

L'hydrogène combustible du futur

Benchrifa Rachid, Zejli Driss, Bennouna Abdelaziz et Zazi Khalida

Centre National de Recherche Scientifique et Technique

Unité de Technologies et Economies des Energies Renouvelables

benchrifa@cnr.ac.ma ; <http://www.cnr.ac.ma/teer/TEER-indexe.htm>

Résumé: Abondance de la matière première pour la production, la propreté et le recyclage naturel sont les propriétés qui feront que l'hydrogène sera amené à jouer un rôle de premier plan dans le futur. L'hydrogène peut rendre le vaste gisement solaire et éolien beaucoup plus accessible. D'autres qualités (économie et fiabilité) finiront par l'imposer plus massivement grâce au progrès rapide des technologies auquel nous assistons. L'hydrogène est doté d'excellentes propriétés physico-chimiques et thermiques lui conférant la qualité de combustible universel. D'autres propriétés spécifiques à l'hydrogène sont à l'origine du développement d'une nouvelle technique de production d'électricité (piles à combustible). Dans ce papier, on se propose de présenter l'hydrogène en tant que vecteur énergétique futur. Ce vecteur peut bénéficier du savoir-faire déjà acquis dans le transport, le stockage et la distribution du gaz naturel gazeux ou liquide.

Mots clés : Hydrogène

Abstract: Abundance of the raw materials production, the cleanliness and the natural recycling are the properties that will allow the hydrogen to play a foreground role in the future. Hydrogen can make the vast solar and wind potentials more accessible. Others qualities (economy and reliability) will finish by imposing it more massively by the rapid progress of the technologies. Hydrogen is endowed with excellent physicochemical and thermal properties that confer it the quality of universal combustible. In this paper, the authors present the hydrogen as future vector of energy. This vector can profit from the acquired know-how in the transportation, storage and the distribution of the gaseous or liquid natural gas.

Key words : Hydrogen

1. Introduction

Durant l'histoire énergétique de l'humanité, la domestication de l'énergie s'est réalisée en deux grandes étapes : la première étape s'identifie avec la longue phase de l'exploitation des énergies renouvelables et surtout la biomasse. Les puissances à la disposition de l'homme pendant cette étape demeuraient très faibles, limitant ainsi son ambition et sa capacité de transformer le monde. La seconde étape a commencé à la fin du 18^{ème} siècle avec l'avènement de l'ère industrielle et elle s'est caractérisée par la dilapidation accélérée du capital énergétique fossile de la planète. Cette évolution de la consommation énergétique, mue en impérieuse nécessité, est en train de bouleverser les rythmes naturels en engendrant d'énormes problèmes écologiques.

Face à l'appropriation inconsidérée de cette ressource fossile qui a mis des dizaines de millions d'années pour s'accumuler dans les couches géologiques, et à la suite de la pollution engendrée par l'usage de ces ressources, l'humanité tout entière se trouve pour la première fois de son histoire en présence d'une série de décisions qui doivent commander son avenir. Nombreux sont les chantiers de réflexions et de décisions qu'il y aurait urgence à proposer, mais la décision la plus sage serait celle qui garantirait à l'homme de vivre en harmonie avec son milieu naturel.

Il ne peut s'agir que de remplacer progressivement les énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) et fissiles, épuisables et origines de beaucoup de pollutions, par les

énergies renouvelables, propre et inépuisables, sans toutefois compromettre le développement économique, qui devrait devenir réellement global et qui devra s'effectuer dans des conditions écologiques viables, qui permettent de le rendre aussi durable. Ainsi, ces ressources énergétiques sont appelées à devenir les principales sources d'énergie dans le monde. Le développement rapide des utilisations de l'énergie éolienne et solaire (Figure 1) et des autres dérivées de l'énergie solaire, montre que la nouvelle ère des énergies renouvelables et en phase de démarrage.

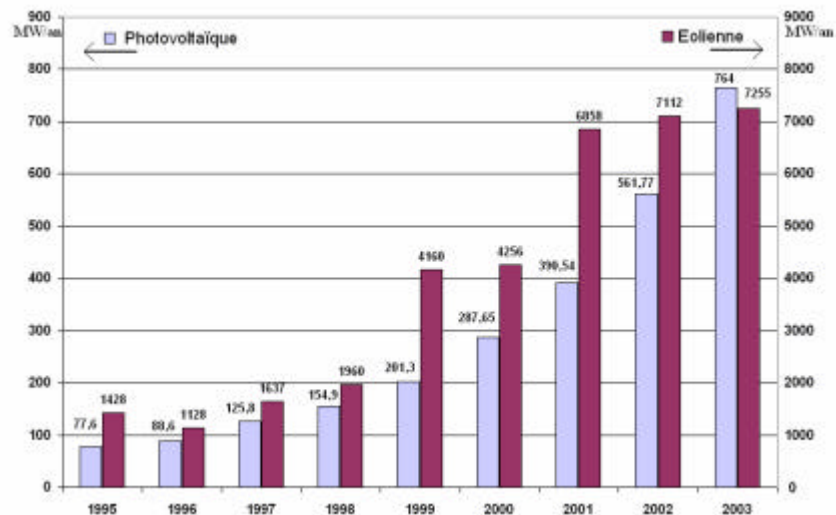


Figure 1 : Evolution de la puissance éolienne et le photovoltaïque dans le monde

Dans la figure 2, nous présentons les prévisions du European Renewable Energy Council (EREC) concernant le développement futur de la contribution des énergies renouvelables (SER) dans la production d'électricité.

