DOCUMENTS

Première démonstration d'une pile à combustible stationnaire en France

Philippe MATHEVON*, Bernard COURAUDON**

Résumé

Électricité de France mène en collaboration avec Gaz de France une action de démonstration d'une nouvelle technique de cogénération, la pile à combustible. Il s'agit de la première pile à combustible stationnaire installée et exploitée en France. La pile est installée dans un milieu semi-urbain, à Chelles en Seine-et-Marne ; elle est raccordée au réseau électrique basse tension et au réseau de chaleur de la ville.

Nous présentons d'abord dans ce document les principes de fonctionnement d'une pile à combustible, les caractéristiques de la pile installée à Chelles, ainsi que les avantages de la technique. Ensuite, nous nous intéressons à la communication qui a été faite aux Chellois sur le projet et aux conditions d'insertion de la pile à combustible dans son environnement. Enfin, nous concluons sur les perspectives de développement pour la pile à combustible stationnaire.

Contexte

Électricité de France et Gaz de France mènent une action de démonstration d'une nouvelle technique de cogénération, la pile à combustible. Il s'agit de la première pile à combustible stationnaire installée et exploitée en France.

Parmi les technologies de piles à combustible existantes, c'est la pile à acide phosphorique (PAFC) qui a été retenue, car c'était à l'époque de la décision la seule technologie à avoir atteint le stade précommercial et à permettre une démonstration à un coût acceptable. La pile fonctionne au gaz naturel.

La pile est installée dans un milieu semi-urbain, à Chelles en Seine-et-Marne. L'énergie électrique produite par la pile (200 $kW_{él}$) est fournie au réseau exploité par le Centre EDF GDF SERVICES de Saint-Mandé. L'énergie thermique produite (200 $kW_{él}$) est utilisée par le réseau de chaleur local, qui assure le chauffage et l'alimentation en eau chaude sanitaire d'une partie de la ville de Chelles.

Électricité de France et Gaz de France ont créé pour cette opération de démonstration un Groupement d'intérêt économique, le GEPPAC, dont le rôle est l'acquisition, l'installation et l'exploitation de la pile à combustible.

Le projet associe la Division Recherche et Développement d'EDF, la Direction de la Recherche de Gaz de France, et le Centre EDF GDF SERVICES de Saint-Mandé. L'ADEME a souhaité participer à ce projet et a contribué à son financement.

Principe d'une pile à combustible

Le principe de la pile à combustible a été découvert en 1839 par William Grove. Il s'agit de produire de l'électricité et de l'eau à partir d'hydrogène et d'oxygène. C'est le principe inverse de celui de l'électrolyse. Les piles à combustible sont donc des générateurs électrochimiques d'électricité, qui à la différence des batteries, n'ont pas besoin d'être rechargées, puisqu'elles fonctionnent tant qu'elles sont alimentées en combustible et en air.

On distingue les piles à combustible stationnaires (cas de la pile de Chelles) et les piles à combustible embarquées (pour des applications telles que la traction automobile). Dans le cas des piles stationnaires, l'hydrogène est généralement obtenu par transformation chimique du gaz naturel. Dans le cas des piles embarquées, le combustible privilégié pourrait être le méthanol ou l'essence. L'oxygène est prélevé dans l'air ambiant.

Il existe différents types de piles à combustible, qui se distinguent principalement par leur tempéra-

* *EDF – Pôle Industrie, Division Recherche et Développement, Site des Renardières, Écuelles, 77818 Moret-sur-Loing Cedex. – Tél. : + 33 1 60 73 72 62 – Fax : + 33 1 60 73 67 43 – E-mail : philippe.mathevon@edf.fr*

** *EDF GDF SERVICES, Centre de Saint-Mandé, 55-59 rue du Commandant René Mouchotte, 94160 Saint-Mandé – Tél. : + 33 1 49 83 14 03 – Fax : + 33 1 49 83 14 77 – E-mail : bernard.couraudon@edfgdf.fr*

ture de fonctionnement et la nature de l'électrolyte (liquide ou solide) utilisé pour conduire l'électricité entre les électrodes :

– les piles à membrane échangeuse de protons (PEMFC),

– les piles à acide phosphorique (PAFC),

– les piles à carbonates fondus (MCFC),

– les piles à oxydes solides (SOFC),

qui fonctionnent respectivement à 80-100 °C, 200 °C, 650 °C et 800-1000 °C.

