



HAL
open science

Simulation numérique des interfaces multi-contacts dans une pile à combustible

Zhi-Ming Zhang, Christine Renaud, Zhi-Qiang Feng

► **To cite this version:**

Zhi-Ming Zhang, Christine Renaud, Zhi-Qiang Feng. Simulation numérique des interfaces multi-contacts dans une pile à combustible. 9e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2009, Giens, France. hal-01413822

HAL Id: hal-01413822

<https://hal.science/hal-01413822>

Submitted on 11 Dec 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Simulation numérique des interfaces multi-contacts dans une pile à combustible

Zhi-Ming Zhang, Christine Renaud, Zhi-Qiang Feng

Laboratoire de Mécanique et d’Energétique d’Evry
Université d’Evry - Val d’Essonne
40 rue du Pelvoux, 91020, Evry Cedex
{zhang, renaud, feng}@iup.univ-evry.fr

Résumé — Le problème du contact est fortement non linéaire et non régulier, surtout dans des interfaces multi-contacts entre différents sous-systèmes. La structure de la pile à combustible (PAC) est lamellaire et constituée de multi-couches en contact les unes avec les autres. L’objectif principal de cet article est de créer un modèle paramétrique pour permettre d’étudier le comportement du contact afin de prédire l’influence des comportements mécaniques multi-contacts sur la performance de la PAC. Les résultats numériques peuvent aider à augmenter les connaissances de la performance et déterminer des paramètres pour la conception de la PAC.

Mots clés — PAC, multi-contacts, pression de contact.

1 Introduction

Les ressources limites devient un problème au quel des publiques s’intéressent. Les questions énergétiques recouvrent à l’heure actuelle en deux domaines. L’un est lié au risque d’épuisement des ressources fossiles et fissiles, l’autre est le problème de la pollution environnemental. Les piles à combustible (PAC) apparaissent comme l’une des solutions les plus prometteuses. La PAC est un générateur d’énergie électrique. Elle transforme de l’énergie chimique du combustible en énergie électrique. Les applications sont prometteuses surtout dans le secteur du transport : véhicule électrique ou aéronautique, etc,. Car la PAC présente de nombreux avantages comme : densité supérieure de puissance, absence de pollution, basse température (70°C-90°C) et rapidité du démarrage, etc [1]. La performance, la durabilité et la fiabilité d’une PAC sont la préoccupation principale des chercheurs dans le monde. Les paramètres influent sont nombreux : chargement mécanique par des boulons tirants, température de fonctionnement, pression de gaz, etc. Il est donc nécessaire d’étudier l’impact du comportement mécanique sur une PAC.

La structure d’une PAC est lamellaire et constituée d’un empilement de différent éléments comme AME (Assemblage Membranes Échangeuses) et GDL (Couche Diffusion Gazeuse), reliés par l’intermédiaire de BP (Plaques Bipolaires) formant ainsi une “Cellule”. Plusieurs cellules avec des plaques de serrage (PS) forme un “Stack” comme indiqué à la figure 1. Pour garantir la réaction chimique et la conductibilité de l’électricité entre des cellules, la structure est assemblée en contact par l’intermédiaire de boulons serrés aux extrémités. Cet assemblage conduit au problème des interfaces multi-contacts entre des éléments : AME et GDL, GDL et BP, BP et PS.

L’assemblage conduit à des pertes de puissance à cause de la résistance de contact entre les éléments [2]. En effet, la résistance de contact dépend fortement de l’état du contact entre les éléments. Par exemple, une perte de contact peut fortement diminuer la densité de puissance de la

PAC. Une forte pression du contact conduit à l'augmentation de la conductivité et de la densité de puissance de la PAC. Par contre, les éléments comme AME et GDL sont des matériaux fragiles et relativement minces, une pression trop importante pourrait provoquer des fissures comme constaté par Su *et al.* [3] (Figure 2). En plus, Stanic *et al.* [4] ont étudié le problème de la durabilité mécanique d'un AME. Ils ont trouvé que l'endommagement est souvent dû au "Pinhole", ce qui apparaît en surface où la pression de contact est maximale. Comme les cellules de la PAC sont connectées en série, l'endommagement d'une cellule provoque un dysfonctionnement de toute la PAC. Il est donc important d'étudier le comportement des interfaces multi-contacts.

