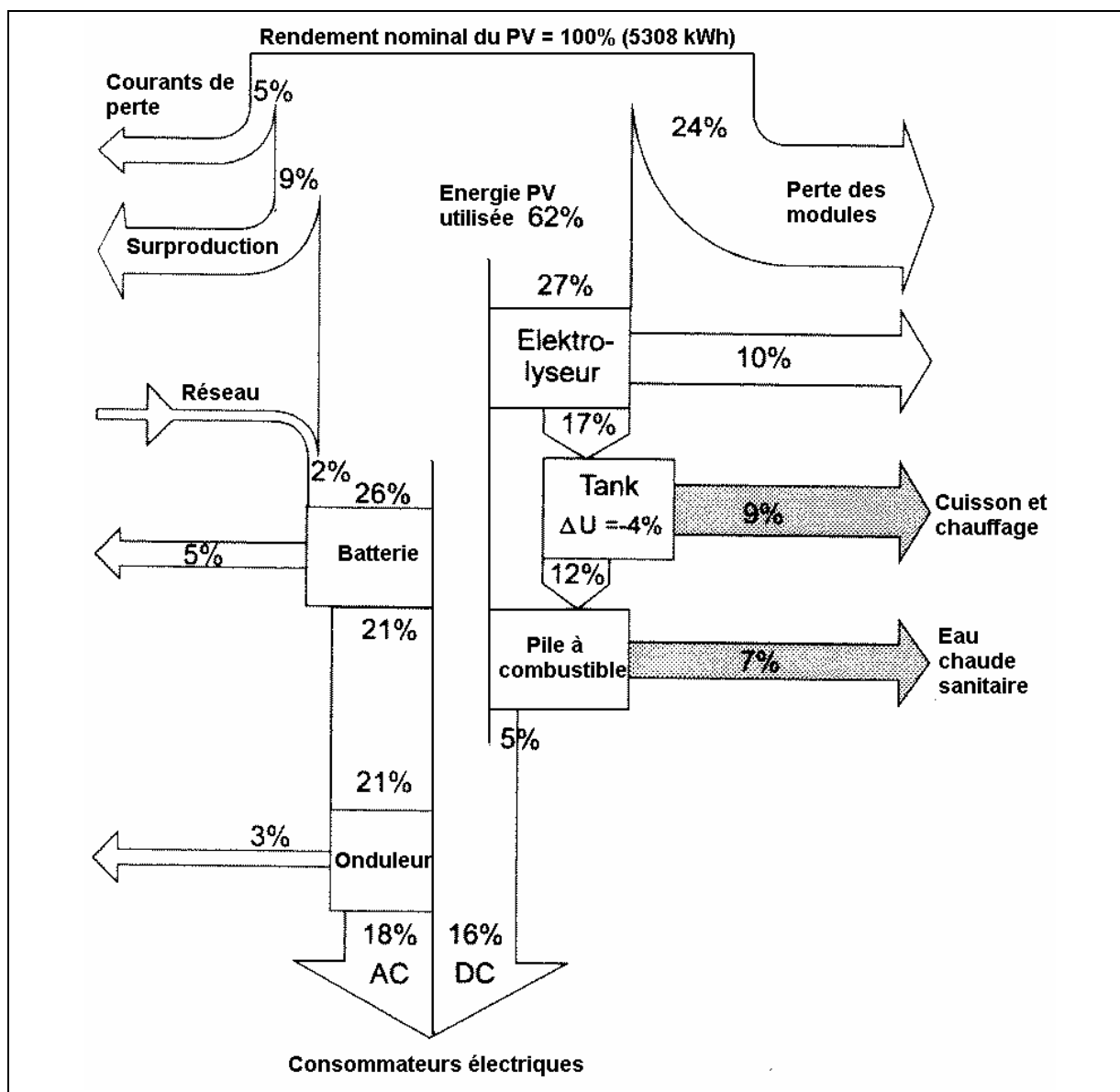


Fig. 3: Flux d'énergie des panneaux photovoltaïques pour la période entre avril 1994 et mars 1995 (extrait de [2]).



La Fig. 3 présente le flux d'énergie des panneaux photovoltaïques pour la période entre avril 1994 et mars 1995. Le rendement nominal de l'installation PV s'obtient en multipliant le rendement du module sous conditions de test standards (environ 11%) avec les valeurs du rayonnement solaire mesurées sur site (direction plein sud, inclinaison 40%). Les pertes des modules, du à un ombrage partiel, s'élèvent à 24%. Grâce à une bonne concordance entre les caractéristiques des modules PV et de ceux de l'électrolyseur, les courants de perte n'atteignent que 5%. La surproduction électrique ne représente que 9% de la production totale. 60% de l'énergie électrique mise à disposition a été consommée sous forme de courant alternatif (alternateur 3 kW avec un rendement annuel de 90%).

En conclusion, 56% de l'électricité mise à disposition a pu être consommée immédiatement ou bien stockée pour une courte durée dans les accumulateurs au plomb. Les 44% restant furent utilisés pour la production et le stockage de l'hydrogène. L'hydrogène a servi par la suite à la cuisson et au chauffage. La pile à combustible a secondé les panneaux photovoltaïques et les accumulateurs lorsque ceux-ci n'étaient pas capable de couvrir les besoins. La Fig. 4 présente la variation du stockage de l'accumulateur et du tank à hydrogène au cours de l'année. Le jeu de batteries était prévu pour un stockage courte durée (compensation nuit-jour). En été, le taux de remplissage varie entre 80% et 100% et en hiver il descend en dessous de 20% de la capacité nominale (20 kWh). Le ballon à hydrogène atteint son remplissage maximal en automne. En été l'hydrogène est seulement utilisé pour la cuisson. Le surplus peut-être alors stocké dans le tank. Des problèmes liés à l'électrolyseur (prototype) n'ont pas permis de dépasser 70% de la capacité nominale du ballon. En hiver, toute l'électricité des modules PV étant consommée par les batteries, l'électrolyseur ne fonctionne que très rarement. Tous ces résultats et bien d'autres sont présentés dans le rapport d'études [2].

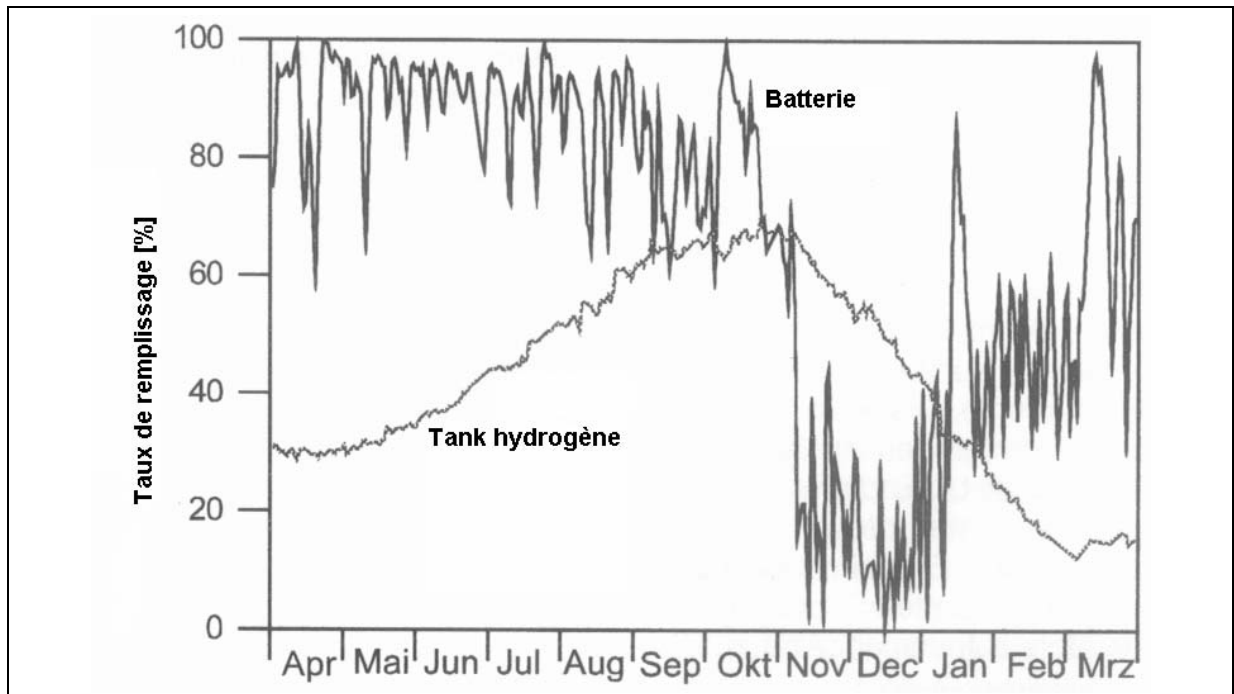


Fig. 4: Variation du contenu du ballon à hydrogène (100% = 1400 kWh) et de l'accumulateur (100% = 20 kWh) entre avril 1994 et mars 1995 (extrait de [2]).

A la fin de la période de démonstration en 1996, il fut décidé de ne pas renouveler la période de test. Bien que la solution développée soit techniquement mature et ne présente par rapport à un système à base de gaz naturel aucune difficulté majeure concernant aussi bien le fonctionnement que la sécurité d'exploitation, les scientifiques ont conclu qu'une MSEA n'avait aucune raison d'être, si ce n'est en absence de réseau électrique public [2]. L'autosuffisance énergétique à l'échelle maison individuelle ne se justifie pas au point de vu des coûts.

Aujourd'hui la MSEA à Fribourg est devenue le « Solarhaus Freiburg» et héberge divers unités pilotes du Fraunhofer ISE. Les systèmes à hydrogène ont été démontés et le bâtiment a été raccordé au réseau électrique public. Actuellement, la maison héberge un stand de test pour système de ventilation compact à base de pompe à chaleur. Ces systèmes, dont l'utilité a été prouvé dans la MSEA, sont actuellement développés par le Fraunhofer ISE à la demande de fabricants.

### **La micro-cogénération a base de piles a combustible**

Les postes les plus coûteux dans le cas de la MSEA étaient à l'époque, en dehors de la pile à combustible, les panneaux PV et l'électrolyseur. Aujourd'hui pour palier au problème de la production et du stockage de l'hydrogène, les constructeurs de chaudières de micro-cogénération ont prévu d'utiliser de petites installation de reformage en ligne sans stockage intermédiaire pour fournir l'hydrogène nécessaire. De plus les systèmes de micro-cogénération actuels sont dimensionnés essentiellement pour couvrir le besoin thermique du bâtiment, le surplus d'électricité produite étant « vendue » à l'opérateur du réseau électrique local, ce qui tend à améliorer la rentabilité de l'installation (voir [3]).

#### ***Le principe***

Les piles à combustibles, qu'il s'agisse de système à basse ou bien à haute température, ont toutes pour principe la réaction électrochimique entre hydrogène et oxygène. N'étant pas présent à l'état natif, l'hydrogène doit être produit. L'électrolyse de l'eau à base d'énergie renouvelable est un procédé au point mais fort coûteux ce qui rend cette solution financièrement peu viable. Un autre procédé est le reformage thermique du gaz naturel car l'hydrogène, un gaz extrêmement volatil, est difficile à stocker et à transporter. De petites installations de reformage à l'échelle résidentielle (voir ci-dessous) ont été développées pour palier à ce problème. L'hydrogène une fois produit, est directement envoyé sur la pile à combustible. Cette solution s'applique bien dans des régions où les infrastructures de gaz de ville sont bien développées. La pression du réseau suffit à alimenter l'installation de reformage et la pile à combust-tible. Suite à la réaction électrochimique où un courant électrique est généré aux pôles de la pile, les gaz chauds d'échappement servent à chauffer l'eau sanitaire ou l'eau du circuit de chauffage. (voir [4])

#### ***Les systèmes commerciaux***

Généralement les systèmes de co-génération à base de piles sont classés en fonction de leur température de fonctionnement. Le Tableau 1 présente quelques systèmes pré-commerciaux européens des plus avancés techniquement. Il est à noter qu'actuellement aucun produit n'est disponible à la vente. Les constructeurs les plus en pointe réalisent actuellement des tests de longue durée sur des sites sélectionnés. Pour l'instant les efforts techniques se concentrent sur l'allongement de la durée de vie des piles (objectif 40 000 heures de fonctionnement) et sur

l'optimisation de la « balance of plant », c'est à dire la réduction de la consommation électrique parasitaire des installations périphériques (pompes, vannes, régulateur,...)

Tableau 1 : Aperçu des fabricants de systèmes à piles à combustible et des produits (selon [4]). Tous les systèmes en dehors de Hexis sont basse température.

Fabricant	Internet	Puissance électrique (kW)	Puissance thermique (kW)
Vaillant Hepworth (RFA)	www.vaillant.de	2,5-4,6	7
Viessmann (RFA)	www.viessmann.de	2	5
Buderus (RFA)	www.heiztechnik.buderus.de	2-5	6-9
HGC (RFA)	www.hgc-hamburg.de	3	8
Osaka Gas (Japon)	www.osakagas.co.jp	5	Pas de données
Bosch (RFA)	www.bosch.de	1	2
Sulzer Hexis (Suisse)	www.hexis.com	0,1-1	0,6-2,6 brûleur à gaz additionnel

## Etat de la technologie de l'hydrogène au Fraunhofer ISE

### *Production de l'hydrogène par électrolyse*

Hydrogène et oxygène peuvent être produits avec une grande pureté via l'électrolyse. Le Fraunhofer ISE développe des électrolyseurs à membranes polymères PEM avec un débit allant de quelques NI/h jusqu'à 500 NI/h sous une pression de 30 bar. Des systèmes complets avec épuration de l'eau, séparation et séchage des gaz et leur stockage (par exemple stockage à hydrures métalliques) sont dimensionnés et optimisés en fonction des spécifications de l'application. Si l'approvisionnement en électricité est effectué par des panneaux PV, la taille de l'électrolyseur sera choisie en fonction de la puissance pic des panneaux. Le revêtement de la membrane conductrice de protons est effectué dans les laboratoires du Fraunhofer ISE. Une couche supplémentaire améliore la pureté des produits (max. 0,3% d'oxygène dans l'hydrogène). Le système 2 kW (consommation électrique) est extrêmement compact et peut être monté en rack. Le système est complètement automatisé. Les difficultés actuelles résident dans le choix restreint des matériaux. L'oxygène, facteur de corrosion et la pression de travail élevée impose l'utilisation de matériaux hi-tech très coûteux. De plus, il s'agit d'un produit « fait-main » ce qui augmente énormément le prix de revient.

### ***Le reformage de carburant hydrocarboné***

La transformation catalytique de carburants courants comme : le gaz naturel, le propane, l'essence, le diesel, le biodiesel et les bio-alcools rend l'utilisation de piles à combustible possible même quand l'hydrogène n'est pas disponible sur place. Le Fraunhofer ISE se concentre sur deux types d'application : la reformage pour petites piles à combustible (entre 1 et 20 kW électrique) avec purification des gaz et le micro-reformage (pour des applications entre 100 et 500 W électrique). Bien que certains de ces produits soient déjà disponibles sur le marché, des efforts de recherche restent nécessaires dans le domaine de la purification des gaz (élimination des traces de CO), lors des démarrages à froid et de la gestion de la vapeur d'eau. Un futur prometteur pour les installations de reformage de petit taille est envisagé pour les applications électriques de haute valeur isolé et non-raccordées au réseau (ex. : système de communication et de navigation en montagne ou en mer, ...) où un carburant haut densité énergétique est indispensable.

### ***Les piles à combustible DMFC***

Les piles à combustible DMFC ont la particularité de fonctionner directement à base de méthanol, un carburant à l'état liquide sous conditions normales. Leur atout par rapport à la pile de type PEM, est la simplicité du fonctionnement (pas de gestion de l'humidité de la membrane, peu d'organes de sécurité) et un stockage bien moins volumineux. En revanche, la puissance spécifique de la pile est bien moindre. Le Fraunhofer ISE développe des piles DMFC de petite taille (par exemple de 1 W à 30 W) pour des applications portables. D'une manière générale, les efforts de recherche se concentrent essentiellement sur les qualités de la membrane, spécialement la diffusion de méthanol et sur les catalyseurs afin d'augmenter la puissance spécifique du stack. A cause de la toxicité relative du méthanol, des essais sont réalisés avec l'éthanol comme carburant.

### **Conclusion**

Dans sa quête pour une source d'énergie propre, l'homme espère avoir trouvé en l'hydrogène une solution adaptée. Bien que ne présentant pas plus de risque d'utilisation que le gaz naturel (l'expérience de la MSEA de Fribourg le montre), l'hydrogène, un carburant secondaire, doit être produit et de préférence sur place.

Les piles à combustible pour application résidentielles produiront leur hydrogène dans un premier temps à partir du reformage du gaz naturel, car les autres techniques présentées dans cet exposé (électrolyse, piles DMFC) ne sont pas encore techniquement ou économiquement viables.

Il est clair que dans le futur, l'énergie électrique, surtout si elle est produite essentiellement à base de source renouvelable, restera un grand concurrent pour l'hydrogène. Comme pour ce dernier, le stockage de l'électricité reste un gros challenge technique. Et, c'est sur cet aspect de stockage que ces deux formes d'énergie pourraient devenir remarquablement complémentaires.