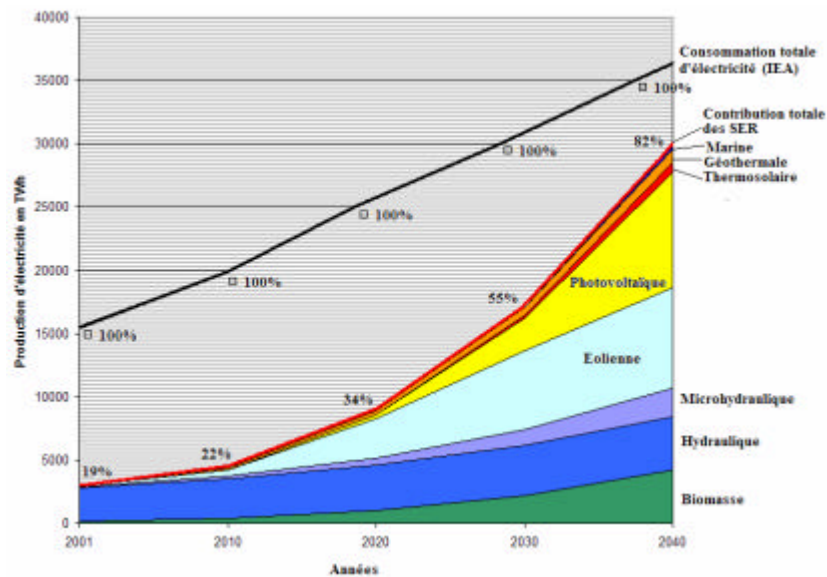


Figure 2 : les prévisions de la contribution des SER dans la production mondiale d'électricité; source : EREC

Selon la majorité des organismes de R-D, ainsi que d'un grand nombre d'industriels, l'hydrogène est le candidat numéro 1 pour le remplacement futur des réserves fossiles de l'énergie solaire. Plusieurs équipes de recherche de par le monde étudient les possibilités et les conditions pour l'installation des complexes solaires, éoliens ou hydrauliques dans le but de la production d'hydrogène.

Abondance de la matière première pour la production de l'hydrogène, propreté de son cycle à base des énergies renouvelables, sont les propriétés qui feront que l'hydrogène sera amené à jouer un rôle de premier plan durant les décennies prochaines. Les efforts déployés dans la R-D, permettront de réduire le coût de sa production et de son utilisation, et d'augmenter la fiabilité des installations de sa production, de son stockage, de son transport et de son utilisation, et finiront par l'imposer plus massivement sur le marché énergétique.

Ce vecteur d'énergie (l'hydrogène) est le seul qui peut être produit à partir du composé le plus abondant sur Terre, l'eau, en utilisant une large variété de sources d'énergies renouvelables et différentes technologies: thermochimique, photochimique ou électrolytique. Ce vecteur d'énergie est susceptible d'être utilisé avec des dommages négligeables pour l'environnement suivant un cycle qui peut se répéter indéfiniment, comme l'illustre bien la figure 3.

