



HAL
open science

Couplage d'un modèle d'arc électrique avec la méthode des éléments finis pour le dimensionnement des cellules de coupure à technologie vide

Julien Fontchastagner, Olivier Chadebec, Hans Schellekens, Gérard Meunier

► To cite this version:

Julien Fontchastagner, Olivier Chadebec, Hans Schellekens, Gérard Meunier. Couplage d'un modèle d'arc électrique avec la méthode des éléments finis pour le dimensionnement des cellules de coupure à technologie vide. *Revue Internationale de Génie Electrique – RIGE*, 2005, 8 (1), pp.139 à 151. hal-03047858

HAL Id: hal-03047858

<https://hal.science/hal-03047858v1>

Submitted on 9 Dec 2020

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.

Couplage d'un modèle d'arc électrique avec la méthode des éléments finis pour le dimensionnement de disjoncteurs à vide

Julien Fontchastagner* — Olivier Chadebec**
Hans Schellekens* — Gérard Meunier**

* *Schneider Electric, Usine 38V, Division Moyenne Tension, Service Anticipation
ZAC Champ Saint-Ange, Varcès, 28050 Grenoble cedex 9, France
hans_schellekens@mail.schneider.fr*

** *Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble
LEG / ENSIEG, BP 46, 38402 Saint Martin d'Hères cedex*

RÉSUMÉ. Cet article propose un couplage entre la méthode des éléments finis et un modèle d'arc électrique dans le vide pour le dimensionnement des disjoncteurs à vide. La méthode des éléments finis permet de calculer le champ magnétique dans l'espace inter-électrodes. Un modèle dépendant de ce champ permet de trouver une nouvelle position d'arc. Dans une dernière partie, une méthode simple pour estimer le pas de temps séparant deux positions d'arc successives est proposée.

ABSTRACT. This paper proposes a coupling between finite element method and an electrical arc model for sizing vacuum circuit breakers. FEM allows to calculate magnetic field between electrodes. A model depending on this field is then applied to find the new arc position. In last part a time step estimation method is proposed.

MOTS-CLÉS : arc électrique dans le vide, calcul du champ magnétique, méthode des éléments finis, disjoncteur à vide.

KEYWORDS: vacuum electric arc, magnetic field calculation, finite element method, vacuum circuit breaker.

1. Introduction

Le marché des disjoncteurs moyenne tension équipés de cellules de coupure à vide est actuellement en constante progression. Avec une maintenance limitée, des temps d'interruption du courant très court, un faible poids et un intérêt écologique certain, les ampoules à technologie vide remplace progressivement leurs homologues à SF6.

Dans un disjoncteur, la coupure du courant n'est jamais instantanée. En effet, après la phase d'écartement des électrodes, il se forme un arc électrique qui doit être éteint le plus rapidement possible. Le champ magnétique présent dans la chambre de coupure est une grandeur qui influence fortement le comportement de l'arc électrique. Celui-ci interagit fortement avec les courants parcourant l'arc (force de Laplace). Les constructeurs d'ampoule s'attachent donc à créer des géométries favorisant ce champ magnétique. Celles-ci se regroupent autour de deux familles. La première est constituée par les ampoules à champ radial (RMF). Ce champ est créé par une géométrie d'électrode spécifique (figure 1). L'arc est alors concentré (forte densité de courant) mais tourne (effet orthoradial de la force) ce qui permet d'éviter la dégradation des électrodes. L'autre type de géométrie d'ampoule est celle à champ axial (AMF). Le champ est créé soit par une spire externe soit par une autre géométrie d'électrode spécifique (figure 1). L'arc est alors en mode diffus i.e. multifilamentaire avec faible densité de courant le parcourant mais statique. Cette faible densité de courant évite l'échauffement excessif des électrodes.