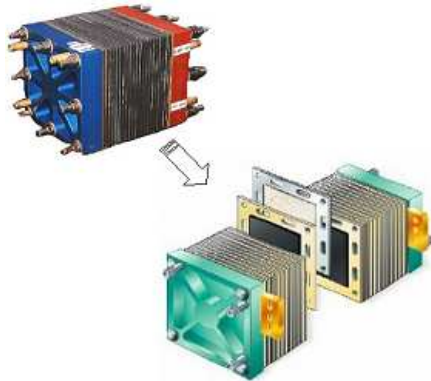


Figure 1 – Assemblage de la PAC

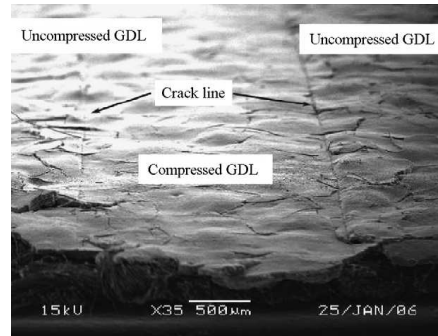


Figure 2 – GDL compressé [3]

Plusieurs chercheurs ont créé des modèles numériques pour étudier la résistance du contact des interfaces de la PAC. Mathias *et al.* [5], ont constaté que la résistance du contact est supérieure à leur résistance propre. Lee *et al.* [6] ont trouvé que l'augmentation de la pression de contact peut diminuer la résistance de contact. Mishra *et al.* [7] ont créé un modèle fractal pour déterminer la résistance de contact en fonction des forces de serrage, des propriétés matérielles et de la surface géométrique. Zhou *et al.* [8] ont développé un modèle 2D pour calculer la pression de contact entre GDL et BPP afin de trouver des paramètres influant la performance de la pile. Lee *et al.* [9] ont établi un modèle 3D avec des éléments de contact et étudié la distribution de la pression de contact maximale dans un stack avec une seule cellule sous la force de serrage.

L'objectif de cette étude est de proposer un modèle paramétrique 3D avec plusieurs cellules qui permet de déterminer les pressions de contact en interfaces multi-contacts dans un empilement de la PAC.

2 Formation des lois de contact

2.1 Définition du repère local de contact en statique

En raison de simplicité et de clarté, nous considérons uniquement deux corps déformables Ω_a et Ω_b en contact l'un avec l'autre. Sur la figure 3, le point P appartenant à Ω_a est un point de contact potentiel et Q est le point le plus proche de P sur Ω_b . En effet Q est le point projeté de P sur la surface de Ω_b qui sera considéré par la suite comme l'origine du repère local représenté sur figure 3. Le vecteur unitaire normal au point de contact \vec{n} est dirigé vers Ω_a et désigne un vecteur de base de ce repère local.

Les positions initiales des noeuds venant en contact de Ω_a et Ω_b étant respectivement x_1 et x_2 , les positions des noeuds en contact après déformation sont définies comme x'_1 et x'_2 , le déplacement des noeuds de Ω_a et Ω_b étant respectivement u_1 and u_2 , le déplacement relatif est : $u = u_1 - u_2 = (x'_1 - x'_2) - (x_1 - x_2)$. La initiale distance entre Ω_a et Ω_b est $g_0 = (x_1 - x_2) \cdot \vec{n}$. Soit r comme la force de contact en s'agissant de P de Ω_b sur Ω_a . Alors Ω_b est soumis à la force $-r$, exercée par