Trois parties principales constituent une pile à combustible alimentée en gaz naturel et produisant un courant électrique alternatif :

• L'unité de transformation du gaz naturel en hydrogène intermédiaire, appelée reformeur.

Dans le cas de la pile à acide phosphorique (PAFC), le gaz naturel, composé principalement de méthane CH_4, est d'abord transformé en hydrogène H_2 et monoxyde de carbone CO :

$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$
(réaction de vapo-reformage).

Ensuite, le reste du CO réagit avec l'eau :
$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$
(réaction de « shift »).

• La partie génératrice d'électricité (courant continu) et de chaleur, appelée cœur de pile.

Le cœur de pile est formé d'un empilement de cellules électrochimiques. Chaque cellule comporte une anode, un électrolyte et une cathode.

Dans le cœur de pile, l'hydrogène se décompose à l'anode en ions H^+ et en électrons e^- ($2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$). L'ion H^+ traverse l'électrolyte et réagit avec les électrons et O_2 à la cathode ($O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$).

• Le convertisseur électronique assurant la transformation du courant continu en courant alternatif triphasé.

Une partie de la chaleur produite par les cellules électrochimiques est récupérée et valorisée. La pile à combustible fonctionne ainsi comme un système de cogénération (production simultanée d'électricité et de chaleur pouvant être réutilisée).

Caractéristiques de la pile installée à Chelles

La pile installée à Chelles est une pile PC25 modèle C fabriquée par la compagnie américaine ONSI, joint-venture créé par United Technology Corporation et Toshiba.

La PC25 est une pile à acide phosphorique, de puissances électrique 200 kW et thermique 200 kW, fonctionnant au gaz naturel. ONSI possède une chaîne de production robotisée de fabrication des modèles PC25. Le modèle C correspond aux piles de seconde génération, issues de la première génération représentée par les modèles A et B.

Environ 150 piles ONSI de modèles A, B ou C sont en fonctionnement dans le monde, principalement aux États-Unis et au Japon. Les premières (modèle A) ont été mises en service il y a six ans.

L'ensemble des piles à combustible ONSI ont cumulé plus de 3 millions d'heures de fonctionnement. Deux piles installées au Japon ont fonctionné 9 500 heures sans arrêt. Une quarantaine de piles ont dépassé six mois de fonctionnement ininterrompu. Deux piles ont cumulé chacune plus de 40 000 heures de fonctionnement.

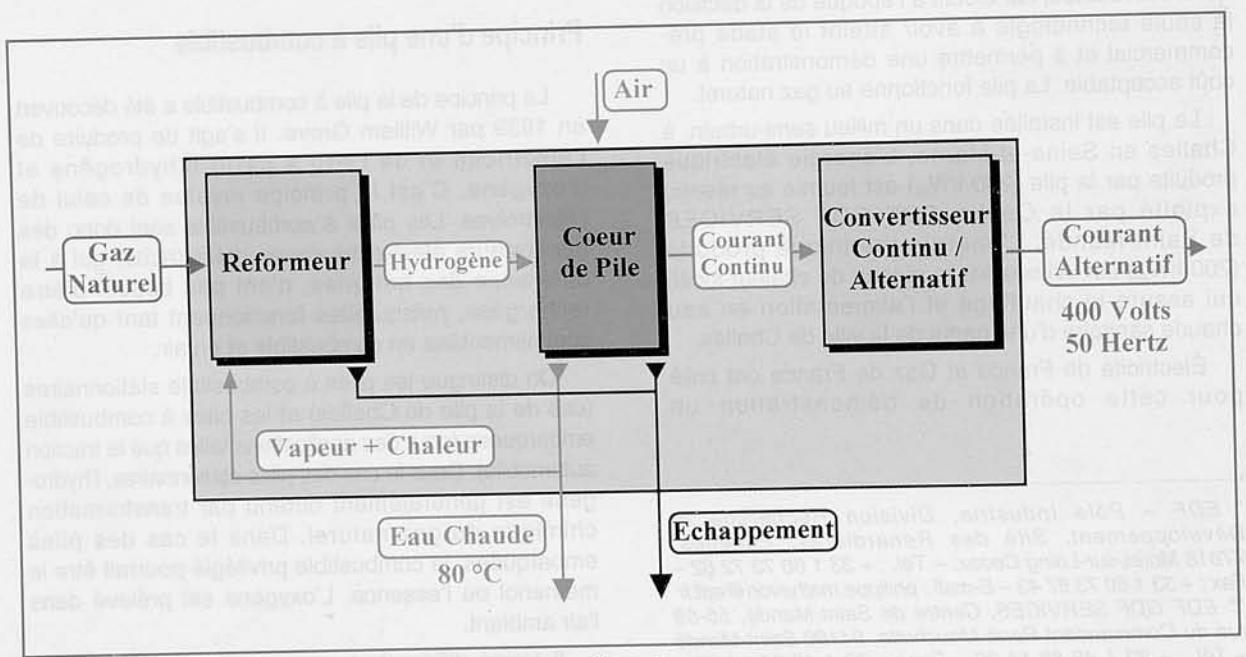

Figure 1.
Principe de fonctionnement d'une pile à combustible.

