

JOURNAL INTERNATIONAL DE TECHNOLOGIE, DE L'INNOVATION,
DE LA PHYSIQUE, DE L'ENERGIE ET DE L'ENVIRONNEMENT

Limitation de courant dans une chambre de coupure à basse tension

A. Gatri, J.-J., Gonzalez , P. Freton , P. Joyeux



ISSN : 2428-8500

DOI : 10.52497/jitipee.v9i1.369

*Le sujet de cet article a été présenté lors du colloque sur les arcs électriques (CAE XVII)
les 17 et 18 mars 2025 à Limoges.
L'article publié a fait l'objet d'une expertise indépendante par deux spécialistes du domaine.*

Limitation de courant dans une chambre de coupure à basse tension

Arsalen Gatri ^(1,2), Jean-Jacques Gonzalez ⁽¹⁾, Pierre Freton ⁽¹⁾, Patrice Joyeux ⁽²⁾

⁽¹⁾ Laplace, UMR 5213 CNRS-UPS-INP, Université Paul Sabatier, 118 route de Narbonne, 31062, Toulouse.

⁽²⁾ Hager Group, 132 Bd de l'Europe, 67210, Obernai.

arsalen.gatri@laplace.univ-tlse.fr

Résumé – Les modélisations magnétohydrodynamiques des plasmas en écoulement dans les chambres de coupure à basse tension sont d'un grand intérêt pour étudier la dynamique de l'arc afin d'optimiser la conception du disjoncteur et améliorer le temps de coupure. La plupart des modèles y compris le nôtre, permettent de représenter le mouvement de l'arc, sa segmentation et l'augmentation de la tension due aux chutes anodiques et cathodiques. Néanmoins, ils ne sont pas couplés aux paramètres du réseau et le courant est imposé par une valeur constante ou un profil dépendant du temps. La comparaison et la confrontation entre les résultats expérimentaux et théoriques sont donc difficiles. Dans l'approche proposée, les gaines hors équilibre ne sont pas modélisées, cependant l'évolution de leur tension est prise en compte via une résistivité additionnelle répercutée au niveau de l'évolution de la tension d'arc. Par un couplage du modèle avec les paramètres du circuit externe, nous montrons l'effet de la tension d'arc sur l'évolution du courant par l'effet de limitation. Les résultats montrent le comportement de l'arc dans trois configurations différentes (zéro, un ou deux séparateurs) et l'influence du nombre de séparateurs sur la limitation du courant.

Mots clés : arc électrique, modélisation, limitation de courant, coupure en basse tension

DOI : 10.52497/jitipee.v9i1.369

Introduction

Les disjoncteurs basse tension sont utilisés dans le monde industriel et domestique, ils permettent la protection des individus et des installations électriques. Cela justifie largement le nombre important d'études réalisées sur ces dispositifs. Ces travaux, qu'ils soient expérimentaux ou numériques, contribuent à l'amélioration des performances des disjoncteurs et à leur optimisation.

Le fonctionnement du disjoncteur basse tension (DBT) est basé sur le principe de la limitation de courant. Lors de l'ouverture du contact mobile, un arc électrique est généré. Le design des boîtiers DBT permet le déplacement de cet arc vers la chambre de coupure sous l'effet de la force de pression et de la force de Lorentz induite par le courant circulant dans les rails. Lorsque l'arc atteint la chambre de coupure, il est segmenté par des séparateurs en plusieurs arcs. Ce phénomène entraîne une augmentation de la tension d'arc par la multiplication des chutes de tension des gaines et permet de forcer le passage par zéro du courant.

Dans les travaux expérimentaux réalisés sur le DBT, on trouve principalement des études sur la vitesse de déplacement de l'arc, réalisées par des caméras magnétiques ou des caméras rapides [1–4]. On trouve également des études paramétriques sur les matériaux des rails et des parois [5–6], mais aussi un grand nombre sur l'analyse de signaux électriques [7–8]. La plupart de ces études utilisent un banc d'énergie pour reproduire des ondes de courant à la fréquence désirée.

En ce qui concerne les études numériques, un grand nombre d'entre elles permettent d'étudier le comportement de l'arc dans des géométries plus ou moins complexes [9–13]. Le déplacement de l'arc est représenté par une simple condition de glissement [14]. Des études plus récentes [9], [15] permettent de prendre en compte l'augmentation de tension due à la présence de séparateurs en introduisant une résistivité additionnelle au niveau des gaines comme suggéré par Lindmayer et Mutzke [10], [12], 16].

Cependant, un courant fixe ou une onde de courant variable dans le temps reste une donnée d'entrée de ces modèles, et est découplée de la variation de la tension d'arc. L'effet de limitation ne peut donc pas être étudié.

Dans cet article, le modèle MHD est développé en tenant compte de la composition du plasma d'air, des propriétés thermodynamiques, des coefficients de transport et d'autres paramètres physiques. Un modèle qui prend en compte la résistivité non linéaire des gaines, développé dans notre équipe, est utilisé pour mieux simuler la chute de tension près des électrodes et le processus de segmentation. En outre, les paramètres en temps réel du circuit externe sont couplés avec le modèle pour refléter le changement des caractéristiques de l'arc et pour prendre en compte la limitation du courant comme elle peut avoir lieu dans un cas réel [17].