### **Références**

- [1] Voss, K.: Experimentelle und theoretische Analyse des thermischen Gebäudeverhaltens für das Energieautarke Solarhaus Freiburg; Thèse doctorale à l'école Polytechnique Fédérale de Lausanne, au département d'architecture; 1995
- [2] Stahl, W., Goetzberger, A., Voss, K. : Das energieautarke Solarhaus: Mit der Sonne wohnen ; 146 p. C.F. Müller Verlag ; 1997
- [3] Sicre, B. : Nachhaltige Energieversorgung von Niedrigstenergiehäusern auf Basis der Kraft-Wärme- Kopplung im Kleinstleistungsbereich und der Solarthermie ; Thèse doctorale à l'université technique de Chemnitz ; 2004  
disponible sur [archiv.tu-chemnitz.de/pub/2005/0015/index.html](http://archiv.tu-chemnitz.de/pub/2005/0015/index.html)
- [4] Wittwer, V., Sicre, B., Bühring, A., Vetter, M., Vogel, M., Wittwer, C.: Systemstudien und Betriebsführungsstrategien für Mini-Kraftwärmekopplungsanlagen in Wohngebäuden ; Fraunhofer ISE ; 2004  
disponible sur [http://www.badenova.de/web/media/dokumente/innovationsfonds/2002-5-endgueltiger\\_AbschlussberichtMiniKWkt.pdf](http://www.badenova.de/web/media/dokumente/innovationsfonds/2002-5-endgueltiger_AbschlussberichtMiniKWkt.pdf)



## **Hydrogène et mobilité Etat de l'art et contribution de la recherche en Suisse**

Alexander Wokaun  
Forschungsbereich Allgemeine Energie  
Paul Scherrer Institut  
CH – 5232 Villigen PSI  
e-mail : alexander.wokaun@psi.ch



**Hydrogène et mobilité:  
état de l'art et  
contribution de la recherche en Suisse**

Alexander Wokaun  
Forschungsbereich Allgemeine Energie  
Paul Scherrer Institut, Villigen

L'HYDROGENE, FUTUR VECTEUR ENERGETIQUE ? A. Wokaun 13 Mai 2005 1

## Anwendungen des Wasserstoffs im Transportwesen

- Sicherheitsanforderungen
- Verteilungsinfrastruktur
- Wasserstoff in Verbrennungsmotoren
- Wasserstoff für Brennstoffzellenantriebe mit Bremsenergie-Rückgewinnung
- Technologie im Kontext der nachhaltigen Mobilität

## Aussage des TÜV Deutschland: Sicherheitsaspekte des Wasserstoffs beherrschbar !

Zündfähige Gemische Treibstoff / Luft:

**Benzin** 1 – 7 Vol.%, Zündtemperatur 500 K

**Wasserstoff** 5 – 76 Vol.%, Zündtemperatur 858 K

Crash von Fahrzeugen mit gleicher Energiemenge (links H<sub>2</sub>, rechts Benzin)

nach 5 Sekunden



nach 1 Minute





## Möglichkeiten der Wasserstoffverteilung

- Schiff (flüssig)



- Pipeline (gasförmig, 0,5-30 bar, 350-9 900 Nm<sup>3</sup>/h H<sub>2</sub>)



- Kryogenbehälter auf LKW (flüssig, bis zu 37 000 Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>)



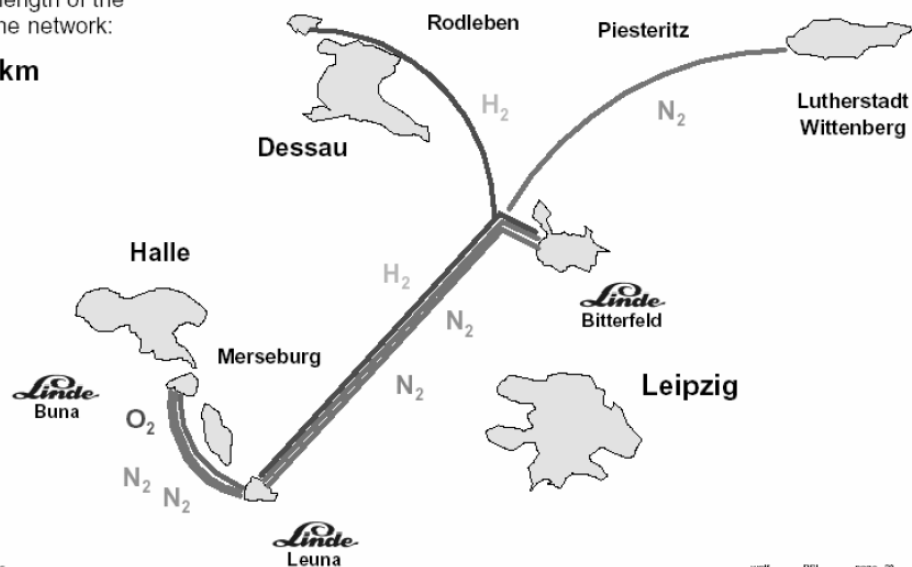
- Flaschenbündeltrailer“ (gasförmig, bis zu 200 bar, bis zu 6 000 Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>)



H<sub>2</sub> – futur vecteur énergétique ? CUEPE

## Beispiel eines existierenden Wasserstoff-Pipelinenetzes

Total length of the pipeline network:  
**395 km**



© 2004 Linde Gas

wfif PSI neme 27

## Dezentrale Wasserstoff-Herstellung durch Hochdruck-Elektrolyse

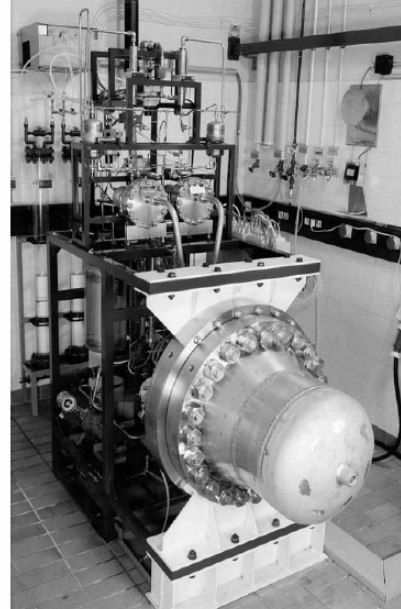
### Betriebsparameter :

Druck 30 – 120 bar,  
neu 200 bar  
Stacktemperatur 60 °C

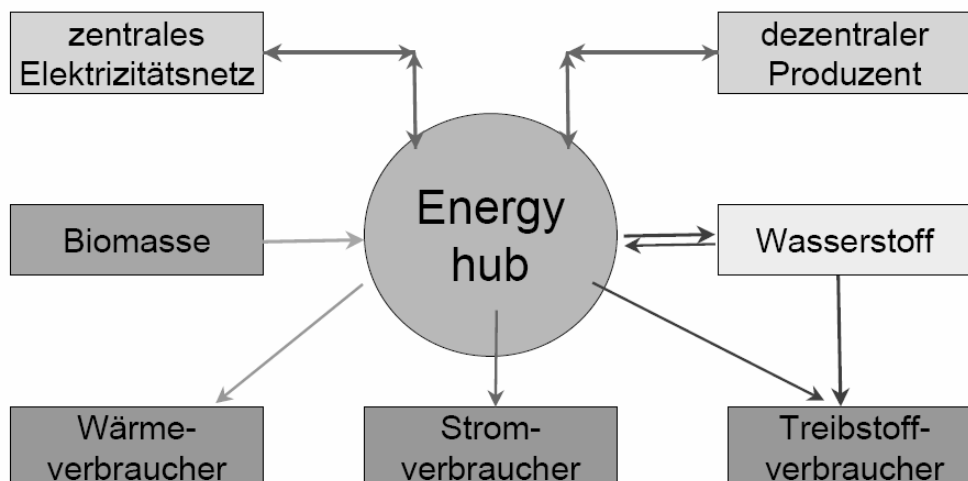
### Wirkungsgrad der dezentralen Erzeugung:

60 % herkömmlich  
80 % fortgeschritten  
85 % neuste Anlagen (AccaGen)

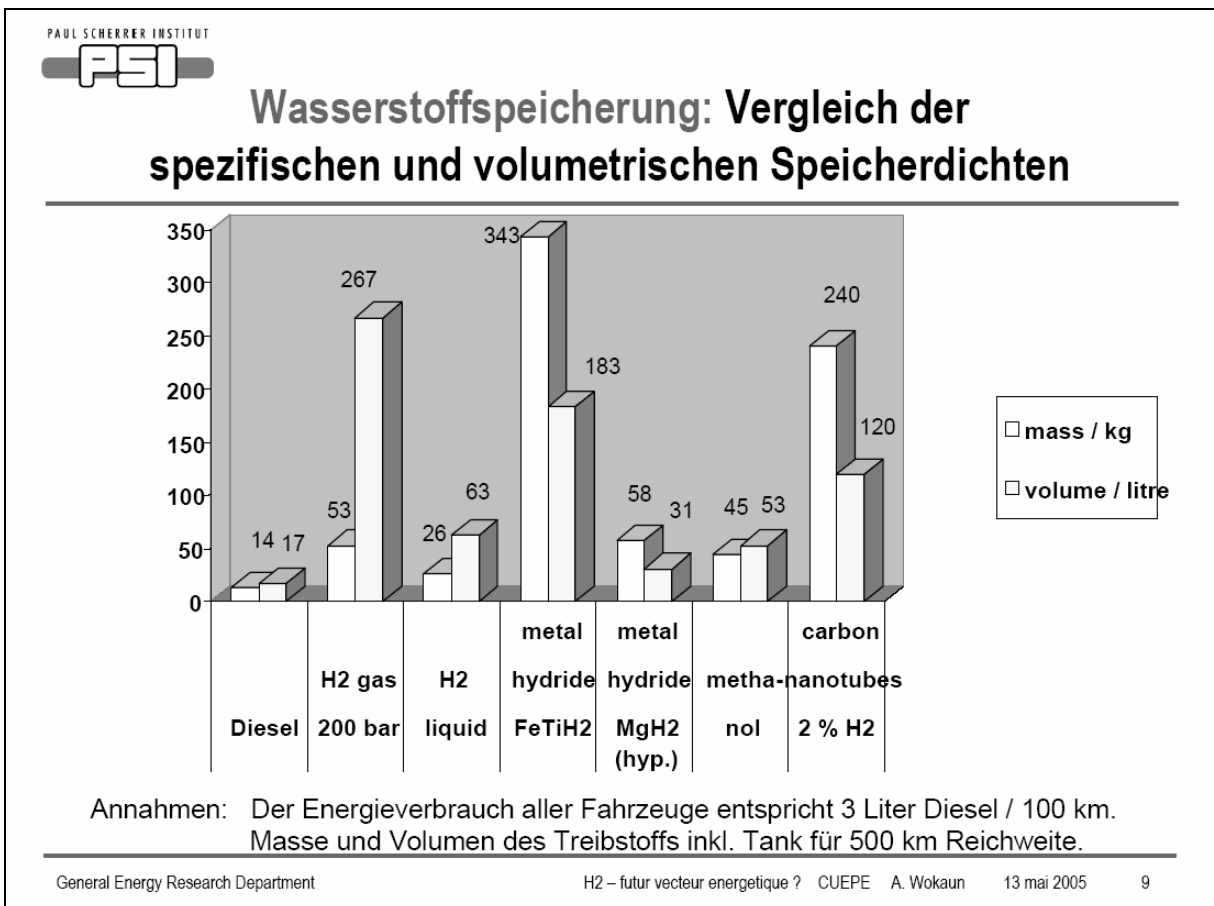
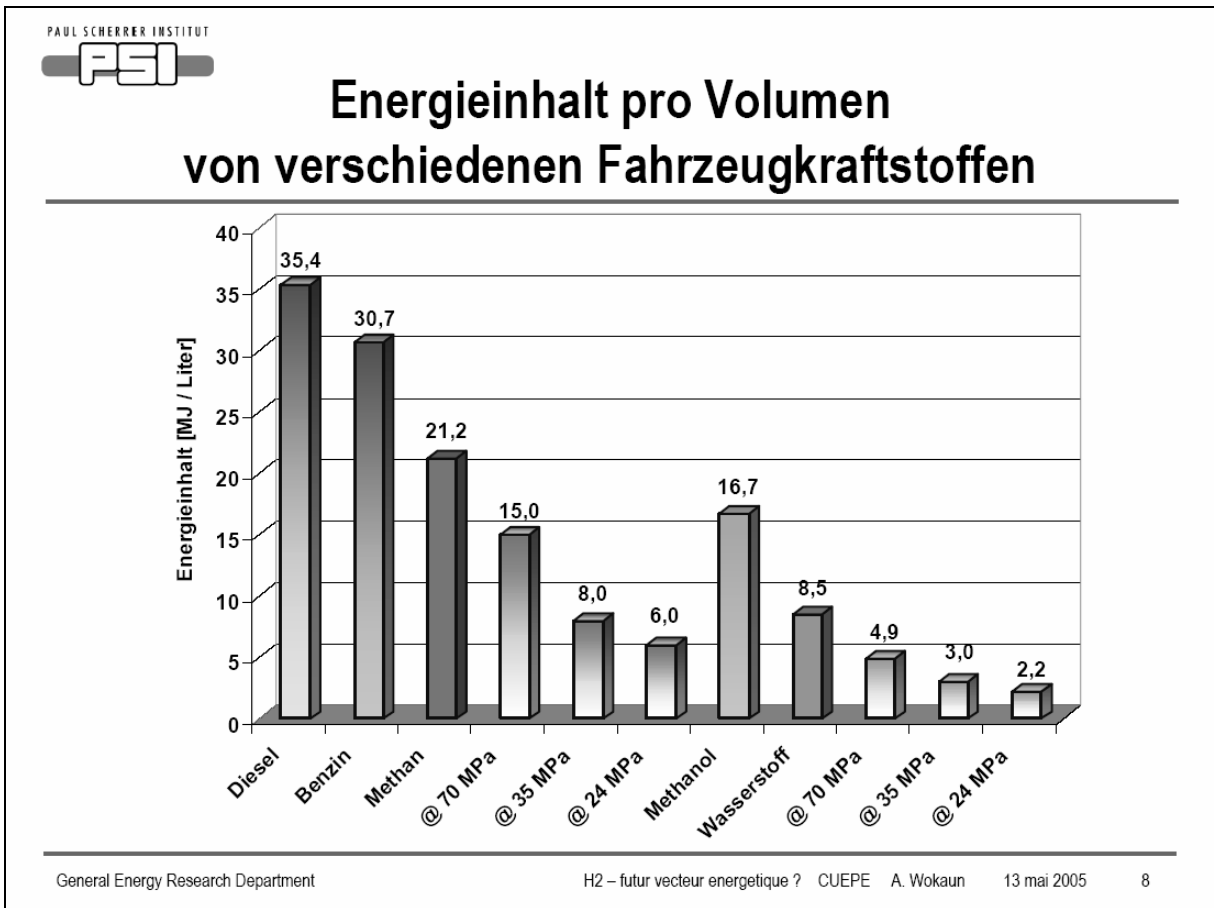
Hochdruckelektrolyseur, Forschungszentrum Jülich



## Dezentraler Energiehub



Hub auf Stufe Gemeinde / Quartier / Überbauung, typische Grössenordnung: 1 MW



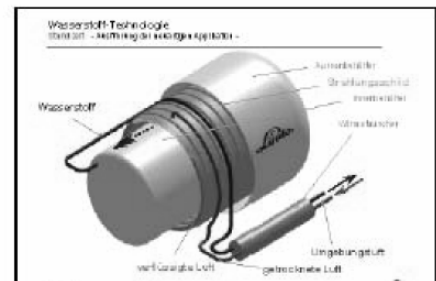
## Speicherung von Wasserstoff im Fahrzeug

### Druckgasspeicher

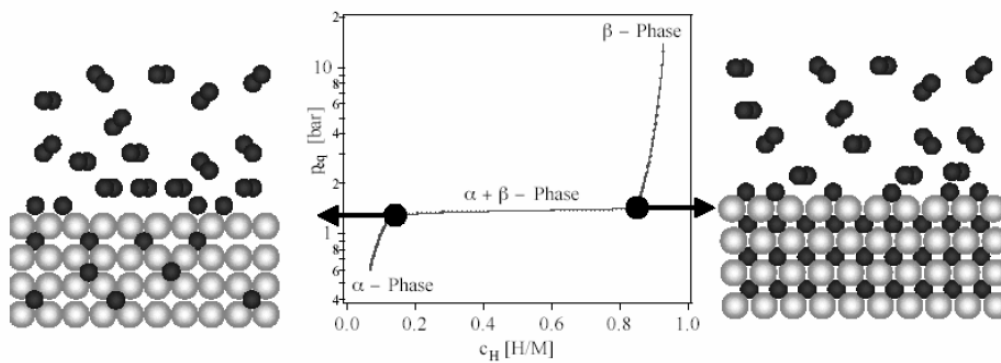
- Stahlflasche
- Verbundflasche  
(metallischer Liner mit Faserumwicklung)
- Compositflaschen



