

## La fiabilité prévisionnelle d'une pile à combustible de type PEMFC

Nedjem-Eddine BENCHOUIA<sup>#1</sup>, Belgacem MADI<sup>2</sup>, Mounir BENADJA<sup>3</sup>

<sup>#1</sup>*Département de Génie Mécanique,  
Faculté des sciences et de la Technologie,  
Université Mohamed-Chérif Messaadia Souk Ahras, 41000, Algeria  
<sup>1</sup>n.benchouia@univ-soukahras.dz*

<sup>2</sup>*Département de Génie Mécanique,  
Faculté de la Technologie,  
Université 20 aout 1955, Skikda, 21000 Algeria  
<sup>2</sup>b\_madi2000@yahoo.fr*

*Département de Génie Électrique  
<sup>3</sup>École de Technologie Supérieure(ÉTS), Montreal, Canada  
<sup>3</sup>mounir.benadja.1@ens.etsmtl.ca*

### Résumé :

L'objectif de cet article est de proposer une nouvelle démarche de calcul de la fiabilité prévisionnelle en appliquant la Méthode de l'Espace des Etats (MEE) aux systèmes piles à combustible PEMFC.

Notre travail porte essentiellement sur l'estimation de la fiabilité de la pile à combustible PEMFC elle-même appliqués aux composants soumis au dommage, systèmes de conversion (boost, buck) et le système de stockage.

**Mots clés :** Pile à combustible, Fiabilité, Analyse, Méthode de l'Espace d'Etats (MEE).

### Abstract:

The objective of this paper is to propose a new method for calculating predictive reliability by applying the State Space Method (MEE) to PEMFC fuel cell systems.

Our work focuses on estimating the reliability of the PEMFC fuel cell itself applied to components subject to damage, conversion systems (boost, buck) and storage system.

**Key words:** Fuel cell, Reliability, Analysis, Method of the Space of States (MEE)

### 1. Introduction

L'analyse de la fiabilité constitue une phase indispensable dans toute étude de sûreté de fonctionnement. A l'origine, la fiabilité concernait les systèmes à haute technologie (centrales nucléaires, aérospatial). Aujourd'hui, la fiabilité est devenue un paramètre clé de la qualité et d'aide à la décision, dans l'étude de la plupart des composants, produits et processus « grand public » : Transport, énergie, bâtiments, composants électroniques, composants mécaniques... [1].

Du point de vue industriel, la fiabilité en général et particulièrement celle liée aux systèmes piles à combustible n'a de sens que si cette fiabilité est associée à une valeur numérique. Le taux de défaillance des systèmes PEMFC est un critère de choix et une figure de mérite est utilisée pour qualifier ce genre de système.

Pour évaluer la fiabilité d'une PAC (que ce soit à l'échelle d'une cellule, d'une pile complète ou d'un segment de pile), des approches d'analyse spécifique combinées avec des outils de simulation et de modélisation adaptés peuvent être mis en oeuvre. Mawardi et al. proposent une méthodologie basée sur une modélisation monodimensionnelle, non isotherme des phénomènes physiques et un modèle d'échantillonnage stochastique afin d'analyser les effets d'incertitude sur des paramètres observables sur les performances d'une PEMFC [2]. Naga Srinivasulu et al. ont utilisé une analyse de sensibilité multiparamétrique pour évaluer des modèles électrochimiques de PEMFC dans le but de déterminer l'importance relative de chaque paramètre du modèle sur les résultats de la simulation [3]. Dans [4], Placca et al. mettent en oeuvre un plan d'expérience factoriel complet et une analyse de sensibilité statistique (ANOVA) pour évaluer les effets et les contributions des paramètres du modèle soumis à des incertitudes sur la tension de sortie calculée.

Dans cet article, nous estimons la fiabilité de la pile à combustible PEMFC elle-même appliqués aux composants soumis au dommage, systèmes de conversion (boost, buck) et le système de stockage, tout en utilisant le processus de Markov.

## **2. Etude quantitative**

### **2.1. Méthode de l'Espace des Etats (MEE)**

La Méthode de l'Espace des Etats (MEE) (ou processus de Markov) permet l'analyse de fiabilité des systèmes réparables [5], [6], [7], [8], [9], [10]. La première étape de construction d'un graphe de Markov consiste à identifier les différents états (défaillants ou non défaillants) que le système peut occuper. L'étape suivante consiste à chercher comment le système passe d'un état à un autre. A chaque transition, de l'état  $E_i$  vers l'état  $E_j$ , est associé un taux de transition  $L_{ij}$  défini de telle sorte que  $L_{ij}.dt$  est égal à la probabilité de passer de  $E_i$  vers  $E_j$  entre deux instants très proches  $t$  et  $t + dt$  sachant que l'on est en  $E_i$  à l'instant  $t$ .

