



HAL
open science

Observation par imagerie de rayons X à 106 d'images par seconde de l'arc dans un fusible opérant sous décharge de condensateur

Jean-Louis Gelet, Jean-Marc Chaix, Xavier Just, Pierre Lhuissier, Gérard Thomas, Olivier Bonnefoy, Alexander Rack, Margie Olbinado

► To cite this version:

Jean-Louis Gelet, Jean-Marc Chaix, Xavier Just, Pierre Lhuissier, Gérard Thomas, et al.. Observation par imagerie de rayons X à 106 d'images par seconde de l'arc dans un fusible opérant sous décharge de condensateur. 13ème édition du Colloque sur les Arcs Electriques (CAE XIII) - 3ème Workshop Arcs et Contacts Electriques (ACE 2017), Institut Jean Lamour (UMR CNRS - Université de Lorraine), Mar 2017, Vandoeuvre-lès-Nancy, France. hal-01504879

HAL Id: hal-01504879

<https://hal.science/hal-01504879v1>

Submitted on 11 Apr 2017

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.

Observation par imagerie de rayons X à 10⁶ d'images par seconde de l'arc dans un fusible opérant sous décharge de condensateur

Jean-Louis GELET^{1*}, Jean-Marc CHAIX², Xavier JUST², Pierre LHUISSIER²,
Gérard THOMAS³, Olivier BONNEFOY³, Alexander RACK⁴, Margie OLBINADO⁴

¹MERSEN France SB SAS, Rue Vaucanson, 69720 Saint-Bonnet de Mure. France

²SIMAP. ENSEEG BP75, 38402 Saint-Martin d'Hères. France

³Ecole des Mines de Saint-Etienne – Groupe SPIN, 42000 Saint-Etienne. France

⁴ESRF. Structure of Materials Group - ID19, S-19 CS 40220, 38043 Grenoble Cedex 9. France

*Auteur correspondant : jean.louis.gelet@mersen.com

Résumé

Pour la première fois, une équipe d'ingénieurs de MERSEN et de chercheurs de Grenoble-INP et de l'Ecole des Mines de Saint-Etienne, en collaboration avec les scientifiques de l'European Synchrotron for Research Facilities de Grenoble a pu filmer l'arc électrique intervenant lors de la coupure d'un fusible au travers de l'enveloppe isolante et à très grande vitesse. Ils ont réalisé des observations jusqu'à 5 millions d'images par seconde, et acquis ainsi des informations d'une très grande richesse sur le phénomène d'arc dans le fusible. Un intérêt tout particulier de ces observations concerne les phénomènes d'arc lors de coupures sous décharges de condensateur dans des circuits très peu inductifs, dites coupures aux grands di/dt.

1. Approche de la dynamique de l'arc électrique dans le fusible

Aujourd'hui encore, l'apparente banalité des fusibles électriques réclame deux types de commentaires. Tout d'abord, les fusibles demeurent la protection ultime contre les courts circuits dans les équipements, y compris ceux présentant les topologies les plus avancées. Ensuite, l'apparition, le développement et l'extinction de l'arc électrique consécutifs à la fusion de l'élément conducteur d'un fusible sont très complexes.

Les observations nécessaires à leur compréhension sont particulièrement difficiles du fait de l'extrême rapidité des phénomènes et du fait que ceux-ci interviennent dans un milieu confiné constitué du milieu granulaire d'extinction et de l'enveloppe isolante. Au cours des années, les ingénieurs et chercheurs qui se sont penchés sur le sujet, n'ont eu accès qu'à l'examen post-mortem des échantillons pour proposer leurs modèles, à l'exception de quelques expériences mettant en place des méthodes très indirectes et nécessitant des interprétations subtiles. Ils sont restés avec le rêve de pouvoir réaliser le film de l'arc à l'intérieur du fusible. Notre équipe, constituée d'ingénieurs de Mersen France et de chercheurs du laboratoire SIMAP de l'Université Grenoble Alpes et de l'Ecole des Mines de Saint-Etienne a pu réaliser, avec le soutien des scientifiques de l'ESRF des films permettant de visualiser l'arc à travers l'enveloppe isolante. On observe ainsi la matière conductrice passant d'une phase solide-liquide à un embryon de plasma, établissant de ce fait les conditions initiales de l'arc. Les films montrent aussi l'allongement de l'arc. Les images peuvent être synchronisées avec la tension et le courant, ce qui permet de remonter au calcul du champ électrique dans le plasma dont l'évolution en fonction du courant fait l'objet de cet article.