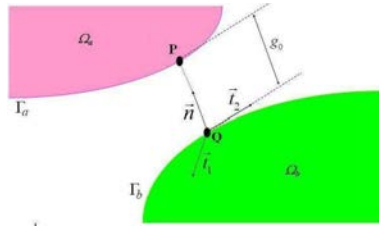


Figure 3 – Repère local de contact

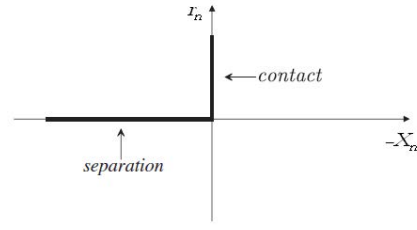


Figure 4 – Conditions de Signorini

Ω_a . Soit \vec{n} le normal vecteur unitaire au point P , dirigé vers Ω_a , et de $T(t_1, t_2)$ forme le plan orthogonal au vecteur \vec{n} dans \mathbb{R}^3 (Figure 3).

Tout élément u et r peut être uniquement décomposé sous la forme :

$$\begin{aligned} u &= u_t + u_n n, & u_t &\in T, & u_n &\in \mathbb{R} \\ r &= r_t + r_n n, & r_t &\in T, & r_n &\in \mathbb{R} \end{aligned} \quad (1)$$

En général, la loi de contact est caractérisée par une condition géométrique de non-pénétration, une condition de non-adhérence en statique et une condition complémentaire mécanique. Ces trois conditions sont appelées condition de Signorini (Figure 4). Elle est écrit en termes de distance de contact x_n et de pression de contact normale r_n :

$$\text{Signorini}(x_n, r_n) \Leftrightarrow x_n \geq 0, r_n \geq 0, r_n x_n = 0 \quad (2)$$

où x_n indique la distance entre les deux surfaces en contact.

Avec l'approximation de petits déplacements, x_n est donné par :

$$x_n = g_0 + u_n \quad (3)$$

En présence de frottement, on définit un cône K_μ appelé «cône de Coulomb» représenté sur la figure 5 et qui met en évidence le couplage entre l'effort normal et la norme de la force tangentielle.

$$K_\mu = \{ r \in \mathbb{R}^3, \|r_t\| \leq \mu r_n \} \quad (4)$$

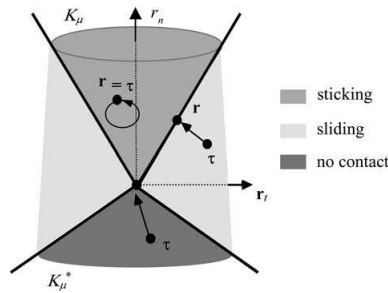


Figure 5 – Loïs de Coulomb

Les conditions de Signorini et la loi de Coulomb définissent une loi de comportement du contact qui est dissipative, complexe et non linéaire incluant 3 statuts de contact : non contact, contact avec adhérence et contact avec glissement. Cette loi de comportement peut être traduite par le bloc conditionnel défini par :

$$\begin{aligned} \text{Si } x_n > 0, & \text{ alors } r = 0 \quad ! \text{ non contact} \\ \text{si } u = 0 & \text{ alors } r \in K_u \quad ! \text{ contact avec adhérence} \\ \text{si } (u \in T, r_n > 0 & \text{ et } r_t = -\mu r_n \frac{r_t}{|r_t|} \quad ! \text{ contact avec glissement} \end{aligned} \quad (5)$$

Par conséquent, grâce à l'équations 5, nous pouvons connaître que le comportement de contact ou non contact dépend en fonction de la distance de contact x_n et de la force de contact r_n . Nous pouvons alors déterminer l'état des multi-contacts dans la modélisation de la PAC.

3 Approche de la modélisation

3.1 Modélisation paramétrique et hypothèses

Dans cette étude, une modélisation 3D de la PAC avec trois cellules a été développée avec la méthode des éléments finis (MEF). Un modèle symétrique a été créé afin d'économiser le calcul. Le schéma d'un demi-modèle de la PAC est montré dans la figure 6. Pour constituer une base de la simulation numérique et éviter des travaux répétitifs pendant la modélisation, un modèle paramétrique a été créé. Les propriétés matérielles des composants de la PAC sont citées par Lee *et al.* [9]. Les dimensions sont présentées seulement pour la modélisation, ils ne reflètent pas le cas réel. Dans la modélisation, on ne considère pas de la réaction chimique et les phénomènes fluidiques.