1. Modèle numérique

1.1. Approche magnétohydrodynamique (MHD)

L'approche magnétohydrodynamique (MHD) est couramment utilisée pour modéliser les arcs électriques dans diverses applications. Cette méthode prend en compte les interactions complexes entre les champs électromagnétiques, les transferts thermiques et les mouvements de fluide. Le plasma est considéré comme un fluide conducteur soumis à des forces électromagnétiques, où des phénomènes tels que l'effet joule et le rayonnement jouent un rôle clé.

ANSYS Fluent est un logiciel de simulation des écoulements fluides basé sur la méthode des volumes finis. Bien qu'il ne soit pas conçu pour la modélisation des plasmas thermiques, il peut néanmoins être utilisé, moyennant certaines adaptations. Cela implique d'intégrer les propriétés spécifiques au plasma, fortement dépendantes de la température et de la pression. De plus, il est nécessaire d'inclure les effets électromagnétiques et énergétiques caractéristiques des plasmas. Pour cela, nous développons des UDF (User-Defined-Function) associées aux termes sources des équations fluides.

1.2. Géométrie

La figure 1 présente une configuration simplifiée d'une chambre de coupure. Cette géométrie a été choisie pour sa simplicité et ses dimensions qui permettent des temps de calculs « raisonnables » (de 5 à 6 jours avec parallélisation sur 10 processeurs à 2,5 GHz pour obtenir 0.3ms). Elle est basée sur les travaux de [18]. Trois configurations ont été construites avec zéro (0SP), un (1SP) et deux séparateurs (2SP). Les dimensions de la chambre sont de $40 \times 2.5 \times 11 \text{ mm}^3$ (xyz), les rails sont de $40 \times 2.5 \times 1.5 \text{ mm}^3$ (xyz) et le séparateur est de $20 \times 2.5 \times 1 \text{ mm}^3$ (xyz). $D1=8\text{mm}$ est la distance entre les deux rails ; $D2=3.5\text{mm}$ est la distance entre les rails et le séparateur dans la configuration 1SP et $D3=2\text{mm}$ pour la configuration 2SP.

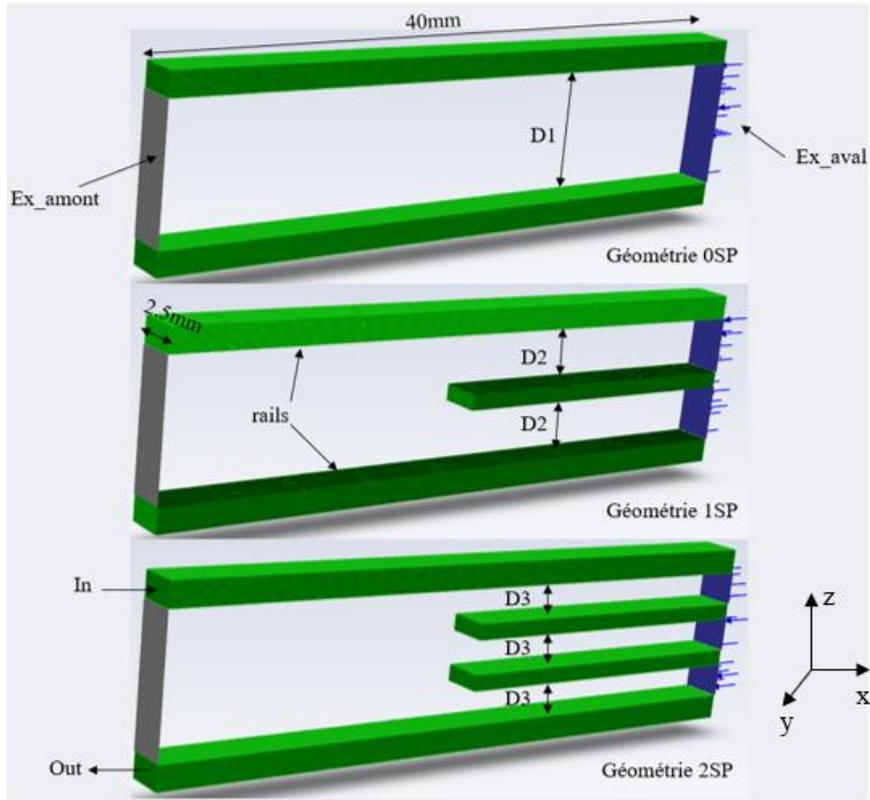


Figure 1 : Géométrie étudiée de la chambre d'arc pour zéro (0SP), un (1SP) et deux séparateurs (2SP).

La géométrie a été maillée à l'aide de l'outil ICEM CFD. Un maillage hexaédrique structuré est choisi pour l'ensemble du domaine avec une taille de cellule de 0.1mm^3 . Les caractéristiques du maillage sont présentées dans le Tableau 1.

Type de maillage	Hexaédrique structuré
Nombre de cellules	1 100 000
Nombre de nœuds	1 186 446

Tableau 1. Description du maillage.

1.3. Hypothèses et conditions

Les hypothèses et les conditions de calcul utilisées dans notre modèle sont les suivantes :

- Le plasma est supposé être en équilibre thermodynamique local (ETL). Ainsi, une seule équation d'énergie est résolue pour le fluide, en supposant que toutes les espèces ont la même température. Cette hypothèse est également utilisée pour calculer la composition du plasma (évolution des densités des espèces), le transport et les propriétés thermodynamiques [10]. Ceci est légitime étant données les gammes de température et de pression atteintes ($T > 10000\text{ K}$ sur l'axe et $P > 1\text{ bar}$).

