



DANIEL HISSEL
LA MÉDAILLE BLONDEL
PROFESSEUR À L'UNIVERSITÉ
BOURGOGNE FRANCHE-COMTÉ,
INSTITUT FEMTO-ST,
FÉDÉRATION FCLAB,
CNRS.

La **Médaille Blondel** récompense des travaux de recherche et développement contribuant aux progrès de la science et des industries électriques et électroniques, menés avec le même souci d'approfondissement et de rigueur que ceux d'André Blondel, pionnier du transport de l'énergie électrique à grande distance et à très haute tension, initiateur de la construction de l'usine hydroélectrique de Génissiat sur le Rhône et créateur des premiers radiophares en 1911.

Systemes hydrogène-énergie : *De la science-fiction à la réalité industrielle*

L'objectif de cet article est de proposer un état des lieux sur l'utilisation de l'hydrogène, en tant que vecteur énergétique, pour diverses applications mettant en jeu de l'énergie électrique. Un point complet sera ainsi fait sur l'état de maturité de cette technologie, les premières applications existantes, ainsi que sur les verrous technologiques restant à lever et les défis scientifiques auxquels il convient de se confronter. Cet article fait suite à la présentation faite lors de la cérémonie des grands prix de la SEE le 4 décembre 2017.

De l'hydrogène aux piles à hydrogène...

Lorsque l'on s'interroge sur ce que devrait être notre futur énergétique, différents qualificatifs viennent à l'esprit des spécialistes : abondance, durabilité, caractère renouvelable à l'échelle de vie humaine, respect de l'environnement, accessibilité à tous en tout point de la planète, multiplicité des contextes applicatifs.

L'hydrogène permet de répondre à l'ensemble de ces exigences. En effet, il est l'élément le plus abondant dans l'Univers (75 % en masse et 92 % en nombre d'atomes). Sur Terre, il n'est malheureusement que rarement présent sous forme de dihydrogène, il va donc falloir le produire. Point positif, sa production par électrolyse de l'eau est très facile et le procédé peut même être particulièrement propre si l'électricité utilisée est d'origine renouvelable. On voit ici la dualité entre les deux « vecteurs énergétiques » que sont l'hydrogène-énergie (le suffixe est important pour bien souligner la finalité de valorisation recherchée) et l'électricité (figure 1). Evidemment, les rendements ne sont pas unitaires, mais le rendement du passage électricité-hydrogène peut atteindre 70 % et celui du passage hydrogène-électricité 60 %. A cela s'ajoutent évidemment des déperditions thermiques

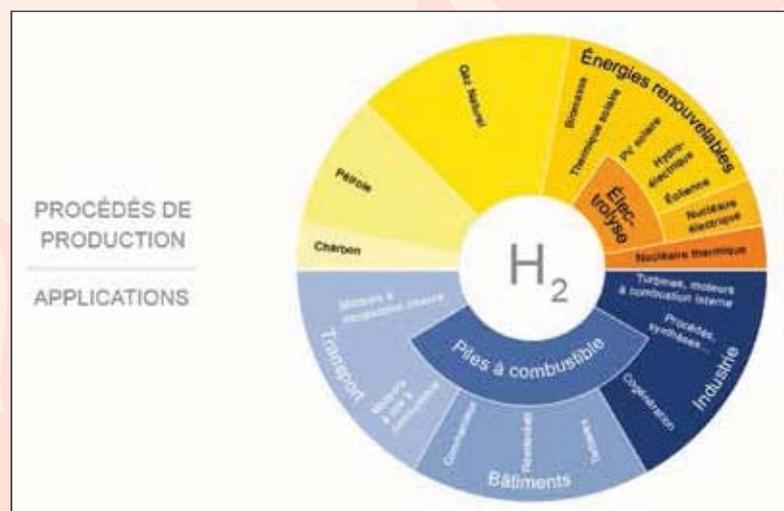


Figure 1 : Le vecteur hydrogène-énergie (d'après Connaissance des Énergies/AFH2/UE).