3.2 Maillage et conditions aux limites

L'élément volumique est utilisé pour la modélisation 3D. Il est défini par 8 nœuds avec trois degrés de liberté (DDL) en chaque nœud. Un maillage de mapping a été adopté afin de garantir la connectivité des éléments, 135438 d'éléments et 138802 de nœuds sont maillés, la taille des éléments est 0.33 mm.

Des conditions aux limites sont imposées sur le modèle d'éléments finis afin de prévenir des mouvements libres. Dans le cas réel, les composants de la PAC sont fixés par des boulons de serrage. Dans le modèle, les surfaces de trous de la plaque de serrage sont fixées, et les conditions de symétrie sont pris en compte.

Afin de simplifier la modélisation, les boulons ne sont pas modélisés et des forces de serrage sont appliquées directement aux nœuds sur les trous des boulons de la plaque de serrage.

3.3 Définition de 7 zones de contact

Des éléments de contact sont insérés entre chaque composant de la PAC : AME et GDL, GDL et BP, BP et plaque de serrage, définis comme des interfaces multi-contacts dans le modèle représenté dans la figure 7.

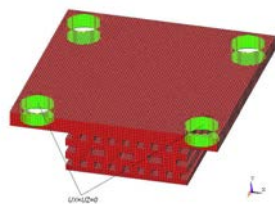


Figure 6 – Maillage du modèle

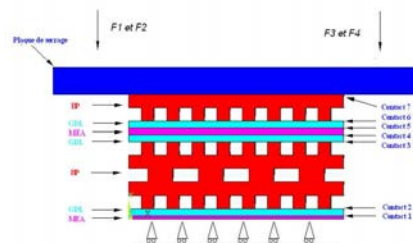


Figure 7 – Zones de contact définies

4 Résultats numériques

4.1 Comportement des interfaces multi-contacts

Dans la figure 8 où la PAC est sollicitée en compression par des boulons tirants, le déplacement des couches diminue au centre du modèle, la déformation des composants est différente. La déformation de l'AME et GDL est supérieure à la déformation de la BP.

À cause de la déformation, les contacts sont décollés aux extrémités entre AME et GDL. En revanche aucun décollement est représenté entre BP et GDL. Dans la figure 9, on donne la

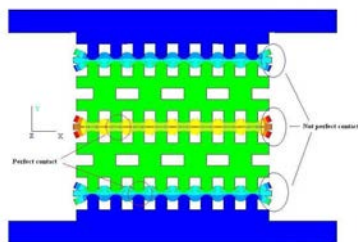


Figure 8 – Déformées

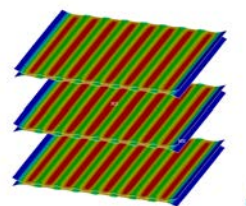


Figure 9 – Pression

distribution de la pression de contact en zone 1, zone 4 et zone 5 (interfaces de la AME et GDL), où correspondent les zones décollés entre GDL et AME. Les conditions aux limites et le modèle géométrique étant symétrique, on retrouve des répartitions de pression de contact symétriques. La pression de contact des zones est distribuée en bandes parallèles en raison des interactions des interfaces multi-contacts par canaux situés sur la BP (figure 7). Sur les zones de contact 1, 4, et 5, aux extrémités, ce sont des zones de décollement où la pression de contact est zéro. C'est une zone de non contact (figure 8). La puissance de densité de la PAC pourrait être diminuée à cause des décollements entre AME et GDL.

