

Etude de la segmentation de l'arc dans un Disjoncteur Basse Tension (DBT)

J. Lu¹, G. Déplaud², P. Freton¹, J-J Gonzalez¹, P. Joyeux²

¹Laboratoire Plasma et Conversion d'Energie, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS.,
118 route de Narbonne, F-31062 Toulouse cedex 9, France

²Hager Electro SAS, 132 Bd d'Europe, 67215 Obernai, France

jingjing.lu@laplace.univ-tlse.fr

Résumé

Les processus de la segmentation de l'arc et de la quantification des chutes de tension additionnelles sont les phénomènes prépondérants à la compréhension et à l'optimisation des disjoncteurs basse tension (DBT). Le but de nos travaux est d'appréhender leur comportement par l'expérience et leur représentation par l'outil numérique. Une modélisation magnétohydrodynamique 3D est réalisée dans une géométrie simplifiée de DBT. Les configurations expérimentale et numérique sont constituées de deux électrodes en parallèle et de la présence optionnelle de séparateurs. Numériquement l'effet des gaines de plasma est considéré par une méthode approchée basée sur les travaux de Lindmayer [1] implémentée au niveau des rails et des séparateurs. Les travaux ont été menés entre deux rails en utilisant un et deux séparateurs. Une chute de tension additionnelle de 10V est retrouvée pour chaque zone d'accrochage. Les résultats théoriques sont confrontés et validés avec les résultats expérimentaux.

Mots clés : Disjoncteur basse tension, modélisation, expérience, segmentation, plasma thermique

Introduction

Le disjoncteur basse tension (DBT) est un appareil de coupure très utilisé et très fiable, mais il est encore étudié en vue d'être amélioré, optimisé : extension de la gamme d'utilisation, respect des normes, diminution du temps de coupure. Le principe du DBT consiste à créer une limitation du courant par une augmentation de la tension d'arc. L'augmentation de la tension s'effectue par différents mécanismes : augmentation des pertes (Rayonnement), allongement de l'arc (Rails divergents), multiplications des chutes aux électrodes (Splitters). Afin de quantifier et de mieux décrire ces mécanismes, des études sont menées par le biais de modèles et d'expériences [1-3]. Si le déplacement de l'arc dans la préchambre jusqu'à la chambre de coupure est bien décrit [1,4], il n'en est pas de même pour la prise en compte des chutes de tension aux électrodes. Différentes approches sont possibles : une approche consistant à décrire finement la gaine et la pré-gaine avec l'ensemble des mécanismes [5] (Difficile à mettre en œuvre dans une configuration réelle) et une approche plus macroscopique basée sur des constatations expérimentales pour rendre compte de la chute de tension supplémentaire provenant de la présence d'un rail ou d'un séparateur [1].

Dans notre équipe en collaboration avec Hager, nous avons abordé la problématique sur la segmentation de l'arc suivant les deux aspects expérimental et théorique. Nous présenterons les bases du modèle 3D que nous avons développé avec ses hypothèses ainsi que l'approche de Lindmayer [1] que nous avons implémentée. Le groupe de Lindmayer [1-3] a proposé une théorie basée sur la caractéristique tension-densité de courant pour décrire le passage du courant et son retard à la commutation sur le(s) splitter(s) en fonction de la chute de

tension en proche voisinage des parois. Ils ont ainsi, pour différentes caractéristiques et seuils de tension, analysé la segmentation de l'arc.