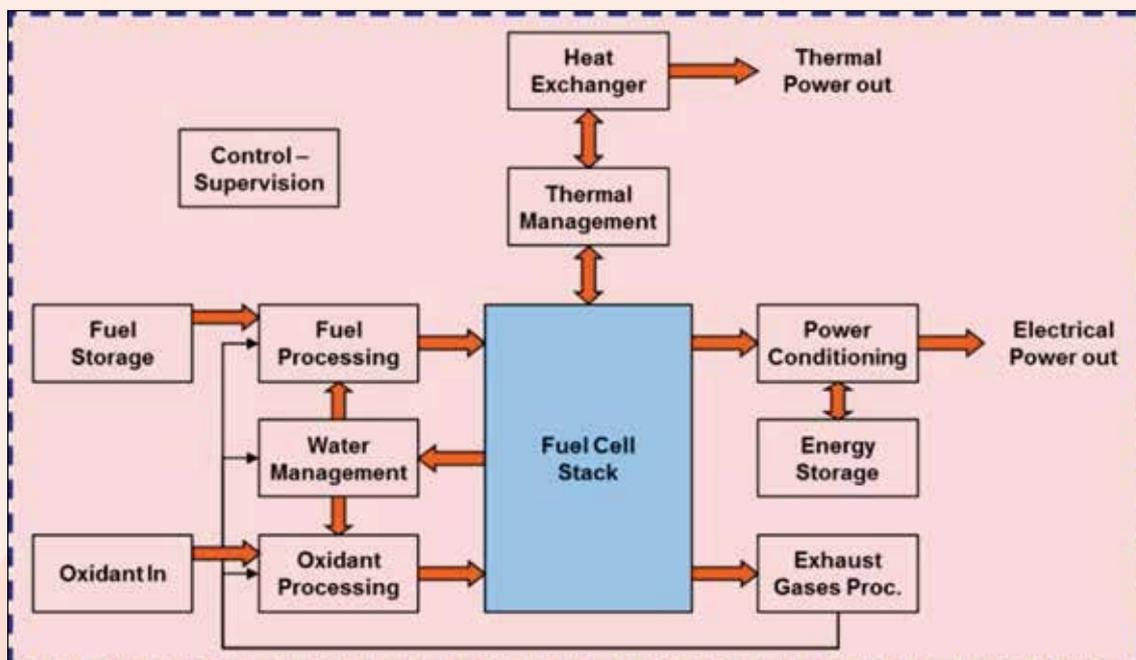


Figure 2 : « Système » pile à hydrogène [2].

qu'il faudra s'attacher à valoriser au niveau systémique pour augmenter encore l'efficacité énergétique globale. Un point d'intérêt supplémentaire : la très grande densité énergétique de l'hydrogène (33 kWh/kg), elle est même trois fois plus élevée que celle de l'essence, pourtant souvent citée en exemple dans ce domaine. Si l'on retient l'hypothèse d'une génération d'hydrogène par électrolyse de l'eau, sa production devient possible quasiment en tout point de la planète, réduisant d'autant les possibles tensions géopolitiques liées à l'accès aux ressources fossiles énergétiques.

Si l'on termine ce tour d'horizon par les domaines applicatifs possibles, ceux-ci sont particulièrement vastes ; on pourrait ainsi citer toutes les applications actuelles ou potentielles de l'électricité. En effet, comme nous l'avons vu, s'il est particulièrement aisé de passer de l'électricité à l'hydrogène grâce à un électrolyseur d'eau, la réaction inverse est possible grâce à une pile à hydrogène (ou pile à combustible), tout ceci sans émission d'aucun polluant in situ. Le vecteur hydrogène constitue donc une solution de stockage d'électricité, sur du long terme, et peut être utilisé dans un large spectre applicatif : groupes électrogènes stationnaires, propres et silencieux, petites alimentations électriques nomades pour le tourisme, dispositifs de production d'électricité, d'eau chaude sanitaire et de froid pour des bâtiments, stockage à long terme de l'électricité sur des réseaux ou micro-réseaux électriques et bien entendu toutes les applications dans les domaines des transports, terrestre, ferroviaire, naval ou aérien... [1]