2. Imagerie de rayons X à 1 million d'images par seconde

Jusqu'à présent, on devait généralement se contenter d'observer les conséquences de l'arc, très longtemps après son extinction, en démontant le fusible ou en utilisant des techniques de rayons X. A notre connaissance, aucune observation directe d'une coupure dans un fusible industriel n'a

jamais pu être obtenue. W. Bussière [1] a réalisé un montage avec des fusibles expérimentaux munis d'un hublot de visée pour observer l'évolution de l'arc à l'aide d'une caméra rapide à 35 000 images par seconde. Il a pu mesurer les vitesses d'allongement d'arc lors de coupures en courant alternatif. Cependant, la matière de remplissage n'entourait pas complètement l'arc et la fréquence de prise de vue, avec 1 image toutes les 30 microsecondes était insuffisante pour observer la transition entre le régime de préarc et le régime d'arc.

Dans le dispositif mise en place par les ingénieurs de Mersen et les chercheurs du laboratoire SIMAP de Grenoble-INP, le fusible à essayer est intégré dans un circuit de décharge d'un condensateur préalablement chargé à la tension requise. Les conditions de décharge sont ajustées par l'inductance d'un câble. Le fusible est irradié pendant l'essai par un faisceau de rayons X. L'image se forme sur un scintillateur transformant l'information des rayons X en lumière visible. Cette lumière est ensuite captée par une caméra CCD placée à l'arrière d'un objectif permettant d'adapter le grandissement. La synchronisation de l'ouverture du faisceau, de la fermeture du circuit de décharge et du déclenchement de la caméra CCD est assurée par un micro-contrôleur programmable.

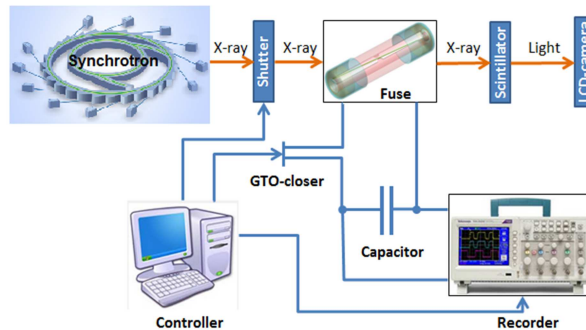


Figure 1 : schéma simplifié du dispositif d'essais, avec ses principaux composants

Les essais ont été réalisés sur des fusibles cylindriques de diamètre 10 mm et de longueur 38 mm fabriqués par MERSEN. Il s'agit de fusibles de classe gR, avec une tension nominale de 690 V et un courant nominal de 20 A. Par rapport à la version industrielle, plusieurs variantes ont été préparées et testées.

Le protocole d'essais consiste à tester les différentes versions d'échantillons sous plusieurs conditions électriques (tension, longueur de la boucle du circuit), en orientant l'élément fusible de façon à ce qu'il se présente sur la tranche ou de face et enfin à différentes fréquences de prise de vue. La mémoire de la caméra CCD n'autorisant à enregistrer que 128 images, on doit adapter la cadence de manière à visualiser soit l'ensemble de la coupure (1 image / 100 microsecondes) soit son tout début de l'arc (1 image / 0,2 microseconde). Les mêmes conditions électriques ont été répétées de manière à acquérir le maximum d'informations tout au long de la durée de l'arc.

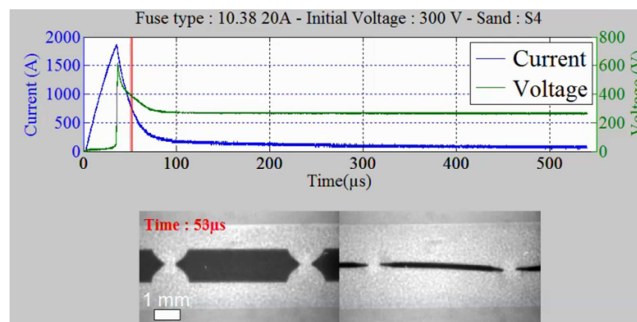


Figure 2 : coordination des images X (vue de côté et vue de face) avec les traces de courant et tension, montrées ici à $t = 53 \mu\text{sec}$.