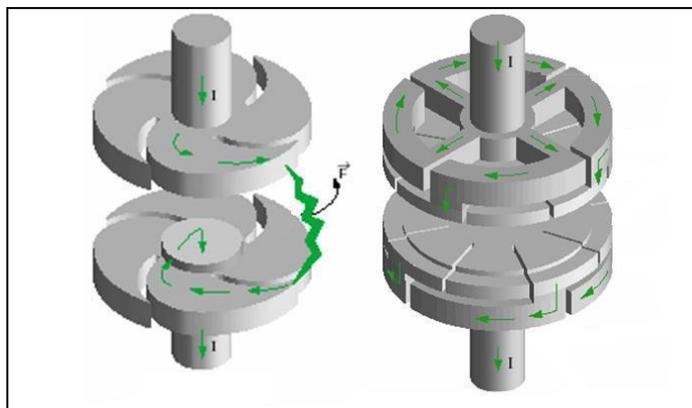


Figure 1. Exemples de deux types de contacts d'ampoule à vide, à champ radial (à gauche), à champ axial (à droite).

Le développement de ce nouveau type d'ampoule nécessite la mise au point d'outils de modélisation adaptés. D'une part, pour comprendre les phénomènes intervenant pendant la coupure (déplacement de l'arc électrique) et d'autre part pour mettre au point de nouvelles géométries de chambres de coupure favorisant

son extinction. Cet article propose de répondre à cette problématique en introduisant une approche originale couplant une méthode de calcul de champ efficace (la méthode des éléments finis) avec un modèle d'arc reposant sur des considérations expérimentales.

La première étape consiste à partir d'une position d'arc initiale et avec l'aide d'un calcul éléments finis, de déterminer le champ magnétique dans l'espace inter-électrodes. Une fois la carte de champ obtenue, par application d'un modèle d'arc approprié, on détermine la nouvelle position de l'arc électrique. Une nouvelle carte du champ est alors calculée et ainsi de suite (figure 2). Ce travail a été implémenté dans le logiciel Flux3D. La deuxième étape, inachevée à ce jour, est de déterminer la valeur du pas de temps séparant deux positions d'arc successives. Dans ce but, une méthode d'estimation est proposée.

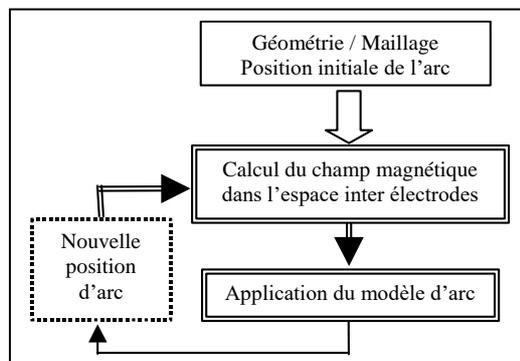


Figure 2. Principe du couplage

2. Le modèle d'arc

2.1. Le point de départ : NIKE un modèle d'arc en mode diffus

Ce modèle est un modèle phénoménologique développé en ne considérant que des grandeurs qui sont accessibles à la mesure : le courant, la tension, et le champ magnétique.

C'est un modèle énergétique d'arc électrique dans le vide lorsqu'il est en mode diffus. Il a été développé par deux spécialistes de la coupure vide : Bruce SCHULMAN (Cutler Hammer - USA) et Hans SCHELLEKENS (Schneider Electric). Il permet d'obtenir une répartition des différents arcs élémentaires du mode diffus (modélisés par des conducteurs filiformes) par la seule connaissance de la distribution de champ magnétique entre les contacts. Ce n'est ni un modèle microscopique, où il faudrait prendre en compte toutes les particules composant le plasma, ni un modèle macroscopique, où l'arc serait un conducteur uniforme. Il se

place à une échelle intermédiaire, où l'on considère chaque arc 'élémentaire' constituant l'arc en mode diffus.

2.2. Le modèle d'arc concentré

Un nouveau modèle a été développé s'appliquant à un arc en mode concentré et dans lequel celui-ci est désormais considéré comme un conducteur uniforme (i.e. on se situe à l'échelle macroscopique). Notre arc sera modélisé par une ligne brisée, dont le nombre de segments sera choisi par l'utilisateur.

Si on considère l'arc à un instant donné, les différentes positions potentielles qu'il pourra prendre à l'instant suivant (arcs admissibles) sont données par les trajets d'arc issus des points voisins du point origine de l'arc considéré. Ceci fait nécessairement intervenir une discrétisation de la surface des contacts fournissant les différentes positions possibles des pieds d'arc, l'évolution de notre arc modélisé dépendant de cette discrétisation. Deux hypothèses sont alors formulées :

- I. Les différents trajets potentiels d'arc sont calculés à partir du champ d'induction B selon le principe énoncé ci-après.

