

Un outil de simulation pour l'étude de la fiabilité d'une pile à combustible de type PEM

Nicolas NOGUER^{1,2,3}, Denis CANDUSSO^{2,3}, Raed KOUTA^{1,2},
Fabien HAREL^{2,4}, Willy CHARON^{1,2}, Gérard COQUERY³

¹ UTBM, IRTES, M3M, Rue de Leupe, F-90400 Sevenans

² FCellSYS, Plateforme pile à combustible, UTBM bâtiment F, Rue Thierry Mieg, F-90010 Belfort Cedex

³ IFSTTAR / COSYS / LTN, 25 Allée des marronniers, F-78000 Versailles Satory

⁴ Université de Lyon, IFSTTAR / AME / LTE, 25 Av. F. Mitterrand, Case24, Cité des mobilités, F-69675 Bron Cedex

[*] Contact: nicolas.noguer@utbm.fr Tél.: +33 (0)3 84 58 36 33; Fax: +33 (0)3 84 58 36 36;

Autres adresses courriels: denis.candusso@ifsttar.fr, raed.kouta@utbm.fr, fabien.harel@ifsttar.fr,
willy.charon@utbm.fr, gerard.coquery@ifsttar.fr

RESUME - Cet article présente une démarche d'aide à l'évaluation de la fiabilité d'une pile à combustible de type PEM. L'objectif est de garantir un niveau de performance électrique donné dans les différentes conditions d'usage envisagées. La démarche s'appuie sur un couplage physico-fiabiliste où la complexité des phénomènes physiques présents dans la pile est prise en compte par une modélisation dynamique, symbolique, acausale et par des paramètres physiques et semi-empiriques. La modélisation retenue, monodimensionnelle, non isotherme inclut une représentation diphasique des écoulements fluidiques. Les qualités du logiciel DYMOLA de Dassault Systèmes environnant le langage MODELICA sont mises à profit pour considérer un maximum de paramètres opératoires ou liés au design de l'assemblage. Ces paramètres sont structurés de telle façon qu'ils permettent de simuler les conséquences de différents types d'incertitudes ou de dégradations ; leurs influences sur la réponse électrique de la pile peuvent être observées.

MOTS-CLES – Pile à combustible, Modélisation, Analyse statistique, Fiabilité, Modelica

1. Modélisation

La modélisation concerne d'abord une cellule individuelle d'un stack de pile à combustible de type PEMFC (à membrane échangeuse de protons). La cellule est divisée en neuf composants : une membrane électrolytique, deux couches catalytiques (cathode et anode), deux couches de diffusions (GDL), deux plaques bipolaires à canaux distribuant les réactifs et deux plaques collectrices de courant. La Figure 1 correspond à la représentation graphique multicouche d'une cellule de PEMFC décrite dans l'environnement DYMOLA, un logiciel de Dassault Systèmes faisant intervenir le langage MODELICA. Une telle cellule individuelle peut ensuite être assemblée avec d'autres cellules pour former un stack complet.

La pile est alimentée en air et hydrogène humidifiés. Ces réactifs passent par les plaques à canaux puis par les GDL pour atteindre les foyers catalytiques où les réactions chimiques se produisent. Le courant est imposé aux bornes de la cellule (mode galvanostatique) et la tension est déterminée en fonction des pressions, des débits, de l'humidification des réactifs et de la température notamment. Chaque couche du modèle possède son propre ensemble de phénomènes modélisés. Par exemple, dans les GDL, les diffusions sont multi-espèces et multiphasiques : chaque réactif de la pile est considéré comme un mélange de gaz et d'eau liquide [1]. Les conditions locales dans un élément sont calculées dynamiquement en utilisant des lois de conservation et de transport de la matière et de l'énergie [2]. L'évolution temporelle des variables liées à chacun des composants de la cellule peut ainsi être déterminée. Le modèle dans son état actuel ne permet cependant pas encore de connaître l'évolution spatiale des variables dans un composant.