La pile à hydrogène est, par définition, un dispositif électrochimique qui convertit de manière continue l'énergie chimique d'un combustible et d'un comburant en énergie électrique (DC), chaleur et différents sous-produits de réaction. Ses principales différences par rapport à un accumulateur électrochimique « traditionnel » sont les suivantes : le combustible est fourni de manière continue et est stocké à l'extérieur de la pile, un découplage entre énergie et puissance existe de manière intrinsèque, la recharge peut s'effectuer très rapidement.

Cette pile à hydrogène n'est pas une invention récente, les premiers travaux datent en effet de 1839 ; Jules Verne, considéré comme le premier auteur de science-fiction, reprenant même son principe dès 1875 dans « L'île mystérieuse ». Longtemps éclipsée par la découverte de l'or noir, cette découverte est remise au goût du jour par la NASA dans le cadre de la conquête spatiale au milieu des années 1960. Plus récemment, depuis le début des années 2000, les développements scientifiques et technologiques se succèdent, poussés notamment par la recherche d'une amélioration de l'efficacité énergétique et par celle d'une plus faible empreinte environnementale pour nos systèmes de fourniture énergétique.

De la notion de « système » pile à hydrogène...

Seule, cette pile à hydrogène ne peut cependant pas être opérée, il faut l'intégrer au sein d'un « système » (figure 2). Ce « système » pile à hydrogène repose sur une alimenta-



Figure 3 : Groupe électrogène à hydrogène (puissance électrique 5kW).
Source : <http://www.h2sys.fr>.

tion en hydrogène et en air (ou oxygène) en amont du cœur de pile, un sous-système de gestion thermique et un sous-système de traitement de l'énergie électrique produite en aval de celui-ci, un couplage avec un élément de stockage d'énergie électrique (souvent de nature électrochimique ou électrostatique) mais aussi des capteurs, actionneurs et un système de contrôle/commande. Nous sommes donc en face d'un système mettant en œuvre une très forte interdisciplinarité scientifique : électrochimie évidemment, mais aussi élec-

tronique, électrotechnique, automatique, traitement du signal, intelligence artificielle, informatique industrielle, mécanique, thermique... sans oublier les sciences humaines et sociales.

A titre d'illustration, on peut s'appuyer sur l'un des produits développés par la société H2SYS, issue de la recherche de l'Institut FEMTO-ST et de la fédération FCLAB. Il s'agit ici d'un groupe électrogène à hydrogène, hybridé à des accumulateurs électrochimiques, et piloté par intelligence artificielle. Le groupe électrogène présenté en figure 3 propose une puissance électrique de 5 kW, son volume est d'environ 1 m x 0,5 m x 0,5 m pour un poids de 75 kg (stockage d'hydrogène compris). Son empreinte sonore en fonctionnement est particulièrement limitée, de moins de 40 dB à 3 m de distance.

Quels sont les verrous technologiques à lever ?

Depuis plusieurs années, les applications commerciales se multiplient, tant dans le domaine du transport que dans celui des applications stationnaires. A titre d'illustration, si l'on se focalise dans le domaine des applications transport, on peut citer les différents véhicules commerciaux existant aujourd'hui sur le marché, notamment ceux proposés par les constructeurs automobiles Toyota, Hyundai ou Honda. Dans le domaine du transport routier, il est courant de se référer aux objectifs fixés par le DOE (Department of Energy – USA). Le diagramme de Kiviat présenté en figure 4 permet ainsi d'identifier sept objectifs à atteindre, pour obtenir un produit industrialisable à grande échelle (typiquement sur une base de 500 000 unités par an). Ces sept objectifs concernent l'efficacité énergétique du système pile à hydrogène (objectif à 65 % pour la seule production électrique), sa durabilité (5 000 heures), sa densité de puissance et

