

## Préface

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). Il paraît donc logique, voire évident, de le considérer avec intérêt pour notre futur mix énergétique. Sur Terre, il n'est malheureusement que rarement présent sous forme de dihydrogène, il va donc falloir le produire. L'hydrogène ainsi produit, que l'on pourra qualifier de « vecteur énergétique hydrogène » présente une dualité naturelle avec le vecteur électricité (les passages d'un vecteur à l'autre étant obtenus soit par électrolyse de l'eau, soit grâce à une pile à hydrogène). Cette dualité rend son utilisation particulièrement facile d'usage, mais introduit aussi une capacité intrinsèque à limiter l'impact environnemental de la chaîne énergétique complète ; en effet, l'hydrogène peut, et même doit être produit en se passant de combustibles fossiles. On parlera alors souvent d'hydrogène-énergie, le suffixe étant important pour bien souligner la finalité de valorisation recherchée.

Dans ce contexte énergétique en forte évolution, les technologies disruptives (parmi lesquelles l'hydrogène-énergie) méritent d'être étudiées en profondeur. Cet ouvrage propose ainsi, fort justement, une vision systémique des enjeux technologiques, économiques et sociétaux liés à ce vecteur énergétique. Fort d'une expérience unique d'une vingtaine d'années dans le domaine, le Dr Samir Jemeï ne se limite cependant pas à cela. Il s'appuie sur cette expérience pour identifier les défis scientifiques majeurs restant à lever pour permettre d'amener les systèmes pile à hydrogène à un niveau de maturité technologique suffisant pour en faire des produits commerciaux totalement compétitifs.

Cet ouvrage va donc offrir au lecteur intéressé une vision approfondie de ces sujets en se focalisant sur deux questions majeures : l'hybridation des groupes électrogènes à hydrogène et l'identification de leur état de santé (actuel et son évolution future). Les résultats de nombreux travaux scientifiques menés ces dernières années sont ici synthétisés. On pourra noter en particulier l'intérêt des méthodes avancées de traitement du signal pour le pilotage en temps réel des flux énergétiques au sein des systèmes pile à hydrogène, mais aussi celui des approches basées sur l'intelligence artificielle pour le diagnostic de l'état de santé et le pronostic de durée de vie restante pour ces générateurs électrochimiques.

Malgré la complexité inhérente aux systèmes étudiés, cet ouvrage sait rester étonnamment pédagogique pour le profane. Le lecteur pourra donc se former progressivement aux enjeux, méthodes et stratégies adoptés (les besoins d'étude, les contraintes particulières associées au système pile à hydrogène, les différentes approches envisageables et les principes en résultant, les métriques permettant de poser un choix et les résultats susceptibles d'être obtenus). S'il le désire, il pourra même pousser son exploration de tel ou tel champ disciplinaire en s'appuyant sur la très riche base bibliographique fournie. Pour gagner encore en pédagogie, les approches utilisées sont systématiquement évaluées grâce à des données expérimentales (provenant de campagnes expérimentales sur bancs d'essais pile à hydrogène) ou sur des systèmes expérimentaux complets (notamment des véhicules électriques à hydrogène).

Ainsi, en sachant habilement mêler théorie scientifique et pratique industrielle, cet ouvrage doit être la référence indispensable pour tous les ingénieurs et chercheurs œuvrant dans le domaine de l'intégration des systèmes pile à hydrogène, qu'il s'agisse d'applications stationnaires respectueuses de l'environnement ou d'applications dans le domaine du transport propre.