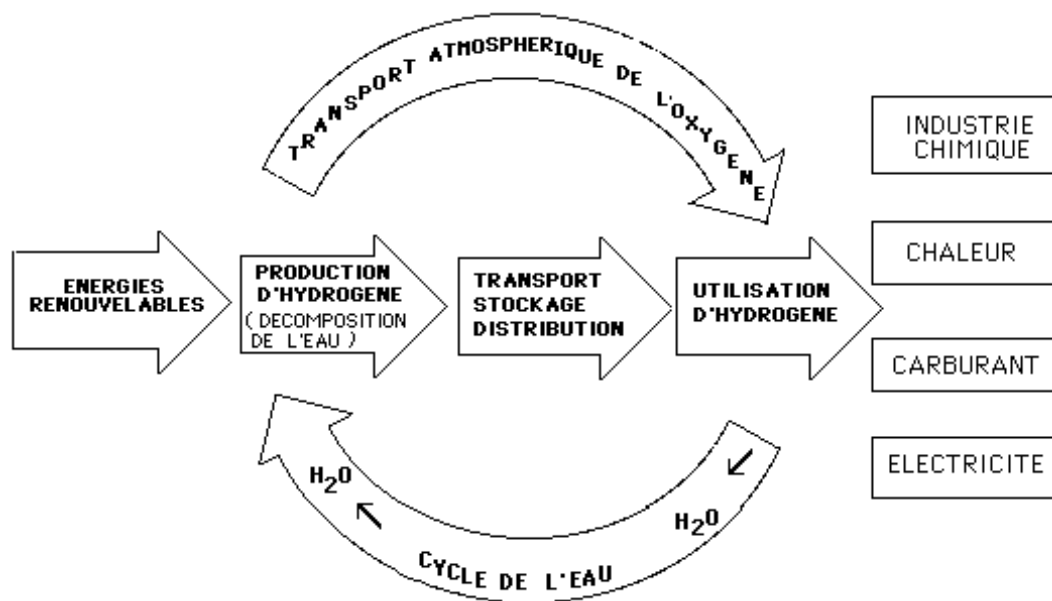


Figure 3 : Cycle d'hydrogène.

2. Les propriétés physico-chimiques de l'hydrogène

L'hydrogène, gaz inodore et incolore, est doté d'excellentes propriétés physico-chimiques lui conférant la qualité de combustible universel. Le tableau 1 donne un certain nombre de ces propriétés en les comparant avec ceux du gaz naturel. Une propriété de première importance est le pouvoir calorifique massique très élevé de l'hydrogène (142 MJ/kg), il est trois fois supérieur à celui de l'essence.

PCI (Pouvoir calorifique inférieur)	119930 kJ/kg ;
PCS (Pouvoir calorifique supérieur)	141860 kJ/kg ;
PCI (Pouvoir calorifique inférieur)	10800 kJ/Nm ³
PCS (Pouvoir calorifique supérieur)	12770 kJ/Nm ³
Densité gazeuse à 20,3 K	1,34 kg/m ³
Densité gazeuse à 273 K	0,08988 kg/Nm ³ (gaz naturel 0.6512 kg/Nm ³)
Densité liquide à 20,3 K	70,79 kg/m ³
Chaleur spécifique (Cp)	14 266 J/kg K (293 K)
Chaleur spécifique (Cv)	10 300 J/kg K
Chaleur d'évaporation	445,4 kJ/kg
Energie théorique de liquéfaction	14 112 J/g (3.92kWh/kg)
Masse atomique	1,0079
Température de solidification	14,01 K
Température d'ébullition (à 1013 mbar abs.)	20,268 K
Température d'auto inflammation dans l'air	858 K (gaz naturel 813 K)
Température de flamme dans l'air à 300 K	2 318 K (gaz naturel 2 148 K)
Limites d'inflammabilité dans l'air (vol %)	4-75 (gaz naturel 5,3-15)
Limites de détonation dans l'air (vol %)	13-65 (gaz naturel 6,3-13,5)
Energie minimale d'inflammation (J)	20 (gaz naturel 290)
Energie explosive théorique (kg de TNT/m ³)	2,02 (gaz naturel 7,03)
Suppression de détonation (mélange stœchiométrique)	14,7 bar (gaz naturel 16,8 bar)
Coefficient de diffusion dans l'air	0,61 cm/s (gaz naturel 0,16)
Vitesse de la flamme dans l'air	260 cm/s (gaz naturel 37 cm/s)
Vitesse de détonation dans l'air	2,0 km/s (gaz naturel 1,8 km/s)
Mélange stœchiométrique dans l'air (vol)	29,53% (gaz naturel 9,48%)

Tableau 1 : Caractéristiques physicochimiques de l'hydrogène naturel

L'hydrogène réagit avec l'oxygène, formant de l'eau et libérant une grande quantité de chaleur (282 kJ/mole H₂). La température de la flamme dans une combustion avec l'oxygène de l'air dépasse 2000°C, ainsi cette flamme est à peine visible à l'oeil nu. Malgré que l'hydrogène a un large domaine d'inflammabilité dans l'air, les dangers d'une auto inflammation ou d'une explosion restent très limités. Ceci résulte des faits qu'il a un très grand coefficient de diffusion dans l'air et que sa densité est la plus faible dans la nature. En effet, l'hydrogène s'échappe vers le haut et sa concentration diminue très rapidement en cas de fuite. En plus, la taille de sa molécule, qui est la plus petite, lui facilite aussi la diffusion à travers les parois métalliques et à travers les substances poreuses, ce qui présente certaines difficultés dans le choix des matériaux pour son stockage et son transport.

Les pouvoirs calorifiques volumiques de l'hydrogène liquide et gazeux sont faibles par rapport à ceux du gaz naturel et de l'essence ou du diesel. A quantités égales d'énergie, il faut prévoir un réservoir pour l'hydrogène avec un volume beaucoup plus grand, ce qui présente un certain nombre de problèmes de stockage et de transport surtout dans les voitures.

Sous conditions adéquates, la réaction de l'hydrogène avec l'oxygène peut être réalisée pour donner de la chaleur de bas niveau (combustion catalytique) ou donner essentiellement de l'électricité (les piles à combustible).