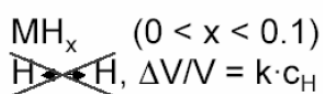
### Flüssigwasserstoffspeicher



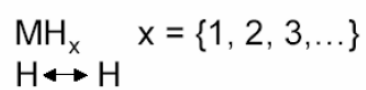
## Speicherung in Metallhydriden



$\alpha$ -Phase: Solid Solution



$\beta$ -Phase: Hydride Phase

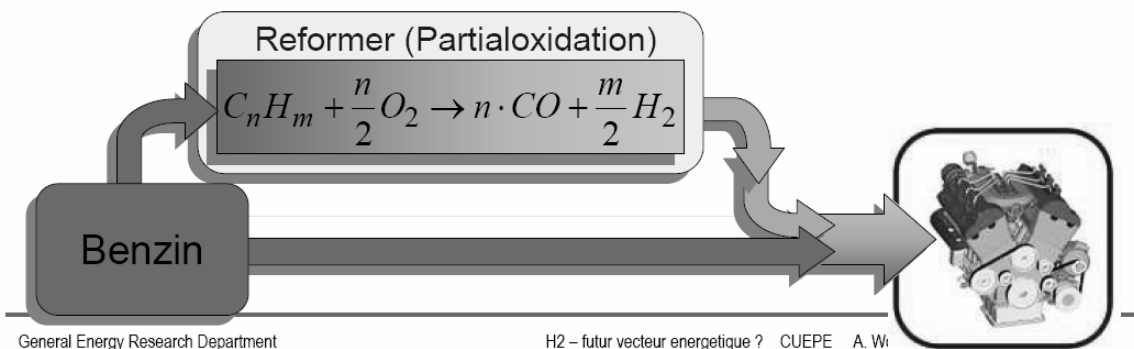


## Wasserstoffanwendung in Verbrennungsmotoren

- Verbrennung von reinem Wasserstoff in Ottomotor steigert den Wirkungsgrad (vom Tank zum Rad)

- Beispiel: europäischer Fahrzyklus (ECE)  
Benzin: 18 % Wasserstoff: 25 %

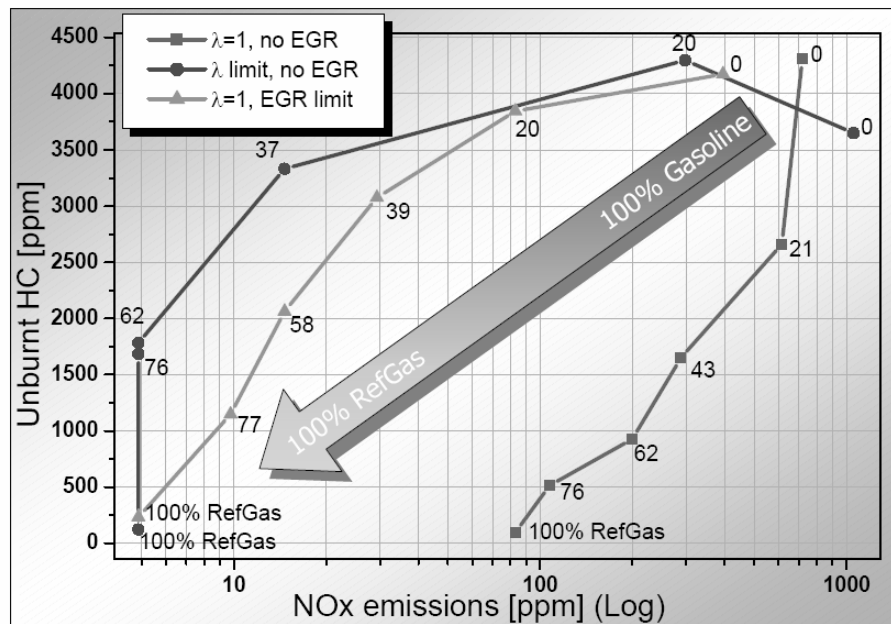
- Solange keine Wasserstoffinfrastruktur verfügbar ist, kann Teilreformierung im Fahrzeug sinnvoll sein.

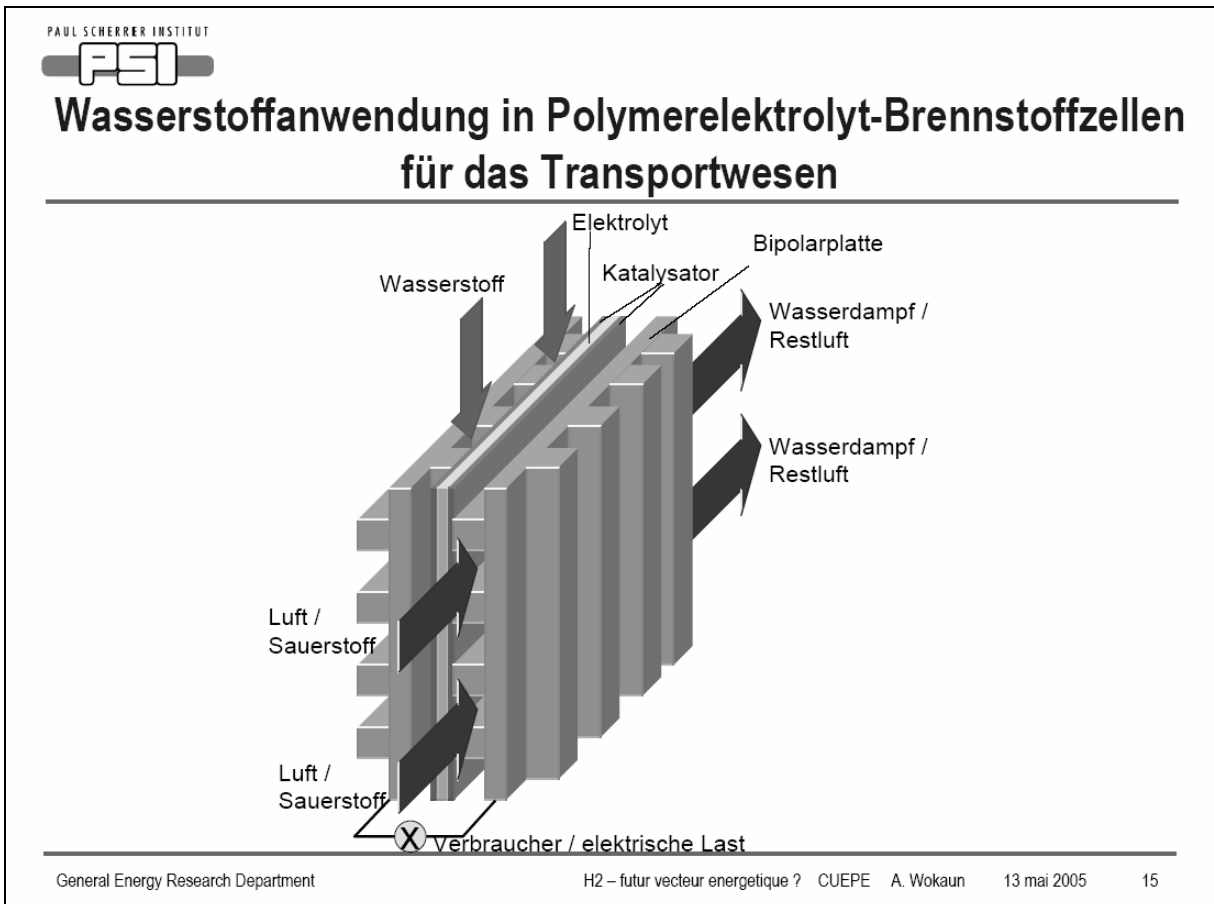
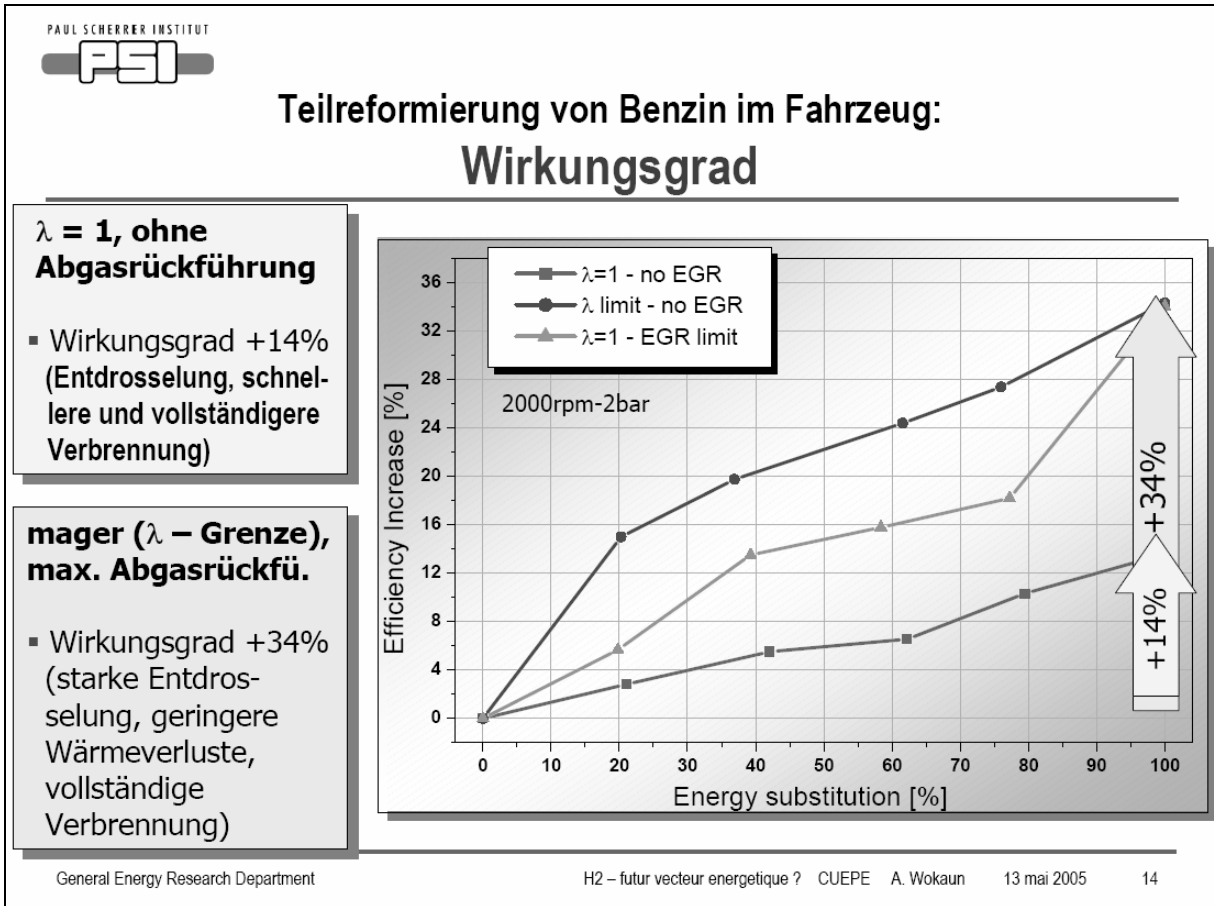


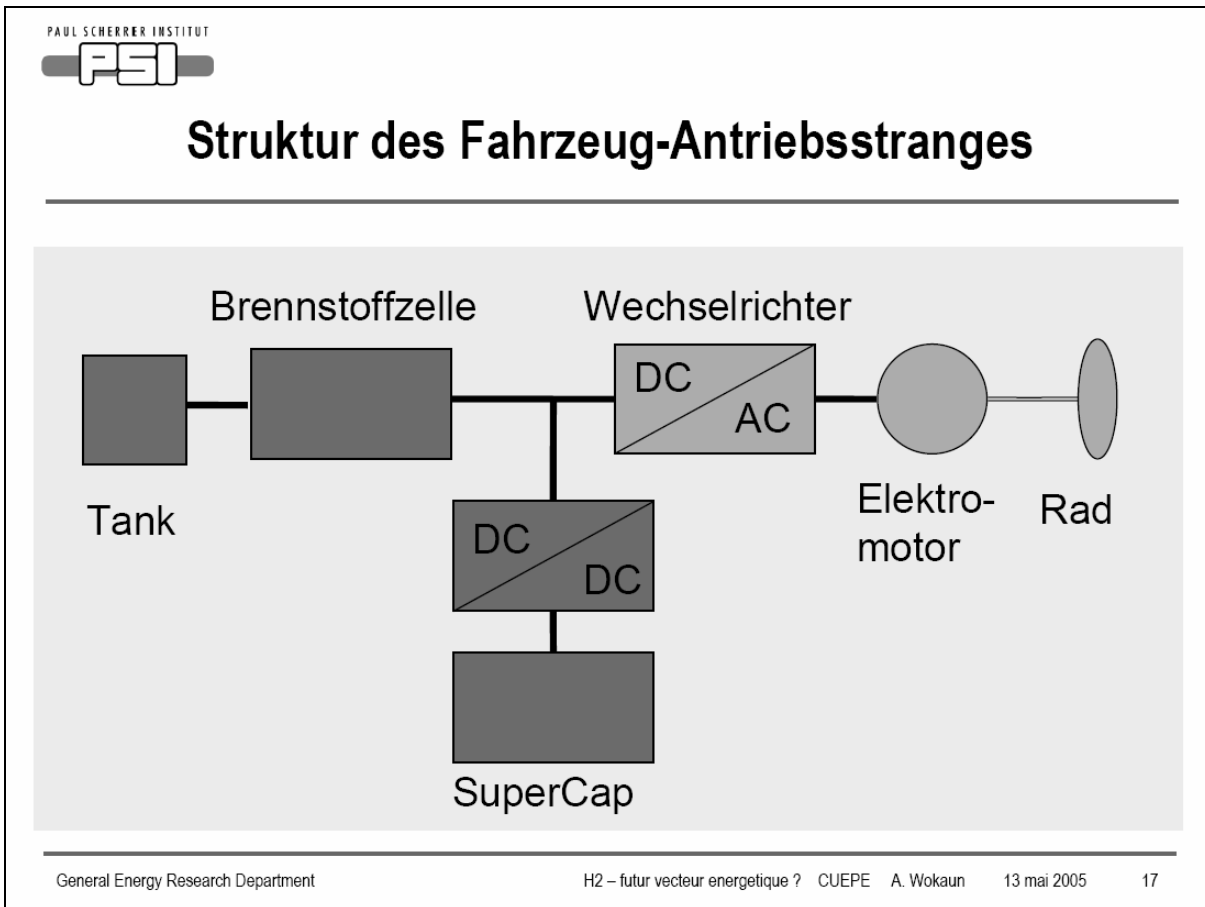
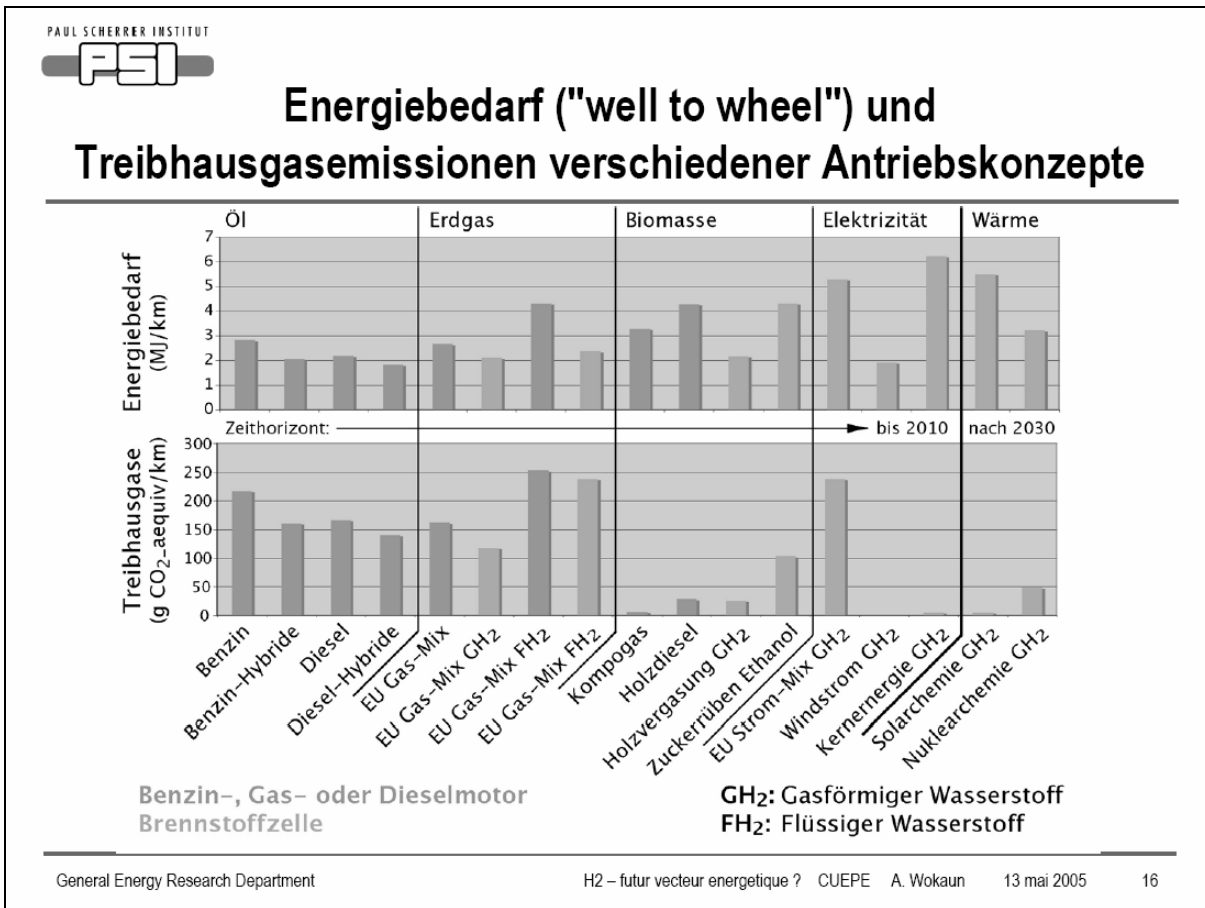
## Teilreformierung von Benzin im Fahrzeug: Emissionen