I. Modélisation

Pour la mise en place du modèle numérique, nous adoptons les hypothèses et les équations suivantes :

A) Hypothèses

- Modèle 3D transitoire en Equilibre Thermodynamique Local (ETL)
- Air à la pression atmosphérique
- Ecoulement laminaire
- Voisinage des électrodes traité par une résistivité additionnelle
- Rayonnement: coefficient émission nette
- Pas d'ablation des parois et des électrodes
- Champ magnétique traité par la méthode hybride: Potentiel vecteur et Biot&Savart en condition limite

B) Equations

- Conservation de la masse: $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V}) = 0$
- Conservation de la quantité de mouvement:

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + \nabla(\rho v_i \vec{V}) = \nabla(\eta \nabla v_i) - \frac{\partial P}{\partial x_i} + (\vec{J} * \vec{B})_i$$
- Conservation de l'énergie: $\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla * (\rho H \vec{V}) = \nabla \left(\frac{\lambda}{c_p} \nabla H \right) + \sigma E^2 - q_{rad} + q_n$
- Conservation du potentiel scalaire: $\vec{\nabla}(\sigma \vec{\nabla} V) = 0$
- Conservation du potentiel vecteur: $\vec{\nabla}(\vec{\nabla} \vec{A}) = -\mu \vec{J}$ ($\vec{B} = \vec{\nabla} \vec{A}$)
- Conductivité effective pour prendre en compte l'effet résistif des gaines: $\sigma_{eff} = J \frac{\Delta y}{u_s}$

Dans les équations ci-dessus, ρ est la densité, \vec{V} est la vitesse, t est le temps, p est la pression, T est la température, v_i est la vitesse dans la direction i ($i= x,y,z$), c_p est la chaleur spécifique, η est la viscosité dynamique, λ est la conductivité thermique, \vec{A} est le potentiel vecteur, σ est la conductivité électrique, μ est la perméabilité, \vec{J} est la densité de courant, \vec{B} est le champ magnétique, H est l'enthalpie, q_n est la dissipation visqueuse et q_{rad} est le terme source d'énergie par rayonnement.

Afin de représenter la chute de tension additionnelle au niveau des rails et des séparateurs, une conductivité électrique effective (σ_{eff}) est définie, donnée par la relation entre la chute de tension (U_s) et la densité courant (J) pour les gaines d'électrode: $\sigma_{eff} = J \frac{\Delta y}{u_s}$, où $\Delta y = 0.1 \text{ mm}$ est l'épaisseur maximale de la gaine cathodique. Cette relation est déterminée à partir d'expériences et de travaux de la littérature [6-8]. Nous avons donc implémenté cette théorie dans notre modélisation magnétohydrodynamique par la mise en place d'un UDF dans @Fluent.

II. Expériences

Les tests sont réalisés dans une maquette simplifiée avec ou sans la présence de séparateurs. La Figure 1 montre une vue générale de la maquette fournie par notre partenaire Hager ainsi que les dispositifs expérimentaux associés. Au niveau de cette Figure 1 on peut

distinguer dans la partie supérieure de gauche à droite : l'alimentation utilisée, la maquette avec les deux rails en position verticale et la caméra rapide. L'alimentation fournit une impulsion de courant de l'ordre de 800A sur 5ms. La caméra rapide est utilisée afin d'acquérir 8400 images/s. Sur la partie inférieure de la Figure 1, sont mentionnées les mesures courant/tension réalisées. Les mesures de courant sont effectuées par sonde, celles de tension sont prises simultanément entre les deux rails et entre un rail et le séparateur. Afin de mieux interpréter les « signatures électriques » un outil a été développé. Il synchronise les mesures électriques avec les images de la caméra.