Le point de départ du calcul du trajet est le pied d'arc.

En considérant le schéma de la figure 3, l'expression de la densité de courant est (E_z représentant la composante axiale du champ électrique) :

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_{//} &= \sigma_{//} \cdot E_z \cdot \cos \alpha \\ \mathbf{J}_{\perp} &= \sigma_{\perp} \cdot E_z \cdot \sin \alpha \end{aligned} \quad [1]$$

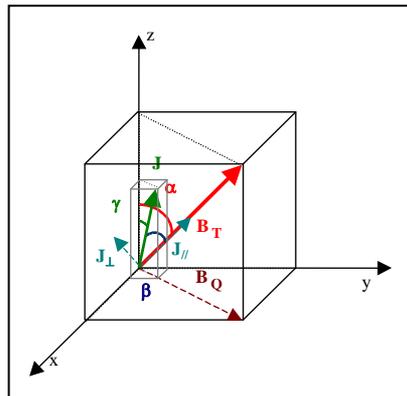


Figure 3. Schéma représentant le champ total \mathbf{B}_T et la densité de courant \mathbf{J} (ainsi que leurs projections)

Avec :

$$\alpha = \text{atan} \left(\frac{\|\mathbf{B}_T\|}{\|\mathbf{B}_Q\|} \right) \quad [2]$$

La physique du plasma nous indique que la composante de la conductivité de l'arc selon la direction du champ magnétique ($\sigma_{//}$) est deux fois plus importante que celle orthogonale à cette direction (σ_{\perp}).

Connaissant le dernier point calculé de la trajectoire (X_{prec} , Y_{prec} , Z_{prec}), on calcule le suivant par :

$$\begin{aligned} X &= X_{prec} + \frac{B_x \cdot \Delta\ell \cdot \sin(\gamma)}{B_Q} \\ Y &= Y_{prec} + \frac{B_y \cdot \Delta\ell \cdot \sin(\gamma)}{B_Q} \\ Z &= Z_{prec} + \Delta\ell \cdot \cos(\gamma) \end{aligned} \quad [3]$$

Où : $\Delta\ell$ est la valeur du pas de calcul, γ l'angle entre \mathbf{J} et l'axe Oz, α celui entre \mathbf{B} et Oz, et β celui entre \mathbf{J} et \mathbf{B} .

Ces trois angles sont donnés par les relations [2] et [4].

$$\beta = \text{atan} \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\sin(\alpha)}{\cos(\alpha)} \right)$$

$$\begin{aligned} &[4] \\ \gamma &= \alpha - \beta \end{aligned}$$

De cette manière, on peut ainsi calculer le trajet d'arc issu de chaque point de départ considéré (pied d'arc).

- **II. À un arc donné, on peut associer une tension.**

Celle-ci provient d'une relation expérimentale, la formule de GUNDLACH [5] donnant la tension d'arc U_i associée à l'arc i (mode diffus).

$$U_i = U_0 + \alpha \cdot \sqrt{B} \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad [5]$$

Où :

- U_0 correspond à une chute de tension fixe dite ‘chute cathodique’ qui est créée par la bulle de haute pression dynamique recouvrant le pied d’arc, et qui est indépendante de la trajectoire de l’arc, elle est de l’ordre de 17V.
- d_0 représente la distance inter électrodes.
- d est la distance effective parcourue par l’arc.
- α est une constante d’ajustement de la formule, pour l’adapter aux différents types de matériaux de contacts et aux géométries d’ampoules.