- b) L'écoulement est considéré comme laminaire. Le nombre de Reynolds est supposé faible en raison de la viscosité élevée de l'arc. De nombreuses recherches effectuées sur une chambre d'arc simplifiée montrent la validité de cette hypothèse [17–18].
- c) Les vapeurs provenant des parois et de l'érosion des électrodes ne sont pas prises en compte. Ainsi, les vapeurs de cuivre provenant des rails, les vapeurs de fer provenant des séparateurs ou le PA66 (C₆H₁₁O₁N₁) provenant des parois latérales ne sont pas prises en compte. Cela pourrait être impactant car elles pourraient modifier les propriétés du plasma et le mouvement de l'arc [19–20].
- d) Le rayonnement est pris en compte en utilisant le coefficient d'émission nette calculé pour $R_p = 5mm$. Bien que cette hypothèse soit valable au cœur de l'arc, elle décrit moins bien les zones périphériques où de l'absorption peut avoir lieu. Cette absorption pourrait engendrer des températures plus élevées en périphérie de l'arc, modifiant son comportement.
- e) Dans notre modèle, la phase d'amorçage n'est pas modélisée. Afin d'initialiser la décharge, un canal conducteur est créé à une température arbitraire de 20kK à la pression atmosphérique.
- f) Les gaines ne sont pas réellement modélisées mais un modèle qui prend en compte une conductivité non linéaire au niveau des interfaces avec le plasma est adopté. La tension de gaine est estimée à 10V [16]. Cette hypothèse souvent utilisée dans la littérature semble légitime pour une bonne représentation du déplacement l'arc.

1.4. Equations de Navier-Stokes

Le modèle fluide utilisé pour simuler l'arc électrique est basé sur les équations de Navier Stokes résolues par Ansys Fluent. Afin de prendre en compte la présence de l'arc et son comportement, des termes sources sont ajoutés dans les équations de conservation de la quantité de mouvement (forces de Lorentz) et dans l'équation d'énergie (effet Joule, rayonnement et flux enthalpique des électrons).

- Equation de conservation de la masse :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

- Equation de conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v} \cdot \vec{v}) = \vec{\nabla} \cdot (\eta \vec{\nabla} v) - \vec{\nabla} p + (\vec{j} \wedge \vec{B}) + S_v \quad (2)$$

- Equation de conservation de l'énergie :

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho H \vec{v}) = \frac{\partial p}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \left(\frac{\lambda}{c_p} \vec{\nabla} H \right) + \sigma \vec{E}^2 - q_{\text{rad}} + S_h \quad (3)$$

\vec{v} est le vecteur de vitesse, p la pression, H l'enthalpie, \vec{j} le vecteur densité de courant, \vec{B} le champ magnétique, ρ la masse volumique, η la viscosité dynamique, λ la conductivité thermique, C_p la chaleur spécifique à pression constante, σ la conductivité électrique, $q_{\text{rad}} = 4\pi\epsilon_N$, ϵ_N est le coefficient d'émission nette, S_v contient des termes supplémentaires de tenseurs visqueux, S_h est un terme source supplémentaire qui prend en compte le flux enthalpique des électrons [23]. Le plasma étant considéré comme un fluide unique, ce terme permet de prendre en compte le transport de l'énergie, dans le champ électrique, par les électrons.

1.5. Equations électromagnétiques

L'aspect électromagnétique de l'arc électrique est régi par les équations de Maxwell [11], [22]. Le champ magnétique et le potentiel électrique sont calculés dans l'ensemble du domaine. Les équations du potentiel scalaire et du potentiel vecteur sont utilisées pour calculer les champs électromagnétiques :

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A} \quad (4)$$

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (5)$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (6)$$

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \vec{A}) = -\mu \vec{j} \quad (7)$$

$$\vec{\nabla} \cdot (\sigma \vec{\nabla} V) = 0 \quad (8)$$

Dans les équations ci-dessus, \vec{A} est le potentiel vecteur, V est le potentiel électrique et μ est la perméabilité magnétique de l'air. Les variations temporelles sont lentes, de ce fait les effets inductifs sont faibles et l'on peut considérer que nous sommes en régime quasi-statique. Cette hypothèse nous permet de négliger le terme $\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$ dans l'équation (5).

Afin de fermer le système pour le calcul du potentiel vecteur \vec{A} , la formulation de Biot&Savart (équation 9) est utilisée comme condition aux limites [24].

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_{\text{volume}} \frac{\vec{j}(\vec{r}')}{|\vec{r}-\vec{r}'|} dV \quad (9)$$

La résolution de l'équation (9) dans l'ensemble du domaine augmente le temps de calcul. Cependant, dans notre cas, nous utilisons une formulation hybride, ce qui signifie que le champ magnétique dans le domaine du plasma est calculé en utilisant les équations du potentiel vecteur pour déterminer le champ magnétique auto-induit et la formulation de Biot&Savart n'est utilisée qu'aux limites du domaine [24].