Supposons un système constitué par des composants, chaque composant ayant un nombre fini d'états de fonctionnement et de panne ; on construira un graphe dont les sommets correspondront aux différents états du système et les arcs correspondront aux transitions (panne et réparation) entre états. Pour un système à  $n$  composants, si chaque composant a deux états (fonctionnement et panne), le nombre maximum d'états est  $2^n$ .

Le calcul de la fiabilité est réalisé à partir de différents états du système.

Le principal avantage de cette méthode est de permettre la modélisation de systèmes réparables.

La méthode est souvent difficile à appliquer pour des systèmes de grande taille caractérisés par une explosion des états.

### **2.2. Méthode de l'Espace d'Etats (MEE)**

L'état (i) dans lequel se trouve le système à un instant  $t$  ne dépend que des états (i-1) ou (i+ 1).

Le passage d'un état à l'autre se réalise suivant une loi exponentielle à taux de défaillance

( $\lambda$ ) =1/MTBF et à taux de réparation ( $\mu$ )=1/MITR constants.

### 2.2.1. MEE de la pile PEMFC

Nous avons réalisé une analyse de La pile PEMFC à travers de la méthode MEE. La figure.1 propose un exemple d'application de la méthode **MEE** à la pile PEMFC, pour les différentes défaillances présente dans le tableau.1.

Tableau. 1. Liste des défaillances pour l'application de la méthode MEE sur la pile PEMFC

Défaillance	Description
<b>A</b>	MEA échouant
<b>B</b>	Échec de la couche de diffusion
<b>C</b>	Plaques bipolaires défectueuses
<b>D</b>	Joints défectueux
<b>E</b>	Barres de renforcement défectueuses
<b>F</b>	Noix défectueuses
<b>G</b>	Connecteurs défectueux