La tension de la cellule peut être calculée pour différentes conditions opératoires (température de la cellule réglée à la sortie de l'empilement dans la boucle de refroidissement de la pile, coefficients de stœchiométries des réactifs, pressions et taux d'humidité des gaz aux entrées), pour différents paramètres intrinsèques liés au design de la pile ou aux matériaux utilisés dans les composants (comme l'épaisseur des différentes couches de l'assemblage ou la porosité des GDL). Il est alors possible d'évaluer l'effet de ces paramètres sur la réponse électrique de la cellule grâce à une analyse temporelle et à des comparaisons avec des résultats expérimentaux. Le modèle permet aussi d'identifier l'impact de

paramètres à la nature semi-empirique (valeurs issues de références bibliographiques ou de documents constructeurs) et utilisés en différents lieux de la modélisation, par exemple dans les équations électriques présentes dans le sous-modèle du cœur de pile (surtensions aux électrodes).

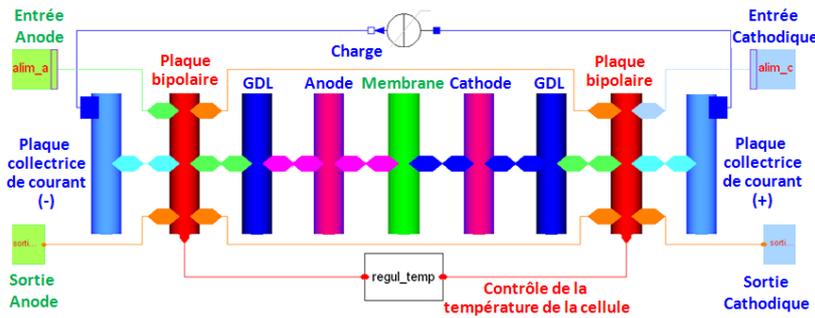


Figure 1 : Couche graphique du modèle de pile développé sous DYMOLA.

2. Analyse statistique

Au-delà des simulations temporelles, le modèle proposé permet aussi de réaliser commodément des analyses statistiques. Il est en effet possible de faire varier un paramètre, qu'il soit opératoire, intrinsèque ou semi-empirique, suivant une loi statistique, avec des tirages de type Monte-Carlo (Figure 2), et d'observer la distribution de la réponse comme la tension ou l'impédance de la membrane. De multiples formes de variations de paramètres sont envisageables : loi statistique normale, uniforme, log normale, Pareto, exponentielle, beta, Weibull, Poisson, etc.

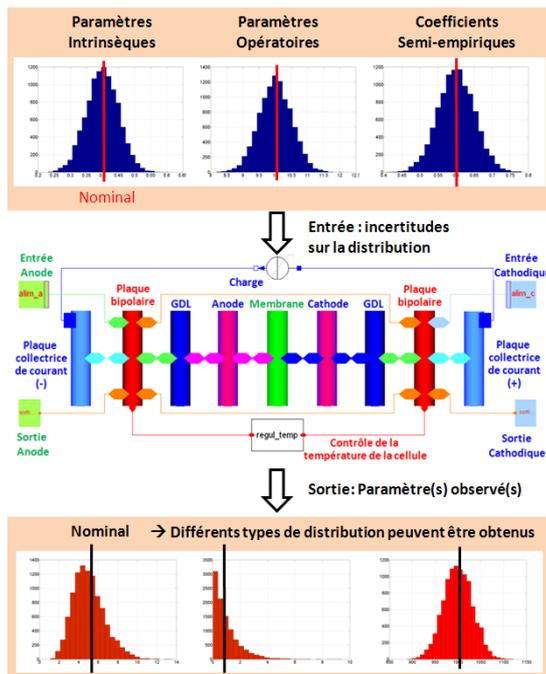


Figure 2 : Exemple d'utilisation des possibilités du modèle développé en vue d'une analyse statistique fiabiliste d'une technologie de pile à combustible.

3. Conclusion

Une méthodologie d'étude de la fiabilité d'une pile à combustible de type PEM dans les conditions réelles est en cours de développement. Cette méthodologie met en œuvre un outil très puissant fondé sur un modèle multi-physique dynamique et statistique qui permet d'introduire des incertitudes et des dégradations sur des paramètres de différents types (opératoire, intrinsèque et semi-empirique) afin d'étudier l'effet de ces variations sur la réponse électrique et plus généralement sur les performances de la pile.

4. Références

- [1] P. Noiying, M. Hinaje, P. Thounthong, S. Raël, B. Davat. Using electrical analogy to describe mass and charge transport in PEM fuel cell. Renewable Energy, Vol. 44, Aout 2012, Pages 128-140.
- [2] J-P. Poirot-Crouvezier. Modélisation dynamique des phénomènes hydrauliques, thermiques et électriques dans un groupe électrogène à pile à combustible. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 2000.