1.6. Couplage avec le réseau

Notre dispositif expérimental, permettant d'étudier le déplacement de l'arc dans une chambre à deux rails parallèles, est associé à un banc d'énergie qui permet, suivant la valeur de la tension de charge et le couple (L, C) de faire varier l'intensité du courant tout en maintenant la fréquence de l'onde. En se basant sur cette configuration expérimentale, on peut donc écrire l'équation différentielle qui gouverne le circuit en présence d'un arc électrique :

$$U_c = U_{arc} + U_L + U_R \quad (10)$$

Où U_c désigne la tension du réseau donnée ici par les capacités, U_{arc} est la tension de l'arc électrique, U_L la tension aux bornes de l'inductance et U_R est la tension de la résistance du circuit. Cette équation peut aussi s'écrire :

$$U_c = U_{arc} + L \frac{dI(t)}{dt} + R.I(t) \quad (10 \text{ bis})$$

Il est entendu par cette expression, que la formation d'un arc électrique permet d'empêcher le courant de court-circuit d'atteindre la valeur maximale du courant présumé. La limitation ne sera donc obtenue que si la tension d'arc devient rapidement supérieure à la tension du réseau. On voit bien que si U_{arc} devient supérieure à U_c , le courant doit s'adapter pour que $\frac{dI(t)}{dt}$ soit inférieure à 0.

Dans cet article, l'équation différentielle non linéaire (10) est discrétisée et résolue de manière itérative suivant la méthode d'Euler. Dans les équations (11) et (12), nous présentons les expressions du courant et de la tension calculées en présence d'un arc électrique. Ainsi, le courant du pas de temps suivant est égal au courant du pas de temps actuel, plus la valeur de changement du courant fonction du pas de temps, idem pour la tension. La résolution de l'équation différentielle est entièrement développée en UDF sous Fluent. Ce type de couplage semble également avoir été réalisé par J. Almurr et al. [25].

Ainsi, on distingue deux courants :

- Courant limité : il est limité par la présence de l'arc dans le circuit et est recalculé et réinjecté à chaque pas de temps dans le modèle.
- Courant présumé : c'est le courant théorique auquel le circuit serait soumis s'il n'y avait pas d'arc électrique.

Les expressions du courant et de la tension limitée couplées avec les paramètres du circuit externe sont données par :

$$I(t + \Delta t) = I(t) + \frac{dI(t)}{dt} \times \Delta t \quad (11)$$

$$U_c(t + \Delta t) = U_c(t) + \frac{dU_c(t)}{dt} \times \Delta t \quad (12)$$

Cette méthode a été vérifiée en comparant les solutions analytique et numérique du courant et de la tension présumée, en résolvant l'équation (10) à l'aide du module « solve_ivp » utilisé pour la résolution des systèmes d'équations différentielles sur Python.

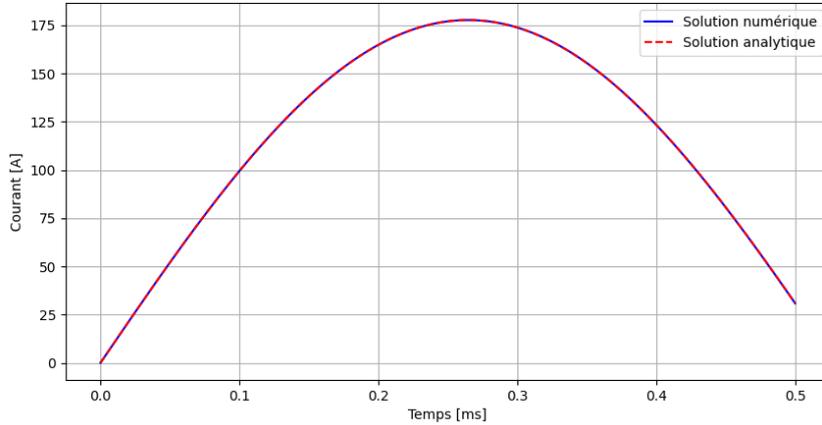


Figure 2 : Comparaison entre les solutions numérique et analytique du courant présumé.

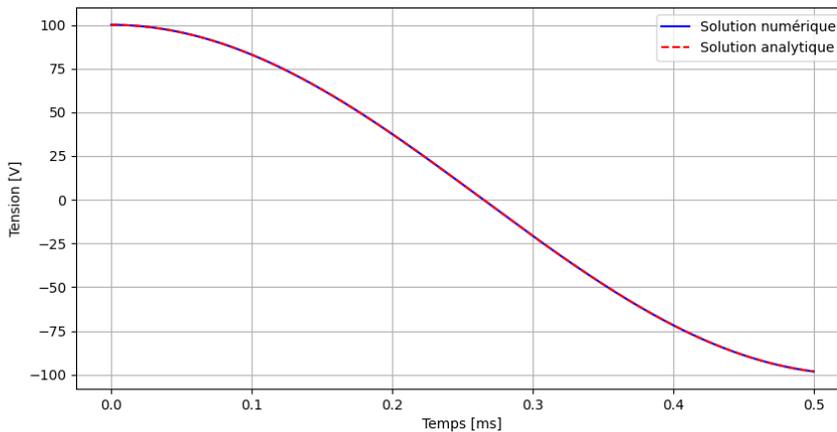


Figure 3 : Comparaison entre les solutions numérique et analytique de la tension présumée.

Il est à noter que, pour cet article, les paramètres du circuit (R, L, C) ont été choisis afin d'avoir une onde de courant adaptée aux dimensions réduites de la géométrie. Ils sont loin d'un cas réel (correspondant au réseau électrique). Il s'agit de paramètres adaptés à notre cas, qui sont fixés à $R=10^{-6} \Omega$, $L=95.10^{-6} H$ et $C=3.10^{-4} F$. La figure 2 montre une demi-période $\frac{T}{2} \sim 0.5ms$ et une valeur maximale de courant présumé $I_{p,max} = 180A$.