3. L'hydrogène dans la nature

L'hydrogène est l'élément le plus abondant dans la nature. Dans le tableau 2 sont présentées les compositions élémentaires de l'univers, de l'eau de mer et du corps humain. Dans tous ces cas, l'hydrogène est l'élément principal, sa part varie entre 90 % dans le cas l'univers et 63 % dans le cas du corps humain. Il représente pratiquement les deux tiers des atomes qui composent les océans. Mais, bien qu'il est abondant sur terre, il n'existe pas à l'état libre : on le trouve lié à d'autres éléments tels que l'oxygène et le carbone

Univers		Eau de mer		Corps humain	
H	90	H	66	H	63
He	9	O	33	O	25,5
O	0,1	Cl	0,33	C	9,5
C	0,06	Na	0,27	N	1,4

Tableau 2 : les compositions atomiques (en %) de l'univers.

4. Etat actuel de production et d'utilisation de l'hydrogène

Vu que l'hydrogène n'existe pas à l'état libre, il faut fournir de l'énergie pour le libérer de ses composés. L'énergie utilisée actuellement dans le monde pour produire l'hydrogène est pratiquement totalement d'origine fossile. 96% de l'hydrogène est produite par des procédés thermochimiques, 48% par reformage du gaz naturel, 30% par reformage des hydrocarbures et 18% par gazéification du charbon. Les 4% qui restent sont produites par électrolyse de l'eau (Figure 4). Dans le cas des procédés thermochimiques une partie de l'hydrogène résulte de la décomposition des ressources fossiles, le reste résulte de la décomposition de l'eau injectée dans les procédés. Le volume de la production de l'hydrogène a atteint environ 500 Milliards de Nm³ fin 2002.

L'hydrogène joue un rôle très important dans l'industrie chimique et pétrochimique (synthèse d'ammoniac, de méthanol, production de colorants, d'eau oxygénée, etc.), environ 250 milliards de Nm³, soit 50% de la demande mondiale en hydrogène, est destinée à la production de l'ammoniac, matière première importante dans l'industrie des engrais. 37% de la production d'hydrogène est utilisé dans les raffineries, 8% sont utilisés pour la production des produits chimiques et surtout du méthanol, et 4% sont utilisés en métallurgie et dans l'industrie des semi-conducteurs. Seulement le 1% qui reste est utilisé comme vecteur énergétique dans des applications aérospatiales (figure 4).

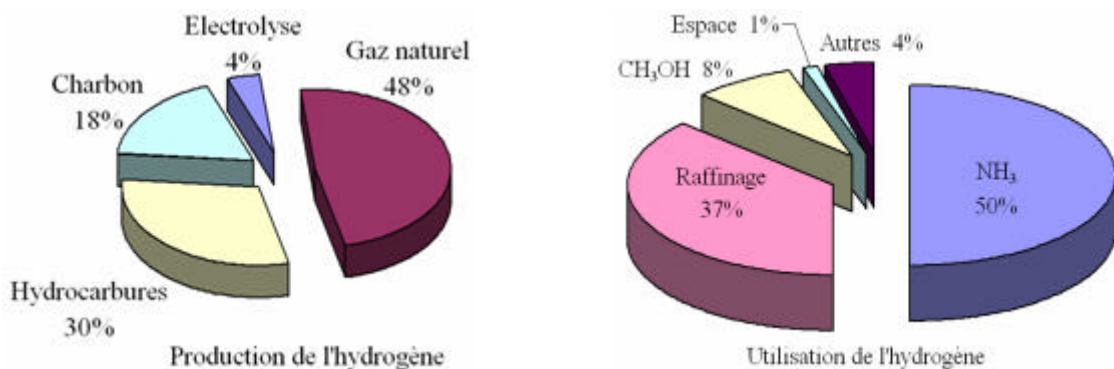


Figure 4 : Etat actuel de la production et de l'utilisation de l'hydrogène dans le monde

Le procédé de reformage du gaz naturel présente, entre les différents procédés de production de l'hydrogène, le coût le plus bas (environ 9\$US /GJ) (Figure 5). Ce coût ne représente que 37,5% du coût de sa production par électrolyse (environ 24\$US /GJ, en se basant sur le coût moyen mondial pour la production d'électricité). Pour une utilisation de l'hydrogène dans le transport, il faut ajouter au coût de production, les coûts de stockage, du transport et de distribution. Il en résulte le prix de revient à la pompe. Ce dernier varie entre 26 et 41 \$US/GJ (Figure 5).