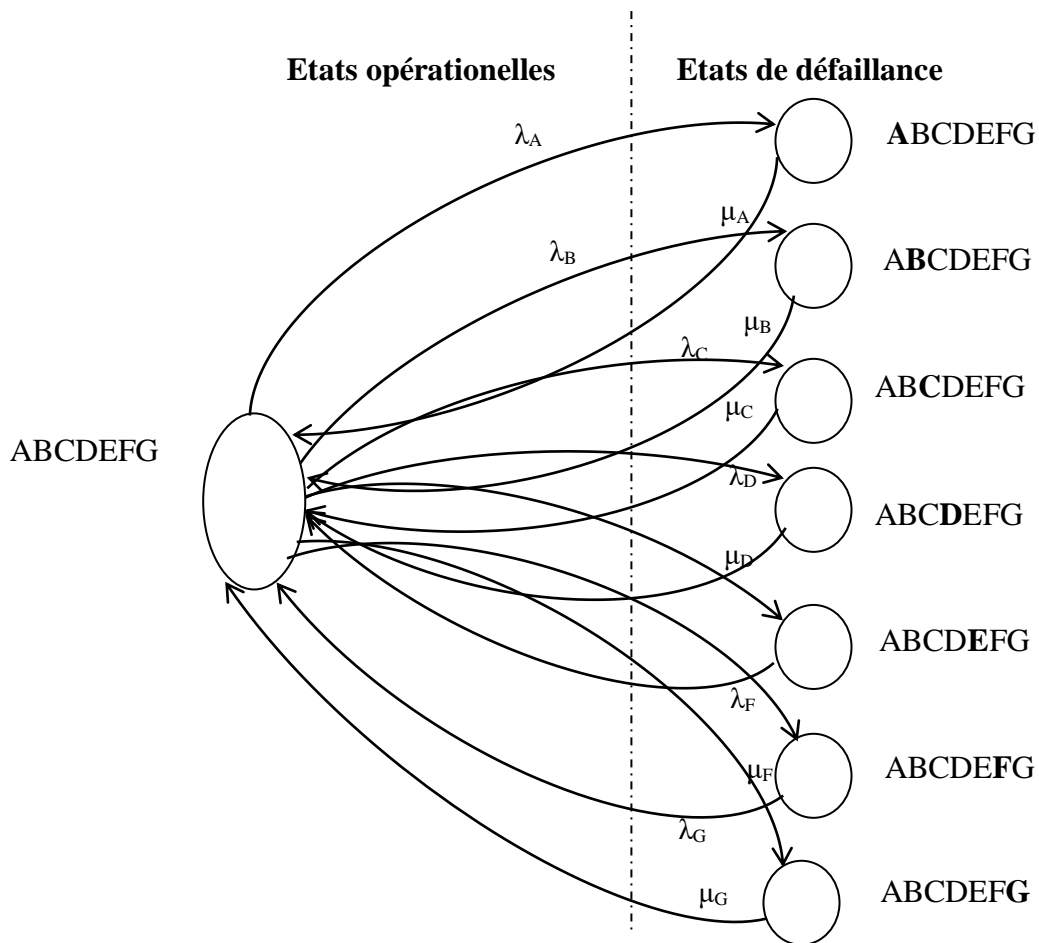


Figure. 1. Méthode MEE appliquée sur la pile PEMFC

### 2.2.2. MEE du système étudié

Cette méthode résulte d'une théorie mathématique dont les grandes lignes seront présentées.

On modélise le processus de la figure.2 comme 3 systèmes "série" . La panne de l'un des 3 systèmes provoque l'arrêt ou une indisponibilité du système.

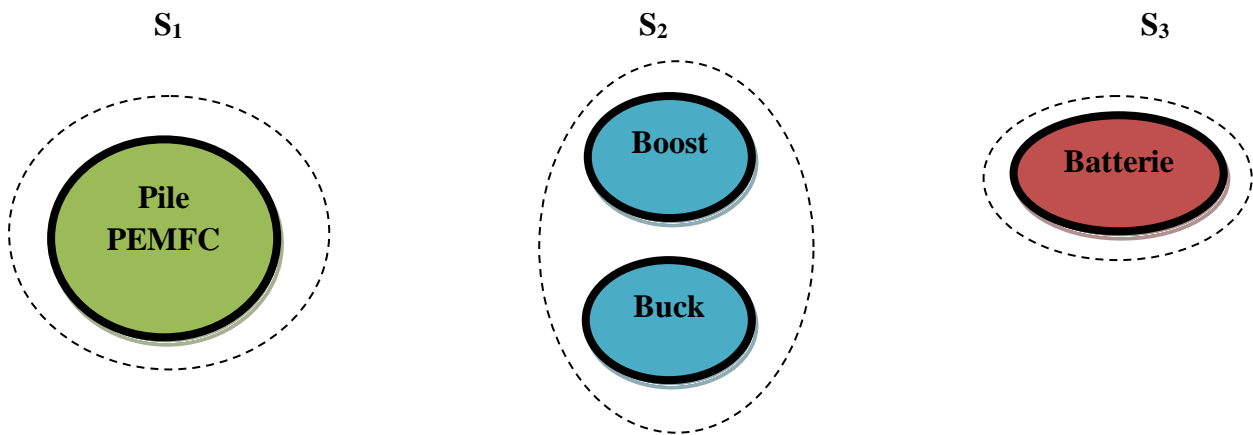


Figure .2. Modèle d'étude du processus

Etat 0: les systèmes  $S_1$ ,  $S_2$  et  $S_3$  fonctionnent.