Cette formule est valable pour un arc élémentaire constitutif d’un arc en mode diffus, mais on se servira d’une version discrétisée et adaptée de celle-ci de manière à pouvoir l’appliquer à notre arc en mode concentré :

$$U_i(k+1) = U_i(k) + CdU \cdot (2,718^{p_2} \cdot 10^{p_3} \cdot |B_{local}(k)|^{2+0.75(p_3-1)} \cdot \ell(k+1)^{p_3} \cdot \Delta\ell) \quad [6]$$

Avec : $\ell(k+1) = \ell(k) + \Delta\ell$

Où :

- k est l’indice d’avancée sur la trajectoire.
- CdU est un terme correctif.
- p_2 est un paramètre qui permet d’adapter la formule aux différents types de matériaux composant les électrodes, et aux différentes géométries. Il est ajusté pour retranscrire des variations significatives de tension d’arc.
- p_3 permet de passer de la formule de Nemchinskii (avec $p_3 = 0$) à celle de Gundlach (avec $p_3 = -1$; on retrouve alors la discrétisation de [5] au facteur CdU près).
- B_{local} est le champ présent au point courant de l’abscisse curviligne.
- $U_i(0) = p_1$ (p_1 n’étant qu’un offset) et $\ell(0) = 0$.

Le terme correctif CdU est donné par la formule (β provenant de [4]) :

$$CdU = 1 + |\sin(\beta)| \quad [7]$$

Le courant circulant dans l’arc est le courant traversant les contacts (courant circuit, I_c). La puissance totale dissipée dans ce dernier est donc le produit de sa tension propre et du courant circuit. Les différentes positions successives sont fournies par la minimisation de cette puissance, ce qui équivaut à la minimisation de la tension d’arc (à I_c constant).

REMARQUE. — On doit trouver un critère ne prenant en compte que les grandeurs disponibles : U , I , B . Un modèle prenant en compte des phénomènes de friction par exemple serait plus satisfaisant, mais les grandeurs nécessaires sont inaccessibles.

On calcule ainsi les divers trajets d'arc admissibles issus des points voisins du pied d'arc de l'instant considéré ainsi que leur tension d'arc associée. La future position d'arc est alors fournie par le trajet de plus basse tension.

Nous proposons donc un modèle d'arc basé uniquement sur des considérations énergétiques, et dépendant seulement du calcul du champ magnétique.

2.3. Modélisation numérique

Pour effectuer le calcul du champ, nous disposons du logiciel de résolution par éléments finis FLUX3D. Dans ce logiciel, il existe deux types de conducteurs :

- les inducteurs
- les conducteurs massifs

Les premiers sont des conducteurs non maillés dans lesquels le courant est imposé et la répartition est connue (il s'agit en fait d'un trajet de courant). Ceux du second type sont des conducteurs maillés tels qu'on les trouve dans tout logiciel de calcul par éléments finis.

La répartition du courant d'arc étant connue par le calcul du trajet, et afin d'éviter un remaillage à chaque position d'arc, ce dernier sera modélisé par un composant de type inducteur. Par contre, du fait de la complexité des géométries de contacts utilisées, les électrodes seront, elles, des conducteurs massifs. Nous pouvons donc désormais nous intéresser au calcul du champ magnétique dans l'espace inter-électrodes.

3. Calcul du champ magnétique

3.1. Calcul des répartitions de courant

Le courant \mathbf{J}_0 dans les deux électrodes est calculé par résolution éléments finis électrocinétique pour 1A. Pour chaque électrode, un potentiel est fixé sur la face d'amené du courant (condition de Dirichlet). Un autre potentiel est fixé sur le nœud de la pastille où se situe le pied d'arc. Cette approche est contestable car en toute rigueur, le courant ne peut circuler à travers une surface nulle. Il serait alors nécessaire d'imposer le potentiel sur une petite face représentative du pied d'arc et en particulier sur les nœuds qui lui sont associés. Ceci implique la nécessité de raffiner le maillage au voisinage de celle-ci, ce qui conduit généralement à l'explosion des tailles de maillage. La solution serait donc de remailler le pied d'arc à chaque nouvelle position. Cette solution étant difficile à mettre en œuvre, nous nous sommes contenté de fixer le potentiel à un nœud, approche qui nous paraît satisfaisante dans un premier temps.

La position de l'arc étant connue, celui-ci est modélisé par un inducteur filaire (ligne brisée) parcouru par un courant de 1A.

3.2. Calcul du champ magnétique par formulation $T_0\Phi$

Tout d'abord, le champ T_{0i} créé par les répartitions J_{0i} de chaque électrode est calculé sur tout le domaine par éléments finis par résolution de :

$$\text{rot}T_{0i} - J_{0i} = 0 \quad [8]$$

Le champ créé par l'arc T_{0arc} est calculé par l'intégration analytique de la formule de Biot et Savart sur le trajet de l'arc. Cette approche possède l'avantage d'être indépendante du maillage de l'espace inter-électrodes. En particulier, il n'est pas nécessaire de remailler à chaque déplacement de l'arc.