Professeur Daniel HISSEL  
Université Bourgogne Franche-Comté  
Institut FEMTO-ST (CNRS)  
Fédération FCLAB (CNRS)

## Introduction

Les émissions mondiales de gaz à effet de serre couvertes par le protocole de Kyoto ont atteint près de 49 milliards de tonnes équivalents CO<sub>2</sub> en 2010. Elles ont augmenté de 80 % entre 1970 et 2010 et de 30 % depuis 1990 [FRA 15]. La grande majorité de ces émissions est évidemment liée à la combustion d'énergies fossiles. La pollution engendrée et le tarissement irréversible des ressources fossiles doivent nous amener à réfléchir sur notre système énergétique mondial qui semble à bout de souffle. De nombreuses mesures sont prises au travers de différents programmes tels que le développement durable, l'horizon 2020 ou encore la COP21, afin de diminuer les émissions de gaz à effet de serre, réduire les consommations énergétiques, stabiliser le réchauffement climatique, diversifier les sources d'énergies primaires ou encore développer les énergies renouvelables. La prise en compte de ces éléments contraint le système à une nouvelle transition énergétique et tend à faire augmenter la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique.

La production d'électricité à l'aide des énergies éoliennes et solaires arrive à maturité avec une production de plus en plus significative. Néanmoins, l'intermittence de ces énergies renouvelables est source de nombreuses problématiques de gestion du réseau électrique. Pour gérer un réseau constitué jour après jour d'un peu plus d'énergies intermittentes, il est nécessaire de disposer de réserves de stockage et de déstockage pour faire face à la différence entre l'offre et la demande sur un territoire donné. En effet, il est important de pouvoir composer avec différentes échelles de temps : journalier (jour/nuit), hebdomadaire (week-end/semaine) et saisonnier (été/hiver). Or, il s'avère que le moyen idéal pour stocker cette énergie d'origine renouvelable est l'hydrogène. Il peut être produit à partir de l'électrolyse de l'eau, elle-même alimentée par les énergies renouvelables. Le gaz produit est alors stocké sous différentes formes pour être utilisé au moment opportun. L'hydrogène pourra être combiné au gaz naturel dans les réseaux existants ou directement utilisé dans l'industrie ou encore pour fabriquer de nouveau de l'électricité grâce à une pile à combustible.

La pile à combustible (PAC) doit retenir toute notre attention, car elle est au cœur des activités de recherches présentées dans cet ouvrage. En effet, ce générateur électrochimique convertit l'énergie chimique d'une réaction entre un carburant (hydrogène) et un comburant (oxygène de l'air) pour produire de l'électricité, de la chaleur et de l'eau. Elle peut être utilisée pour des applications stationnaires, nomades ou encore transports. D'ailleurs, pour décarbonner les transports, l'utilisation du vecteur énergétique hydrogène combiné à une pile à combustible devient une solution de plus en plus mature. Pour preuve, de nombreux constructeurs automobiles mondiaux fabriquent et commercialisent aujourd'hui leur propre véhicule pile à combustible. Le dernier en date est le constructeur nippon Toyota qui a vendu près de mille unités en six mois et dont les prévisions atteindront 30 000 véhicules pile à combustible par an à partir de 2020.

Toujours au Japon, mais pour des applications stationnaires, plus de 200 000 systèmes pile à combustible ont été installés dans des résidences privées afin de produire de l'électricité et de la chaleur.

L'hydrogène peut être considéré dans tous les secteurs, pour stocker de l'énergie intermittente, alimenter des applications portables, pourvoir aux besoins d'un site isolé découplé du réseau électrique, propulser un moyen de transport automobile, ferroviaire, naval ou encore spatial... En 1874, Jules Verne avait prédit dans *L'Île mystérieuse*, sans algorithme d'intelligence artificielle, la chose suivante :

« L'eau sera un jour employée comme combustible, que l'hydrogène et l'oxygène, qui la constituent, utilisées isolément ou simultanément, fourniront une source de chaleur et de lumière inépuisable et d'une intensité que la houille ne saurait avoir. » [VER 74]

Un siècle et demi plus tard, l'avènement d'une société hydrogène est concevable.