Etat 1: le sous système  $S_1$  est en panne

Etat 2: le sous système  $S_2$  est en panne

Etat 3: le sous système  $S_3$  est en panne

Etat 4: les sous systèmes  $S_1$  et  $S_2$  sont en panne

Etat 5: les sous systèmes  $S_1$  et  $S_3$  sont en panne

Etat 6: les sous systèmes  $S_2$  et  $S_3$  sont en panne

Etat 7: les systèmes  $S_1$ ,  $S_2$  et  $S_3$  sont en panne

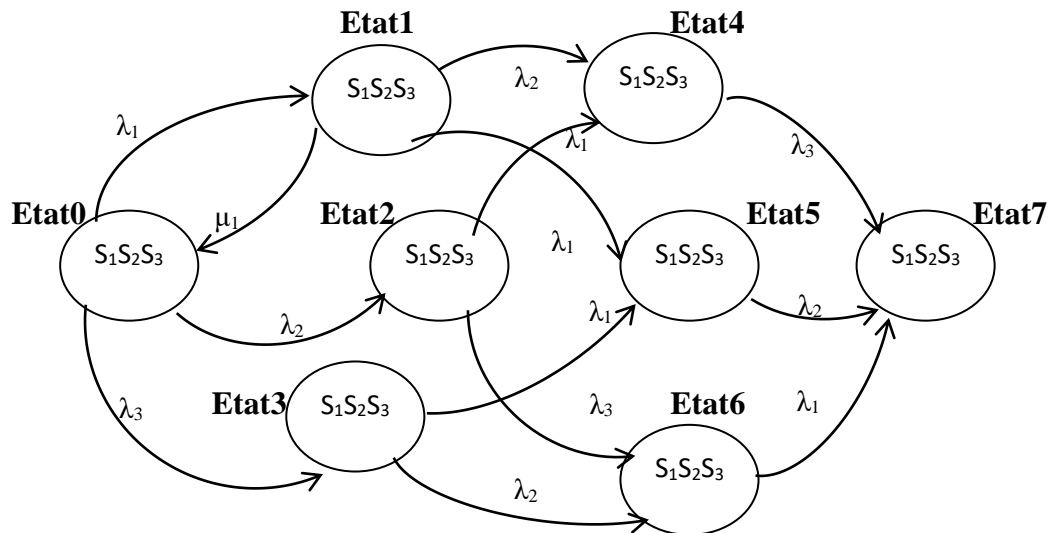


Figure .3. Chaîne de Markov

**Remarque:** la probabilité pour que 2 sous systèmes ou 3 tombent en panne simultanément est négligée. Cette probabilité étant jugée très faible, il n'est pas souhaitable de la prendre en compte pour ne pas compliquer les calculs.

**Matrice d'états A associée au graphe**

A=

$$\begin{bmatrix}
 -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) & \mu_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \lambda_1 & -(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \lambda_2 & 0 & -(\lambda_1 + \lambda_3) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \lambda_3 & 0 & 0 & -(\lambda_1 + \lambda_3) & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \lambda_2 & \lambda_1 & 0 & -\lambda_3 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \lambda_3 & 0 & \lambda_1 & 0 & -\lambda_1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \lambda_3 & \lambda_2 & 0 & 0 & -\lambda_1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_3 & \lambda_2 & \lambda_1 & 0
 \end{bmatrix}$$

(1)

$[P'] = [M] [P]$  avec:

$$P' = \begin{bmatrix} P'_0 \\ P'_1 \\ P'_2 \\ P'_3 \\ P'_4 \\ P'_5 \\ P'_6 \\ P'_7 \end{bmatrix} \quad P = \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \\ P_7 \end{bmatrix} \quad (2)$$

On peut donc écrire :

$$\begin{aligned} P'_0 &= (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)P_0 + \mu_1 P_1 \\ P'_1 &= \lambda_1 P_0 - (\lambda_2 + \lambda_3 + \mu_1)P_1 \\ P'_2 &= \lambda_2 P_0 - (\lambda_1 + \lambda_3)P_2 \\ P'_3 &= \lambda_3 P_0 - (\lambda_1 + \lambda_2)P_3 \\ P'_4 &= \lambda_2 P_1 + \lambda_1 P_2 - \lambda_3 P_4 \\ P'_5 &= \lambda_3 P_1 + \lambda_1 P_3 - \lambda_2 P_5 \\ P'_6 &= \lambda_3 P_2 + \lambda_2 P_3 - \lambda_1 P_6 \\ P'_7 &= \lambda_3 P_4 + \lambda_2 P_5 - \lambda_1 P_6 \end{aligned} \quad (3)$$

Avec, comme conditions initiales :

$$\sum P_i = 1 \quad (4)$$

$$P_0(0) \approx 1$$

La fiabilité globale avec les hypothèses utilisées est donc égale à  $P_o + P_r$

Dans le cadre d'études de fiabilité d'ensembles complexes, on est amené à résoudre des équations différentielles et à utiliser la transformée de *Laplace*. La technique est de passer d'un espace temporel à l'espace de *Laplace* où les équations sont plus aisées à résoudre.

