

Jean Pottier <sup>1</sup>  
Roger Aureille <sup>2</sup>

## Le programme de développement d'électrolyseurs avancés pour la production d'hydrogène en France \*

La compétition économique entre les différents procédés de production d'hydrogène s'est modifiée depuis 10 ans du fait du coût croissant du naphta et du gaz naturel par comparaison avec l'électricité d'origine nucléaire. La France, qui a de très modestes ressources en combustibles fossiles, a développé un important programme nucléaire qui offre, d'une part, un coût modéré de l'électricité nucléaire en base et, d'autre part, la disponibilité de l'électricité nucléaire d'heures creuses à partir de 1988.

En fonction de la demande sur le réseau, il faut faire appel aux différents modes de production d'électricité : nucléaire, hydraulique, charbon et fuel. On montre, ainsi, l'apparition de l'électricité nucléaire disponible en heures creuses, qui est très favorable à la production d'hydrogène par électrolyse.

On a effectué, à partir de 1975, l'évaluation critique des procédés d'électrolyse et les études détaillées, effectuées en 1977-78, ont centré l'intérêt sur l'électrolyse alcaline avancée avec, comme objectif, une certaine amélioration du rendement et une forte réduction du coût des électrolyseurs. En 1979, des contrats ont été passés avec deux groupes industriels pour effectuer un programme de recherche et de pré-développement en vue de définir un procédé d'électrolyse avancé, d'essayer ce procédé sur un banc de 20-30 kW et de présenter le dossier de réalisation d'un électrolyseur pilote d'une puissance de 2 MW environ.

Les performances techniques des procédés ainsi définis sont suffisamment prometteuses pour envisager, avec optimisme, la poursuite du programme de développement, et notamment la réalisation des électrolyseurs pilotes.

### 1. Situation énergétique française

A la suite de la crise de 1973, la France a développé un important programme nucléaire capable d'assurer une grande part de la fourniture d'électricité et de permettre une réduction notable des importations de combustibles fossiles. Actuellement, ce programme qui est largement engagé, se poursuit au rythme de la mise en service d'environ 4 000 MW par an, et cette production d'électricité nucléaire atteindra bientôt 50 % de la puissance

électrique totale en France. La pauvreté des ressources énergétiques de la France ne permet pas de concurrencer le nucléaire autrement que par l'importation, à grand frais, de combustibles fossiles (voir tableau 1 et figure 1).

Tableau 1. Niveau approché du coût du kWh produit en 1982 à partir de diverses sources d'énergie (centimes de F).

Durée annuelle de fonctionnement \ Coût du kWh	Nucléaire	Charbon	Fuel-oil
400 h		198	213
2 000 h	61	60	92
4 000 h	33	41	75
8 760 h	19	31	67

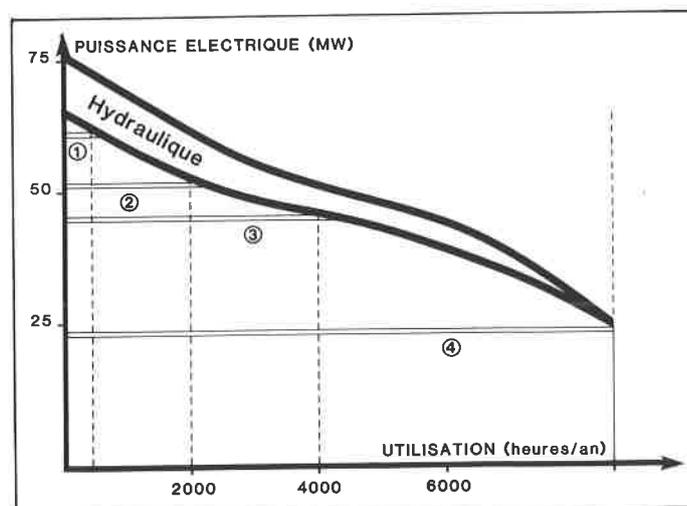


Figure 1.

\* Communication présentée aux Journées européennes des énergies, le 15 février 1983, à Paris.

<sup>1</sup> Gaz de France, Direction des Etudes et techniques nouvelles.

<sup>2</sup> Electricité de France, Direction des Etudes et recherches.