### Roh- emissionen (vor Katalysator) :

- unverbrannte Kohlenwasserstoffe sinken auf wenige ppm
- NO<sub>x</sub> – Emissionen fallen unter die Messgrenze (5 ppm)









## Bremsenergie-Rückgewinnung mit Ultrakondensatoren Laden / Entladen von 100 Wh während 15 Sekunden

**Elektroden auf Basis  
aktivierter Kohlen-  
stoffmaterialien**

**optimiert  
für hohe Energien:  
2600 F, 4.3 Wh / kg  
2.5 kW / kg**

**Bremsenergie rück-  
gewinnung reduziert  
Verbrauch im  
ECE-Zyklus um 15%**



## Demonstrator der Technologiekette





## Ziele bei der Entwicklung des Brennstoffzellenfahrzeugs HY-LIGHT

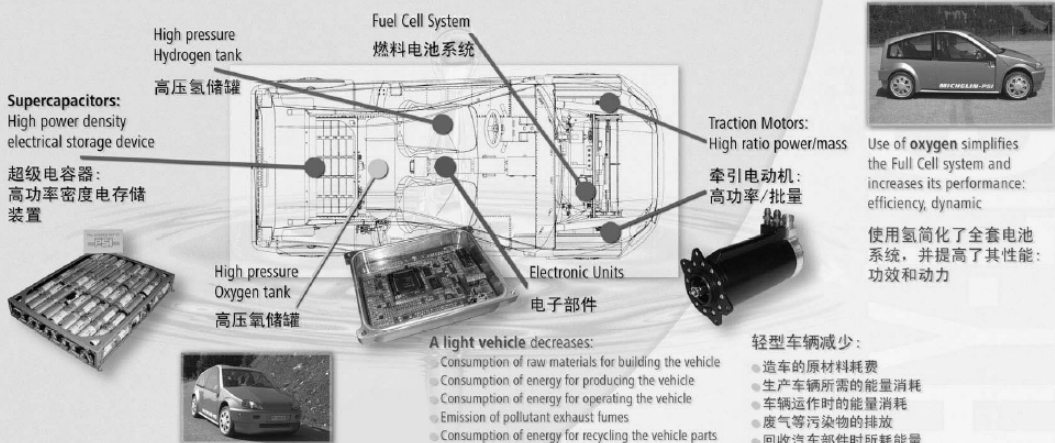
- Umsetzung neuer elektrochemischer Forschungsergebnisse und der Erkenntnisse aus früheren Projekten
- Signifikante Verbrauchsreduktion durch Massenreduktion und Steigerung des Antriebswirkungsgrades
- Verbesserung der reduzierten Reichweite bestehender Fahrzeug-Prototypen
- Realisation einer möglichst weitgehenden Minimierung des Verbrauchs

## Anordnung der Komponenten

### The clean mobility concept car HY-LIGHT

Main components

清洁的流动，HY-LIGHT 汽车理念  
主要部件



Use of oxygen simplifies the Full Cell system and increases its performance: efficiency, dynamic.  
使用氢简化了全套电池系统，并提高了其性能：功效和动力



## Hauptinnovationen im Fahrzeug

Michelin:

Leichtbau-Chassis

Integration des Wasserstofftanks in die Fahrzeugstruktur

Vollelektrischer Antrieb mit Elektromotoren in den Vorderrädern

Elektrische Dämpfung, die eine Lageregelung des Fahrzeugs in den Kurven ermöglicht in allen 4 Rädern

PSI:

Brennstoffzellensystem mit Wasserstoff und Sauerstoff

Supercap – Speichermodul

## Am Fahrersitz



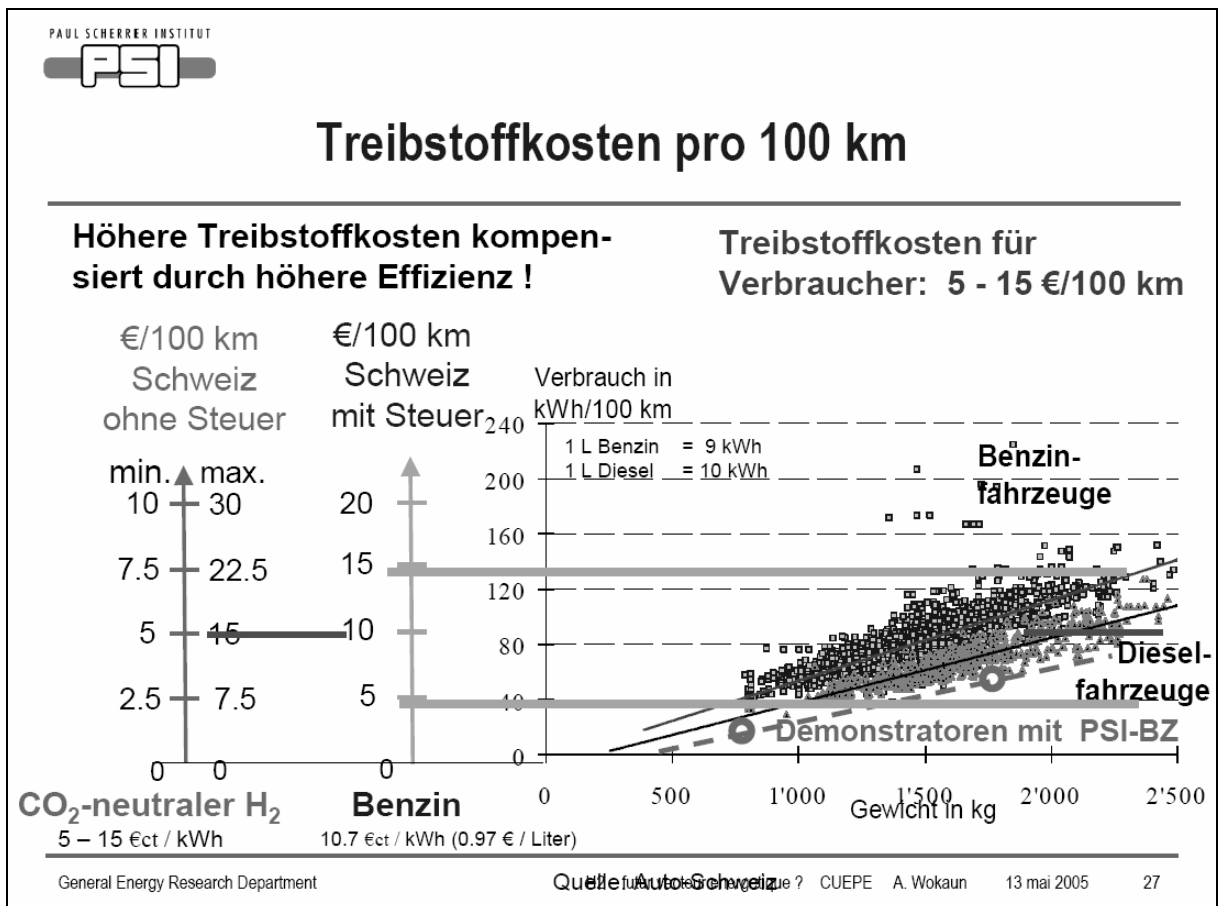
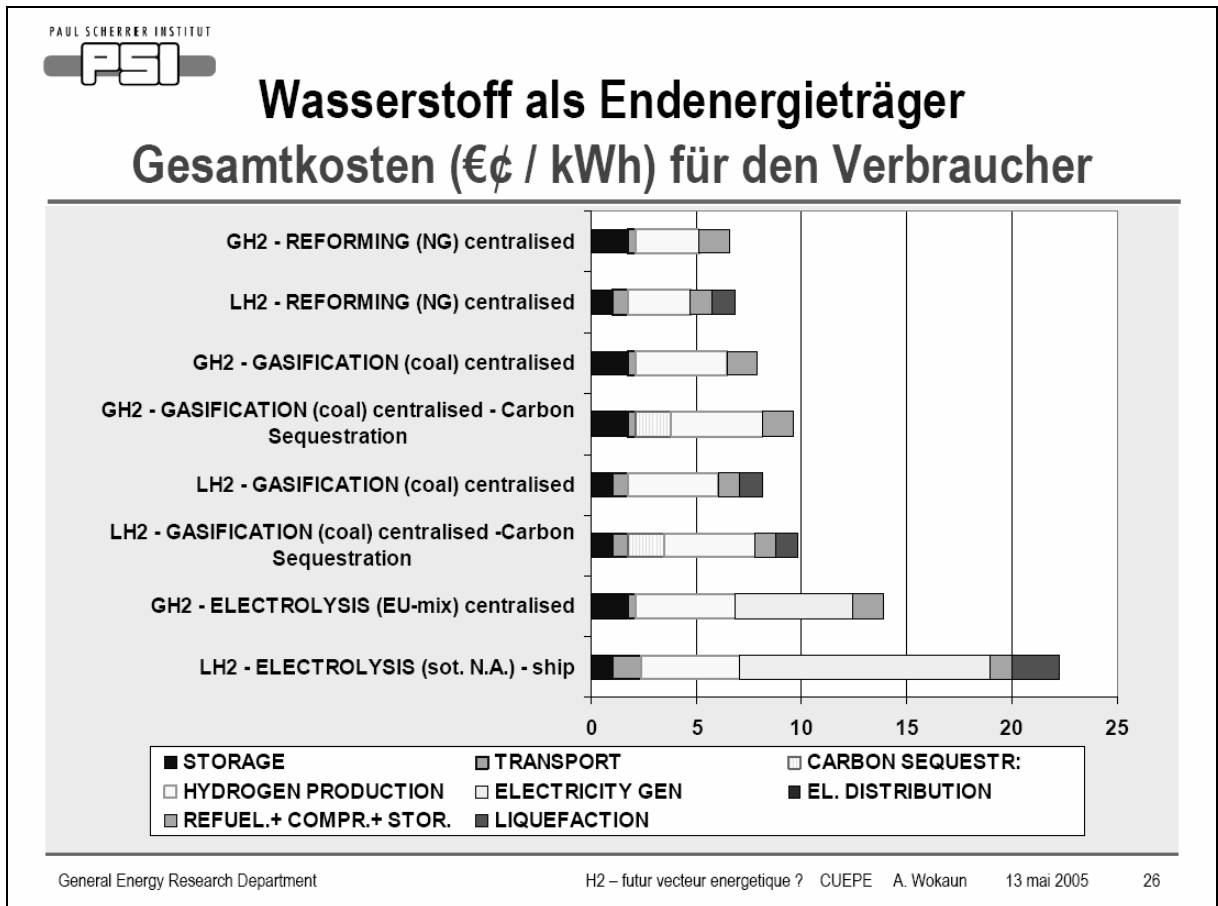
## Kennwerte des Fahrzeugs

### Bau eines spezifisch auf die Brennstoffzelle optimierten Fahrzeuges

Fahrzeuggewicht	850 kg
(4 plätzig + Kofferraum)	
Beschleunigung 0-100 km/h	< 12 Sek.
Reichweite	400 km ( bei 80 km / h )
Verbrauch	< 25 kWh / 100 km ( gasförmiger H <sub>2</sub> )
Elektrische Federung und Dämpfung mit erstklassigem Kurvenverhalten	
High-Tech Elektromotoren im Rad	

## Betanken heute und morgen: Was kostet eine Füllung an der Tankstelle?





## Vorteile eines angepassten Fahrzeuges

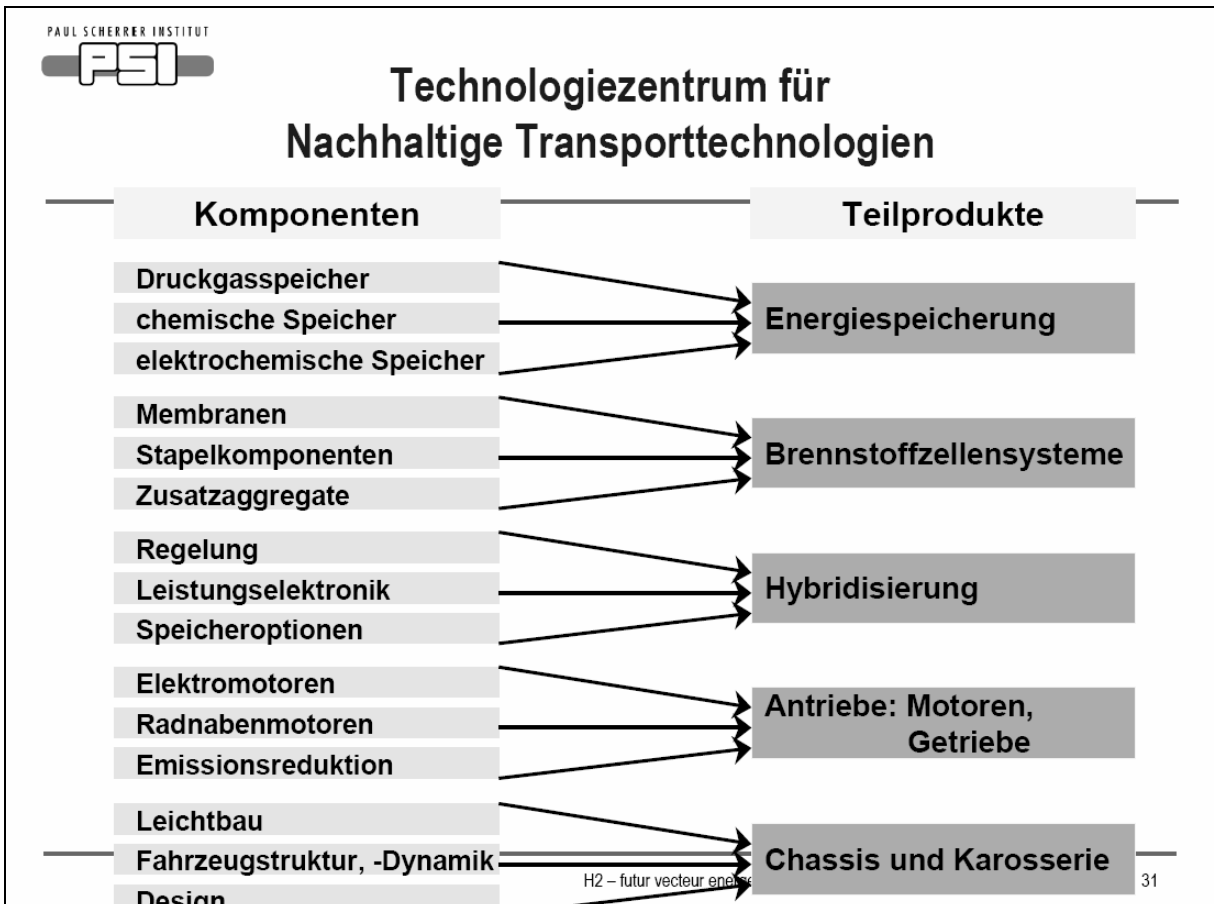
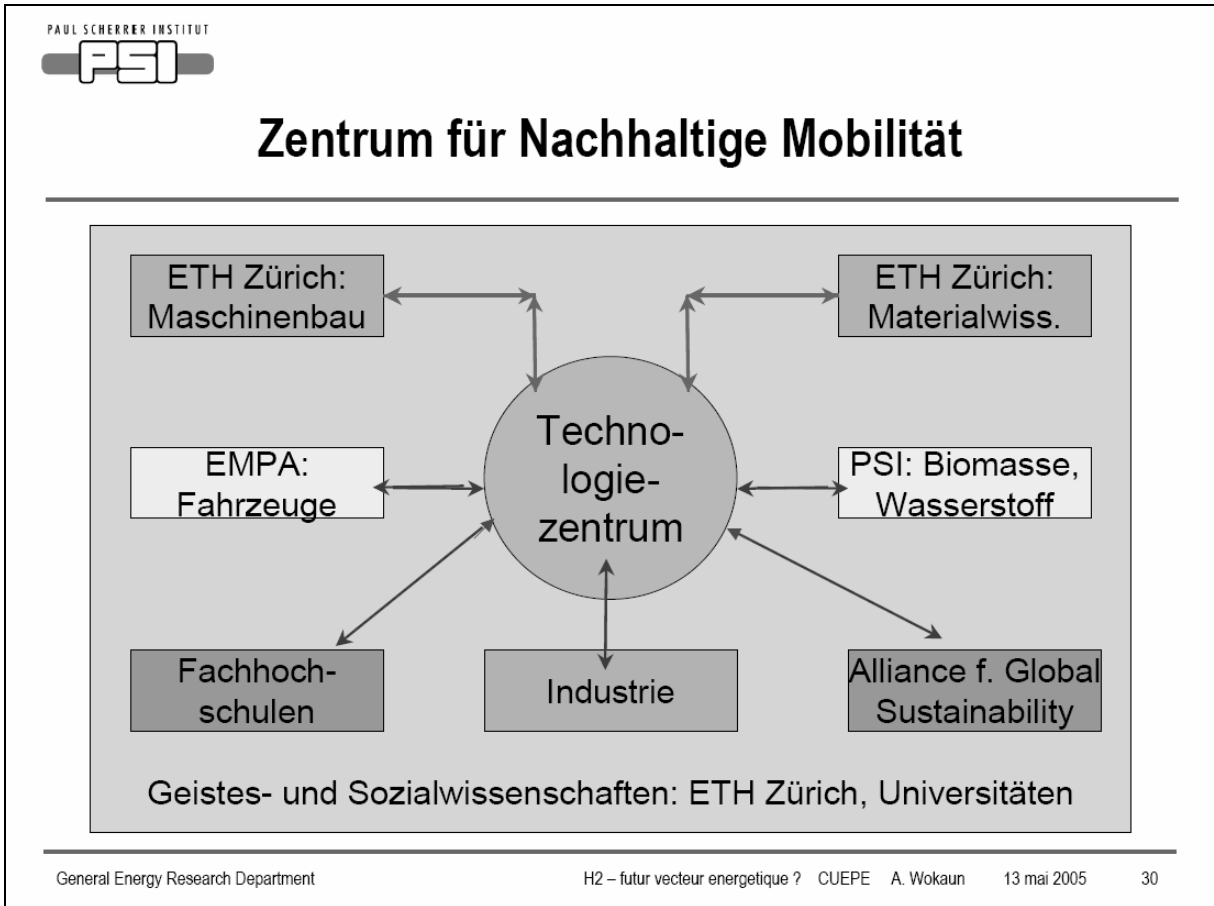
Leichtfahrzeug	generell: 6 -8 % Verbrauchsreduktion pro 100 kg weniger Masse ⇒ Gewicht 850 kg
BZ-Antrieb	erhöht den Wirkungsgrad in der City
Supercaps	erlauben Bremsenergie-Rückgewinnung (- 15% )
Kombination der Massnahmen	ermöglicht Reichweitensteigerung mit Wasserstoff ⇒ 400 km