On obtient alors pour notre système :

$$\begin{aligned} 1 - sP_0 &= (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)P_0 + \mu_1 P_1 \\ sP_1 &= \lambda_1 P_0 - (\lambda_2 + \lambda_3 + \mu_1)P_1 \\ sP_2 &= \lambda_2 P_0 - (\lambda_1 + \lambda_3)P_2 \end{aligned} \quad (5)$$

$$sP_3 = \lambda_3 P_0 - (\lambda_1 + \lambda_2) P_3$$

$$sP_4 = \lambda_2 P_1 + \lambda_1 P_2 - \lambda_3 P_4$$

$$sP_5 = \lambda_3 P_1 + \lambda_1 P_3 - \lambda_2 P_5$$

$$sP_6 = \lambda_3 P_2 + \lambda_2 P_3 - \lambda_1 P_6$$

$$sP_7 = \lambda_3 P_4 + \lambda_2 P_5 - \lambda_1 P_6$$

En arrangeant les termes, et en tenant compte des conditions initiales, on a :

$$\begin{bmatrix} -(s + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) & \mu_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_1 & -(s + \lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_2 & 0 & -(s + \lambda_1 + \lambda_3) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_3 & 0 & 0 & -(s + \lambda_1 + \lambda_3) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \lambda_1 & 0 & -(s + \lambda_3) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_3 & 0 & \lambda_1 & 0 & -(s + \lambda_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 & \lambda_2 & 0 & 0 & -(s + \lambda_1) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_3 & \lambda_2 & \lambda_1 & s \end{bmatrix}$$

(6)

Ce système d'équations peut se résoudre de différentes façons. La solution retenue est la méthode de *Cramer*, elle se prête à l'informatisation et dans le cas où l'on a davantage d'éléments, son intérêt devient plus grand.

**Application numérique:** On trouve  $P_0 + P_1 = 0.8735$

La fiabilité de fonctionnement est donc de 0.8735 pour  $t=8000$  heures de fonctionnement.

### 3. Conclusion

Dans ce travail, nous avons proposé les différentes défaillances de la pile PEMFC ainsi que pour le système. Nous avons essayé d'estimer et analyser la fiabilité prévisionnelle d'un système pile PEMFC.

En effet une bonne fiabilité permettra de garantir non seulement la sécurité des systèmes (et par conséquent des personnes) mais aussi la diminution des coûts liés à la maintenance et à la non disponibilité des systèmes. De plus, la prédiction de la fiabilité en fonction des profils de mission dès la phase de conception des systèmes est un avantage compétitif de tout premier plan car il permettra de retenir les architectures des systèmes répondant au mieux au besoin, ce qui permettra de garantir la maîtrise des nouvelles technologies introduites et de réaliser des produits innovants ayant un niveau de maturité suffisant.

En résumé, les piles à combustible ont le potentiel de révolutionner nos vies dans une proche façon que le microprocesseur a été. Une fois que nous avons trouvé un moyen de faire ces piles à combustible commercialement abordable, cette source d'énergie va changer notre monde et améliorer la qualité de nos vies en réduisant la dégradation de l'environnement causée par les moteurs à combustion.

#### 4. Références

- [1] Ouahiba Tebbi. Estimation des lois de fiabilité en mécanique par les essais accélérés, Thèse de Doctorat, Université d'Angers, France. 7 Jun 2005.
- [2] A. Mawardi, R. Pitchumani. Effects of parameter uncertainty on the performance variability of proton exchange membrane (PEM) fuel cells. *Journal of Power Sources*, Vol. 160, Issue 1, Pages 232-245, Sept. 2006.
- [3] G. Naga Srinivasulu, T. Subrahmanyam, V. Dharma Rao. Parametric sensitivity analysis of PEM fuel cell electrochemical Model. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, Issue 22, Nov. 2011, Pages 14838-14844, 20 Oct. 2009.
- [4] L. Placca, R. Kouta, J-F. Blachot, W. Charon. Effects of temperature uncertainty on the performance of a degrading PEM fuel cell model. *Journal of Power Sources*, Vol. 194, Issue 1, Pages 313-327.
- [5] Villemeur, A. (1988). *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels : fiabilité, facteurs humains, informatisation*. Eyrolles, Paris.
- [6] Pagès, A. et Gondran, M. (1980). *Fiabilité des systèmes*. Eyrolles, Paris.
- [7] Schoenig, R., Aubry, J.-F., Cambois, T., et Hutinet, T. An aggregation method of markov graphs for the reliability analysis of hybrid systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 91(2) :137–148, 2006.
- [8] Birolini, A. (1997). *Quality and Reliability of Technical Systems*. Springer, Berlin.
- [9] Bon, J.-L. (1995). *Fiabilité des systèmes - Méthodes mathématiques*. Masson, Paris.
- [10] Frankel, E. G. (1988). *Systems reliability and risk analysis*. Kluwer Academic, Dordrecht, Netherlands.