Dans cet ouvrage, nous abordons essentiellement les problématiques liées à la technologie pile à combustible pour la production d'énergie. Même si de nombreux progrès ont été réalisés depuis une vingtaine d'années autour de la PAC, à ce jour, les défis techniques ne sont pas totalement résolus. Le travail de recherche décrit dans cet ouvrage s'inscrit dans ce contexte et nous nous sommes penchés sur des travaux qui relèvent du domaine du génie électrique et, à un moindre degré, du domaine de l'automatique.

Les travaux présentés s'articulent autour de trois axes, organisés en quatre chapitres.

Le premier chapitre débute avec un bref état des lieux sur le modèle énergétique actuel. Nous balaierons ensuite les solutions qui pourraient permettre de décarbonner le

bouquet énergétique. Parmi ces solutions, un focus est proposé sur le vecteur hydrogène qui est en lien étroit avec le générateur pile à combustible. Ce chapitre se termine avec la présentation de la pile à combustible et ses applications. Nous présenterons notamment les applications potentielles pour le transport et le stationnaire. Finalement, nous mettons en avant les avantages et inconvénients qu'offre cette technologie. Les problèmes de coût, de rendement, de durée de vie, d'intégration ou encore de stockage d'hydrogène constituent les problématiques liées à la PAC, mais elle permet surtout de ne rejeter que peu ou pas de polluants, d'être silencieuse, d'avoir un haut rendement énergétique, et à terme, de bénéficier d'une durée de vie conséquente et d'un coût réduit. Néanmoins, la PAC est un générateur multiphysique qui devient difficilement appréhendable lorsqu'il est considéré avec ses auxiliaires.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons les différents types de PAC existants et identifierons les deux technologies que sont les PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) et les SOFC (*Solid Oxyde Fuel Cell*) comme étant les solutions les plus prometteuses pour les applications transports et stationnaires. Quelle que soit la technologie retenue, de nombreux auxiliaires sont nécessaires pour faire fonctionner la PAC et il est important de savoir maîtriser l'ensemble du système. Ainsi, nous décrirons tous les auxiliaires et nous nous attarderons plus particulièrement sur le groupe moto-compresseur permettant l'alimentation en air de la PEMFC qui constitue un des plus gros consommateurs énergétiques du système (environ 10 à 15 %). Concernant la SOFC, qui se différencie notamment de la PEMFC de par sa température de fonctionnement supérieure à 800 °C, nous présenterons un générateur de puissance intégré. Pour les deux technologies, la mise en œuvre expérimentale est un point clé permettant d'appréhender le fonctionnement de la PAC et son système. Nous pouvons considérer ces travaux comme le premier axe qui constitue le socle des activités de recherche nécessaires à l'obtention d'un système PAC à durabilité augmentée. Le deuxième axe traite de l'optimisation énergétique de différentes sources d'énergie lorsqu'elles sont hybridées, ce qui permet d'augmenter la durée de vie des PAC. Le troisième axe est dédié au diagnostic et au pronostic de PAC qui permet en plus d'allonger la durée de vie et d'augmenter la fiabilité du générateur.

Ainsi, dans le troisième chapitre, nous aborderons l'hybridation des sources d'énergie. Si nous nous plaçons dans une application transport, il est important d'hybrider la PAC avec d'autres sources. La dynamique globale du système PAC est plutôt lente et entraînera des difficultés à suivre un profil de mission rapide. De plus, pour réduire la consommation énergétique globale dans un véhicule, il est nécessaire de récupérer l'énergie de freinage, ce qui est impossible avec une PAC seule car c'est une source non réversible. Enfin, l'hybridation de cette PAC avec des dispositifs de stockage d'énergie doit être envisagée pour obtenir des rendements globaux performants. Dans de tels systèmes hybridés, une stratégie de gestion d'énergie doit être développée, afin de

pouvoir répartir les demandes de puissance sur les bonnes sources, aux bons instants, en fonction du profil de mission à respecter. Deux approches sont proposées dans ce chapitre :