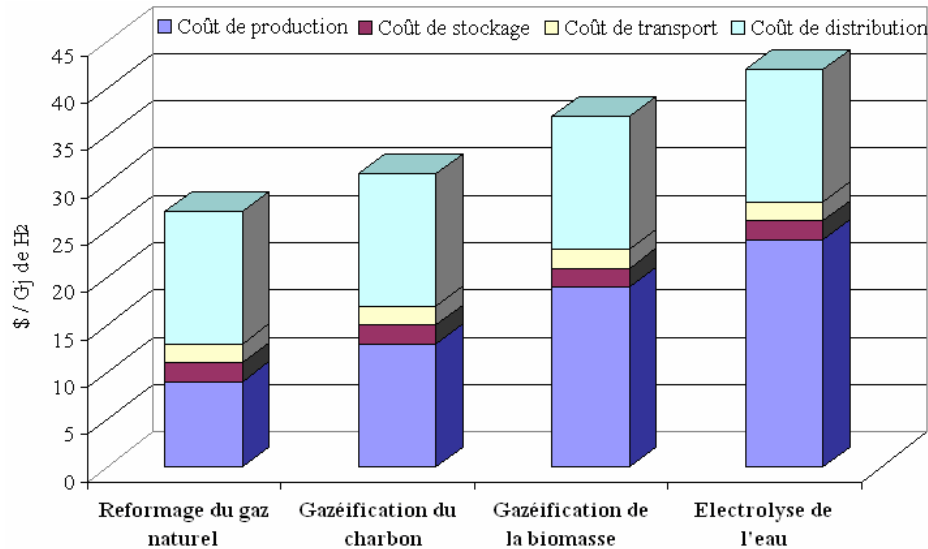


Figure 5 : Estimation des prix de revient à la pompe de l'hydrogène (IFP/Total/CEA/AFH2(2002))

5. Utilisation et production future de l'hydrogène

Comme il a été déjà souligné dans l'introduction, les ressources fossiles d'énergie sont épuisables et leur utilisation présente des grands dangers environnementaux. Le recours aux énergies renouvelables est incontournable. Mais la majorité des ressources renouvelables sont intermittentes et sont aussi des énergies qu'on peut appeler «Energie de site », ce qui veut dire que ces ressources ne sont pas transportables à volonté, et qu'elles ne peuvent être valorisées que sur le site de l'offre au moment de l'offre, ce qui est le cas pour le rayonnement solaire, le vent, les vagues, etc. La transformation de ces ressources en électricité peut pallier une bonne partie de la différence entre les lieux et les moments de l'offre et ceux de la demande, mais le recours à un support pour le stockage chimique reste incontournable. Le support le plus probable selon les scientifiques et les industriels est l'hydrogène. Cette nouvelle vocation de l'hydrogène¹ ne diminue pas l'importance de ses utilisations actuelles, mais probablement elle va les renforcer.

Vu que les sources renouvelables d'énergie et le cycle de l'hydrogène ne présentent aucun danger principal pour l'environnement², l'hydrogène offrira sûrement la possibilité de

¹ Cette vocation n'est pas nouvelle. Le stockage chimique de l'énergie solaire dans les hydrocarbures (les ressources fossiles) par la nature utilise l'hydrogène couplé au carbone.

² La production de l'hydrogène ne présente aucun danger d'impact négatif ou d'épuisement de ressources et sa consommation ne génère aucun cumul de nouveaux produits, vu que le cycle de l'hydrogène est un cycle fermé et de courte durée. Mais des dangers peuvent résulter de

résoudre les problèmes environnementaux et la dépendance vis-à-vis des carburants fossiles. Il permettrait le renforcement de l'utilisation des énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire et l'énergie éolienne, en permettant le stockage de ces énergies sous une forme chimique pour une utilisation découplée du lieu et du temps de l'offre.

Dans une perspective d'introduction de l'hydrogène comme vecteur énergétique dans le respect total des exigences du développement durable, plusieurs possibilités sont envisagées et profondément étudiées, certaines sont arrivées à maturité technologique et d'autres sont encore au stade du développement. Deux filières principales de production massive et propre de l'hydrogène à partir des énergies renouvelables (thermosolaire, énergie éolienne, conversion photovoltaïque ou biomasse) sont présentées (Figure 6).