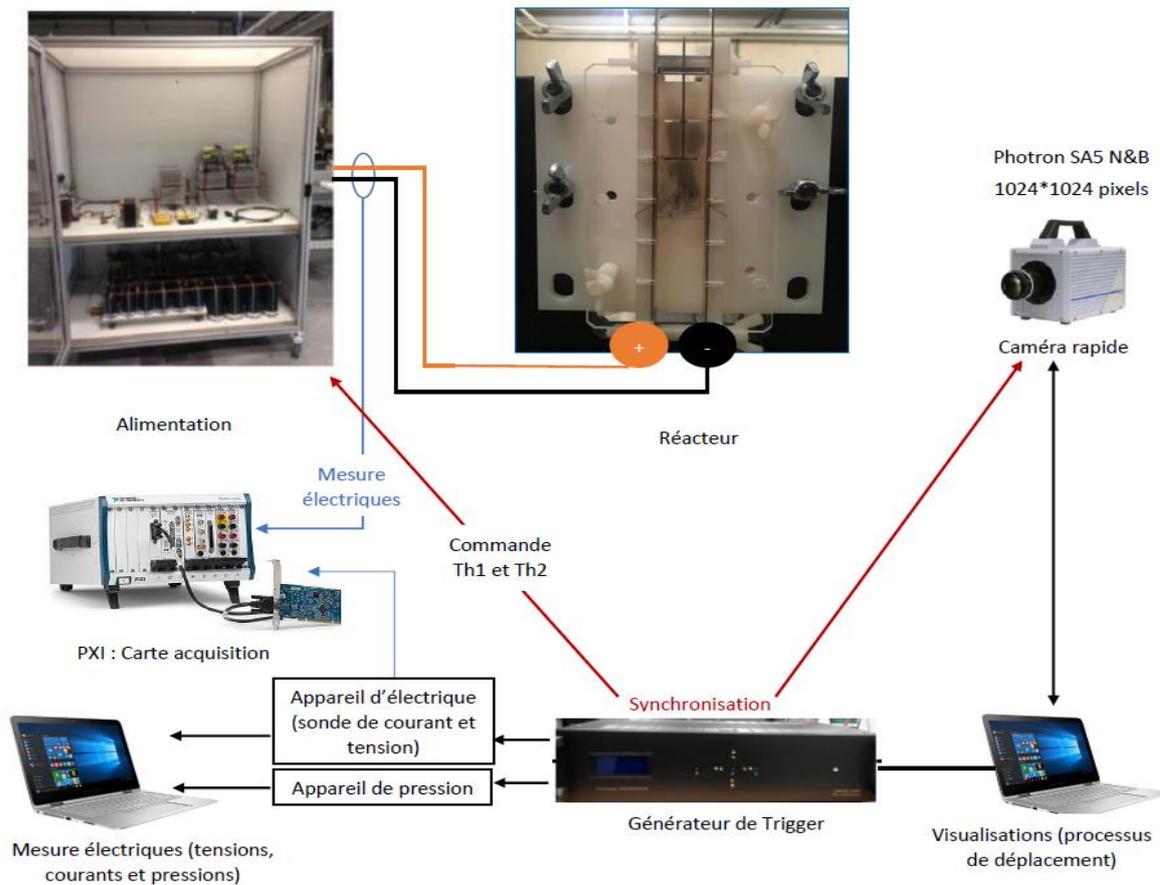


Figure 1 : Dispositif expérimental utilisé pour les tests

III. Résultats

La Figure 2 présente, à titre d'illustration, les mesures relevées de la tension entre les deux rails et de la tension entre un rail et le séparateur. L'arc est amorcé par un fil fusible de 0.3 mm. A $t = 1.66$ ms, un pic de tension entre les rails d'amplitude 141 V est observé. Ce pic est dû à l'explosion du fil fusible. Avant l'entrée de l'arc dans le séparateur, la tension $V_{\text{rail-rail}}$ reste pratiquement constante et l'arc possède une vitesse de déplacement de 14 m/s. L'analyse simultanée des images de la caméra rapide indique que l'arc commence à entrer dans le séparateur à $t = 2.44$ ms. En raison du chemin de courant allongé, la tension entre les rails augmente progressivement de 70 V à 104 V jusqu'à $t = 3.4$ ms où l'arc a totalement commuté sur le séparateur. L'arc est segmenté pas le séparateur et continue de se déplacer vers le fond de la chambre. A $t = 4$ ms l'arc est arrivé en fond de chambre. La vitesse de déplacement dans le séparateur est de 37 m/s. Dans cette expérience, la chute de tension due à la présence du séparateur est environ de 34 V.