4.2 Pressions de contact maximales

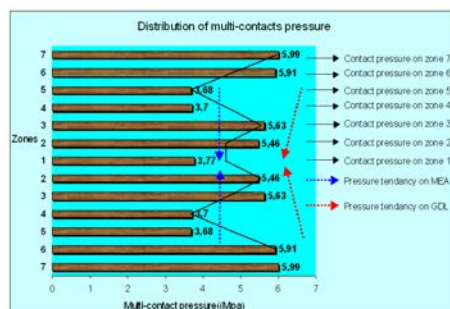


Figure 10 – Pression en tous les zones

Parce que la pression de contact maximale est un paramètre important pour la durabilité de la PAC, la distribution de toutes les pressions maximales dans les 7 zones est indiquée dans la figure 10. On constate que les pressions de contact en différents zones ne sont pas identiques, trois tendances typiques des distributions des pressions de contact se détachent :

- La pression de contact de l'interface de BP et EP est supérieure à la pression maximale de l'interface de BP et GDL qui elle même est supérieure à la pression de contact de l'interface de AME et GDL.

- Les pressions de contact on interfaces de BP et GDL aux extrémités de la PAC sont plus élevées que les pressions des interfaces centrales : $P_6 > P_3 > P_2$.
- Les pressions des interfaces de la AME et GDL sont de même valeur : $P_5 = P_4 = P_1$.

La différence est due à la déformation différente des composants de la PAC, car les matériaux sont différents.

5 Conclusions

Dans cet article, nous avons présenté les récents développements apportés à la modélisation de la PAC. Les résultats numériques montrent que :

1. En compression par des boulons tirants, le déplacement diminue vers le centre de la PAC, la déformation de l'AME et GDL est supérieure à celle de la plaque bipolaire.
2. La pression de contact entre BP et PS est supérieure à la pression entre GDL et BP, qui elle même est supérieure à la pression de contact entre GDL et AME.
3. Un décollement et un non contact existent aux extrémités entre GDL et AME, où la pression de contact est nulle.
4. La pression de contact des interfaces multi-contacts sont différentes dans la PAC à cause des différentes déformations des composants de matériaux différents.

Par ailleurs, les résultats numériques permettent d'augmenter la connaissance de la performance de la PAC et d'améliorer la conception de la PAC. Nous souhaitons approfondir ces travaux en affinant le modèle élément fini dans certaines zones où localement les phénomènes de contact sont importants (décollement possible). Il serait également intéressant d'ajouter plus de cellules au modèle actuel pour se rapprocher de la réalité.

Références

- [1] G. Hoogers. *Fuel cell Technology Handbook*. CRC Press, 2002.
- [2] R. F. Mann, J. C. Amphlett, M. A. I. Hooper, H. M. Jensen, and B. A. Peppley. Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell. *J. Power Sources*, 86 :173–180, 2002.
- [3] Z. Y. Su, C. T. Liu, H. P. Chang, C. H. Li, K. J. Huang, and P. C. Sui. A numerical investigation of the effects of compression force on PEM fuel cell performance. *J. Power Sources*, 183 :182–192, 2008.
- [4] V. Stanic and M. Hoberecht. Mechanism of pinhole formation in membrane electrode assemblies for PEM fuel cells, <http://ntrs.nasa.gov/archive>.
- [5] M. Mathias, J. Roth, J. Fleming, and W. Lehnert. *Diffusion Media Materials and Characterisation*. Handbook of Fuel Cells - Fundamentals, Technology and Applications, 2003.
- [6] W. K. Lee, C. H. Ho, J. W. Van Zee, and M. Murthy. The effects of compression and gas diffusion layers on the performance of a PEM fuel cell. *J. Power Sources*, 84 :45–51, 1999.
- [7] V. Mishra, F. Yang, and R. Pitchumani. Analysis and design of PEM fuel cells. *J. Power Sources*, 141 :47–64, 2005.
- [8] P. Zhou and C. W. Wu. Numerical study on the compression effect of gas diffusion layer on the PEMFC performance. *J. Power Sources*, 170 :93–100, 2007.
- [9] S. J. Lee, C. D. Hsu, and C. H. Huang. Analyses of the fuel cell stack assembly pressure. *J. Power Sources*, 145 :353–361, 2005.