- la première, basée essentiellement sur la transformée en ondelettes combinée aux réseaux de neurones, a permis de développer une gestion d'énergie en ligne appliquée à un véhicule hybride lourd composé essentiellement d'un système PAC, d'accumulateurs électrochimiques et de supercondensateurs. Nous retiendrons notamment que cette répartition d'énergie prend en compte les gammes de fréquences des différentes sources en utilisant seulement les données actuelles et antérieures d'un signal monovarié de la demande de puissance du véhicule. Cela permettra, à terme, de réaliser une implantation en temps réel mais également d'augmenter la durée de vie de la PAC ;

- la deuxième approche repose sur la logique floue de type 2 et les algorithmes génétiques. Cette solution a été appliquée sur une locomotive hybride, composée d'accumulateurs électrochimiques, de supercondensateurs et d'un groupe Diesel, afin de minimiser la consommation de carburant. Les résultats montrent que les caractéristiques et dynamiques des différentes sources ont été prises en compte grâce aux outils de l'intelligence artificielle. Nous proposons, ici, des gestions d'énergie performantes permettant d'utiliser les sources de manière optimale. Néanmoins, il convient de concentrer nos efforts sur la durée de vie et la fiabilité de la PAC afin d'avoir un système hybride encore plus performant.

Pour cela, le quatrième chapitre examine le diagnostic et le pronostic de la PAC. Ces deux disciplines doivent nous permettre d'atteindre notre objectif d'augmentation de durée de vie et de fiabilité. Les méthodes de diagnostic permettent d'identifier l'origine d'une défaillance et déterminer l'état de santé de la PAC pour recourir à des prises de décisions assurant un bon fonctionnement du générateur. La discipline du PHM (*Prognostics and Health Management*) permet, quant à elle, de prédire l'évolution du comportement de la PAC afin d'estimer un défaut futur. Il existe de nombreuses approches pour développer des outils de diagnostic et de pronostic. Néanmoins, il est important d'avoir au préalable une connaissance approfondie des mécanismes de dégradation de la PAC et de son système pour aboutir à des solutions efficaces. Ainsi, dans la première partie de ce chapitre, nous balayons les mécanismes de dégradation et les défaillances pouvant survenir sur la PAC et son système. Dans une deuxième partie, nous présenterons deux méthodes de diagnostic. La première, basée données, est une méthode de classification supervisée appelée « k plus proches voisins ». La seconde, basée signal, repose sur la transformée en ondelettes. Ces approches ont notamment permis d'effectuer le diagnostic de différents défauts pouvant survenir sur le système PAC avec des taux de bonnes classifications atteignant les 90 %. Nous verrons qu'il est également possible d'estimer l'état de santé de la PAC grâce à la transformée en ondelettes couplée à des indicateurs énergétiques. Dans la dernière partie de ce

chapitre, nous développerons les méthodologies portées sur le pronostic basé données. Les outils utilisés pour suivre l'état de santé et estimer le comportement futur de la PAC sont basés sur les réseaux de neurones. Les premiers travaux sont traités à l'aide des systèmes ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*). Ce modèle permet notamment de prédire le comportement de l'évolution temporelle de la tension. Néanmoins, les bases d'apprentissages s'avèrent conséquentes. Pour réduire les données nécessaires et obtenir de meilleures performances de prédiction, nous avons utilisé dans un second temps, les ESN (*Echo State Network*) qui sont des nouveaux systèmes de réseaux de neurones. Les réseaux de neurones traditionnels sont souvent coûteux en temps de calcul du fait de la complexité algorithmique. Pour les ESN, la complexité algorithmique est remplacée par la complexité structurelle de telle sorte que la phase d'apprentissage est plus rapide que celle des réseaux de neurones traditionnels. Nous verrons que grâce à l'utilisation d'ESN, d'algorithmes génétiques et de transformée en ondelettes, les résultats obtenus sont très encourageants. En effet, ils permettent une prédiction des tensions cellules jusqu'à la fin de vie de la PAC avec une erreur inférieure à 10 %.