3. Analyse des observations

Pour chacun des essais, ont été tracées les courbes de la tension et du courant en fonction du temps :

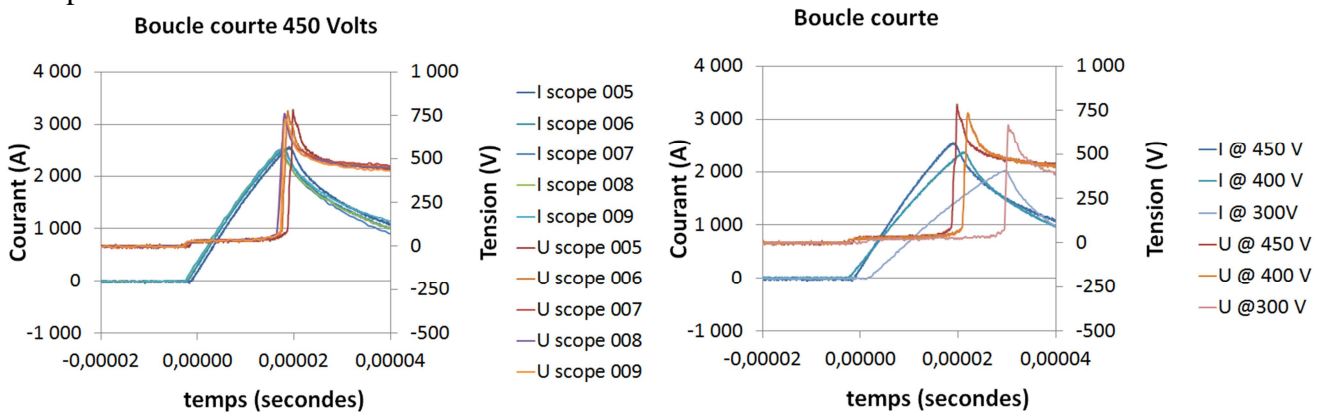


Figure 3 : Traces de courant et tension pour des échantillons identiques. A gauche, reproductibilité de l'essai à 450 V et boucle courte. A droite, effet de la tension de charge du condensateur.

Les films en rayons X ont été exploités pour mesurer la longueur d'arc au cours du temps. On a retenu comme instant d'établissement de l'arc la première image où l'on observait une discontinuité dans la matière de l'élément fusible.

Ainsi, image par image, les longueurs d'arc ont-elles été mesurées pour tous les essais sous 450 V avec une boucle courte. Les cadences les plus rapides (1 image/1 μ sec), permettent de voir les premiers instants de l'arc. Sous les cadences les moins rapides (1 image/100 μ sec), on observe l'allongement de l'arc dans sa totalité. Tous les points, obtenus pour les cadences élevées ou plus lentes, ont été ajustés par une courbe linéaire par morceaux dans un système d'axes log x log. Cette opération a été répétée pour les trois tensions de réalisation des essais, soit 450, 400 et 300 V.