La figure 1 montre la courbe type des puissances électriques classées en fonction de la durée d'utilisation annuelle. Le tableau 1 indique, dans les conditions économiques de 1982, le coût du kWh obtenu selon les différentes voies (nucléaire, charbon, fuel-oil) en fonction de la durée annuelle de fonctionnement. Compte tenu du coût très compétitif de l'équipement électronucléaire en France et du coût élevé des combustibles fossiles importés, la production nucléaire d'électricité est rentable au delà d'une durée annuelle de fonctionnement proche de 2 000 h (encore que ce chiffre apparaisse assez sensible aux hypothèses de prix des combustibles). Il en résulte donc que, pour satisfaire la demande électrique au

moindre coût, certaines centrales nucléaires fonctionneront seulement une partie de l'année (6 000 à 4 000 h par an ou moins) alors qu'elles sont normalement capables de produire davantage. Leur production supplémentaire peut être envisagée à bas prix, puisque cela n'entraînerait qu'une dépense supplémentaire de combustible nucléaire, sans nécessiter d'investissements. Mais, il faut évidemment trouver à cette production un usage convenable en dehors de la demande ordinaire d'électricité : elle peut être vendue à des réseaux électriques étrangers, elle peut aussi alimenter des usages facilement modulables et interruptibles, parmi lesquels figure la production d'hydrogène électrolytique.

## 2. Évolution du coût des différentes filières de production d'hydrogène.

Pour apprécier l'intérêt d'une production électrolytique d'hydrogène, interruptible ou non, nous examinerons d'abord le cas d'une production continue (de l'ordre de 8 000 h/an) pour comparer le coût de production de différentes filières.

Actuellement, l'hydrogène est produit généralement par reformage de gaz naturel ou d'hydrocarbures légers (LPG, naphta). Le prix de ces produits a été croissant depuis une dizaine d'années et, en fonction de la poursuite de cette croissance, la projection pour l'avenir du prix de l'hydrogène est indiquée dans le tableau 2 et la figure 2. Les données présentées sont établies, en 1982, avec un amortissement économique de 10,5 % l'an correspondant à une durée de vie de 20 ans et un taux d'actualisation de 9 %. Le prix se situerait à terme à un niveau de 75 à 105 cF/m<sup>3</sup>N.

Pour faire une comparaison avec l'électrolyse, il faut d'abord préciser l'origine de l'électricité. La production hydroélectrique n'est largement disponible que dans quelques pays (Norvège, Canada, etc.). A partir du charbon, la production directe de H<sub>2</sub> par gazéification est plus économique que le passage par l'électrolyse. Nous considérerons donc l'électricité nucléaire dont le coût de production en base est en France de 19 cF/kWh.

Il faut ensuite analyser quel type d'électrolyse peut être mis en œuvre. Les électrolyseurs actuels ont un coût d'équipement élevé.

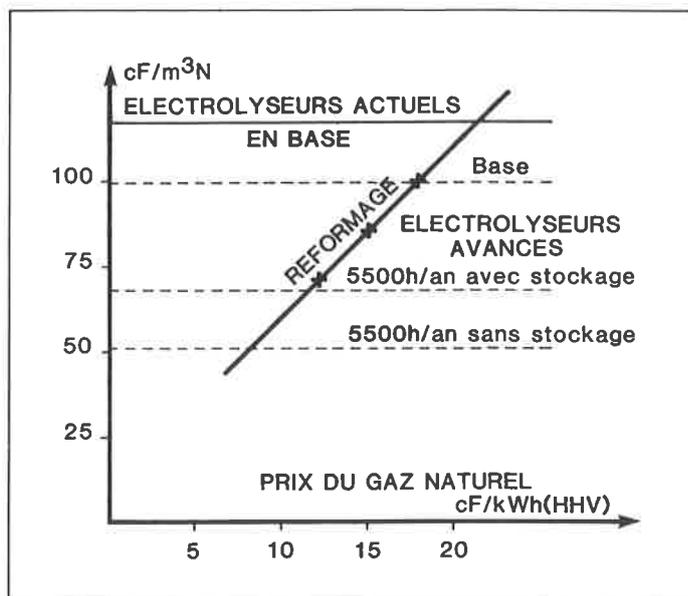


Figure 2.

Tableau 2. Comparaison des coûts de production de l'hydrogène (conditions 1982).