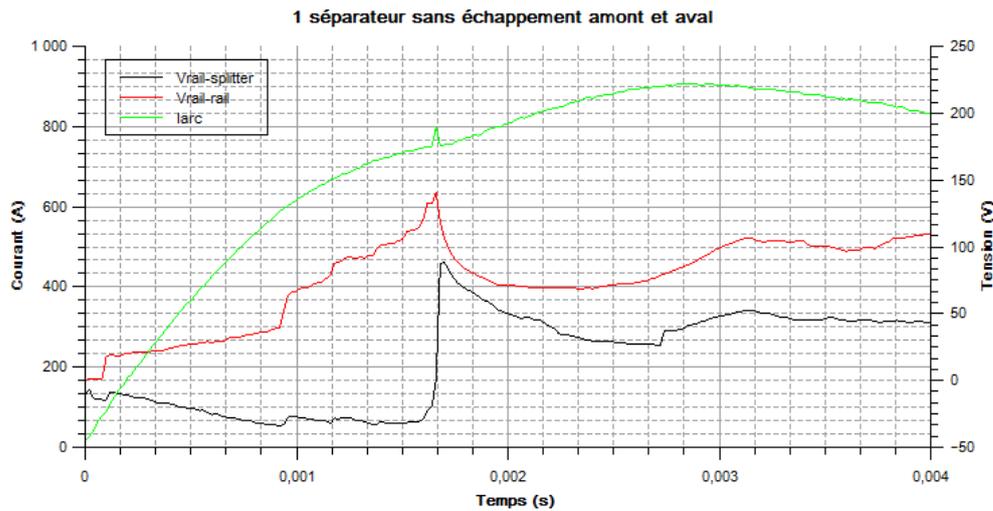


Figure 2 : Résultat expérimental avec 1 séparateur sans échappement en amont et aval

Conclusion

Nous menons des travaux expérimentaux et théoriques sur une géométrie de DBT simplifiée afin de quantifier les chutes de tension dues à la présence de séparateurs afin d'approfondir notre connaissance sur le processus de segmentation et d'aider à la compréhension des mécanismes et des configurations (Exhausts amont/aval plus ou moins fermés) qui conduisent à une optimisation du temps de limitation du courant. Les résultats du code 3D sont confrontés aux résultats expérimentaux. Une chute de tension additionnelle de 10V (Paramètre ajustable) par gaine est retrouvée en accord avec la théorie proposée par Lindmayer [1].

Références

- [1] M. Lindmayer, E. Marzahn, A. Mutzke, T. Ruther and M. springstubbe, The process of arc splitting between metal plates in low voltage arc chutes. IEEE Trans. CPMT, vol.29,no.2,2006,pp,310-317
- [2] A. Mutzke, T. Ruther, M. Kurrat, M. Lindmayer and E.-D. Wilkening, Modeling the arc splitting process in low-voltage arc chutes, 53rd IEEE Holm Conf. on Electrical Contacts, Pittsburgh, 2007, pp. 175-182
- [3] A. Mutzke, T. Ruther, M. Lindmayer and M. Kurrat, Arc behavior in low-voltage arc chambers, European Physical Journal-applied Physics. 49, 22910(2010)
- [4] J. Quéméneur, J. Lu, J.-J. Gonzalez and P. Freton, Arc motion in low voltage circuit breaker (LVCB) experimental and theoretical approaches, Science and Technology 2018,8(2): 35-45
- [5] M. S. Benilov and A. Marotta, A model of the cathode region of atmospheric pressure arc, J. phys. D, Appl. Phys., vol.28, no.9, pp. 1869-1882, 1995
- [6] Y. Yokomizu, T. Mastumura, R. Henmi and Y. Kito, Total voltage drops in electrode fall regions of SF₆, argon and air arcs in current range from 10 to 20000 A, J. Phys. D: Appl. Phys. 30 2905-10, 1999
- [7] F. Cayla, P. Freton and J.-J. Gonzalez, Arc/cathode interaction model, IEEE Trans. Plasma Sci. 36 1944-54, 2008
- [8] H. Schmitz and K.U. Riemann, Analysis of the cathodic region of atmospheric pressure discharges, J. Phys. D: Appl. Phys. 35 1727-35, 2002