



**PRODUCTION D'HYDROGENE PAR DISSOCIATION DE L'EAU  
A PARTIR D'UN REACTEUR NUCLEAIRE**

*Sommaire*

*I – Introduction*

*II – Les réacteurs nucléaires*

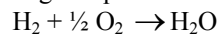
*III – L'électrolyse*

*IV - Les cycles thermochimiques*

*V - Conclusion*

**I Introduction**

La puissance énergétique de l'hydrogène qui est libérée lors de la réaction



s'exprime en terme de pouvoir calorifique supérieur (PCS) qui inclut l'énergie contenue dans la vapeur d'eau produite. Suivant la fiche n° 2.3 du présent Mémento, le PCS = 141 860 kJ/kg  $\Leftrightarrow$  286 kJ/mole. Cette valeur correspond en fait à l'énergie de liaison des molécules d'eau et donc à l'énergie minimale qu'il est nécessaire d'apporter pour la production d'hydrogène par dissociation de l'eau prise à l'état liquide.

Il est théoriquement envisageable d'effectuer une décomposition directe de l'eau par apport d'énergie sous la seule forme thermique. Cependant la réaction n'est réellement irréversible qu'au dessus de 3000 K (à une température que nous appellerons température de décomposition directe  $T_{dc}$ ), ce qui la rend difficilement envisageable au niveau industriel, tant au niveau de la source de chaleur nécessaire qu'à celui des matériaux compatibles avec de telles températures.

Il est aussi possible d'effectuer cette décomposition à une température moins élevée mais dans ce cas, il est indispensable que l'énergie nécessaire, représentée par une variation d'enthalpie ( $\Delta H$ ), ne soit pas apportée sous la seule forme thermique (exprimée par le produit de la température absolue (T) et de la variation d'entropie ( $\Delta S$ )), mais aussi sous une forme plus noble (électrique ou mécanique) décrite par la variation ( $\Delta G$ ) d'une autre quantité : l'enthalpie libre, appelée aussi *Gibbs energy* dans les ouvrages de langue anglaise. Toutes ces quantités sont reliées entre elles par la relation :

$$\Delta H = \Delta G + T \times \Delta S$$

L'efficacité d'un système de production d'hydrogène peut être estimée en terme de rendement. En effet, considérons un système dans lequel est introduite de l'eau, à une température ambiante  $T_a$  et une pression de référence P (par exemple : la pression atmosphérique) et qui produit de l'hydrogène et de l'oxygène à  $T_a$  et P. Ce système est isolé au sens thermodynamique du terme :

1. il reçoit, à partir d'une source chaude à la température  $T_c$ , une quantité de chaleur  $Q_T$  qui est injectée dans le système de production d'hydrogène sous forme d'énergie thermique Q et de travail W, lui même obtenu à partir de la source chaude avec un rendement  $\eta_r$  ( $Q_T = Q + W / \eta_r$ ) ;
2. il rejette à la température ambiante  $T_a$  une quantité de chaleur  $Q_a$ .

Il est possible d'exprimer des relations entre les variations, par rapport à un état initial ( $T_a, P$ ) de l'enthalpie  $\Delta H^0$ , de l'entropie  $\Delta S^0$ , et de l'enthalpie libre  $\Delta G^0$  [1].

Le premier principe de la thermodynamique (*principe d'équivalence*), implique que :

$$\Delta H^0(T_a) = W + Q - Q_a$$

et le deuxième principe (*principe d'irréversibilité ou aussi de Carnot*) :

$$\Delta S^0(T_a) \geq (Q/T) - (Q_a/T_a)$$

expression dans laquelle l'égalité correspondrait à la réversibilité de l'ensemble des transformations. Ces deux relations permettent d'exprimer :

$$W+Q(1- T_a / T) \geq \Delta H^0(T_a) - T_a \Delta S^0(T_a) = \Delta G^0(T_a).$$

Dans cette relation aussi, l'égalité correspondrait à la réversibilité de l'ensemble des transformations.