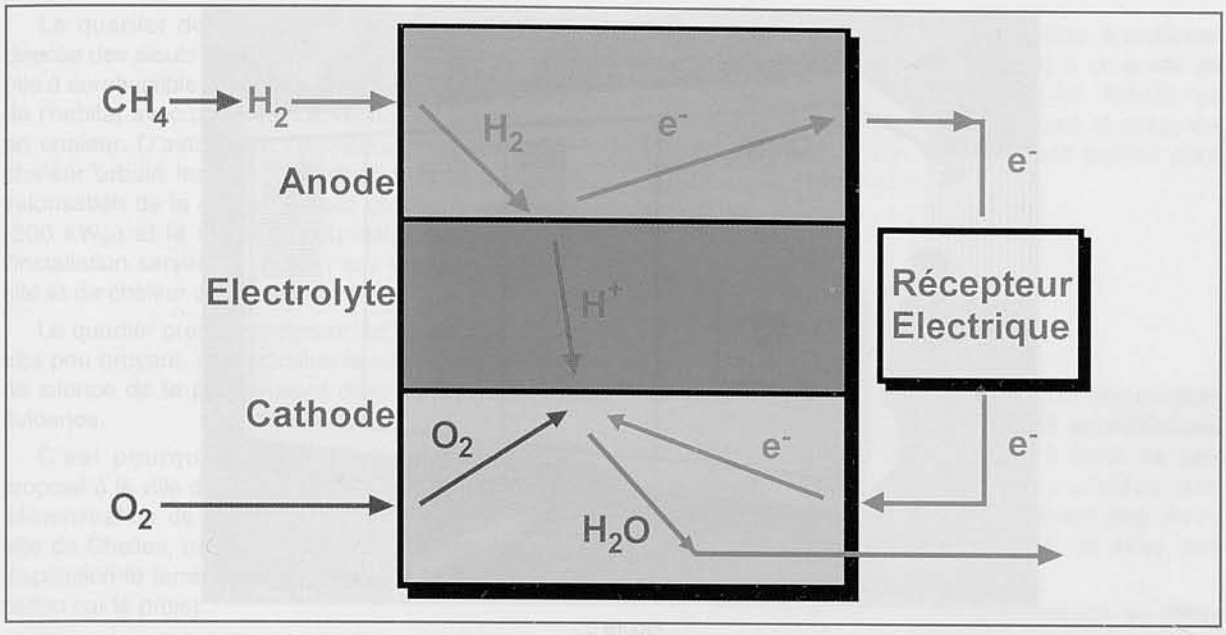

Figure 2.
Principe de fonctionnement du cœur de pile.

Il y a actuellement une vingtaine de piles ONSI en Europe. Certaines sociétés électriques ou gazières européennes comme Sydkraft en Suède, Hamburgische Electrizitäts-Werke/Hamburger Gas-Werke en Allemagne ou les Services Industriels de Genève en Suisse possèdent leur propre PC25 depuis plusieurs années. La plupart des piles se trouvent en Allemagne, mais des opérations ont lieu également en Suède, Italie, Suisse, Danemark et Autriche.

Quatorze de ces piles sont des modèles PC25C (une en Suède, une en France et douze en Allemagne).

La pile fournit d'une part de l'électricité sous forme de courant triphasé en 400V/50Hz, et d'autre part de l'eau chaude à une température de 80 °C. La puissance électrique est de 200 $kW_{él}$, la puissance thermique maximale sortie est de 200 kW_{th}. La puissance est modulable.

À puissance nominale, la consommation de gaz naturel est d'environ 50 Nm^3/h. Le rendement électrique de la pile est de 40 % PCI (pouvoir calorifique inférieur), et ce sur une large gamme de puissance.