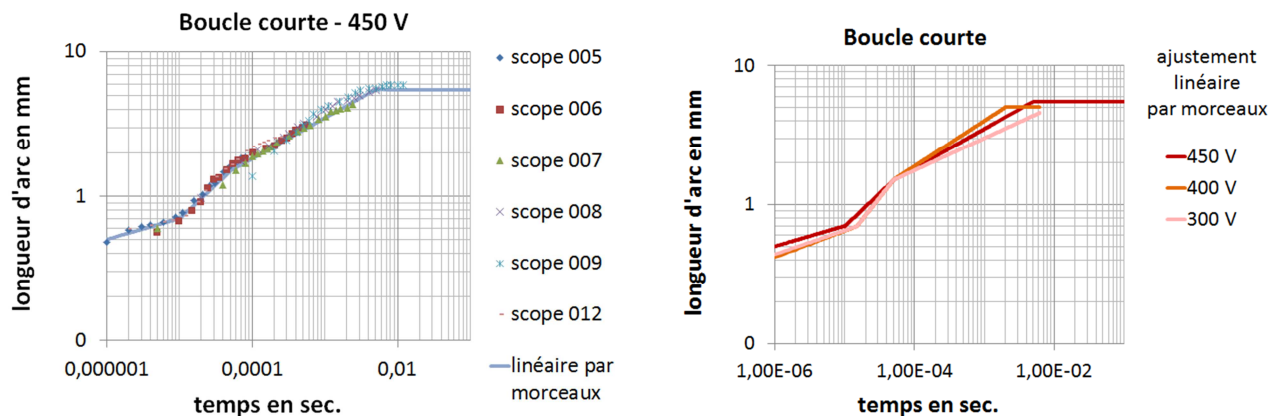


Figure 4 : allongement d'arc mesuré pour différents essais d'échantillons identiques. A gauche reproductibilité de l'essai à 450V et pour différentes cadences d'imagerie. A droite effet de la tension de charge du condensateur, ajustements linéaires par morceaux pour chaque niveau de tension d'essai.

Il est donc possible d'évaluer la longueur d'arc à chaque instant et de voir son évolution en fonction du courant et de la tension, puis d'approcher la valeur du champ électrique, en supposant celui-ci homogène au sein de la colonne d'arc et en tenant compte de l'existence d'une tension aux électrodes dont la valeur a été estimée par certains auteurs, tel Dolegowski [2], Onuphrienko[3],

Wright et Beaumont [4]. Nous avons pour nos calculs, retenu le modèle proposé par Gnanalingham et Wilkins [5] :

$$U_{\text{électrodes}} = 15 + 1,0 \cdot [i(t)]^{0,39} \quad \text{Gnanalingham et Wilkins}$$

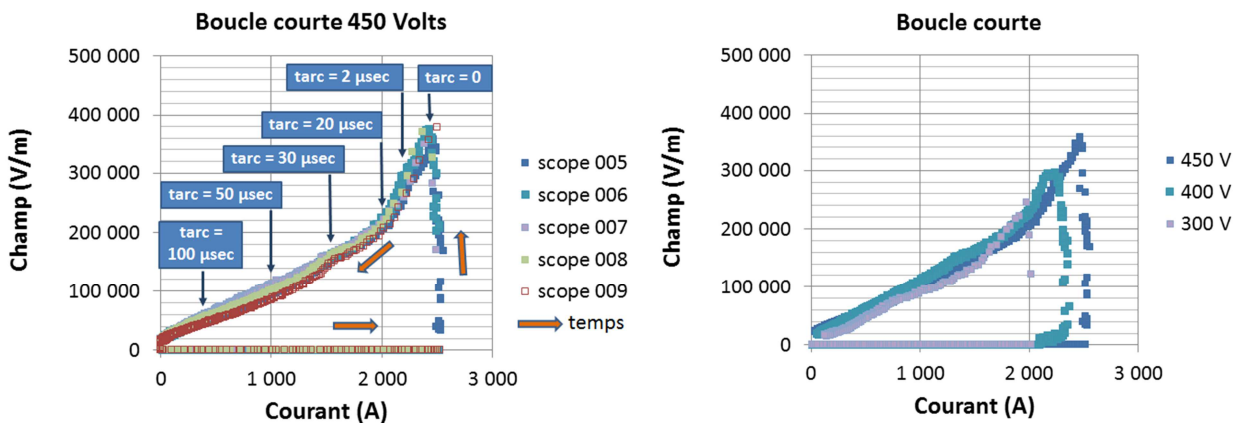


Figure 5 : champ électrique pour des échantillons identiques. A gauche, reproductibilité de l'essai à 450 V et boucle courte. A droite effet de la tension de charge du condensateur.

4. Discussion

Nous avons orienté notre analyse vers l'étude des courbes du champ électrique en fonction du courant.