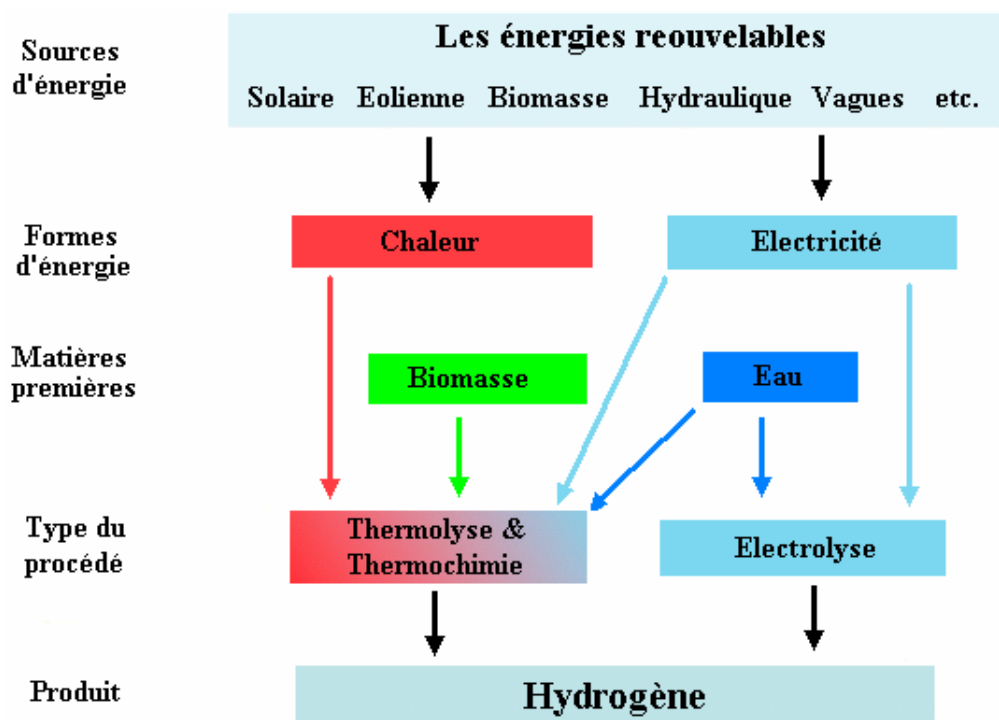


Figure 6 : Les modes de production de l'hydrogène vecteur énergétique futur

La production de l'hydrogène par thermolyse de l'eau ou par conversion thermochimique de la biomasse peut répondre à une demande limitée et locale de l'hydrogène. La voie de l'électrolyse de l'eau reste la plus prometteuse dans la mesure où cette production jouera le rôle de stockage des énergies renouvelables intermittentes. L'électricité produite en grande quantité par conversion de l'énergie solaire ou énergie éolienne et non consommée directement sur le réseau électrique, sera utilisée pour produire et stocker l'hydrogène pour l'utiliser plus tard selon le besoin.

L'énergie éolienne est actuellement en plein développement dans le monde, la puissance installée a dépassé 39000 MW fin 2003 (Figure 1). Des éoliennes, de puissance unitaire dépassant les 1,5 MW, sont proposées pour alimenter des habitations en électricité et produire de l'hydrogène par électrolyse quand la production est supérieure à la demande.

l'impact du système de gestion : technologies choisies, intensité de l'intervention de l'homme, etc.

Pour l'électricité d'origine solaire, plusieurs technologies ont des chances réelles de participer à sa production. En effet, la puissance installée chaque année des convertisseurs photovoltaïques augmente ces dernières années d'environ 30 % par an (Figure 1). Les différents concepts des centrales thermosolaires, ont déjà montrée leur fiabilité technique. La réalisation des différents projets permettra d'améliorer considérablement les performances économiques de la production d'électricité solaire.

Le prix de revient de l'hydrogène produit par les énergies renouvelables à été estimé par plusieurs études économiques. Ce coût est déterminé par le prix de revient de l'électricité, et ce dernier dépend de l'origine de l'électricité (hydraulique, Biomasse, Eolienne ou solaire). La figure 7 présente cette estimation avec une comparaison du bilan (incluant le mode de production de l'hydrogène) des émissions de CO₂ lors de l'utilisation de l'hydrogène dans le transport.