1.7. Conditions aux limites

Les surfaces qui enveloppent le domaine sont nommées « parois ». Nous supposons que la vitesse est nulle sur les parois. Dans la configuration présentée, l'échappement en amont « Ex_amont » est en position fermée. L'échappement en aval « Ex_aval » est ouvert, à la pression atmosphérique. Il est pris en compte par une condition « Pressure Inlet » permettant à la convection d'entrer ou de sortir du domaine contrairement à une condition « Pressure Outlet »

qui ne permettrait qu'une condition sortante du domaine. Pour l'équation de l'énergie, la méthode « couplé » proposée par le solveur Fluent est appliquée entre le plasma et les électrodes. Cette méthode prend en compte un transfert de chaleur « simplifié » (conduction uniquement). La densité du courant est calculée en résolvant l'équation de conservation du potentiel électrique V . Une distribution homogène et temporelle de la densité de courant est donnée à la surface « In » afin de répondre à $I(t)$ désiré, et un potentiel de référence de 0 V est imposé à la surface « Out ». La température des parois avant et arrière est fixée à 300 K. Toutes les conditions sont mentionnées dans le Tableau 2.

Condition limite	Type	Energie	Potentiel électrique	Champ magnétique
Rails	Wall	Coupled	Coupled	Biot&Savart
In	Wall	Flux nul	$J(t)=I(t)/S$	/
Out	Wall	Flux nul	0V	/
Ex_amont	Wall	T=300K	Flux nul	Biot&Savart
Ex_aval	Pressure Inlet	P=P _{atm} T=300K	Flux nul	Biot&Savart
Séparateur(s)	Wall	Coupled	Coupled	Biot&Savart
Parois	Wall	T=300K	Flux nul	Biot&Savart

Tableau 2. Conditions aux limites.

L'arc est initialisé à une distance de 5 mm des séparateurs. Afin d'initialiser la décharge de l'arc, un canal conducteur de $R=0.7\text{mm}$ est créé entre les deux rails à une valeur de 20kK. Le rayon du canal de l'arc est choisi en fonction des dimensions de la géométrie et de la conductivité électrique de l'arc afin de pouvoir passer un courant jusqu'à 200A dans un canal qui ne dépasse pas l'épaisseur de la géométrie.

2. Résultats et discussion

Le processus du déplacement et de la segmentation de l'arc est illustré par les champs de température pour différentes configurations : 0SP, 1SP et 2SP.

Les résultats sont présentés sur la figure 4 pour différents pas de temps : $t_1=10\mu\text{s}$, $t_2=50\mu\text{s}$, $t_3=0.1\text{ms}$, $t_4=0.15\text{ms}$, $t_5=0.2\text{ms}$, $t_6=0.25\text{ms}$, $t_7=0.3\text{ms}$.

Pour les premiers pas de temps, l'arc situé entre les deux rails, suite à l'initialisation, a un comportement similaire dans les trois cas.

A $t_2=50\mu\text{s}$, l'arc commence à se galber et nous pouvons observer la propagation de la température entre les rails. A $t_3=0.1\text{ms}$, l'arc se déplace en étant poussé par les forces de Lorentz et de pression. Pour les cas 1SP et 2SP, cette augmentation de la température favorise la formation des pieds d'arc et la segmentation de l'arc sur le(s) séparateur(s). Des multi-accrochages sont également observés à $t_5=0.2\text{ms}$ en raison du chauffage et de l'augmentation

de la conductivité électrique à proximité des pieds d'arc. Ensuite, nous pouvons voir que le processus de segmentation est terminé et que les pieds d'arc sont entièrement localisés sur le(s) séparateur(s).

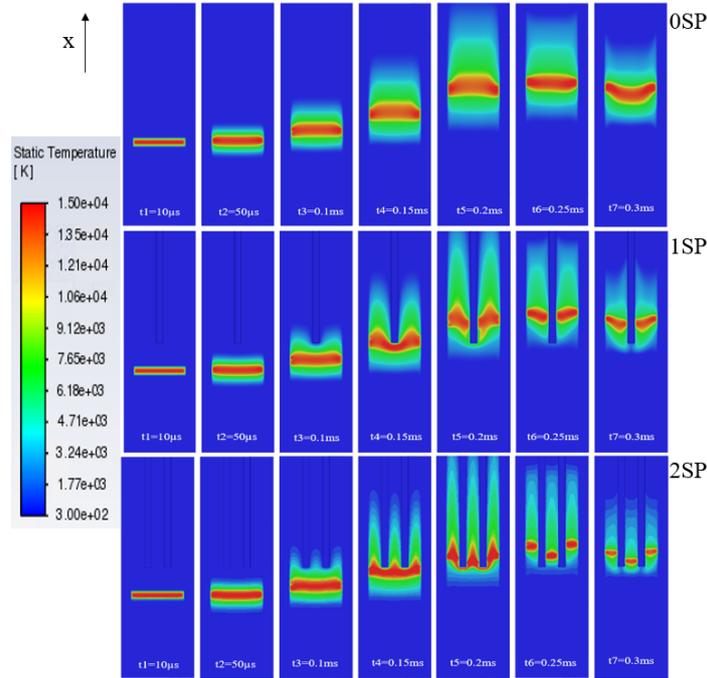


Figure 4 : Champs de température pour les trois configurations 0SP, 1SP et 2SP.