## Dimensionen der Mobilität

### **Mobilität ist mehr als Verkehr und Verkehrsträger!**

- **gesellschaftliches Bedürfnis, individuelle Entscheide**
- **multimodale Verkehrssysteme (Schiene, Strasse, Flugzeug)**
- **Raumplanung (Wohnen, Arbeiten, Erholung)**
- **Treibstoffe und Fahrzeuge**

**"Nachhaltige Mobilität" muss alle diese Aspekte berücksichtigen !**



## Schlussfolgerungen

**Auch im Transportwesen werden auf lange Zeit mehrere Energieträger (Diesel, Erdgas, Wasserstoff) parallel eingesetzt → diversifizierten Energiemix erhalten !**

- **Wasserstoff wird bereits heute grossmassstäblich produziert, Überschüsse verfügbar, Sicherheitsfragen sind beherrschbar.**

- **Die Wahl der Herstellungsmethode entscheidend darüber, ob Wasserstoffeinsatz die CO<sub>2</sub>-Bilanz verbessert.**

- **Im Transportsektor bietet Wasserstoff entscheidende Vorteile, heute im Verbrennungsmotor, morgen in der Brennstoffzelle.**

- **Technische Lösungen sind nur ein Teilaspekt der Nachhaltigkeit; Raumplanung, öffentlicher Verkehr, Akzeptanz, Wahl des Kunden**

⇒ **Kein technischer Hinderungsgrund gegen graduelle Einführung des Wasserstoffs als Energieträger. Langfristige Investitionen und Schaffen politischer Rahmenbedingungen sind notwendig. Wasserstoff ist Innovationschance für die Schweizer Industrie.**





## **Hydrogen A viable solution to all energy problems ?**

Robert Dall'Ara  
AccaGen SA  
Via Chiosso 8  
CH – 6952 Canobbio  
e-mail : r.dallara@accagen.com

AccaGen SA



Hydrogen  
a viable solution to  
all energy problems?

By R. Dall'Ara  
CEO AccaGen

May 2005

## Summary



- Introduction to AccaGen and AET
- The hydrogen market today
- Hydrogen as energy carrier
- Hydrogen production
- Hydrogen utilization as energy carrier
- Examples of realized hydrogen projects
- Conclusion

May 2005

## Who is AccaGen



AccaGen is a High-tech company, localized in Ticino, focused on the technologies for the clean hydrogen production.

The technology background is based both on acquired technologies, from the company Casale Chemicals, and on own developments.

The company was founded in 2003, has today 12 employees and is selling the most advanced hydrogen generators available on the market

May 2005

# Why AccaGen and AET



AET is the energy producer company in Ticino owned by the Canton. In spite of typical cantonal companies determined by long decision times and no innovation capacity, AET is driven by a young team of professionals headed by Dr. Rossi in a very entrepreneurial way.

AET is expanding its core activity at international level with investments and partnerships, showing year after year record profits.

AET is also involved in supporting emerging technologies related to the energy sector by setting up local ventures.

AccaGen is one of the AET's ventures taking profit of the market and information network of AET to develop and sell state of the art High-Tech equipment.

May 2005

# The hydrogen market



The hydrogen market exists since more than 100 years at industry level, where hydrogen is used as chemical element. In recent times a new market has opened: hydrogen as energy carrier element

## Industrial market:

- Refineries
- Metal treating
- Chemical industry
- Glas industry
- Food industry
- Power plants

Market size H2: 100 BEUR  
mainly captive

## Energy market:

- Energy storage in stationary systems
- Fuel for automotive applications

Market size equipment  
FC+Generators: 100 MEUR

Market size H2: 4 MEUR

May 2005

# Hydrogen production I



Hydrogen in his basic gaseous form H<sub>2</sub> is not available on earth.  
Hydrogen can be found in large quantities in:

Water H<sub>2</sub>O

Methan CH<sub>4</sub>

Oil drivates C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>

Therefore hydrogen must be extracted from existing compounds. The extraction process is characterized by:

- Extraction energy
- Residual compound after extraction

May 2005

# Hydrogen production II



The most common production processes are:

## Water electrolysis

Reaction:  $2 \text{H}_2\text{O} + \text{electricity} \rightarrow 2 \text{H}_2 + \text{O}_2$

Min. energy required: 3.55 kWh/Nm<sup>3</sup> of H<sub>2</sub>

Commercial systems: 4-6 kWh/Nm<sup>3</sup>

Production pressure: 1-200 bar

Equipment size: 1-200 Nm<sup>3</sup>/h

Turn on time: 10 min

## Steam reforming of natural gas

Reaction:  $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} + \text{heat} \rightarrow 3 \text{H}_2 + \text{CO}$

And

$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} + \text{Heat} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$

Energy efficiency (HHV): 80%


Production pressure: 10-25 bar

Plant size: 300-50'000 Nm<sup>3</sup>/h


Turn on time: few hours

May 2005


# Clean hydrogen production



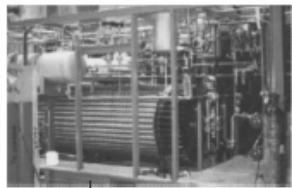
Wind Solar Hydro Geothermal



Nuclear?



H2 Generation




Energy transport by electricity

May 2005


Detailed description: This diagram illustrates the production of clean hydrogen. It shows four primary energy sources: Wind, Solar, Hydro, and Geothermal. A central image of an electrical substation is labeled 'Energy transport by electricity', with lines connecting it to the four energy sources. Below this, a 'Nuclear?' image and an 'H2 Generation' image are also connected to the central substation. The 'aco hydrogen' logo is in the top right corner.

# Centralized or distributed production




Efficiency comparison

90%




Distributed generation

78%




Tot=70%  
No CO2

80%



Centralized generation

65%



Tot=52%  
+ CO2

Detailed description: This diagram compares centralized and distributed production. It starts with an 'Efficiency comparison' icon. The 'Distributed generation' path shows a 90% efficiency for the generation stage, followed by a 78% efficiency for the H2 generation unit, resulting in a total of 70% efficiency with no CO2 emissions. The 'Centralized generation' path shows an 80% efficiency for the generation stage, followed by a 65% efficiency for the truck, resulting in a total of 52% efficiency with CO2 emissions. The 'aco hydrogen' logo is in the top right corner.

# Hydrogen as energy carrier



The use of hydrogen as energy carrier can be exploited in the following ways:

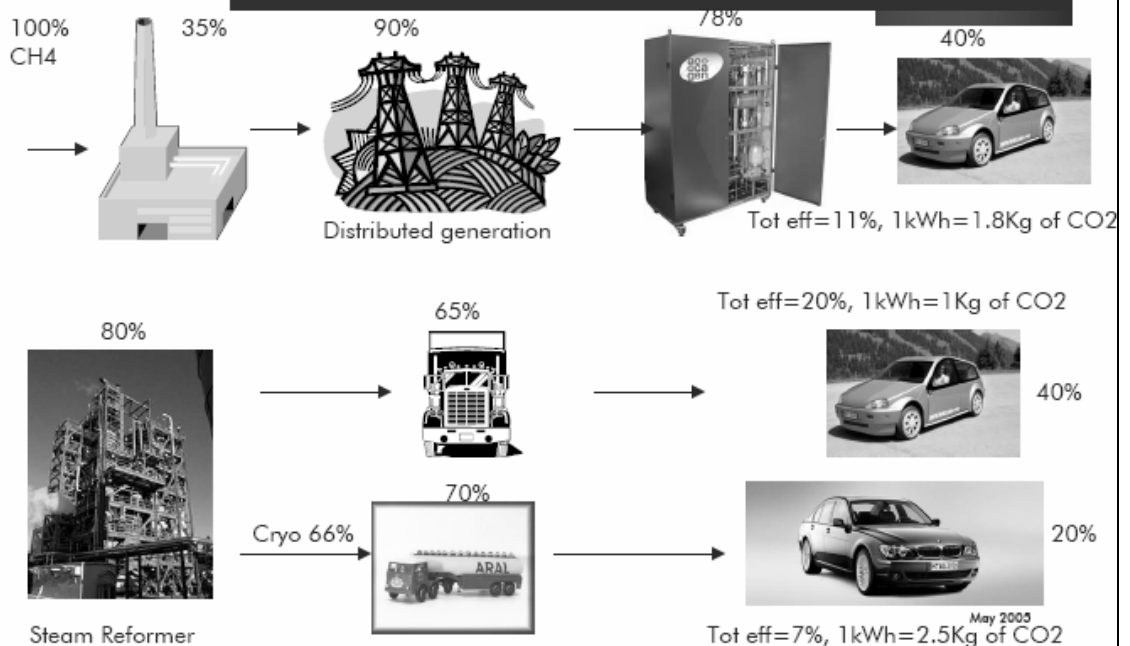
- Heat production: flame burning or catalytic burning (100% efficiency LHV)
- Electricity production: motor or turbine, low efficiency (20-35%) but existing industrial devices
- Electricity production: fuel cell (30-60%), only prototype available

Because of low efficiency energy extraction from hydrogen, except for heat generation, hydrogen make sense to be used only in nice applications !!

See automotive fuel example

May 2005

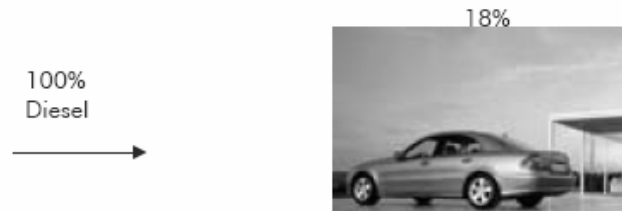
# Hydrogen as fuel today I



## Hydrogen as fuel today II



Tot eff=18%, 1kWh=1Kg of CO<sub>2</sub>



Tot eff=18%, 1kWh=4 Kg of CO<sub>2</sub>

It makes more sense to use the primary fossil energy source directly on the car !!

May 2005

## Example application I



This project is finalized to the energy production for non electrified islands starting from wind energy, which is by nature discontinuous. The wind mill produces electricity when the wind is blowing. The produced electricity is partly used directly and partly transformed in hydrogen by mean of a high pressure (55 bar) AccaGen electrolyser, which fills directly an hydrogen tank bulding the energy reservoir in case of no wind.

Hydrogen is converted back to electricity with fuel cells, is used both for cooking and heating by catalitic burning in houses and is used as fuel for hydrogen vehicles. The plant is located in the Shetland Islands (UNST) and will be officially opened on the 22<sup>nd</sup> of May 2005.

The innovation of this project is that the produced hydrogen is significantly less expensive than any other energy source (kerosene) available on the island.

May 2005

## Example application II



This project is finalized to the home fuel production starting from solar energy. The system is localized in Fribourg (CH) by Michelin. Photovoltaic energy is converted to hydrogen with an AccaGen 30 bar electrolyser, which is further compressed by gas booster to 350 bar to fill the car tank.

The fuel produced with this system (without taxes) costs 30 times more than gasoline at the refilling station (incl. Taxes) or 150 times taxes excluded.

May 2005

## Conclusion I



- Hydrogen gas is not available on earth and must be extracted by other compounds by using energy. Therefore it is only an energy carrier and not a source.
- If the primary energy source is not clean (as is the case for over 99% of the world energy) then the hydrogen produced is also non clean
- CO<sub>2</sub> sequestration is more a dream than a reality, so non clean energy remains non clean!!
- The replacement of non clean energy sources with clean ones will require huge investments and probably much more than 50 years
- Hydrogen as energy carrier, for the reasons above, will stay at prototype level in automotive applications upto clean hydrogen will be available abundantly. I fear 50 years are not enough!

May 2005



## Conclusion II



- Hydrogen as energy carrier is gaining importance as energy buffer for discontinuous sources like renewables, especially for off grid applications
- Hydrogen as energy carrier can be used to optimize the grid electrical energy cyclus day/night used as daily buffer.
- Hydrogen as energy carrier finds already today nice applications, where it is economically more effective compared to classical energy source (see example)
- Among synthetic fuels hydrogen is the most reasonable in terms of efficiency.
- Clean hydrogen is today produced by water electrolysis using renewable energy sources. This production method seem to be confirmed for the future as well. That's why AccaGen is here supported by AET.
- The primary market for hydrogen, clean or not, will remain for many more years the industrial market using hydrogen as chemical element.

May 2005



## Hydrogen Energy: Can We Help? An Industrial Perspective

Laurent Allidières  
Air Liquide  
Division des Techniques Avancées  
Rue de Clémencière, BP 15  
F - 38360 Sassenage  
email : [laurent.allidieres@airliquide.com](mailto:laurent.allidieres@airliquide.com)



Hydrogen Energy: Can We Help?

An Industrial Perspective.

May 13<sup>th</sup> 2005

Division des Techniques Avancées  
BP 15


F-38360 SASSENAGE - France

Phone : + 33 (0) 4 76 43 64 94

Fax : + 33 (0) 4 76 43 60 95

Contact : [laurent.allidieres@airliquide.com](mailto:laurent.allidieres@airliquide.com)

Visit our website : [www.dta.airliquide.com](http://www.dta.airliquide.com)


 AIR LIQUIDE

## Hydrogen Energy: can we help?

⇒ ■ Air Liquide in Brief ...

- Hydrogen Energy. Why ?
- Tomorrow's Dream
- Air Liquide's Approach to Fuel Cells
- What Do We Need?