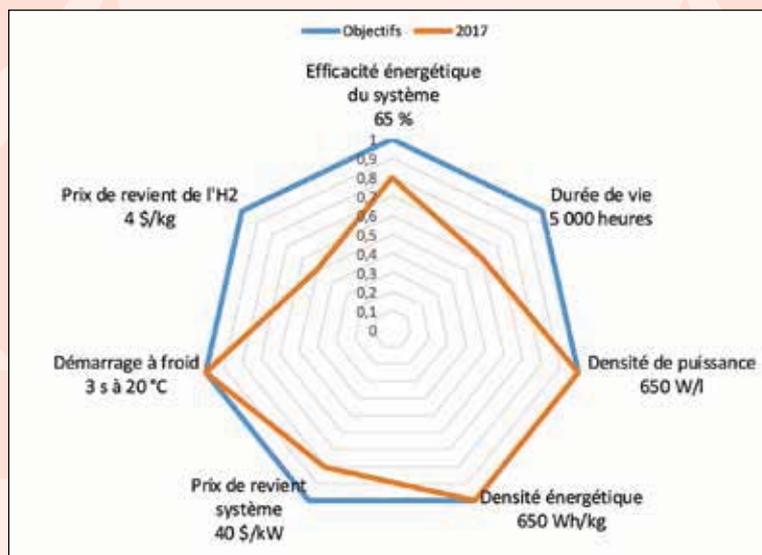


Figure 4 : Situation des développements en 2017 – cible application transport.



Figure 5 : Véhicules MobyPost - Première flotte de véhicules à hydrogène déployée en France.

d'énergie (respectivement 650 W/l et 650 Wh/kg), la durée d'un démarrage à froid (en moins de 30 secondes depuis $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, sans puissance extérieure) et les coûts (le prix d'un système pile à hydrogène devrait être inférieur à 40 \$/kW et celui de l'hydrogène inférieur à 4 \$/kg, sachant qu'il faut environ 1 kg d'hydrogène pour alimenter un véhicule familial sur 100 km).

On s'aperçoit ainsi que, dans ce domaine, ces verrous technologiques doivent conduire à développer des activités de recherche en sciences pour l'ingénieur dans le domaine de l'efficacité énergétique du système complet et dans celui de la durabilité du système, sous conditions d'usage réelles (cycles électriques, thermiques, vibratoires...). Les actions à mener en vue d'une réduction des coûts relèvent certes du domaine des sciences pour l'ingénieur, mais également du développement d'une réelle filière industrielle et de l'identification de modèles économiques robustes. L'approche adoptée ici est donc de type "top-down", du besoin industriel exprimé, vers le défi scientifique à relever.

Quelle déclinaison recherche dans les domaines relevant du génie électrique ?

Amélioration de l'efficacité énergétique

Dans ce domaine, le chercheur en génie électrique peut s'attacher tout d'abord à développer des auxiliaires ad-hoc

pour l'application pile à hydrogène. En effet, l'alimentation en air (ou oxygène) repose en général sur l'utilisation d'un compresseur d'air, idéalement très haute vitesse pour gagner en compacité et sans réducteur mécanique pour éviter les pertes associées. Ainsi, il est important de proposer des développements autour de machines électriques très haute vitesse (typiquement 100 000 tours / minute) mais aussi autour de leur alimentation et de leur pilotage, de manière à réduire au maximum la consommation énergétique du groupe moto-compresseur d'air.

Le convertisseur statique de sortie de la pile à hydrogène constitue un autre sujet de recherche intéressant. En effet, de nouvelles architectures DC/DC peuvent être proposées, associant haut rendement, fort rapport d'élévation en tension et courants élevés. En outre, de nouvelles fonctionnalités peuvent y être intégrées, comme par exemple l'ajout d'une possibilité d'utiliser le convertisseur statique pour réaliser le diagnostic temps réel de l'état de santé de la pile à combustible [3].