Sur la figure 5, nous présentons l'évolution en fonction du temps de la tension d'arc.

A $t=0s$, un canal conducteur est initialisé entre les deux rails à $T=20kK$ qui permet aisément de faire circuler le courant. Une fois les équations couplées résolues, le courant circule plus difficilement et les pertes par rayonnement agissent d'où l'augmentation de la tension à $t1=10\mu s$.

De $t1=10\mu s$ à $t3=0.1ms$, le comportement de l'arc est similaire dans les trois cas. L'arc est situé entre les deux rails et la présence de(s) séparateur(s) n'influence pas la tension de la colonne d'arc.

Pour le cas 0SP, la tension de l'arc a approximativement la même valeur tout au long de son déplacement du fait qu'il n'y a pas d'obstacles rencontrés par l'arc. Après $t5=0.2ms$, la tension de l'arc diminue en s'approchant du bord de la géométrie et en devenant moins courbée.

A $t4=0.15ms$, dans les cas 1SP et 2SP, l'arc est bloqué par le(s) séparateur(s) et la température environnante augmente, favorisant ainsi la formation de pieds d'arc sur le(s) séparateur(s).

De $t4=0.15ms$ à $t5=0.2ms$, l'arc est galbé par la présence de(s) séparateur(s), ce qui augmente progressivement sa tension. Ainsi, lorsque l'arc commute sur les séparateurs, une tension additionnelle de 20V par séparateur se rajoute et on observe une tension maximale de 80V pour le cas 1SP et 100V pour le cas 2SP.

De $t_5=0.2\text{ms}$ à $t_7=0.3\text{ms}$, la tension d'arc baisse car l'arc, moins galbé, est perpendiculaire aux séparateurs. Cependant, les tensions des trois configurations (OSP, 1SP et 2SP) reste séparées de 20V en raison de la différence de tensions de gaines due à la présence des séparateurs.

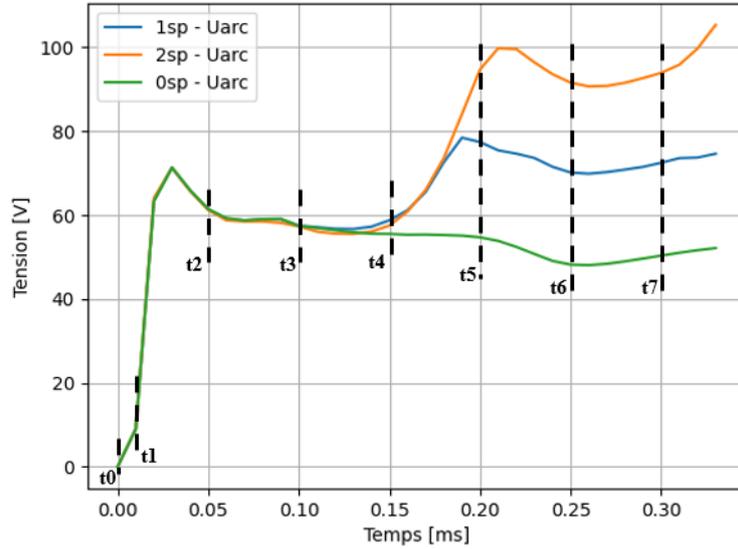


Figure 5 : Evolution de la tension d'arc pour les trois configurations 0SP, 1SP et 2SP. Les temps reportés sont relatifs aux évolutions de la Figure 4

Par la suite, nous présentons sur la figure 6 l'influence de l'évolution de la tension d'arc sur l'évolution du courant et son effet limitant.

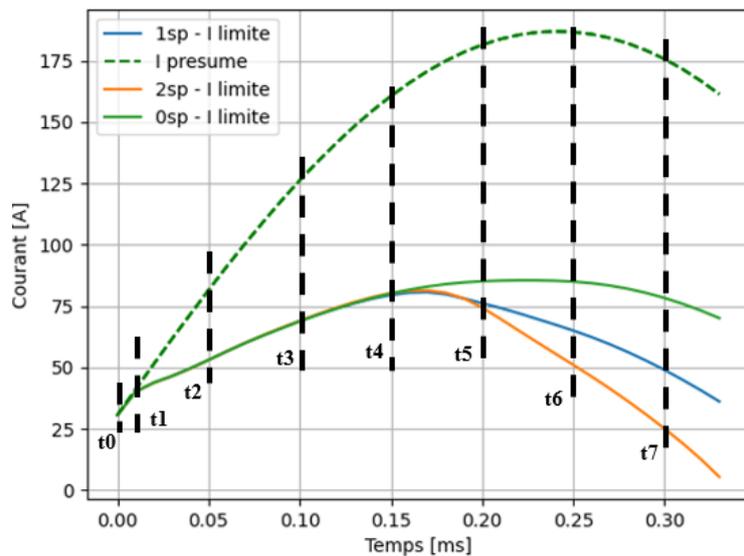


Figure 6 : Evolution du courant pour les trois configurations 0SP, 1SP et 2SP. Les temps reportés sont relatifs aux évolutions de la Figure 4.