CUEPE – Geneva – 13<sup>th</sup> May 2005 The world leader in industrial and medical gases **2**

 AIR LIQUIDE

## Air Liquide in brief ...


- **9,4 billion euro sales in 2004**  
(80% outside France)
- Over **35.000 employees**
- Serving more than **1 million customers ...**
- ... in more than **65 countries**
- **8 R&D centers** (US, Germany, France, Japan)
- **6 Engineering Centers** (US, Canada, France, Germany, China, India, Japan)
- **350.000 shareholders**




**World leader in  
industrial and medical  
gases**



The world leader in industrial and medical gases **3**

## Hydrogen Production & Purification

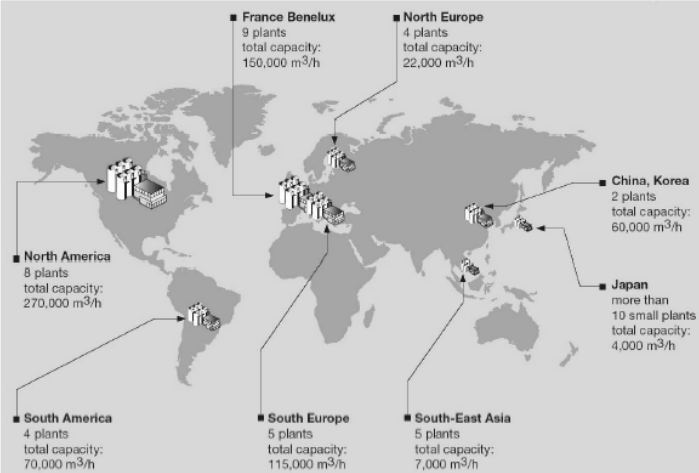


**SMR: Steam Methane Reformer**

**PSA: Pressure Swing Adsorption**

> 200 Hydrogen  
production plants




Region	Number of Plants	Total Capacity (m <sup>3</sup> /h)
North America	8	270,000
South America	4	70,000
France Benelux	9	150,000
North Europe	4	22,000
China, Korea	2	60,000
Japan	more than 10 small	4,000
South Europe	5	115,000
South-East Asia	5	7,000

CUEPE – Geneva – 13<sup>th</sup> May 2005


The world leader in industrial and medical gases 4

## Existing H<sub>2</sub> Infrastructures




Production


Distribution




**SMR**




**PSA**




**Cylinders**




**Trucks**



**Pipe-line**




**H<sub>2</sub> filling station**





CUEPE – Geneva – 13<sup>th</sup> May 2005

The world leader in industrial and medical gases 5

## Hydrogen Distribution





### Cylinders



200 bars, 9 m<sup>3</sup> GH<sub>2</sub>  
 Hundred of thousands  
 cylinders

### Trucks - Trailers

**Cryogenic tanks:**  
 -253°C 40,000 m<sup>3</sup> GH<sub>2</sub>  
**Tube trailer:**  
 200 bar 2,500 to 6,600 m<sup>3</sup> GH<sub>2</sub>  
 > 1000 trucks

### Pipeline


12 networks worldwide  
 > 1200 km of pipelines

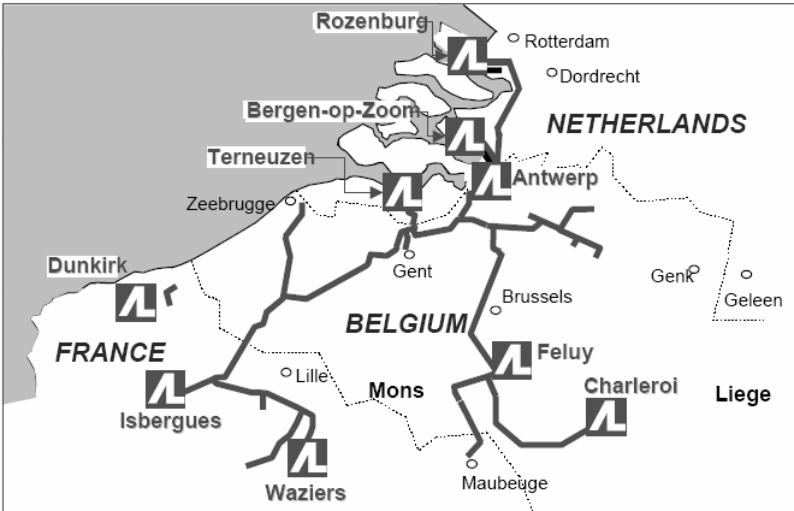
CUEPE – Geneva – 13<sup>th</sup> May 2005

The world leader in industrial and medical gases



6

## Hydrogen network





**Benelux:**  
 The largest  
 H<sub>2</sub> network  
 in the world

 Hydrogen plant  
 Pipeline

**12 H<sub>2</sub> network worldwide:**


Benelux	Germany
Texas	South Korea
Louisiana	Thailand
France (x3)	Indonesia



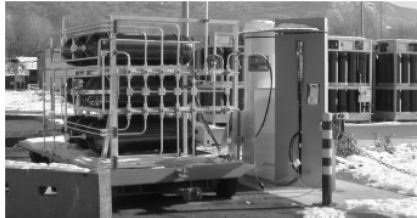

CUEPE – Geneva – 13<sup>th</sup> May 2005


The world leader in industrial and medical gases

7

## Hydrogen Distribution









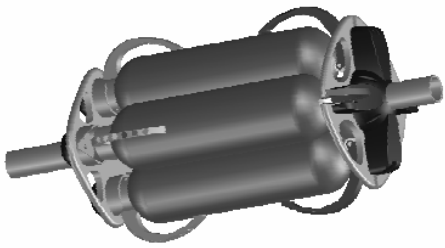


The world leader in industrial and medical gases

8


## Hydrogen Storage






↑↑ Compressed gaseous exchangeable rack ↑↑


↓↓ Conformable shape liquid hydrogen tank ↓↓






↑↑ H2 race car from BMW ... ↑↑

↓↓ ... With Air Liquide tank ↓↓



The world leader in industrial and medical gases


9



## Hydrogen Energy: can we help?

- Air Liquide in Brief ...
- ⇒ ■ Hydrogen Energy. Why ?
- Tomorrow's Dream
- Air Liquide's Approach to Fuel Cells
- What Do We Need?

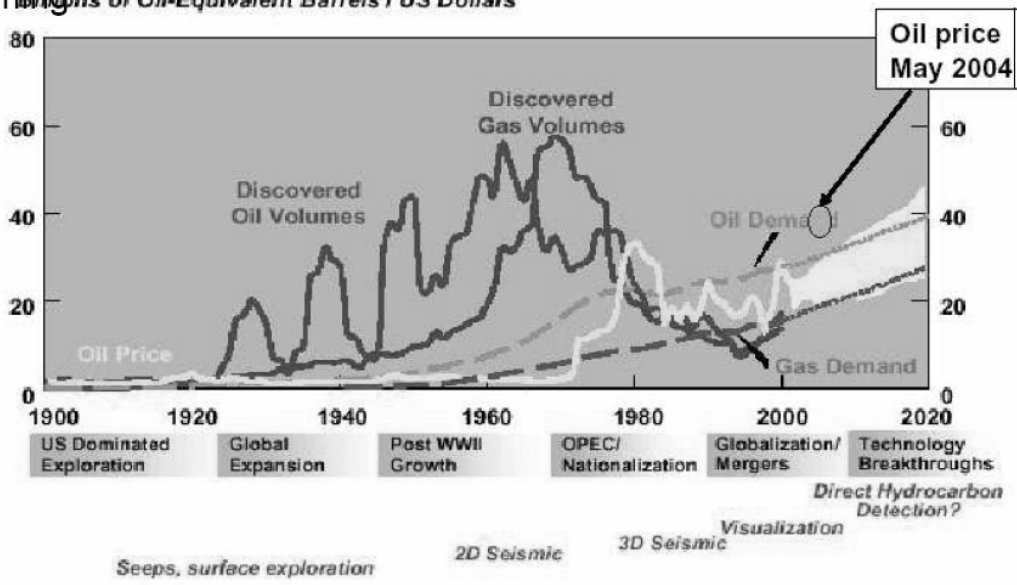
CUEPE – Geneva – 13<sup>th</sup> May 2005
The world leader in industrial and medical gases
10



## Hydrogen energy. Why ?

- still plenty of fossil fuels, mostly coal  
but the end of cheap fossil oil and natural gas is coming

**Billions of Oil-Equivalent Barrels / US Dollars**




The graph plots five variables over time from 1900 to 2020. The left y-axis represents 'Billions of Oil-Equivalent Barrels' (0 to 80), and the right y-axis represents 'US Dollars' (0 to 60). The x-axis shows years from 1900 to 2020. The 'Oil Price' line (lightest) shows a sharp increase starting around 2000, peaking in May 2004. The 'Discovered Oil Volumes' line (dotted) shows a steady increase over time. The 'Discovered Gas Volumes' line (dashed) shows a similar trend but starting later. The 'Oil Demand' line (solid) shows a steady increase over time. The 'Gas Demand' line (dotted) shows a steady increase over time. Below the graph, several key events and technologies are listed: 'US Dominated Exploration' (1900-1920), 'Global Expansion' (1920-1940), 'Post WWII Growth' (1940-1960), 'OPEC/ Nationalization' (1960-1980), 'Globalization/ Mergers' (1980-2000), and 'Technology Breakthroughs' (2000-2020). Specific technologies mentioned include 'Seeps, surface exploration', '2D Seismic', '3D Seismic', 'Visualization', and 'Direct Hydrocarbon Detection?'.

Source: The Future of the Oil & Gas Industry: Past Approaches/new challenges, Harry J. Longwell, 7.5.2002

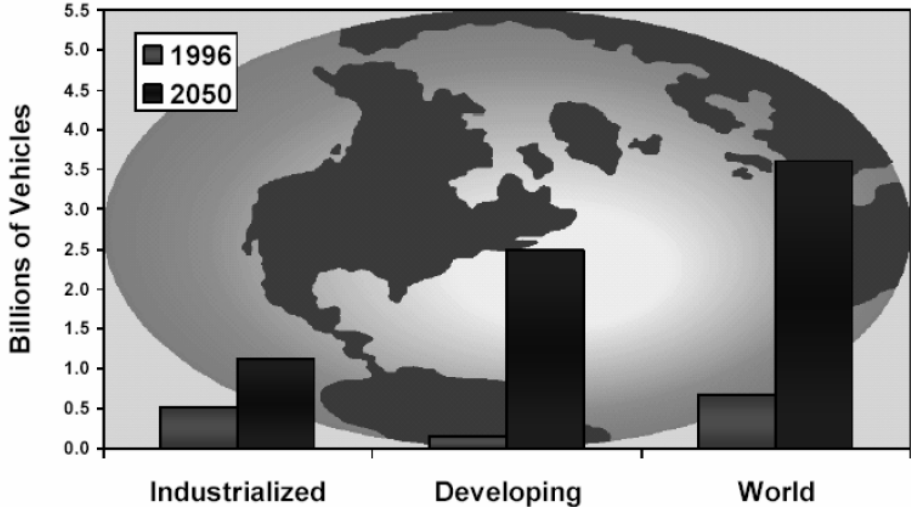
CUEPE – Geneva – 13<sup>th</sup> May 2005
The world leader in industrial and medical gases
11



## Hydrogen energy. Why ?



■ and the number of vehicles in the World is growing ...




Category	1996	2050
Industrialized	~0.5	~1.2
Developing	~0.2	~2.5
World	~0.7	~3.6

*Source: EE Analytic Team*

CUEPE – Geneva – 13<sup>th</sup> May 2005 The world leader in industrial and medical gases **12**

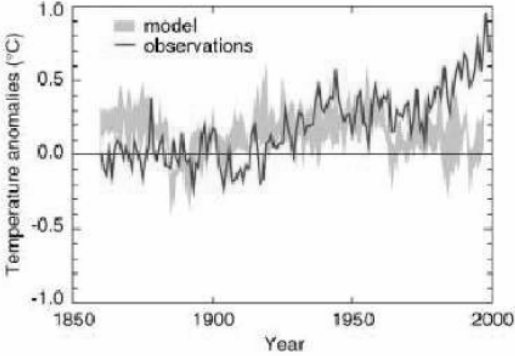
## Hydrogen energy. Why ?



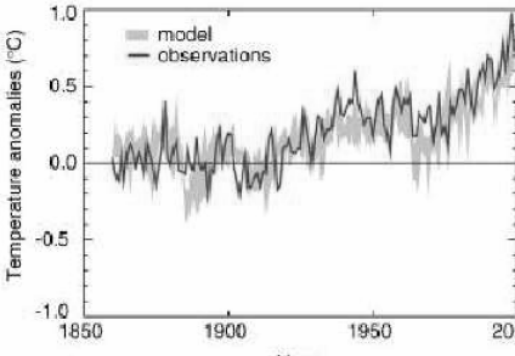
■ and Global Warming is booming due to anthropogenic Green House Gas emission ...

✓ Simulation of average earth temperature variation

**Natural only ...**

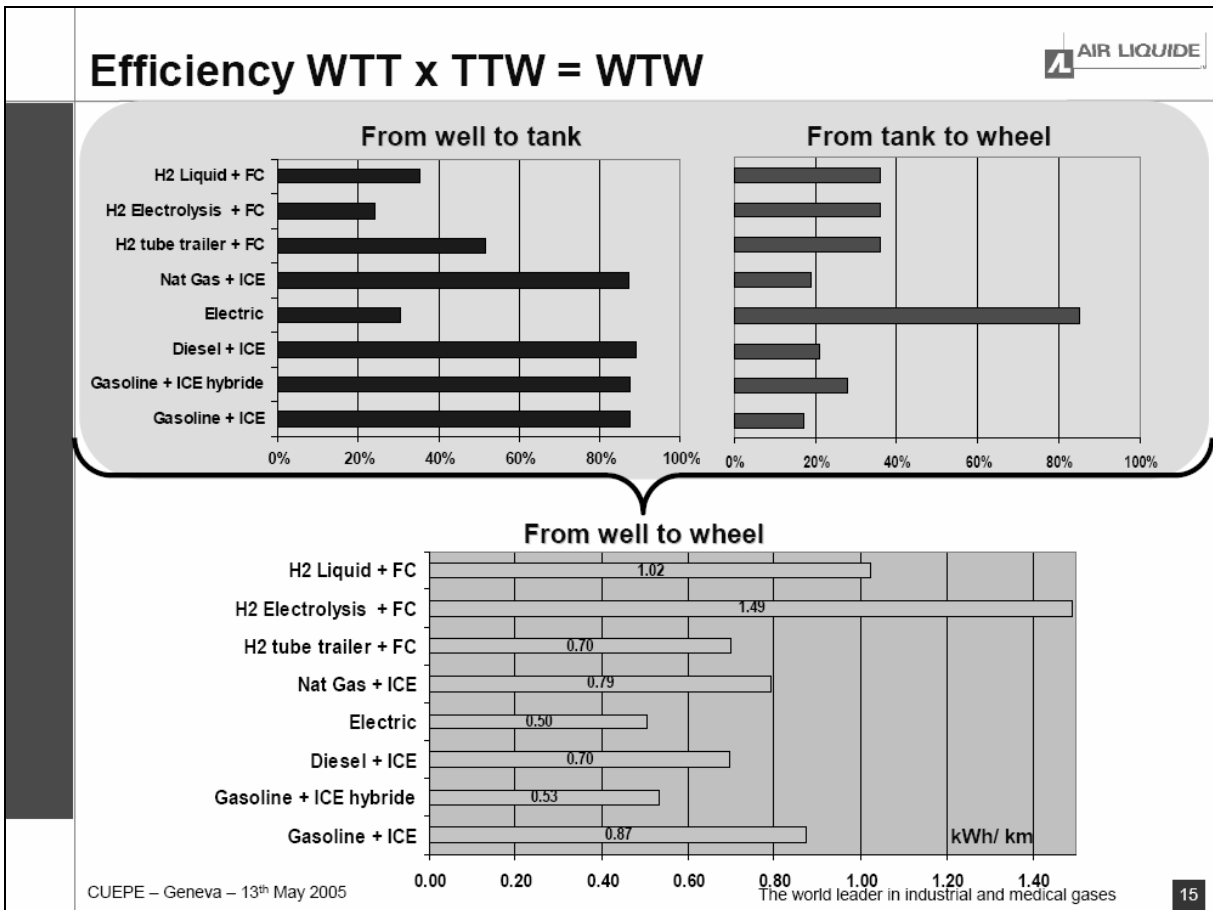
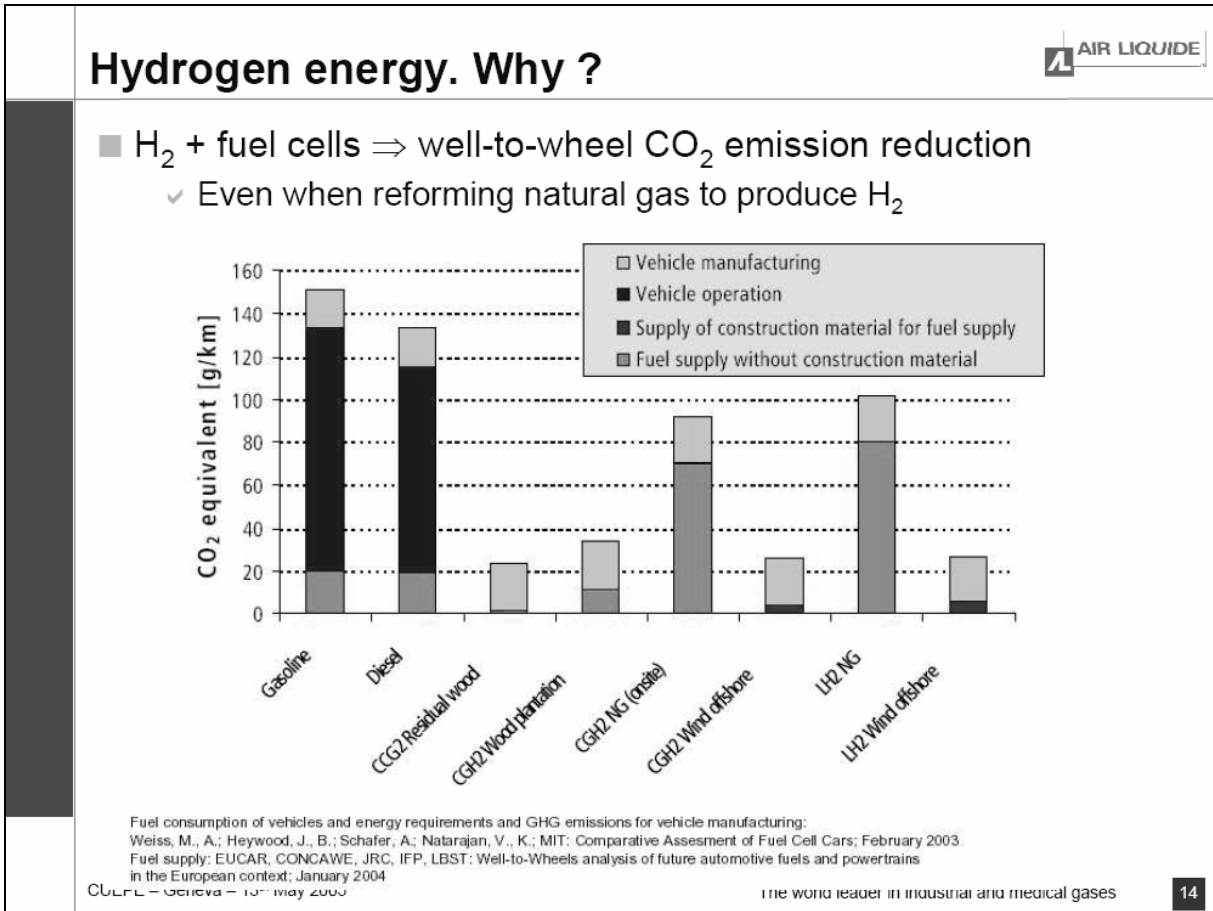


**Natural + Anthropogenic**



*Source : IPCC, Shanghai report 2001*

CUEPE – Geneva – 13<sup>th</sup> May 2005 The world leader in industrial and medical gases **13**



## Hydrogen Energy: can we help?

**AIR LIQUIDE**

- Air Liquide in Brief ...
- Hydrogen Energy. Why ?
- ⇒ ■ Tomorrow's Dream
- Air Liquide's Approach to Fuel Cells
- What Do We Need?