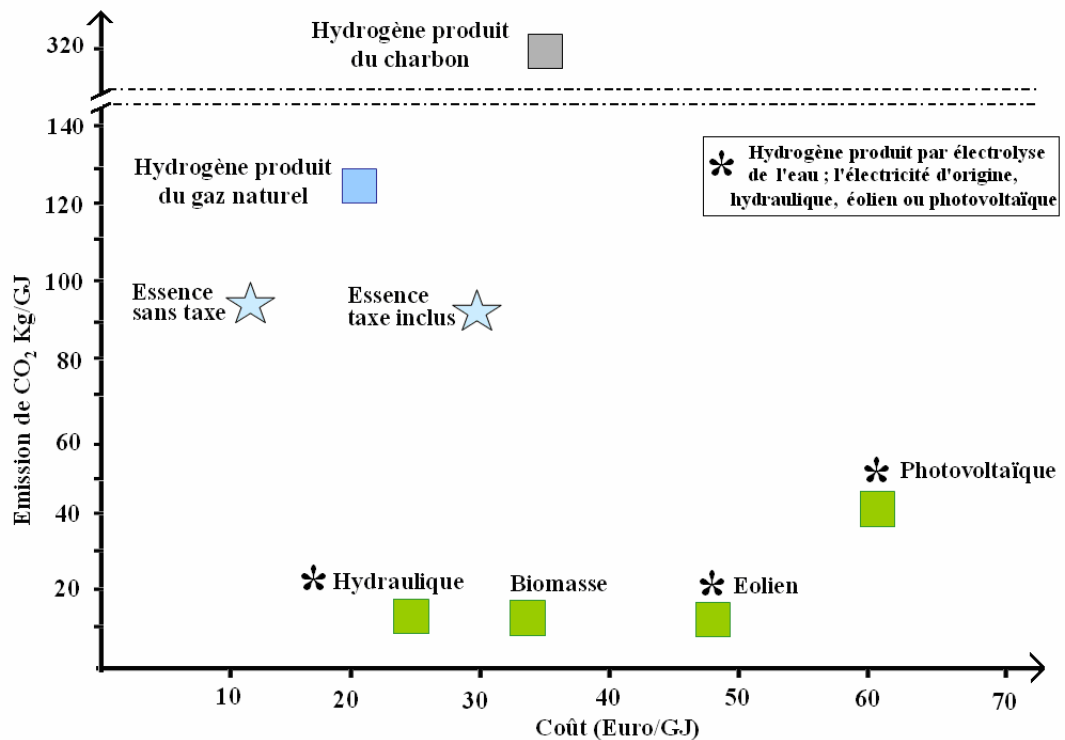


Figure 7 : Estimation du prix de revient de l'hydrogène et bilan d'émission de CO₂ en fonction des sources d'énergie

6. Transport et distribution future de l'hydrogène

Actuellement, l'hydrogène est, soit produit sur place par les industries qui en consomment en grandes quantités, soit fourni sous forme liquide dans des Dewar, ou dans des citernes pour des besoins moins importants. Le transport de l'hydrogène gazeux en bouteilles sous pression est limité au besoin essentiellement des laboratoires.

Le transport d'hydrogène que les complexes solaires, éoliens ou hydroélectriques auront à produire dans le futur, serait assuré par des pipelines qui conviennent le mieux pour le transport des grandes quantités des gaz sur les courtes, moyennes et longues distances. Il

existe déjà de nombreux réseaux de pipelines aux Etats-Unis et en Europe. Ces pipelines assurent le transport de l'hydrogène sur des distances de quelques centaines de kilomètres : 700 km au USA et 1500 kilomètres en Europe. La figure 8 présente un exemple de réseau hydrogène dans le nord ouest de l'Europe.

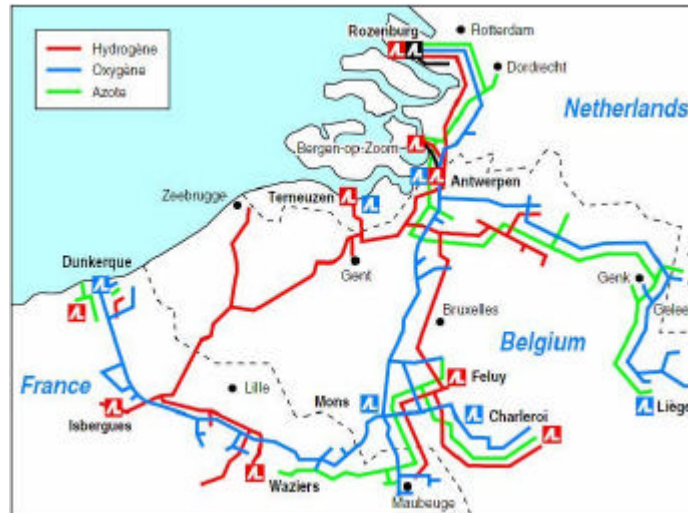


Figure 8 : Exemple de réseau hydrogène dans le nord de l'Europe

7. Le stockage de l'hydrogène

Dans la perspective de l'utilisation de l'hydrogène à grande échelle, il sera donc nécessaire de mettre au point des systèmes de stockage sûrs et performants. Cela a poussé plusieurs équipes de recherche à se pencher sur la question.

Le stockage en poste fixe ne pose pas plus de problèmes que celui du gaz naturel. Cependant, vu la faible densité énergétique volumique de l'hydrogène; le stockage d'une quantité avec un grand contenu énergétique nécessite l'utilisation soit des systèmes de stockage avec des volumes très importants, soit de fortes pressions, ce qui augmente d'autant, le poids du réservoir. Un des avantages est la faible consommation d'énergie pour la compression par rapport à celle de la liquéfaction. Le stockage sous forme liquide a actuellement le coût le plus élevé. La liquéfaction de l'hydrogène consomme l'équivalent d'environ 40% du contenu énergétique du gaz liquéfié.

Le stockage de l'hydrogène adsorbé sous forme moléculaire dans des microbilles et le stockage de l'hydrogène absorbé sous forme d'hydrure métallique, où la réaction d'absorption et de désorption de l'hydrogène avec les métaux est réversible, sont aussi envisagés. Dans les deux cas, le stockage ne dépend que de la pression de l'hydrogène et de la température du système de stockage. Ces deux derniers modes de stockage présentent de nombreux avantages de sécurité ; le support est stable et non inflammable ; les risques d'incendie sont considérablement réduits. La figure 9 présente une voiture BMW 745i dans une station pilote de distribution de l'hydrogène liquide et le réservoir de stockage de l'hydrogène liquide utilisé dans cette voiture.