Il est possible de définir deux rendements :

1. Le rendement énergétique:

$$\eta_{en} = \Delta H^0(T_a) / Q_T, \quad \Delta H^0(T_a) \text{ étant égal au PCS} = 286 \text{ kJ/mole.}$$

Le principe de Carnot s'applique aussi au rendement de production du travail :

$$\eta_r \leq (1- T_a / T_c)$$

ce qui donne au rendement énergétique une borne supérieure faisant apparaître l'intérêt d'avoir une valeur élevée pour la température de source chaude :

$$\eta_{en} \leq \Delta H^0(T_a) / [Q + W / (1- T_a / T_c)]$$

2. Le rendement exergetique qui donne une mesure de l'utilisation de la forme noble de l'énergie :

$$\eta_{ex} = \Delta G^0(T_a) / [W + Q \times (1- T_a / T_c)]$$

## II Les réacteurs nucléaires

Ils présentent l'avantage de produire de la chaleur, sans émission de gaz à effet de serre. Bien qu'ils aient été jusqu'à présent presque exclusivement dédiés à la production d'électricité, ils font depuis quelques années l'objet de réflexions et de vérifications expérimentales, notamment dans le cadre du « Generation IV International Forum » [2] pour des utilisations alternatives, notamment pour la production d'hydrogène [3]. L'importance d'une valeur élevée de la température de source chaude fait apparaître la filière des réacteurs à haute température refroidis au gaz (HTR), comme la plus prometteuse des filières actuellement exploitées ou en cours de développement pour la production d'hydrogène.

Le Japon est en train d'expérimenter un HTR de 30 MW<sub>th</sub> dénommé High Temperature engineering Test Reactor (HTTR) [4]. Le combustible est de l'UO<sub>2</sub> faiblement enrichi. Au printemps 2003, la phase de démonstration à 850°C (1123 K) est achevée et celle à 950 °C (1223 K) en cours de réalisation. Dans cette gamme de températures, l'utilisation de la chaleur nucléaire pour la production d'hydrogène devient envisageable. Dans un premier temps il est possible de produire de l'hydrogène par reformage du méthane, avec une réduction d'environ 25 % de la consommation de gaz naturel, par rapport au procédé classique dans lequel la chaleur nécessaire est obtenue par combustion de gaz naturel.

Toutefois pour la production d'hydrogène, l'utilisation la plus séduisante à long terme de la haute température spécifique d'un HTR, paraît être le couplage avec une méthode de dissociation de l'eau, sans consommation d'aucune autre matière, notamment d'origine fossile.

## III L'électrolyse

### 1°) L'électrolyse haute température

Par rapport à l'électrolyse traditionnelle, dont le procédé est opérationnel, l'électrolyse à haute température (EHT) présente deux avantages :

1. La part d'énergie thermique ( $T \times \Delta S^0$ ) augmente linéairement avec la température quand la part d'enthalpie libre ( $\Delta G^0$ ) diminue ;
2. Les pertes ohmiques à l'électrolyseur, qui sont principalement liées à des phénomènes de surtension, diminuent quand la température augmente. La dépendance n'est pas linéaire, les pertes deviennent négligeables quand la température est supérieure à 700°C [5].

En pratique, à basse température, une partie non négligeable de l'énergie électrique part en dissipation ohmique au niveau des électrodes et l'énergie réellement fournie est largement supérieure aux 286 kJ/mole requis [6]. Ainsi, les valeurs d'énergie électriques nécessaires ont été estimées à :

- 405 kJ/mole à 298 K ;
- 380 kJ/mole à 400 K ;
- 193 kJ/mole à 1000 K (avec un apport d'énergie thermique de 96 kJ/mole) ;
- 165 kJ/mole à 1200 K (avec un apport d'énergie thermique de 122 kJ/mole).

Des prototypes de laboratoire ont été testés avec succès depuis les années 1975 jusqu'aux années 1990. En particulier [6] ont fait état d'un test en continu, avec conservation des performances sur plus de 3000 heures.

Les différentes structures proposées pour le développement de l'électrolyseur, s'articulent autour de deux types : la structure tubulaire qui a été tout d'abord étudiée et la structure planaire qui semble actuellement plus prometteuse. Dans les deux cas les verrous à la mise en œuvre industrielle sont les coûts d'investissement élevés et les durées de vie limitées des électrolyseurs, principalement liées à des phénomènes de corrosion au niveau des connecteurs. Toutefois l'EHT fonctionnant en réversibilité par rapport aux piles SOFC, elle devrait pouvoir bénéficier prochainement des retours d'expériences des nombreux travaux de R&D actuellement en cours sur ces SOFC. Ces travaux, combinés avec le développement d'un démonstrateur de 200 l d'H<sub>2</sub>/h [2], durant la période 2004-2008 et dans le cadre d'une collaboration CEA - Université norvégienne des sciences et technologies, devraient selon les prévisions conduire entre 2005 et 2010, à une réduction très appréciable des coûts de production de l'EHT.