CUEPE – Geneva – 13<sup>th</sup> May 2005 The world leader in industrial and medical gases **16**

## Tomorrow's dream

**AIR LIQUIDE**

### Key facts

- Today: 800 M° vehicles in the world
- 1.2 kg of H<sub>2</sub> to drive 100 km
- To fuel 8 M° vehicles: 21 B°m<sup>3</sup>/years
  - Worldwide H<sub>2</sub> production: >500 B°m<sup>3</sup>/years
- Today: 135 000 gas stations in Europe
  - Conversion of 10% to H<sub>2</sub>: 10 B°€

**Automotive is the only market that can drive long term technological developments**

**But** • Horizon 2040 ++  
• How to jump start technology?

CUEPE – Geneva – 13<sup>th</sup> May 2005 The world leader in industrial and medical gases **17**



## Today's Reality Versus Tomorrow's Dream ...

**H<sub>2</sub> energy**


- Zero emission
- Alternative source
- H<sub>2</sub>: most abundant
- High efficiency

**Tomorrow's dream:**

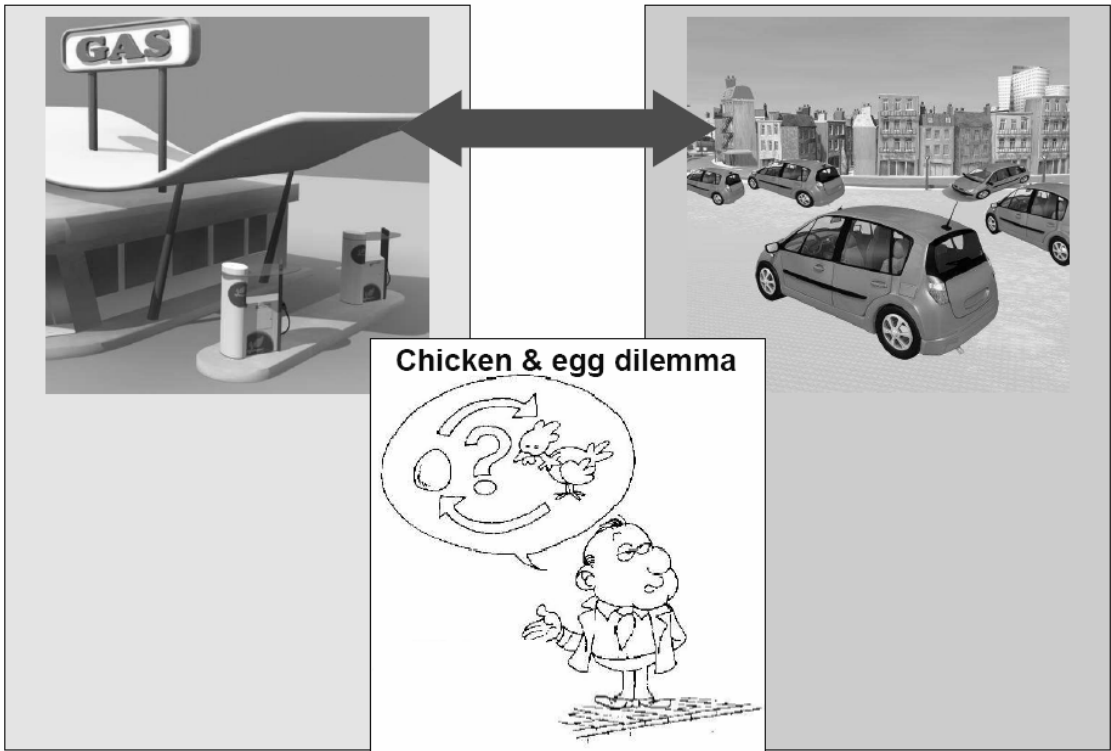
**Today's reality:**

- Developing technologies (fuel-cell)
- Limited "public" infrastructure
- Limited "carbon free" H<sub>2</sub> availability
- Safety, Public Acceptance
- Cost vs. market price


**Hydrogen energy:  
how can we help making this dream come true?**

CUEPE - Geneva - 13<sup>th</sup> May 2005 the world leader in industrial and medical gases 


## Technology development dilemma




**Chicken & egg dilemma**

CUEPE - Geneva - 13<sup>th</sup> May 2005 The world leader in industrial and medical gases 


## Our Approach






**Existing infrastructure**

Chicken & egg dilemma






**Other niche applications**

CUEPE – Geneva – 13<sup>th</sup> May 2005

The world leader in industrial and medical gases


20

## Hydrogen production



### ■ Maturity of hydrogen production technologies

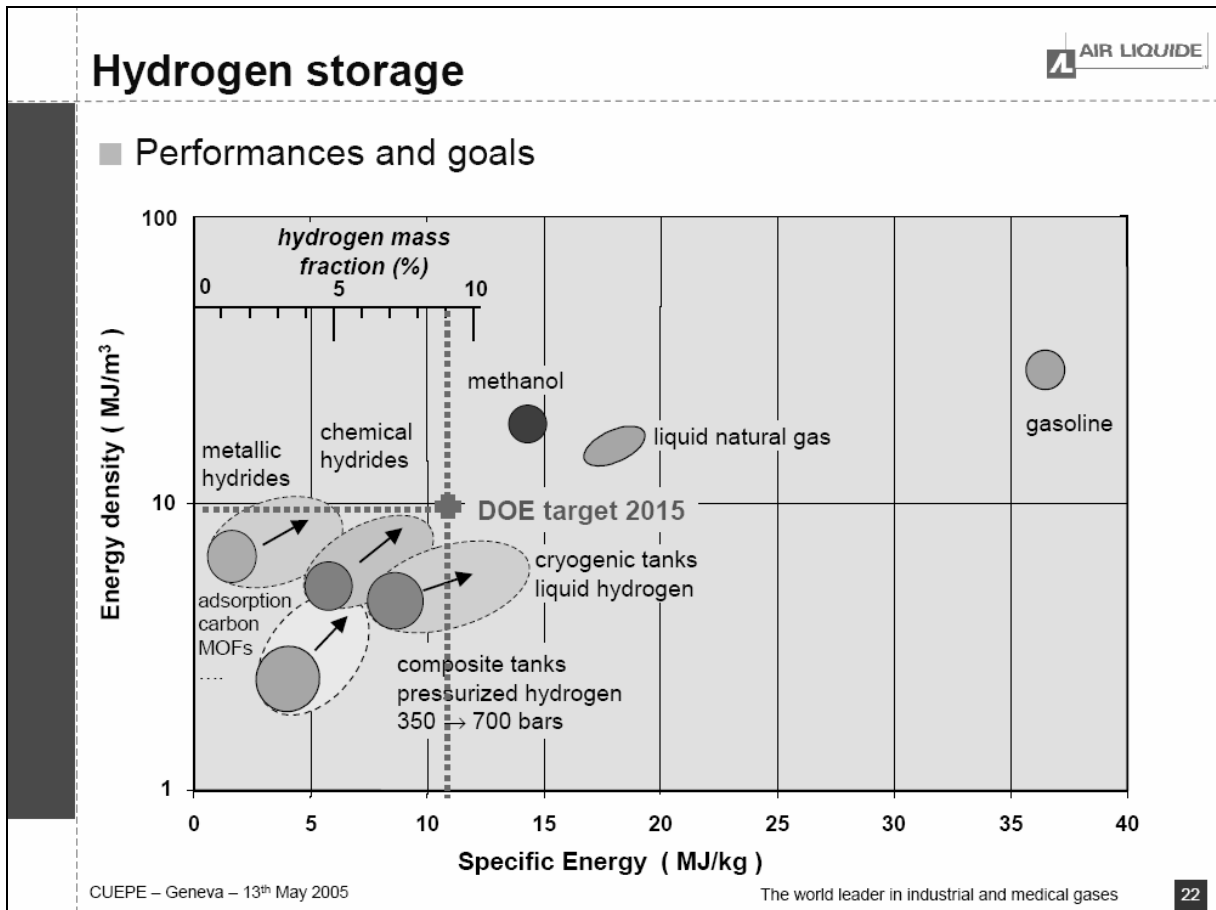
<b>Renewable</b>				Photochemical
				Thermochemical (solar)
	Biomass gaseification (with or without CO <sub>2</sub> sequestration)			
	Electrolysis from renewable energy (wind, photovoltaics)			
<b>CO<sub>2</sub> free</b>				Thermochemical (nuclear)
	Electrolysis from nuclear electricity → high temperature electrolysis			
				Electrolysis from fossil with CO <sub>2</sub> sequestration
				Reforming of fossil fuels with CO <sub>2</sub> sequestration
<b>Fossil</b>	Electrolysis from electricity derived from fossil fuels			
				Hydrogen from coal gaseification
				Hydrogen from oil reforming
				Steam methane reforming decentralized
				Steam methane reforming centralized
	SHORT TERM (2010)	MID TERM (2015)	LONG TERM (> 2025)	

adapted from 


CUEPE – Geneva – 13<sup>th</sup> May 2005

The world leader in industrial and medical gases

21



## Hydrogen Energy: can we help?



- Air Liquide in Brief ...
- Hydrogen Energy. Why ?
- Tomorrow's Dream
- ⇒ ■ Air Liquide's Approach to Fuel Cells
- What Do We Need?

CUEPE – Geneva – 13<sup>th</sup> May 2005

The world leader in industrial and medical gases

23

## Air Liquide's Approach to Fuel Cells



### ■ **axane**

- ✓ A wholly owned Air Liquide subsidiary
  - ✓ Created in May 2001
- Located in Grenoble (France) AL high tech park



CUEPE – Geneva – 13<sup>th</sup> May 2005

The world leader in industrial and medical gases

24

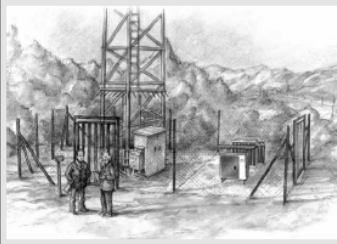
## **axane** strategy



**Stationary**



**Base load supply  
or UPS**



**Portable**



**All purpose generator  
set applications**



**Integrated on board**



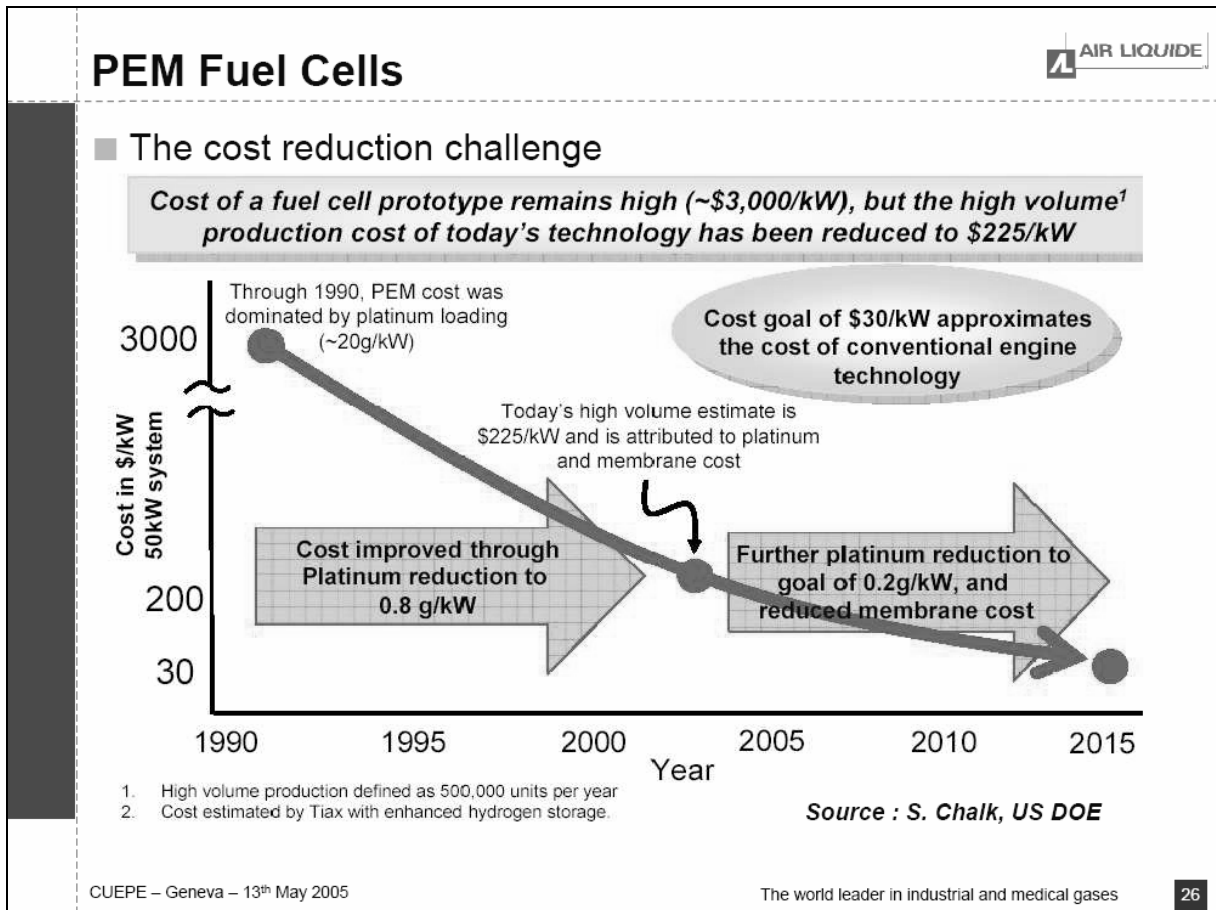
**On board system for APU  
or vehicle propulsion**




CUEPE – Geneva – 13<sup>th</sup> May 2005

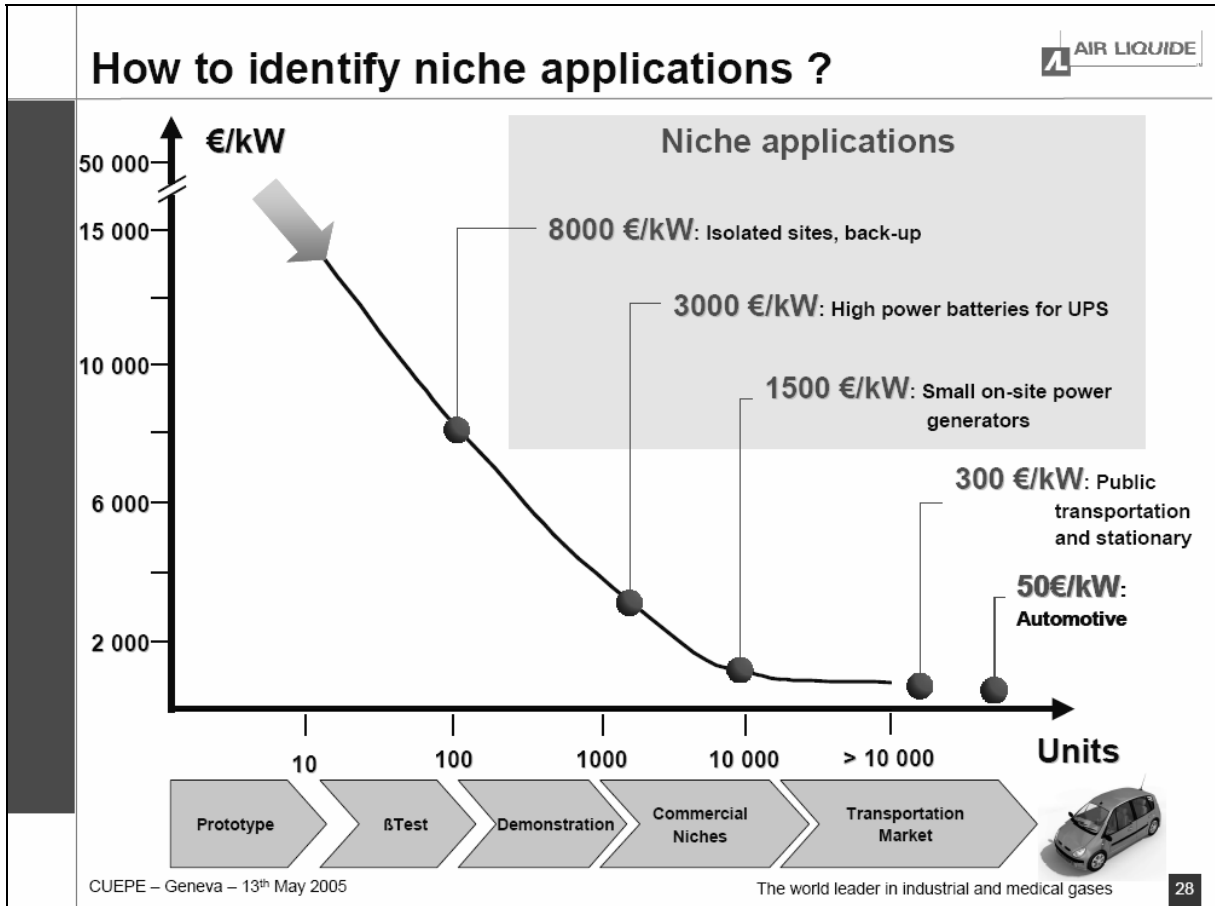
The world leader in industrial and medical gases