Nous observons sur la figure 6 que le courant limité s'écarte du courant présumé et on remarque une croissance plus lente du courant avec des valeurs moins élevées dans les trois cas. Ceci est dû à l'évolution de la tension d'arc observée sur la figure 5 entre $t_1=10\mu s$ et $t_4=0.15ms$.

Ensuite, quand la tension d'arc devient supérieure à celle du réseau, on observe un changement de pente et une décroissance progressive du courant vers zéro.

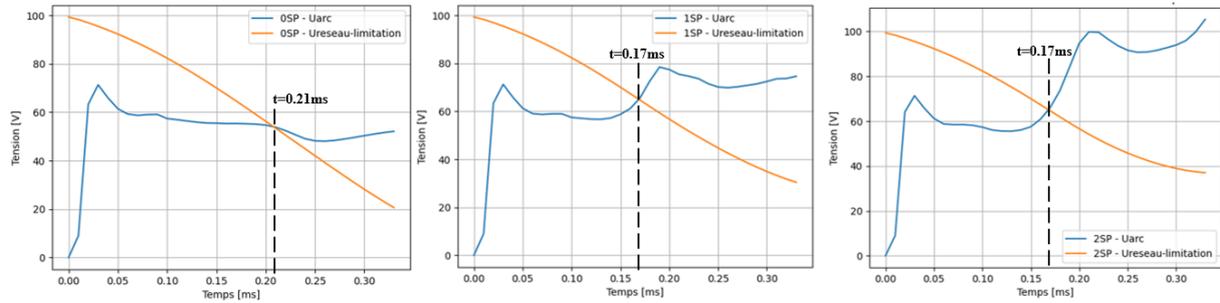


Figure 7 : Evolution de la tension du réseau et de la tension d'arc pour les configurations OSP, 1SP et 2SP.

Nous présentons sur la figure 7 l'évolution de la tension du réseau et de la tension de l'arc. Dans le cas 1SP et 2SP, on observe un dépassement de la tension du réseau par la tension d'arc à $t\sim 0.17ms$. Cependant, la configuration 2SP montre une limitation plus rapide du courant par rapport à la configuration 1SP par la présence de 20V de plus dans la tension d'arc. Pour la configuration OSP, la décroissance du courant commence plus tard à $t\sim 0.21ms$ et la limitation s'avère plus lente par rapport aux autres cas. La résolution de l'équation du réseau a été programmée via une UDF dans le logiciel Ansys Fluent afin qu'elle soit prise en compte lors du calcul complet. Le couple courant-tension obtenu a été validé à l'aide du module « solve_ivp » de Python dédié à la résolution d'équations différentielles.

La stratégie de coupure communément utilisée dans les disjoncteurs repose donc sur la mise en place de plusieurs séparateurs (11 à 13 séparateurs). L'addition des tensions de gaines par la présence des séparateurs permet d'augmenter la tension de l'arc ($\sim 450V$) jusqu'à l'extinction. Plus cette tension est élevée, plus la limitation du courant est rapide.

Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté les grandes lignes de notre modèle numérique. Ensuite, nous avons expliqué la nécessité de prendre en compte la limitation de courant. Les résultats ont été présentés pour différents cas (OSP, 1SP et 2SP) afin de montrer l'influence du nombre de séparateurs et la montée en tension d'arc sur la limitation du courant. L'étude montre que l'on a une limitation de courant plus rapide avec deux séparateurs grâce à l'ajout de tensions de gaines supplémentaires par rapport au cas sans et avec un séparateur.

Certes, le modèle présenté dans cet article ne montre pas la réalité de la coupure en basse tension, vu que les paramètres du circuit électrique ont été ajustés afin de faire le calcul dans une géométrie réduite. Cependant, cela nous a permis de tester l'aptitude de notre modèle à tenir compte de la limitation du courant et avoir un couplage avec les paramètres du circuit externe. Ce module sera intégré dans nos futurs calculs dans des conditions géométriques et paramétriques réelles.