L'optimisation énergétique de l'EHT nécessitera aussi l'utilisation d'échangeurs thermiques/récupérateurs, qui en utilisant l'énergie thermique contenue dans les gaz en sortie d'électrolyseur, fourniront une part appréciable de l'énergie nécessaire pour amener la vapeur d'eau à la température désirée à l'entrée de l'électrolyseur.

Pour la production d'électricité, les HTR couplés avec des turbines à gaz (cycle de Brayton) pourraient conduire à des rendements énergétiques compris entre 47 % et 50% [2]. Ces valeurs sont largement supérieures à celles des réacteurs nucléaires à eau pressurisée (REP) qui dans les meilleurs des cas ne dépassent pas 35 %.

L'EHT couplée avec un HTR, produisant à la fois l'énergie thermique et l'énergie électrique, pourrait pour la production d'hydrogène, conduire à un rendement énergétique avoisinant les 50% [5]. En comparaison, les rendements énergétiques de l'électrolyse à basse température, avec un approvisionnement en électricité à partir d'une source plus conventionnelle est largement moins favorable: pour un REP, la limite est inférieure à 25 % et pour une centrale au fuel, à 27%.

## 2°) Electrolyse conventionnelle à basse température

Elle est développée au Canada par le *Joint Institute for Energy and the Environment* [7] et en Norvège par Norsk Hydro [8]. Elle est basée sur la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau, quelque soit la méthode de production de l'électricité.

Le Canada utilise à l'heure actuelle de l'énergie électrique d'origine nucléaire, soit récupérée pendant les heures creuses, soit fournie par des réacteurs dédiés, type CANDU de 600 MW<sub>e</sub>. Pour donner un exemple, un réacteur de 600 MW<sub>e</sub> permet de produire l'hydrogène nécessaire à l'alimentation de 600 000 véhicules. Le procédé de production d'hydrogène utilisé est conventionnel, à basse température, à plus faible rendement énergétique et moindre coût d'investissement que l'EHT. Suite à des études fournies par le constructeur canadien Stuart Energy System's, le coût de l'électrolyseur serait voisin de 170 \$/kW.

## **IV Les cycles thermochimiques**

### 1. Principe et généralités

L'objectif de ces cycles est de réaliser la décomposition de l'eau à une température inférieure à celle de la décomposition directe T<sub>dc</sub>. Des substances chimiques sont introduites pour, au travers d'une série de réactions de combinaisons avec l'eau et entre elles, puis de dissociations, amener à la production d'hydrogène et d'oxygène, tout en restituant les substances chimiques initiales.

Suivant [9], l'épine dorsale de tout cycle thermochimique est une réaction endothermique à haute température : T<sub>h</sub> (largement inférieure à T<sub>dc</sub>) qui conduit par rapport à la dissociation directe de l'eau, à une augmentation importante de la variation d'enthalpie et une augmentation bien plus importante de la variation d'entropie. En pratique cela peut être réalisée en augmentant le produit (masse × capacité calorifique) des réactifs.

Cette réaction endothermique, que nous qualifierons de réaction de base, est en général accompagnée de production d'oxygène ou/et d'hydrogène. A partir d'une réaction de base il est envisageable de bâtir des cycles thermochimiques à un ou plusieurs étages (ou paliers).

- Dans un cycle idéal à deux étages, la réaction de base est complétée par une réaction exothermique au cours de laquelle les substances chimiques sont restituées dans leur état initial (pression et température) et produit l'oxygène ou/et l'hydrogène qui n'a pas été produit par la réaction de base.

- Dans un cycle réel à plusieurs étages, dans un même étage peuvent être inclus des changements d'état physique et de compositions chimiques, ainsi que les processus de séparation de phases et de composants.

Les cycles thermochimiques obéissent aux principes de la thermodynamique. Le cycle de référence de la décomposition directe de l'eau sans rejet de chaleur correspond à un rendement énergétique de 100%. Un cycle thermochimique peut être évalué par rapport à ce cycle de référence, en particulier l'augmentation de la variation d'entropie qui résulte de la réaction de base a une efficacité énergétique limitée :  $\eta_{\Delta} \leq (1 - T_a / T_h)$ .