Différentes solutions d'hybridation électrique entre la pile à combustible et le stockage électrochimique ou électrostatique peuvent également être envisagées, hybridations externes avec ou sans convertisseur statique intermédiaire, mais aussi hybridations internes avec pour objectif de développer un composant hybride présentant à la fois une très bonne densité d'énergie et de puissance.

Bien entendu, l'optimum global d'un système n'étant jamais la somme des optima locaux, une optimisation à l'échelle systémique doit également être menée, avec pour objectif de travailler sur des architectures innovantes, mais aussi sur le développement d'algorithmes optimisés pour le pilotage des flux énergétiques au sein du système, en fonction de la demande de puissance exprimée au niveau de la charge (voir figure 5 : la flotte de véhicules Mobypost, première flotte de véhicules à pile à hydrogène française, développée par la fédération FCLAB, sur contraintes d'usages spécifiques à l'application de livraison postale visée).

Augmentation de la durabilité

Ici, le chercheur en génie électrique va s'attacher à travailler à nouveau dans une approche « top-down », très complémentaire de celle de type « bottom-up » déployée dans les laboratoires travaillant sur les matériaux ou l'électrochimie.

Ainsi, la première étape est de diagnostiquer l'état de santé du système pile à hydrogène, avec le moins de capteurs physiques possible, pour éviter toute augmentation associée des coûts et toute diminution de la fiabilité du système. De fait, les mesures possibles au sein du système pile à hydrogène peuvent être classées selon ce qui est techniquement et économiquement possible, envisageable sous certaines conditions, ou impossible (voir tableau 1).

Pour cette première étape de diagnostic en ligne de l'état de santé du système pile à hydrogène, différentes approches sont couramment investiguées dans la littérature, certaines reposant sur des approches basées modèle, d'autres sur des approches basées signal. Pour les premières (basées modèle), un modèle du système, analytique et reposant sur une connaissance approfondie des phénomènes physico-chimiques, ou de type boîte noire et reposant sur un vaste jeu de données expérimentales, doit tout d'abord être construit. Pour les secondes (basées signal), l'objectif est

d'obtenir un maximum d'informations sur l'état de santé en pratiquant une analyse, souvent temps-échelle, de quelques signaux judicieusement choisis au sein du système pile à hydrogène [4].

Si aujourd'hui, cette première étape de diagnostic temps réel est relativement bien maîtrisée, des travaux plus récents se concentrent sur le pronostic de durée de vie restante, pour le système pile à hydrogène, compte-tenu des conditions opératoires passées, présentes et envisagées pour le futur. Il s'agit ici de proposer aux industriels et utilisateurs finaux des métriques pour identifier la garantie commerciale susceptible d'être proposée aux produits développés, mais aussi des informations quant aux contraintes de maintenance, préventive ou palliative, sur ces objets [5].

Enfin, des travaux récents se concentrent également sur le contrôle tolérant aux fautes et/ou au vieillissement des systèmes pile à hydrogène ; l'idée étant ici de modifier en temps réel le pilotage de la pile à hydrogène, en fonction de son état de santé et de son niveau de vieillissement, de manière à garantir une continuité d'usage, même en mode dégradé [6].

Segmentation de puissance

Si l'on s'intéresse à la nécessaire réduction des coûts du système pile à hydrogène, comme déjà évoqué, celle-ci passe notamment par la mise en place d'une filière industrielle robuste. La prise en compte de secondes vies possibles pour les piles à hydrogène (de l'application transport vers l'application stationnaire par exemple) et le développement d'analyses en cycle de vie constituent une autre voie intéressante de progrès. Enfin, une approche liée au développement de briques énergétiques unitaires de puissance donnée, susceptibles d'être considérées de manière générique dans diverses applications, permettra également une baisse des coûts par une augmentation des volumes produits. En outre, cette dernière approche pourra également permettre

Possible	Envisageable sous conditions	Impossible
Courant stack	Tensions cellules	Débits dans les canaux de distribution
Tension stack	Pression gaz (entrée/sortie)	Densités locales de courant
Impédance stack*	Débits gaz	Hygrométrie des gaz
Température eau de refroidissement	Températures internes stack	Contenu hydrique de la membrane électrolytique
Température gaz		Impédance stack*
Vitesse groupe motocompresseur d'air		Composition des gaz (entrée et sortie)

Tableau 1 : Classification des mesures envisageables sur un système pile à hydrogène industriel, selon des critères techniques et économiques.