Références

- [1] D. Shin, I. O. Golosnoy, T. G. Bull, et J. W. McBride, « Experimental study on the influence of vent aperture size and distribution on arc motion and interruption in low-voltage switching devices », in *2017 4th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST)*, Xi'an: IEEE, oct. 2017, p. 213-217. doi: 10.1109/ICEPE-ST.2017.8188830
- [2] J. W. McBride et D. Shin, « A study of the Motion of High Current Arcs in Splitter Plates using an Arc Imaging System », *Int. Conf. Electr. Contacts*, p. 175-180, 2016. <https://eprints.soton.ac.uk/402403/>
- [3] J. Quéméneur, J. Lu, J.-J. Gonzalez, P. Freton, et J.-J. Gonzalez, « ARC MOTION IN LOW VOLTAGE CIRCUIT BREAKER (LVCB) EXPERIMENTAL AND THEORETICAL APPROACHES », 2019, [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02324102>
- [4] J. Lu *et al.*, « Experimental Studies of Arc Motion Between Two Parallel Runners with Splitter Plates », *PLASMA Phys. Technol.*, vol. 7, n° 1, p. 16-20, juin 2020. doi: 10.14311/ppt.2020.1.16.
- [5] P. Rodriguez, J. Didier, G. Bernard, et S. Rowe, « Arc-contact-insulating wall interactions in low voltage circuit-breakers », *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 13, n° 2, p. 480-488, avr. 1998. doi: 10.1109/61.660918.
- [6] E. Gauster, W. Rieder, et S. Member, « Arc Lengthening Between Divergent Runners: Influence of Arc Current, Geometry, and Materials of Runners and Walls », *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.-PART A*, vol. 21, n° 1, 1998. doi: 10.1109/HOLM.1996.557173.
- [7] C. Fievet, M. Barrault, P. Chevrier, et P. Petit, « Experimental and numerical studies of arc restrikes in low-voltage circuit breakers », *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 25, n° 5, p. 954-960, oct. 1997. doi: 10.1109/27.649604.
- [8] J. W. McBride et P. M. Weaver, « Review of arcing phenomena in low voltage current limiting circuit breakers », *IEEE Proc-Sci Meas Technol*, vol. 148, n° 1, 2001. doi: 10.1049/ip-smt:20010185
- [9] Mingzhe Rong, Yi Wu, Fei Yang, Chunping Niu, et Ruiguang Ma, « Numerical research on switching arc of circuit breaker », in *2011 1st International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology*, Xi'an, China: IEEE, oct. 2011, p. 488-491. doi: 10.1109/ICEPE-ST.2011.6123036.
- [10] A. Mutzke, T. Rütther, M. Lindmayer, et M. Kurrat, « Arc behavior in low-voltage arc chambers », *EPJ Appl. Phys.*, vol. 49, n° 2, janv. 2010. doi: 10.1051/epjap/2010001.
- [11] F. Karetta et M. Lindmayer, « Simulation of the Gasdynamic and Electromagnetic Processes in Low Voltage Switching Arcs », *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.-PART A*, vol. 21, n° 1, 1998. doi: 10.1109/95.679038
- [12] M. Lindmayer, E. Marzahn, A. Mutzke, T. Rütther, et M. Springstube, « The process of arc splitting between metal plates in low voltage arc chutes », *IEEE Trans. Compon. Packag. Technol.*, vol. 29, n° 2, p. 310-317, juin 2006. doi: 10.1109/TCAPT.2006.875902.
- [13] Jingjing Lu, « Caractérisation du comportement du plasma dans un disjoncteur basse tension par le développement d'un outil numérique et d'expériences associées », 2020.

- [14] B. Swierczynski, J. J. Gonzalez, P. Teulet, P. Freton, et A. Gleizes, « Advances in low-voltage circuit breaker modelling », *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 37, n° 4, p. 595-609, févr. 2004.
doi: 10.1088/0022-3727/37/4/011.
- [15] J. Yin, Q. Wang, et X. Li, « Simulation Analysis of Arc Evolution Process in Multiple Parallel Contact Systems », *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 46, n° 8, p. 2788-2793, août 2018.
doi: 10.1109/TPS.2018.2828330.
- [16] A. Mutzke, T. Rtither, M. Kurrat, M. Lindmayer, et E.-D. Wilkening, « Modeling the Arc Splitting Process in Low-Voltage Arc Chutes », *Electr. Contacts - 2007 Proc. 53rd IEEE Holm Conf. Electr. Contacts*, 2007.
doi: 10.1109/HOLM.2007.4318213
- [17] P. Schueller, « Coupure en BT par limitation du courant ». Cahier technique n°163, Shnieder Electric.
<https://studylibfr.com/doc/9264157/cahier-technique-n-163-%C2%B0-coupure-en-bt-par-limitation-du>
- [18] A. Iturregi, B. Barbu, E. Torres, F. Berger, et I. Zamora, « Electric Arc in Low-Voltage Circuit Breakers: Experiments and Simulation », *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 45, n° 1, p. 113-120, janv. 2017.
doi: 10.1109/TPS.2016.2633400.
- [19] F. Yang *et al.*, « Numerical analysis of arc characteristics of splitting process considering ferromagnetic plate in low-voltage arc chamber », *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 38, n° 11 PART 2, p. 3219-3225, nov. 2010.
doi: 10.1109/TPS.2010.2070084.
- [20] Z. Sun, M. Rong, F. Yang, Y. Wu, Q. Ma, et X. Wang, « Numerical modeling of arc splitting process with ferromagnetic plate », *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 36, n° 4 PART 1, p. 1072-1073, août 2008.
doi: 10.1109/TPS.2004.924559.
- [21] M. Rong, F. Yang, Y. Wu, A. B. Murphy, W. Wang, et J. Guo, « Simulation of arc characteristics in miniature circuit breaker », *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 38, n° 9 PART 1, p. 2306-2311, sept. 2010.
doi: 10.1109/TPS.2010.2050703.
- [22] Y. Fei *et al.*, « Numerical simulation of the eddy current effects on the arc splitting process », *Plasma Sci. Technol.*, vol. 14, n° 11, p. 974-979, nov. 2012.
doi: 10.1088/1009-0630/14/11/05.
- [23] Maëva COURREGÉ, « Caractérisation des interactions plasma/parois dans un disjoncteur haute tension », Thèse de doctorat, 2017.
<https://theses.fr/2017TOU30162>
- [24] P. Freton, J. J. Gonzalez, M. Masquère, et F. Reichert, « Magnetic field approaches in dc thermal plasma modelling », *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 44, n° 34, août 2011.
doi: 10.1088/0022-3727/44/34/345202.
- [25] J. Almurr, W. Bussière, J. Hertzog, et D. Rochette, « Numerical investigations on the electric arc behavior upon contact opening in a low-voltage switch under the effect of external magnetic field », *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 209, p. 107945, août 2022.
doi: 10.1016/j.epr.2022.107945.