25





- ## Criteria for selection of niche applications
- 
- **Compatible with existing industrial H<sub>2</sub> infrastructure**
  - **Market price in line with current technology**
  - **Less stringent operating conditions than automotive market**
  - **Easier public acceptance**
- CUEPE – Geneva – 13<sup>th</sup> May 2005 The world leader in industrial and medical gases 27






## Example of niche application - 1







First commercial contract

### COMM PAC™

#### Stationary electric generator

- main power supply as based load
- emergency standby supply UPS

**Technical specifications**

- Net power 2,5 kW
- Overload capacity 5 kW for 1 second
- Noise 50 dba @ 1 m
- Weight (less fuel) 150 kg
- Dimensions 115 x 120 x 70 cm
- Operating temp. - 20°C / + 45°C

**Hydrogen feed**

- H<sub>2</sub> 99.99 %
- Pressure 0.2 bar
- Consumption 0.7 Nm<sup>3</sup>/h per kW

CUEPE – Geneva – 13<sup>th</sup> May 2005 The world leader in industrial and medical gases **29**

## Example of niche application - 2



### MOBIXANE™ Stand alone portable power generator



#### Technical specifications

- Net power 2,5 kW
- Overload capacity 5 kW for 1 second
- Noise 45 dba @ 1 m
- Weight (less fuel) 55 kg
- Dimensions 66 x 48 x 48 cm
- Operating temp. - 20°C / + 45°C

#### Hydrogen feed

- H<sub>2</sub> 99.99 %
- Pressure 0.2 bar
- Consumption 0.7 Nm<sup>3</sup>/h per kW

## Hydrogen Energy: can we help?

- Air Liquide in Brief ...
- Hydrogen Energy. Why ?
- Tomorrow's Dream
- Air Liquide's Approach to Fuel Cells
- ➔ ■ What Do We Need?


# AIR LIQUIDE

## What do we need?

### ■ Research & Development

Production	Distribution	Fuel-cell
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Improvement</li> <li>■ CO<sub>2</sub> sequestration</li> <li>■ H<sub>2</sub> alternative production</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ HP Composite packaging</li> <li>■ Advanced Liq Storage</li> <li>■ Hydrides &amp; active materials</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Improvements</li> <li>■ New PEM generation</li> </ul>

Short Term  
Long Term




... leverage and coordination


CUEPE – Geneva – 13<sup>th</sup> May 2005 The world leader in industrial and medical gases 32

# AIR LIQUIDE

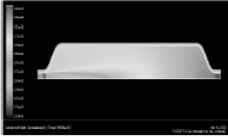
## Air Liquide H<sub>2</sub> Energy Technology Centers




New packaging




Filling stations




Storage modeling




Filling stations




H<sub>2</sub> fueled cars




Advanced storage




Fuel-cell



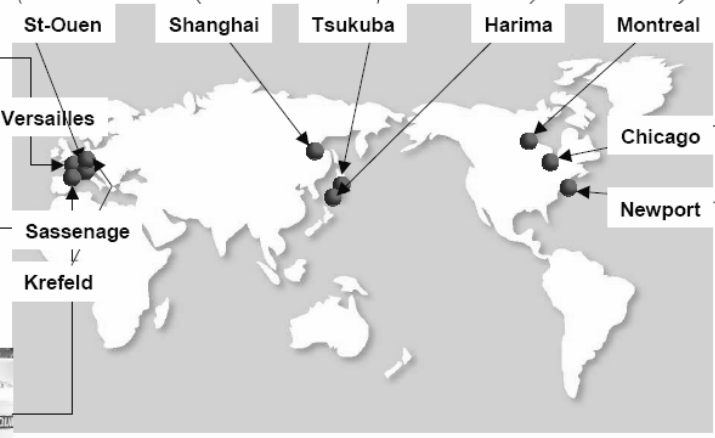
Liquid H<sub>2</sub> storage



Fuel-cell tests



Membrane

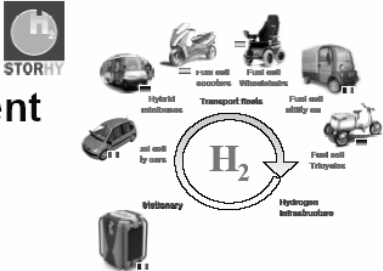
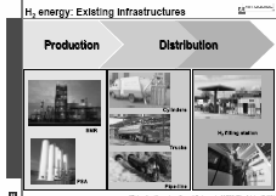



CUEPE – Geneva – 13<sup>th</sup> May 2005 The world leader in industrial and medical gases 33

**Conclusions**

**The dream can come true**

- Short term market opportunities exists
- Leverage core technologies with niche applications
- Key Issues:
  - ✓ R&D coordination & partnerships
  - ✓ Funding industrial deployment
  - ✓ Political push




CUEPE – Geneva – 13<sup>th</sup> May 2005

The world leader in industrial and medical gases

34

**Thank you**



AIR LIQUIDE

## PROGRAMME

- 9h00            Bienvenue, W. Weber, directeur du CUEPE
- 9h15            *Les innovations émergentes de l'économie de l'hydrogène : quelles nécessités et incertitudes en 2005 ?*, B. Bourgeois, Université Pierre Mendès France, Grenoble
- 10h00          *Entre énergie primaire et énergie utiles : quelques réflexions sur le vecteur hydrogène et les filières énergétiques*, P. Hollmuller, CUEPE, Université de Genève
- 10h45          Pause
- 11h15          *Stockage de l'hydrogène et risques*, J.M. Joubert, CNRS, Thiais
- 12h00          Questions
- 12h30          Repas
- 14h00          *La maison solaire énergétiquement autarcique de Fribourg en Brisgau et les conséquences pour la fourniture en énergie des résidences actuelles*, B. Sicre, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg im Brisgau
- 14h30          *Hydrogène et mobilité. Etat de l'art et contribution de la recherche en Suisse*, A. Wokaun, Paul Scherrer Institut, Villigen
- 15h00          *Hydrogen. A viable solution to all energy problems ?* P. Rossi et R. Dall'Ara, AET/AccaGen, Bellinzona/Canobbio
- 15h30          Pause
- 15h45          *Hydrngen energy : Can we help ? An industrial perspective*, L. Allidières, Air Liquide, Sassenage
- 16h15          Table ronde et discussion avec le public
- 17h00          Vin d'honneur



## LISTE DES PARTICIPANTS

ABU ALKHAIR	Ayman	CUEPE	1227 Carouge	<a href="mailto:abualkh0@etu.unige.ch">abualkh0@etu.unige.ch</a>
ACKERMANN	Georges-Pierre	TCS Section GE	1224 Chêne-Bougeries	<a href="mailto:gpack@nack.ch">gpack@nack.ch</a>
AESCHBACHER	Jacques		1292 Chambésy	
ALLIDIÈRES	Laurent	Air Liquide	F-38360 Sassenage	<a href="mailto:laurent.allidieres@airliquide.com">laurent.allidieres@airliquide.com</a>
ANDEREGG	Carla	CUEPE	1227 Carouge	<a href="mailto:carla.anderegg@cuepe.unige.ch">carla.anderegg@cuepe.unige.ch</a>
ARMENGOL	Jacques	SIG Service du gaz	1211 Genève 2	
AUDEOUD	William	CUEPE	1227 Carouge	<a href="mailto:archelectra@bluewin.ch">archelectra@bluewin.ch</a>
BALLISSAT	Olivier	FER Genève	1211 Genève 11	<a href="mailto:olivier.ballissat@fer-ge.ch">olivier.ballissat@fer-ge.ch</a>
BEAUCHAMP	Hélène	Etudiante MESNE		<a href="mailto:beauchamp2@etu.unige.ch">beauchamp2@etu.unige.ch</a>
BERTHOLET	Jean-Luc	CUEPE	1227 Carouge	<a href="mailto:jean-luc.bertholet@cuepe.unige.ch">jean-luc.bertholet@cuepe.unige.ch</a>
BIANCHI	Davide	Etudiant EPFL	6900 Lugano	<a href="mailto:dbi@hispeed.ch">dbi@hispeed.ch</a>
BOURGEOIS	Bernard	Uni P. Mendès France	F-38040 Grenoble	<a href="mailto:bernard.bourgeois@upmf-grenoble.fr">bernard.bourgeois@upmf-grenoble.fr</a>
BRUNETTI	Maura	Plasmas EPFL	1217 Meyrin	<a href="mailto:maura.brunetti@epfl.ch">maura.brunetti@epfl.ch</a>
BUERER	Meinrad	E4TECH Sàrl	1006 Lausanne	<a href="mailto:BUERER@E4TECH.COM">BUERER@E4TECH.COM</a>
CHEVRIER	Jacques		1211 Genève 3	
DALL'ARA	Roberto	AccaGen	6952 Canobbio	<a href="mailto:r.dallara@accagen.com">r.dallara@accagen.com</a>
DANLOY	Luc	Ing. retraité CERN	1217 Meyrin	
DELAGE	Patrick	Migros Genève	1227 Carouge	<a href="mailto:patrick.delage@gmge.migros.ch">patrick.delage@gmge.migros.ch</a>
ESPINOSA	Cecilia	E4TECH Sàrl	1006 Lausanne	<a href="mailto:ESPINOSA@E4TECH.COM">ESPINOSA@E4TECH.COM</a>
FAESSLER	Jérôme	Etat de Genève	1226 Thônex	<a href="mailto:jerome.faessler@etat.ge.ch">jerome.faessler@etat.ge.ch</a>
FERRAZ	Clarice	CUEPE	1227 Carouge	<a href="mailto:clarice.ferraz@cuepe.unige.ch">clarice.ferraz@cuepe.unige.ch</a>
FRIEDLI	Stéphane	SIG Service du gaz	1211 Genève 2	<a href="mailto:stephane.friedli@sig-ge.ch">stephane.friedli@sig-ge.ch</a>
GALLINELLI	Peter	CUEPE	1227 Carouge	<a href="mailto:peter.gallinelli@cuepe.unige.ch">peter.gallinelli@cuepe.unige.ch</a>
GARBELY	Myriam	CUEPE	1227 Carouge	<a href="mailto:myriam.garbely@cuepe.unige.ch">myriam.garbely@cuepe.unige.ch</a>
GENTAZ	Claude	CUEPE	1227 Carouge	<a href="mailto:transtec@bluewin.ch">transtec@bluewin.ch</a>
HAEFELI	Peter	CUEPE	1227 Carouge	<a href="mailto:peter.haefeli@cuepe.unige.ch">peter.haefeli@cuepe.unige.ch</a>
HART	David	E4TECH Sàrl	1006 Lausanne	<a href="mailto:HART@E4TECH.COM">HART@E4TECH.COM</a>
HEER	Ernst	Prof. Hon. UNIGE	1213 Onex	
HOLLMULLER	Pierre	CUEPE	1227 Carouge	<a href="mailto:pierre.hollmuller@cuepe.unige.ch">pierre.hollmuller@cuepe.unige.ch</a>
INEICHEN	Pierre	CUEPE	1227 Carouge	<a href="mailto:pierre.ineichen@cuepe.unige.ch">pierre.ineichen@cuepe.unige.ch</a>
JOUBERT	Jean-Marc	CNRS	F-94320 Thiais	<a href="mailto:jean-marc.joubert@glvt-cnrs.fr">jean-marc.joubert@glvt-cnrs.fr</a>
KOPP	Benoît	Etu. Collège Saussure	1258 Ségégnin	<a href="mailto:familiekopp@bluewin.ch">familiekopp@bluewin.ch</a>
KÜNZI-CHAO	Sofield	Etu. Int'l Studies Bsc	1213 Petit-Lancy	<a href="mailto:sofield.kunzi@bluewin.ch">sofield.kunzi@bluewin.ch</a>
LACHAL	Bernard	CUEPE	1227 Carouge	<a href="mailto:bernard.lachal@cuepe.unige.ch">bernard.lachal@cuepe.unige.ch</a>
LUBBERS	Helmut	ecoglobe.ch weblin	1205 Genève	<a href="mailto:helmut@ecoglobe.ch">helmut@ecoglobe.ch</a>
MARCOS	Luis	Etat VD, Div. Energie	1014 Lausanne	<a href="mailto:luis.marcos@seven.vd.ch">luis.marcos@seven.vd.ch</a>
MEIER	Stephan	Etudiant IAUG	1203 Genève	<a href="mailto:stephanj@gmx.ch">stephanj@gmx.ch</a>
MERMOUD	André	CUEPE	1227 Carouge	<a href="mailto:andre.mermoud@cuepe.unige.ch">andre.mermoud@cuepe.unige.ch</a>
MESHREKY	Andreia	CUEPE	1227 Carouge	
MÜLLER	Philippe	BKW Energie AG	3000 Berne	<a href="mailto:philippe.mueller@bkw-fmb.ch">philippe.mueller@bkw-fmb.ch</a>

NGUYEN	Cam Lai	CUEPE	1227 Carouge	<a href="mailto:cam-lai.nguyen@cuepe.unige.ch">cam-lai.nguyen@cuepe.unige.ch</a>
PAMPALONI	Eric	CUEPE	1227 Carouge	<a href="mailto:eric.pampaloni@cuepe.unige.ch">eric.pampaloni@cuepe.unige.ch</a>
PERRENOUD	Dylan	Etudiant CUEPE	1201 Genève	<a href="mailto:perrend1@etu.unige.ch">perrend1@etu.unige.ch</a>
QUELOZ	Barbara	Etudiante IAUG	1203 Genève	<a href="mailto:quelo8@etu.unige.ch">quelo8@etu.unige.ch</a>
RENAUD	Pierre	PLANAIR SA	2314 La Sagne	<a href="mailto:info@planair.ch">info@planair.ch</a>
ROMERIO	Franco	CUEPE	1227 Carouge	<a href="mailto:franco.romerio@cuepe.unige.ch">franco.romerio@cuepe.unige.ch</a>
ROSSI	Paolo	AET	6501 Bellinzona	<a href="mailto:paolo.rossi@aet.ch">paolo.rossi@aet.ch</a>
RUSTERHOLZ	Laure	Etudiante	1226 Thônex	<a href="mailto:laurus@telesonique.net">laurus@telesonique.net</a>
SANJURJO	Xavier	Etudiant MESNE		<a href="mailto:sanjurj0@etu.unige.ch">sanjurj0@etu.unige.ch</a>
SCHMID	Gérard	Eau Secours	1216 Cointrin	
SCHUEPBACH	Eva	Directrice IUKB	1950 Sion 4	<a href="mailto:eva.schuepbach@iukb.ch">eva.schuepbach@iukb.ch</a>
SICRE	Benôit	ISE	D-79110 Freiburg	<a href="mailto:sicre@ise.fhg.de">sicre@ise.fhg.de</a>
STROEBEL	Jérôme		1208 Genève	<a href="mailto:jerome.strobel@eip.ch">jerome.strobel@eip.ch</a>
TESNIER	Grégory	Entreprise Romande		<a href="mailto:er@fer-ge.ch">er@fer-ge.ch</a>
THOMANN	Pascal	CUEPE	1227 Carouge	<a href="mailto:pascal.thomann@cuepe.unige.ch">pascal.thomann@cuepe.unige.ch</a>
TRACHSEL	Christian	Section Urbanisme	2000 Neuchâtel	<a href="mailto:christian.trachsel@ne.ch">christian.trachsel@ne.ch</a>
TSCHOPP	Jean-Marc		1227 Carouge	
VANNAY	Christine	Etudiante CUEPE	1205 Genève	<a href="mailto:vannay2@etu.unige.ch">vannay2@etu.unige.ch</a>
VIQUERAT	Pierre-Alain	CUEPE	1227 Carouge	<a href="mailto:pierre-alain.viquerat@cuepe.unige.ch">pierre-alain.viquerat@cuepe.unige.ch</a>
WEBER	Agathe	Polar Foundation	1206 Genève	<a href="mailto:agathe.weber@bluewin.ch">agathe.weber@bluewin.ch</a>
WEBER	Willi	CUEPE	1227 Carouge	<a href="mailto:willi.weber@cuepe.unige.ch">willi.weber@cuepe.unige.ch</a>
WOKAUN	Alexander	PSI	5232 Villigen PSI	<a href="mailto:alexander.wokaun@psi.ch">alexander.wokaun@psi.ch</a>
ZGRAGGEN	Jean-Marc	CUEPE	1227 Carouge	<a href="mailto:jean-marc.zraggen@cuepe.unige.ch">jean-marc.zraggen@cuepe.unige.ch</a>