Figure 9 : Stockage de l'hydrogène sous forme liquide pour le transport en voiture

Des programmes de recherche sont aussi établis pour développer le stockage dans le charbon actif, nano fibres et nano tubes en carbone. Le stockage dans ces cas se fait par adsorption. Les modes de stockage dans les nano fibres et les nano tubes en carbone semblent beaucoup plus efficaces.

8. Champ d'application de l'hydrogène

Outre son utilisation depuis longtemps comme élément de base dans l'industrie pétrochimique et essentiellement dans le raffinage et dans l'industrie chimique (particulièrement la synthèse de l'ammoniac), l'hydrogène peut être parfaitement utilisé dans le futur comme vecteur énergétique, afin de répondre à la grande demande en énergie propre. Il est actuellement le carburant principal des fusées, dont le secteur est en pleine expansion. Afin d'élargir la gamme d'utilisation énergétique de ce nouveau vecteur, plusieurs modes sont actuellement envisagés, soit fournir la chaleur par combustion vive ou catalytique, soit produire de l'électricité directement par les piles à combustible.

L'utilisation de l'hydrogène pour alimenter les piles à combustible dans le transport se confronte à des contraintes sévères de volume et de coût de stockage de l'hydrogène. Toutefois la liquéfaction de l'hydrogène constitue une opération très coûteuse en énergie, elle nécessite environ 40% de l'énergie contenue dans le gaz d'hydrogène. L'utilisation de l'hydrogène comprimé jusqu'à 700 bars peut assurer une autonomie avec un volume acceptable.



Figure 10 : Les contraintes de volume pour des applications dans le transport

Les autres modes de stockage, l'absorption dans les hydrures métalliques et l'adsorption dans des nano tubes de carbone sont des dispositifs trop lourds. La figure 10 montre les contraintes de volumes pour les différents modes de stockage de l'hydrogène lors des applications dans le transport.

9. Technologies de l'hydrogène

Si les techniques de production, du stockage et du transport d'hydrogène ont depuis longtemps fait l'objet de plusieurs travaux de recherche pour des applications industrielles, les recherches en ce domaine se sont intensifiées à partir des années 70 en vue d'une utilisation future de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique.

Ainsi, le savoir faire s'est enrichi et on assiste ces dernières années à la naissance de plusieurs projets de démonstration, tant dans le domaine de la technologie d'hydrogène (production, transport et stockage) que dans le domaine de son utilisation comme vecteur d'énergie. Le tableau 3 présente les différentes technologies qui sont appelées à jouer leurs rôles primordiaux dans l'introduction de l'hydrogène comme vecteur énergétique dans l'économie mondiale.

Production de l'hydrogène	Reformage du méthanol Gazéification du charbon Gazéification de la biomasse Pyrolyse de la biomasse Electrolyse de l'eau
Stockage de l'hydrogène	Compression du gaz Liquéfaction du gaz Hydruure métallique Hydruure chimique
Transport de l'hydrogène	Canalisations (Pipelines) Transport dans des réservoirs Transport maritime du gaz Transport ferroviaire du gaz
Production de puissance	Alkaline Fuel Cell (AFC) Poly mer Exchange Membran Fuel Cell (PEMFC) Direct Methanol Fuel Cell (DMFC) Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC) Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC) Solid Oxid Fuel Cell (SOFC) Turbine à gaz Moteur à combustion interne
Application dans le transport	Véhicule à hydrogène – piles à combustible Combustion de hydrogène dans des moteurs Véhicule hydruure piles à combustible moteur

Tableau 3 : Les technologies impliquées dans l'introduction de l'hydrogène comme vecteur énergétique dans le système énergétique futur.

10. Références :

R. Benchrifa, D. Zejli et A. Bennouna ; Hydrogène solaire : Vecteur d'énergie de l'avenir ; L'ESPACE MAROCAINE, Magazine Scientifique pour une Nouvelle Dynamique, n°5, pp 42 – 45 1992.

A. Bennouna ; Vers un Maroc Exportateur d'Énergie ; Ouvrage publié en 1994 en langue Arabe.

Énergie matière première : L'hydrogène comme vecteur énergétique : concurrence ou complémentarité avec les combustibles fossiles ; n° 20 ; pp 9 – 16 ; 2^{ème} trimestre 2002.

Sites internet

<http://www.zsw-bw.de/> : ZSW (Zentrum fuer Solarenergie- und Wasserstoff-Forschung)

<http://www.nrel.gov/> : National Renewable Energy Laboratory

<http://www.nfrcr.uci.edu/> : National Fuel Cell Research Center

<http://irh.uqtr.ca/> : Hydrogen Research Institute (Canada)

<http://www.hydrogenus.com/> : National Hydrogen Association (US)

<http://www.afh2.org/> : Association Française de l'hydrogène

<http://www.eintoday.com/> : Fuel Cell Today

<http://www.annso.freesurf.fr/> : fuel cell 2002