	Reformage du gaz naturel	Electrolyse actuelle 2 700 F/kWe	Electrolyse avancée 1 450 F/kWh	
			Base	Heures creuses
Durée annuelle de fonctionnement (heures) . . . . .	8 000	8 000	8 000	5 500
Consommation spécifique :				
Electricité (kWh/m <sup>3</sup> N) . . . . .		4,8	5	5
Gaz naturel (kWh PCS/m <sup>3</sup> N) . . . . .	5			
Coût moyen de l'électricité :				
cF/kWh . . . . .		19	19	6
Éléments du coût de production : cF/m <sup>3</sup> N :				
Charges fixes :				
Production . . . . .	11	26	14,5	21
Stockage-transport . . . . .				17
Énergie :				
Electricité . . . . .	91	85	30	
Gaz naturel . . . . .				
cF/kWh PCS { 12 . . . . .	60			
15 . . . . .	75			
18 . . . . .	90			
Coût total : cF/m <sup>3</sup> N . . . . .	71	117	99,5	68
Hydrogène : cF/kWh PCS . . . . .	20	33	28	19

Ceci est dû, entre autres, à l'utilisation d'une technologie ancienne d'électrolyse à la potasse et à la faiblesse et l'irrégularité du marché mondial des électrolyseurs. D'après les données portées dans le tableau 2, l'électrolyse actuelle, ayant un coût d'équipement de 2 700 F/kWe et un rendement de 4,8 kWh/m<sup>3</sup>N, ne serait compétitive que pour un coût élevé des hydrocarbures.

Des travaux de recherche et développement sont conduits dans différents pays pour améliorer les performances des électrolyseurs. Le programme, qui se déroule en France et qui est décrit plus loin, nous amène à considérer comme réalisable, d'ici 8 à 10 ans, un électrolyseur avancé ayant un coût d'équipement d'environ 1 450 F/kWh et un rendement de l'ordre de 4,5 à 5 kWh/m<sup>3</sup>N. Ceci n'exclut pas que d'autres programmes plus ambitieux visent des performances meilleures.

La tendance qui apparaît d'après la figure 2 est que, à moyen terme (8 à 10 ans), le prix de l'hydrogène issu des hydrocarbures fossiles se rapproche du prix de l'électrolyse en base, soit 1 F/m<sup>3</sup>N. Au

### 3. Les motivations et le démarrage du développement d'électrolyseurs avancés en France.

Les premières évaluations de l'électrolyse, tenant compte du contexte énergétique décrit précédemment, ont été effectuées en 1973-75. A priori, différentes techniques pouvaient être envisagées :

- l'électrolyse à la potasse, de pratique industrielle courante et susceptible de diverses améliorations,
- l'électrolyse avec polyélectrolyte solide (SPE) à température élevée (200 °C-250 °C),
- l'électrolyse à très haute température en phase vapeur avec électrolyte de zircon.

L'importance des travaux effectués, notamment aux U.S.A. pour l'électrolyse SPE, montrait bien la difficulté de cette voie et n'incitait pas à démarrer des travaux dans ce domaine. Cette électrolyse SPE ainsi que l'électrolyse à haute température visent effectivement une amélioration notable du rendement mais constituent des techniques radicalement nouvelles et, compte tenu des incertitudes dans leurs possibilités de développement, le choix s'est porté sur l'amélioration de l'électrolyse à la potasse où des progrès intéressants pouvaient être envisagés dans un délai raisonnable. Les initiatives prises par l'E.D.F. se sont trouvées complétées, à partir de 1975, par l'action de la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique qui, dans le cadre du Comité Hydrogène, a soutenu des travaux dans divers domaines intéressants l'hydrogène tels que la thermochimie, le stockage sur hydrure et bien entendu l'électrolyse.

Cette action a permis, d'une part, d'aider certains laboratoires dans leurs travaux de recherche et, d'autre part, de confier à plusieurs groupes industriels des études et essais préliminaires pour évaluer les possibilités d'amélioration de l'électrolyse à la potasse.

La technique de l'électrolyse industrielle à la potasse avait peu évolué depuis une vingtaine d'années car son domaine d'utilisation, étroit et particulier, et l'irrégularité du marché n'apportaient aucune incitation aux constructeurs. Les études préliminaires, réalisées en 1977-78, ont montré que, dans l'optique d'un développement échelonné sur une dizaine d'années, on pouvait espérer des progrès dans deux directions :

- une amélioration des caractéristiques techniques de la cellule d'électrolyse,
- une optimisation et une adaptation à des unités importantes du mode de construction de l'électrolyseur par empilement et de l'ensemble de l'unité d'électrolyse.