Pour faciliter l'analyse des cycles thermochimiques complexes [10] ont élaboré une méthode permettant d'associer à tout cycle thermochimique un cycle ditherme qui lui soit équivalent. L'utilisation de cette méthode a permis de montrer l'identité de principe entre la voie thermochimique et la voie électrolytique. Elle a aussi fait ressortir l'importance des irréversibilités pour l'évaluation du bilan énergétique global. En effet, si la valeur de la haute température est suffisamment élevée, le rendement énergétique peut être théoriquement très élevé. Le calcul précis du rendement énergétique passe par la prise en compte de l'ensemble des irréversibilités attachées à chaque transformation. L'optimisation des rendements énergétique et exergétique nécessiterait l'utilisation d'échangeurs thermiques/récupérateurs comme pour l'EHT, mais aussi de turbines couplées avec des compresseurs, pour récupérer une partie de l'énergie mécanique nécessaire à la circulation des substances chimiques.

En résumé, parmi les problèmes auxquelles sont confrontés les cycles thermochimiques, on peut mentionner :

- La nécessité de faire circuler des quantités importantes de matière. L'hydrogène étant le plus léger des éléments, les substances chimiques introduites sont bien plus lourdes que l'eau et les réactions chimiques, nécessitent souvent des valeurs élevées de pression. Ceci devrait conduire à des dispositifs complexes pour récupérer une partie de l'énergie mécanique. Ces dispositifs complexes pourraient aussi conduire à des investissements importants.
- La nécessaire conservation des substances chimiques introduites, ce qui impose un haut degré de pureté et le contrôle précis des processus de séparation des phases et des constituants.
- Le caractère corrosif de nombreuses substances, renforcé par la haute température, pose un problème de tenu de matériaux qui peut être compliqué par la présence simultanée de plusieurs substances.

## 2. Le cycle thermochimique I/S

Le premier cycle thermochimique pour la production d'hydrogène a été présenté en 1964. Dans [3], il a été estimé entre 2000 et 3000, le nombre de cycles thermochimiques qui ont été envisagés depuis cette date. En fait, la perspective d'un couplage avec un HTR contraint les valeurs possibles de la haute température ( $T_h$ ) et donc limite le nombre de réactions endothermiques de base, envisageables. Dans ce contexte, la réaction de base la plus étudiée est la décomposition de l'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) qui en fait comporte trois parties : une vaporisation de l'acide (au voisinage de 880 K), puis deux sous-réactions de décomposition:

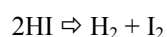
1.  $H_2SO_4 \rightarrow SO_3 + H_2O$  (à 880-930 K).
2.  $SO_3 \rightarrow SO_2 + \frac{1}{2}O_2$  (à 1000-1300 K).

La seconde sous-réaction, bien qu'à plus haute température, nécessite un apport de chaleur moindre que la première et que la vaporisation. Par ailleurs, un autre avantage de cette réaction de base est que quand la décomposition de  $SO_3$  est achevée, la quantité d'énergie nécessaire pour fermer le cycle est relativement faible. Elle a été estimée à 71 kJ/mole [9].

A partir de cette réaction endothermique de base, plusieurs cycles thermochimiques ont été proposés [3]. Le plus étudié est le cycle Iode/Soufre (I/S) initialement proposé par la General Atomic Company vers la fin des années 1970 et qui bénéficie actuellement d'un regain d'intérêt concrétisé par des programmes expérimentaux au Japon, ainsi qu'en France et aux U.S.A dans le cadre d'une collaboration entre ces deux pays [2]. Le principe est le suivant : dans une première étape, par apport d'eau d'iode et de  $SO_2$ , deux acides (HI et  $H_2SO_4$ ) sont produits



Cette réaction exothermique (dite de Bunsen) s'effectue vers 180°C. Puis HI est séparé de l'acide sulfurique et distillé vers 280°C pour donner  $I_2$  et HI qui est ensuite décomposé, vers 400°C, pour donner de l'hydrogène :



L'iode récupéré à ce stade est réinjecté dans le réacteur de Bunsen avec le SO<sub>2</sub> résultant de la décomposition de l'acide sulfurique.

Le JAERI (Japan Atomic Energy Research Institute) [4] estime que le rendement théorique du cycle I/S serait de compris entre 47% et 50 % sans co-génération et proche de 60% avec co-génération (production d'électricité) et que le coût de production de l'hydrogène par le procédé I/S serait 60% moins cher que par électrolyse de l'eau.

A noter que le cycle I/S fait l'objet d'une collaboration Franco-Américaine entre le CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique) d'une part et le DOE (Department Of Energy) d'autre part [2]. Cette collaboration prévoit la réalisation pour 2008 d'une boucle intégrée produisant 100 l d'H<sub>2</sub>/h, la construction et l'exploitation d'une boucle de démonstration de 150 m<sup>3</sup> d'H<sub>2</sub>/h, pour la période 2007 à 2011.