Les équipements permettant la production d'électricité et de chaleur se présentent extérieurement en deux modules. Le premier, le module de production, comporte tous les éléments participant à la transformation du gaz naturel en électricité et chaleur. Le second, le module de refroidissement, a pour but de permettre le fonctionnement normal de la pile (production d'électricité jusqu'à 200 $kW_{él}$) en cas de faible demande d'énergie thermique du réseau de chaleur.

On distingue dans le module de production :

- le système de transformation du gaz naturel en hydrogène intermédiaire, composé principalement d'une unité de désulfuration du gaz naturel et des réacteurs catalytiques de vapo-reformage et de « shift » ;
- la partie génératrice d'électricité et de chaleur, appelée « cœur de pile ». Cette partie est formée de 250 cellules électrochimiques disposées en série. La surface de chaque cellule est de 1 m^2. La température de fonctionnement des cellules est de 200 °C ;
- le convertisseur électronique assurant la transformation du courant continu en courant alternatif triphasé 400V/50Hz.

Le module de production est un parallélépipède de 5,5 m × 3 m sur 3 m de hauteur. Le poids de la pile est de 18 tonnes et celui du module de refroidissement est de 850 kg.

Les options proposées par le constructeur pour ce matériel sont principalement la récupération d'une eau à plus haute température (120 °C), la production directe d'eau chaude sanitaire et la possibilité de fonctionner en îlotage.

L'installation fonctionne automatiquement.

Avantages de la pile à combustible

La pile à combustible constitue un système de production décentralisée d'électricité et de chaleur au rendement élevé, très peu polluant et pratiquement sans nuisances sonores :

- les rendements électriques sont plus élevés que pour d'autres systèmes de cogénération : ils sont compris entre 35 et 50 % PCI selon les types de piles (jusqu'à 70 % si la pile est couplée à une



Figure 3.
Le module de production d'une pile ONSI PC25-C.

turbine), alors qu'ils sont de 25 à 30 % pour les moteurs à gaz de puissance similaire. Le rendement total (électrique + thermique) est d'environ 80 % ;

- les processus mis en jeu pour la transformation du gaz naturel en hydrogène dans le reformeur puis pour son utilisation dans le cœur de pile (réactions électrochimiques) se déroulent à des températures trop basses pour générer des oxydes d'azote. Les émissions d'oxydes de soufre (SO_x) et d'imbrûlés sont nulles ; les émissions d'oxydes d'azote (NO_x) et de monoxyde de carbone (CO) sont négligeables (cas de la pile de Chelles : $NO_x < 1$ ppmv et $CO < 5$ ppmv) ;

- le meilleur rendement électrique se traduit également par une diminution de la quantité de dioxyde de carbone (CO_2) produite par kWh par rapport à un autre moyen de production utilisant la même énergie fossile ;

- de par leur principe de fonctionnement (absence de moteur ou de turbine), les piles à combustible génèrent moins de bruit que les autres types de cogénérateur. Le processus électrochimique ne génère pas de bruit ; les émissions sonores de la pile à combustible proviennent uniquement des auxiliaires du système, comme les ventilateurs, les pompes de circulation et le convertisseur électronique. Sans aucune protection acoustique, le niveau de bruit généré par la pile de Chelles serait de 60 dBa à 10 mètres.

Communication sur le projet

EDF et Gaz de France ont présenté début 1998 le projet d'installation de la pile à combustible à Chelles dans le journal de la ville. Les principes de fonctionnement d'une pile, les objectifs du projet et l'intérêt porté par EDF et Gaz de France aux piles à combustible ont été expliqués aux Chellois.

Afin de convaincre les habitants de l'utilité de la pile à combustible, une réunion publique ouverte aux habitants des quartiers avoisinants la pile a été organisée en juin 1998. Plus de 200 Chellois ont répondu présents. Lors de cette réunion, des responsables d'EDF et Gaz de France, de l'ADEME, un exploitant suisse utilisant une pile à combustible depuis cinq ans, ont présenté la pile à combustible et ont répondu aux questions posées par les habitants.

Enfin, une visite a été organisée par EDF et Gaz de France à Hambourg, en Allemagne, en septembre 1998, afin qu'une trentaine de Chellois (élus de la majorité et de l'opposition, représentants d'associations de protection de l'environnement, de parents d'élèves...) puissent découvrir « de visu » une pile en fonctionnement. Ces représentants ont notamment pu discuter avec des riverains qui habitaient à quelques mètres de la pile.