Ces études conduisaient à considérer comme réaliste, à moyen terme, l'obtention d'un électrolyseur d'un rendement de 4,5 kWh/m<sup>3</sup>N et d'un coût de 600 F/kWe dans les conditions économiques de 1978. Dans ces conditions EDF et GDF ont décidé, en 1979, de lancer une première étape de développement confiée à deux groupes industriels et de renforcer leur coopération dans ce domaine pour assurer l'encadrement et le soutien de cette action.

contraire, et ceci confirme l'exposé des motifs du paragraphe précédent, si l'on fait appel à une production d'électricité d'heures creuses dont la disponibilité serait de 5 500 h par an, avec un coût voisin de 6 cF/kWh, on obtient des coûts nettement inférieurs et largement compétitifs. Ce coût serait voisin de 50 cF/m<sup>3</sup>N pour l'hydrogène utilisé directement en période creuse, et serait porté aux environs de 70 cF/m<sup>3</sup>N si l'on peut équiper dans de bonnes conditions un stockage souterrain régularisant l'utilisation de l'hydrogène sur toute l'année.

On constate que ces coûts seront inférieurs à ceux du fonctionnement marginal des unités existantes utilisant le gaz naturel. Ils sont légèrement inférieurs à ceux que l'on pourrait obtenir en France à partir de charbon d'importation au prix actuel (5,25 cF/kWh PCS). De plus, la gazéification du charbon présente des inconvénients de diverses natures : le charbon doit être importé, son coût est susceptible d'augmenter dans l'avenir et les unités performantes sont de très grande taille.

Les projets d'étude d'électrolyseurs prototypes ont été conduits, depuis le début de 1980, avec les objectifs suivants, découlant du choix d'une technique améliorée d'électrolyse à la potasse :

- établir les plans détaillés d'un électrolyseur prototype de puissance 2 MW environ représentatif d'unités industrielles de puissance plus élevée (dizaine de MW),
- faire un essai de longue durée (8 à 12 mois) des composants spécifiques nouveaux de l'électrolyseur, notamment ceux des cellules d'électrolyse,
- faire une évaluation technico-économique du coût d'équipement et de la mise en œuvre d'électrolyseurs de taille industrielle (dizaine ou centaine de MW).

Les dépenses de ces projets, qui dépassent la dizaine de millions de francs, sont supportées par moitié par le groupe industriel opérateur. L'autre moitié est partagée entre EDF et GDF en tenant compte de l'aide reçue de la D.G.R.S.T. en 1980 et 1981.

Au terme de cette étape, on peut indiquer que les deux groupes industriels ont choisi des orientations nettement différenciées :

- l'un d'eux (Creusot-Loire-RTI) a choisi une température de fonctionnement élevée (160 °C minimum, susceptible d'être portée à 180 ou 200 °C), qui permettrait d'éviter le recours à l'activation des électrodes, mais exige l'utilisation du nickel pour les structures et éventuellement pour le diaphragme en remplacement de l'amiante qui est à la limite de ses possibilités d'utilisation,
- l'autre groupe, (Alsthom-ACB) a choisi une température modérée (120 °C environ) associée à une activation d'électrode performante. Le diaphragme en amiante peut être utilisé, mais d'autres matériaux plus performants sont envisageables.

Dans les deux cas, le fonctionnement se fait sous pression de 30 bar au moins, avec une densité de courant élevée, de l'ordre de 10 kA/m<sup>2</sup>. La cellule d'électrolyse a une épaisseur faible pour réduire la chute ohmique dans l'électrolyte et dans le diaphragme, ce qui améliore le rendement.

Les dispositifs annexes ont fait l'objet d'études détaillées, par exemple :

- dessin et mode de construction des cadres de cellules,
- assemblage des cellules par empilement,
- contrôle des circulations d'électrolyte,
- séparateurs potasse-oxygène et potasse-hydrogène à la sortie de l'électrolyseur.

Les essais d'endurance qui sont en cours, devront confirmer les dispositions adoptées, ainsi que l'évaluation du rendement qui se situerait aux environs de 4,8 à 5 kWh/m<sup>3</sup>N. Le coût des unités de puissance basées sur cette technique de l'électrolyse avancée à la potasse est évalué à 1 450 F/kW ± 15 % aux conditions de 1982.