### 3. La filière HTGR (High Temperature Gas cooled Reactor) couplée au procédé I/S

Elle a été considérée par l'IAEA (International Atomic Energy Agency) [3], elle est étudiée par le JAERI, et dans le cadre de la collaboration Franco-Américaine entre le CEA et le DOE

#### 3.1 – Le programme japonais

Le concept actuellement étudié est basé sur un petit réacteur de 30 MWth avec une température de sortie du gaz de 850-950°C, récemment construit par le JAERI et dont le fonctionnement à pleine puissance a été atteint au début de l'année 2001. Par ailleurs le JAERI a étudié et testé (hors pile) une unité (à échelle de laboratoire, 0,001 Nm<sup>3</sup>/h) de séparation d'eau par le procédé thermochimique I/S, et teste actuellement une deuxième unité de 0,05m<sup>3</sup>/h d'hydrogène qui sera suivie par une unité de 1 Nm<sup>3</sup>/h, puis 110 Nm<sup>3</sup>/h (vers 2006). Le test d'une unité à l'échelle 1 (4000 Nm<sup>3</sup>/h) est envisagé vers 2010, le couplage au réacteur intervenant un ou deux ans plus tard.

Des travaux de perméabilité des métaux par l'hydrogène semblent avoir conduit au choix de l'Hastelloy XR.

#### 3.2 – La collaboration programme Franco-Américaine

Elle prévoit la mise en œuvre d'une expérience de démonstration avec couplage avec un HTR à partir de 2011.

### 4. Les cycles hybrides et les autres cycles thermochimiques

Un cycle hybride combine des réactions thermochimiques et électrolytiques. L'intérêt de ces cycles réside dans les perspectives de contournement partiel des difficultés inhérentes à la thermochimie et à l'électrolyse:

- en réduisant le nombre de substances chimiques, on réduit le nombre de processus de séparation des phases et des constituants et aussi les quantités de matière qu'il est nécessaire de faire circuler et donc on diminue les irréversibilités liées à l'utilisation de l'énergie mécanique. L'avantage principale de la thermochimie est préservé : le rendement énergétique dépend de la haute température de la réaction endothermique de base ;
- au niveau de l'électrolyseur, même pour des températures inférieures à 100°C, il est possible de réduire la tension électrique et donc les pertes par effet Joule. Toutefois, la substance chimique nécessairement ajoutée à l'eau, peut conduire à des problèmes de corrosion des électrodes, différents de ceux de l'EHT mais pas forcément plus faciles à surmonter.

Plusieurs cycles hybrides offrent des perspectives de rendement énergétique élevé, tous ne sont pas techniquement réalisables. Dans l'optique d'un couplage avec un HTR, [3] a présenté un certain nombre de ces cycles, beaucoup d'entre eux utilisent la décomposition de l'acide sulfurique comme réaction endothermique de base. Le plus prometteur et le plus étudié de ces cycles, est celui proposé initialement par Westinghouse, qui ne manipule que trois corps purs (H, O, S). Pour ce cycle, la répartition en besoins énergétiques ramenés à une source primaire thermique, a été estimée [11] à 61 % pour la décomposition de l'acide sulfurique et 39 % pour la part d'électrolyse. Un cycle, assez proche dans sa conception avait été étudié par le CEA, sous contrat Ispra/Euratom<sup>1</sup> de 1976 à 1979. Un ensemble d'études préliminaires avaient été conduites sur un procédé couplé de décomposition thermique (vers 800°C) sur catalyseur de l'acide sulfurique, et d'électrolyse de SO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O dégageant de l'hydrogène (procédé MARK II).

Pour les autres cycles thermochimiques, la valeur de la température de l'hélium en sortie du HTR restreint les possibilités de cycles envisageables [3]. Parmi les cycles qui n'utilisent pas la décomposition de l'acide sulfurique, le plus prometteur semble actuellement être le cycle UT3, initialement proposé par l'université de Tokyo. Il fait actuellement l'objet de nouvelles investigations, notamment au CEA [12]. En plus de l'eau, ce cycle nécessite la manipulation de brome, de calcium et de fer.

<sup>1</sup> Contrats SAV 2110 et 4264.