* Cette mesure est possible en temps réel uniquement si elle est réalisée directement via le convertisseur DC/DC de sortie de la pile à hydrogène, en modifiant son pilotage [3]. Une mesure via un spectromètre d'impédance électrochimique n'est envisageable que sur un banc d'essai instrumenté, pas dans une application industrielle.

des gains substantiels au niveau de la durabilité du système et/ou de son efficacité énergétique, comme le soulignent des travaux récents dans ce domaine [7].

Conclusions

Dans cet article, nous avons pu mettre en avant toutes les promesses que l'hydrogène peut proposer pour un futur mix énergétique. Sa dualité avec l'électricité en fait un vecteur énergétique particulièrement séduisant. Son utilisation dans des piles à hydrogène permet de découpler les notions d'énergie et de puissance, autorisant de fait des recharges extrêmement rapides et de grandes autonomies pour les systèmes électriques. Il reste bien entendu encore quelques verrous technologiques à lever et de passionnants défis scientifiques à relever. L'ingénieur, le chercheur en génie électrique, ont ainsi un rôle majeur à jouer, pour permettre le déploiement de système hydrogène-énergie, à la fois performants et durables.

Références

- [1] D. Hissel, Energie : les promesses de l'hydrogène, CNRS – Le Journal, décembre 2017.
- [2] M.C. Péra, D. Hissel, J.M. Kauffmann, Fuel cell systems for electrical vehicles: an overview, IEEE Vehicular Technology Society News, 49 (1), 9–14, 2002.
- [3] D. Depernet, A. Narjiss, F. Gustin, D. Hissel, M.C. Péra, Integration of electrochemical impedance spectroscopy functionality in proton exchange membrane fuel cell power converter, International Journal of Hydrogen Energy, 41 (11), 5378–5388, 2016.
- [4] D. Hissel, M.C. Péra, Diagnostic & health management of fuel cell systems: issues and solutions, Annual Reviews in Control, 42, 201-211, 2016.
- [5] M. Jouin, M. Bressel, S. Morando, R. Gouriveau, D. Hissel, M.C. Péra, N. Zerhouni, S. Jemei, M. Hilaret, B. Ould-Bouamama, Estimating the end-of-life of PEM fuel cells: guidelines and metrics, Applied Energy, 177, 87 - 97, 2016.
- [6] C. Lebreton, M. Benne, C. Damour, N. Yousfi-Steiner, B. Grondin-Perez, D. Hissel, J.P. Chabriat, Fault Tolerant Control Strategy applied to PEMFC water management, International Journal of Hydrogen Energy, 40 (33), 10636-10646, 2015.
- [7] N. Marx, D. Hissel, F. Gustin, L. Boulon, K. Agbossou, On the sizing and energy management of an hybrid multistack fuel cell – Battery system for automotive applications, International Journal of Hydrogen Energy, 42 (2), 1518-1526, 2017.

L'AUTEUR

DANIEL HISSEL est actuellement professeur des universités à l'université Bourgogne Franche-Comté. Il dirige la fédération de recherche CNRS FCLAB, regroupant six laboratoires de recherche au niveau national dans le domaine de l'hydrogène-énergie. Il pilote également l'équipe de recherche SHARPAC (Systèmes électriques hybrides, actionneurs électriques et systèmes piles à combustible) au sein de l'Institut FEMTO-ST (CNRS). Avant de rejoindre le monde académique, il a été ingénieur au sein de la société ALSTOM. Ses travaux de recherche concernent essentiellement l'efficacité énergétique et la durabilité des systèmes hydrogène-énergie. Il est auteur ou co-auteur de plus de 400 publications et communications au niveau international dans le domaine.