Si certains représentants étaient restés inquiets après la réunion publique (taille de l'installation, nuisances sonores, sécurité...), les discussions avec les bénéficiaires allemands de cette nouvelle technologie qu'est la pile à combustible, les ont complètement rassurés. Les représentants ont donné un avis favorable à l'opération de démonstration de la pile à Chelles à l'issue de la visite.

Conditions d'insertion de la pile dans son environnement

La pile à combustible a pour intérêt majeur de permettre une production simultanée d'électricité et de chaleur avec des rendements énergétiques élevés et des émissions atmosphériques très faibles.

Le quartier de Chelles où est installée la pile dispose des atouts indispensables à l'implantation d'une pile à combustible : une densité importante au niveau de l'habitat avec des besoins locaux en électricité et en chaleur. D'autre part, l'existence d'un réseau de chaleur urbain facilitait l'installation de la pile et la valorisation de la chaleur qu'elle produit. L'électricité (200 $kW_{él}$) et la chaleur (200 kW_{th}) produites par l'installation servent en apport aux réseaux d'électricité et de chaleur de Chelles.

Le quartier présentait également l'avantage d'être très peu bruyant, en particulier la nuit, et les qualités de silence de la pile peuvent donc y être mises en évidence.

C'est pourquoi EDF et Gaz de France ont proposé à la ville de Chelles d'accueillir cette première démonstration de pile à combustible en France. La ville de Chelles, très intéressée par le projet, a mis à disposition le terrain et s'est associée à la communication sur le projet.

Concernant la pile elle-même, le module de production est fabriqué en présérie aux États-Unis par ONSI Corporation. La pile a donc dû être adaptée et modifiée pour une utilisation en France. Ceci concerne notamment la certification d'appareils à pression par la DRIRE.

En ce qui concerne les conditions d'installation, la pile est raccordée au réseau de gaz naturel existant (4 bars), par l'intermédiaire d'un poste de détente permettant d'abaisser la pression à 20 millibars. La pile est connectée en basse tension à partir du transformateur HT/BT desservant les habitations proches. L'énergie thermique est récupérée au moyen de l'échangeur de chaleur intégré au module de production de la pile. La pile nécessite également un raccordement en eau (eau de ville), et utilise de l'azote lors des opérations de démarrage et d'arrêt ; l'azote est approvisionné en bouteilles.

La conception du module de production est telle qu'il peut être installé directement en extérieur. À Chelles, un bâtiment a été réalisé afin de mieux intégrer visuellement l'ensemble des équipements de la pile dans son environnement. L'architecture du bâtiment a été définie en collaboration avec la mairie de Chelles. Le bâtiment a également fait l'objet d'une étude acoustique complète.

L'exploitation de la pile ne nécessite pas de personnel permanent, puisque l'installation fonctionne automatiquement et peut être contrôlée à distance. Un système de télésurveillance relié à un poste de contrôle fonctionne 24 heures sur 24. Seules les opérations de maintenance nécessitent la présence de personnel sur place, spécialement qualifié pour intervenir sur l'installation.

Perspectives pour la pile à combustible stationnaire

La pile à combustible peut constituer une solution alternative à de nombreuses techniques de productions locales d'électricité et de chaleur à partir de gaz naturel telles que des moteurs à explosion, des turbines à gaz, mais avec un rendement plus élevé (et donc des économies d'énergie) et avec des nuisances très faibles.

C'est pourquoi EDF mène actuellement, en collaboration avec Gaz de France, cette opération de première démonstration d'une pile à combustible stationnaire en France, qui permet d'acquérir une expérience d'exploitation pratique d'une pile à combustible, en tant que générateur d'énergie répartie.

Il s'agit aussi de mieux évaluer les rendements énergétiques de la pile, la disponibilité de l'installation, sa durée de vie, les coûts d'exploitation et de maintenance, et de mesurer la qualité de l'énergie électrique fournie.

Chelles a été choisie pour cette opération de démonstration, et ses habitants sont les premiers en France à bénéficier de cette technique prometteuse mais pas encore compétitive qu'est la pile à combustible.

En effet, les qualités de la pile à combustible ne doivent pas faire oublier son coût actuellement très élevé (près de 30 000 F par kW électrique pour les piles les moins chères). Seule une baisse considérable de ce coût d'investissement pourra permettre un développement réel de la pile à combustible.

Les recherches et développements en cours sur les piles à combustible embarquées pourront contribuer à cette baisse du coût d'investissement (de par l'effet de grande série qui résulterait d'une production pour l'automobile) et donc au succès et à la diffusion des piles à combustible stationnaires pour la production décentralisée.