## V Conclusion

L'utilisation d'un ensemble réacteur nucléaire + dissociation d'H<sub>2</sub>O, produirait de l'hydrogène sans aucune émission de gaz à effet de serre. L'intérêt économique d'un tel dispositif, devrait émerger au cours des prochaines décennies. Exprimé en coût de production (en considérant le PCS et sans prendre en compte les coûts de distribution et de transport), l'objectif à atteindre a été estimé dans [13], comme devant être compris dans une fourchette de 9 à 13 €/GJ, ce qui est plus cher que le reformage du méthane, avec apport de chaleur par combustion de gaz naturel (5–10 €/GJ)<sup>2</sup> mais moins que l'électrolyse traditionnelle à basse température (18 €/GJ).

La mise en œuvre industrielle de la production massive d'hydrogène à partir d'un réacteur nucléaire, nécessitera de lever un certain nombre de verrous qui ne sont pas tous de nature technique : Sûreté (avec la prise en compte du triple risque nucléaire + hydrogène + chimique), acceptabilité du public, compatibilité avec une infrastructure de l'hydrogène dont on ne connaît pas à l'heure actuelle, la répartition centralisée/décentralisée-répartie.... Néanmoins l'accroissement considérable aux USA, au Japon et en Europe des engagements financiers pour la période 2003-2008 [14], sur la R&D dédiée aux piles à combustible et à la filière hydrogène devrait permettre de progresser de façon significative.

---

## RÉFÉRENCES

- [1] : Vidal, J. *THERMODYNAMIQUE-Application au génie chimique et à l'industrie pétrolière*, Editions TECHNIP. 1997.
- [2]: Carré, F. *Hydrogen from nuclear*, Communication présentée à la 1<sup>ière</sup> EHEC. Grenoble- Septembre 2003.
- [3] : *Hydrogen as an energy carrier and its production by nuclear power*, IAEA-TECDOC—1085. Vienna-May 1999.
- [4]: Miyamoto, Y. et al. *Research and Development Program of Hydrogen Production System with High Temperature Gas-Cooled Reactor*, In Proc. of the ICONE11 Conf. Paper n° 3639. Tokyo-April 2003.
- [5]: Rodriguez, G. et Pinteaux, T. *Studies and design of several scenarios for large production of hydrogen by coupling a high temperature reactor with steam electrolyzers*, Papier n° CO1/6, dans les proceedings de la 1<sup>ière</sup> EHEC. Grenoble-Septembre 2003.
- [6]: Doenitz, W. et al. *Hydrogen production by high temperature electrolysis of water vapour*, Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 5, N° 1, pp. 55 – 63. 1980.
- [7] : Rapport JIEE 2000-06 et [www.jiee.org](http://www.jiee.org).
- [8]: Andreassen, K. *Hydrogen Production by Electrolysis*, Hydrogen Power: Theoretical and Engineering Solutions, pp. 91-102,1998 et [www.electrolysers.com](http://www.electrolysers.com) .
- [9]: O'Keefe, D.R. Norman J.H. and Williamson, D.G. *Catalysis research in thermochemical water-splitting processes*, Catal. Rev.-Sci. Eng., Vol.22, Part 3, pp. 325-369. 1980.

---

<sup>2</sup> En fonction de l'augmentation prévisible des taxes ou droits à polluer sur les émissions de gaz à effet de serre et du prix du gaz naturel, le coût de production de l'hydrogène à partir du reformage, devrait fortement augmenter au cours des prochaines décennies.

[10]: Estève, B. Lecoanet, A. et Roncato, J.P. *Thermodynamique des cycles thermochimiques de décomposition de l'eau*, Entropie, N° 61, pp. 70-83. 1975.

[11]: Bilgen, E. and Bilgen, C. *A hybrid thermochemical hydrogen producing process based on the CRISTINA-MARK cycles*, Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 11, N° 4, pp. 241 – 256. 1986.

[12]: F. Lemort, C. Lafon, C. Girold. *Thermodynamic and Technological Assessment of the UT-3 Hydrogen Production Cycle*, Papier n° CO1/95, dans les proceedings de la 1<sup>ière</sup> EHEC. Grenoble-Septembre 2003.

[13]: *Innovative medium-long term Routes for Hydrogen Production*, Proposal Submission Forms – Integrated Project - 6<sup>th</sup> Framework Programme for Research, Technological Development and Demonstration. European Commission, 2003.

[14]: Communications invitées à la 1<sup>ière</sup> EHEC, par Robert Dixon, Ken-ichiro Ota, Phillippe Busquin-Grenoble.- Septembre 2003. Voir aussi *Fuel Cell Report to Congress*, ESECS EE-1973, February 2003 et [http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/fc\\_report\\_congress\\_feb2003.pdf](http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/fc_report_congress_feb2003.pdf)