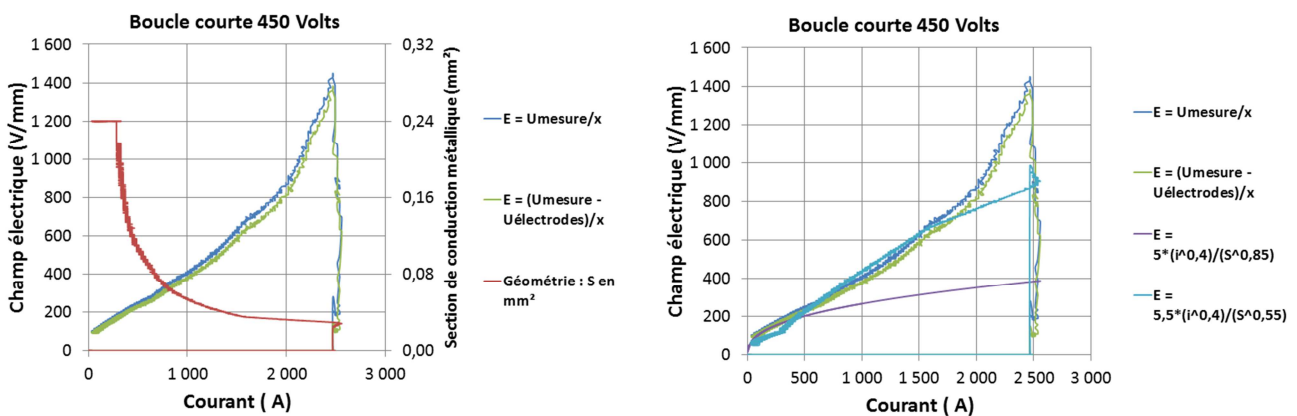


Figure 6 : courbes du champ en fonction du courant. A gauche, la valeur de la section de conduction est également portée. A droite, ont été tracées des courbes théoriques issues de modèles de la littérature.

Les courbes $E = f(i)$ du champ en fonction du courant présentent plusieurs zones :

- tout à droite, pour les courants les plus élevés, très rapide montée de la valeur du champ, correspondant à l'« explosion » du conducteur métallique.
- de 2500 à 1650 A, une décroissance rapide de la valeur du champ ; l'allure de la courbe $E = f(i)$ ne concorde pas avec les modèles de la littérature. Cela pourrait s'expliquer par le fait que l'arc n'est pas encore dans un état quasi-statique comme le requièrent les conditions des publications. Il est remarquable que ce comportement dure 10 $\mu\text{sec.}$, ce qui est du même ordre de grandeur que la constante de temps de dé-ionisation (ou d'ionisation) de l'arc.
- entre 1650 et 620 A, une courbe du champ pouvant être ajustée par une courbe $E = \frac{5,5 \cdot i^{0,4}}{s^{0,55}}$, loi en puissance intermédiaire, selon Wheeler⁷, entre celle d'un conducteur cylindrique et

celle d'un conducteur plat, où faute d'analyse plus précise, la section S de l'arc a été assimilée à celle du conducteur métallique

- en dessous de 620 A, une courbe du champ pouvant être ajustée par une courbe $E = \frac{5.i^{0.4}}{S^{0.85}}$, assez cohérente avec celle annoncée par Wheeler⁷ pour un conducteur plat.

Il apparaît d'ores et déjà une certaine cohérence entre les premiers résultats de l'exploitation et les données de la littérature. De nombreux essais, avec des enregistrements du courant et de la tension et des films à différentes cadences restent encore à dépouiller. Ceux-ci devraient permettre d'aller vers un modèle plus précis dans lequel interviendraient à la fois les caractéristiques électriques et les données géométriques.

Références

- [1] William Bussière. *Mesure des grandeurs (T,Nc,P) au sein du plasma d'arc des fusibles en moyenne tension*. Thèse de doctorat en Physique des plasmas. Université de Clermont-Ferrand, 2000.
 - [2] Michał Dolegowski. Calculation of the course of the current and voltage of a current limiting fuse. *ICEFA Liverpool*, 1978.
 - [3] Y.J. Onuphrienko. On researches of the arcing process in fuses with filler (sand filled fuses), *3rd Int. Symp. on switching arc phenomena, Lodz, Poland*, 1977.
 - [4] A. Wright, K.J. Beaumont. Analysis of high-breaking capacity fuselink arcing phenomena. *Proc. IEE*, 123, 1976, 252-258.
 - [5] S. Gnanalingam, Robert Wilkins. Digital simulation of fuse breaking tests. *IEE PROC. Vol. 127. Pt; C, No.6*, 1980.
 - [6] J.E. Daalder, E.F. Schreurs. *Arcing phenomena in high voltage fuses*. Department of Electrical Engineering, Eindhoven University of Technology, EUT report 83-E-137, 1983.
 - [7] C.B. Wheeler. The high-power constricted plasma discharge column – 1. Theoretical analysis. *J. Phys. D.* 1970, 3, 1374-1380.
-