## 4. Développement du programme

A la fin de cette étape, normalement au cours de l'année 1983, nous serons donc en mesure d'apprécier la qualité technique des procédés d'électrolyse proposés ainsi que l'évaluation économique des électrolyseurs de puissance. Évidemment cette évaluation sera comparée aux possibilités des techniques existantes proposées par les constructeurs d'électrolyseurs. En tenant compte de ces éléments, on prévoit d'engager la construction d'électrolyseurs prototypes de 2 MW au cours de la période 1983-1985. Si les essais de prototypes (1985-1986) sont favorables, on pourra envisager la construction d'électrolyseurs de puissance, intégrés dans un site industriel.

On estime que, dans un premier stade, l'électrolyseur apporterait un complément ou un remplacement partiel à une fourniture principale existante d'hydrogène assurée chez un industriel, par un moyen classique (reformage de gaz naturel par exemple). Ce schéma aurait la souplesse souhaitable pour une première installation et pourrait en particulier s'adapter aux incertitudes de fonctionnement d'une première réalisation et au fonctionnement en heures creuses bénéficiant d'un tarif électrique favorable. Cette option serait évidemment favorisée par le faible coût de l'hydrogène produit en heures creuses, qui serait inférieur au coût marginal du reformage du gaz naturel.

## 5. Conclusions

- La France est un site privilégié pour la mise en place d'électrolyseurs avancés à cause du développement important du nucléaire et du coût très compétitif de l'électricité nucléaire par rapport aux produits fossiles qui sont les bases actuelles de la production industrielle d'hydrogène.
- Le programme de développement d'électrolyseurs avancés à la potasse devrait permettre un abaissement important des coûts d'équipement des électrolyseurs.

Le développement ultérieur de l'électrolyse dépendra évidemment du contexte énergétique général (développement du nucléaire, prix des hydrocarbures et du charbon). On estime que pour la France l'hydrogène produit serait de préférence affecté à des utilisations spécifiques (chimie, raffinage, conversion du charbon) plutôt qu'énergétiques. Différentes modalités peuvent être envisagées :

- intégration à un ensemble industriel avec fonctionnement en heures creuses (cas exposé ci-dessus),
- intégration à un ensemble stockage-transport-utilisateurs permettant une production électrolytique en heures creuses. Dans ce cas, il faut tenir compte de l'incidence du coût de transport-stockage de l'hydrogène (une évaluation préliminaire de ce poste a été portée au tableau 2),
- intégration à un ensemble industriel avec fonctionnement en continu.

Il est difficile aujourd'hui de départager ces différentes modalités mais ceci n'est pas tellement important car les techniques d'électrolyse avancées à la potasse ne semblent pas actuellement nettement différenciées selon qu'il s'agit d'électrolyse en continu ou en heures creuses. Elle pourront donc s'appliquer le moment venu à ces différents cas.

- Les premières unités de démonstration (1988-1990) et de production industrielle (après 1990) fonctionneront en heures creuses pour bénéficier d'un prix favorable d'électricité. Leur production éventuellement assistée d'un stockage sera valorisée de préférence à des utilisations spécifiques (chimie, conversion de charbon ou produits pétroliers lourds).

### INFORMATION N° 3-11

Domaine d'application  
**Mesures d'absorption moléculaire UV-Visible**

Utilisateurs

Des travaux pratiques à la recherche : laboratoires pharmaceutiques, contrôles cliniques, industries,...

#### **SPECTROPHOTOMÈTRES SIMPLE et DOUBLE FAISCEAU** (avec ou sans microprocesseur)

- La qualité d'une optique mondialement appréciée
  - Robustesse
- Évolution des appareils par adjonction de nombreux accessoires



Consultez-nous.  
Laboratoire d'application à votre disposition.



**JOBIN  
YVON**

Leader mondial  
en optique

16-18 rue du Canal - 91163 LONGJUMEAU Cedex  
Tél. 909 34 93 - Télex : JOBYVON 692 882 F

### INFORMATION N° 232

Domaine d'application  
**Fluorescence**

Utilisateurs

Laboratoires de recherche  
et de contrôle cliniques, pharmaceutiques,  
alimentaires, industriels,...

#### **SPECTROFLUORIMÈTRES, SÉRIE JY 3**

- La plus haute sensibilité
- De l'appareil de routine à l'appareil informatisé



Consultez-nous  
Documentation technique sur demande



**JOBIN  
YVON**

Leader mondial  
en optique

16-18 rue du Canal - 91163 LONGJUMEAU Cedex  
Tél. 909 34 93 - Télex : JOBYVON 692 882 F