Si des pièces ferromagnétiques sont présentes, l'induction finale est obtenue après une troisième résolution élément finis de [9].

$$\text{div}(\mu(\sum_{i,arc} T_{0i,arc} I_{i,arc} - \text{grad}\Phi)) = 0 \quad [9]$$

Cette relation est associée aux équations de circuit de notre problème, à savoir la mise en série d'une source de courant constante, d'une première électrode massive, d'un inducteur filaire puis d'une deuxième électrode massive.

4. Couplage du modèle

4.1. Résultats en magnétostatique

Le modèle est implanté dans le logiciel de calcul. On utilise une géométrie de contacts à champ radial très proche des géométries industrielles. On peut alors visualiser les différentes positions successives d'un arc comme le montre la figure 4.

On constate que l'arc s'éloigne du centre du contact vers la périphérie. Cependant le but de contacts tels que celui implanté dans la simulation ci-présente est de guider l'arc le long des quatre ailettes définissant les électrodes. Il doit ensuite « sauter » à l'ailette suivante une fois arrivé au bout de la première.

Dans notre cas, le déplacement de l'arc est sensiblement différent. En effet on constate que celui-ci « saute » la fente qu'il rencontre dès le début et qu'il ne suit donc pas la piste proposée. Ceci vient du fait qu'aucune prise en compte de termes temporels n'intervient dans le modèle.

Pour remédier à cela, une méthode simple de calcul du temps est proposée dans le paragraphe suivant.

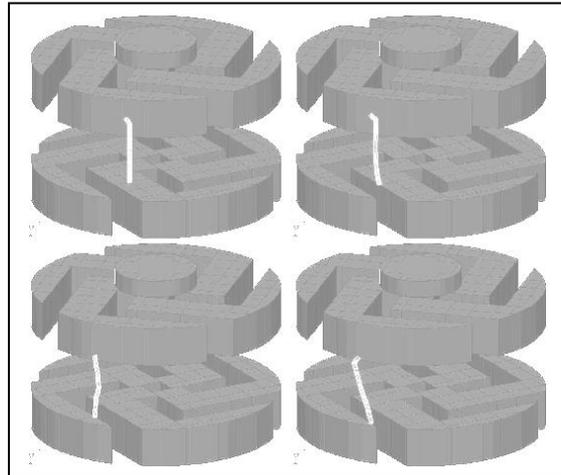


Figure 4. *Les quatre premières positions de l'arc.*

4.2. Vers une prise en compte du temps dans le modèle

4.2.1. *Détermination du temps séparant deux positions successives*

Le passage d'une position d'arc à la suivante n'est pas considéré comme progressif, mais on suppose qu'à un instant donné, deux positions successives coexistent. On considère que les tensions d'arc ne varient pas pendant le temps où on passe d'une position à la suivante. A l'instant t (considéré comme initial) la totalité du courant de circuit (I_c) circule dans le premier arc. Puis le courant de boucle (celui circulant dans le deuxième arc, augmente jusqu'à atteindre ou non la valeur du courant de circuit. S'il y parvient, la nouvelle position est effective, sinon l'arc reste dans sa position initiale.

Le système ainsi obtenu peut être assimilé à un circuit RL alimenté par une source de tension de valeur ΔU (différence entre les deux tensions d'arc, qui est forcément négative). R représente la résistance équivalente des contacts (les résistances des arcs sont considérées comme prise en compte dans le calcul des tensions associées). L représente l'inductance équivalente de l'ensemble {arcs/contacts}. Le courant circulant dans ce circuit est le courant de boucle.

Le fait que le courant de boucle atteigne ou non la valeur de I_c dépend de la résistance R . Pour qu'il y parvienne, il faut que R soit inférieur à une résistance critique donné par la formule [10].

$$R_{\text{critique}} = \frac{-\Delta U}{I_c} \quad [10]$$

Les différentes phases intervenant dans l'estimation du pas de temps désiré sont détaillé dans le schéma représenté en figure 5.

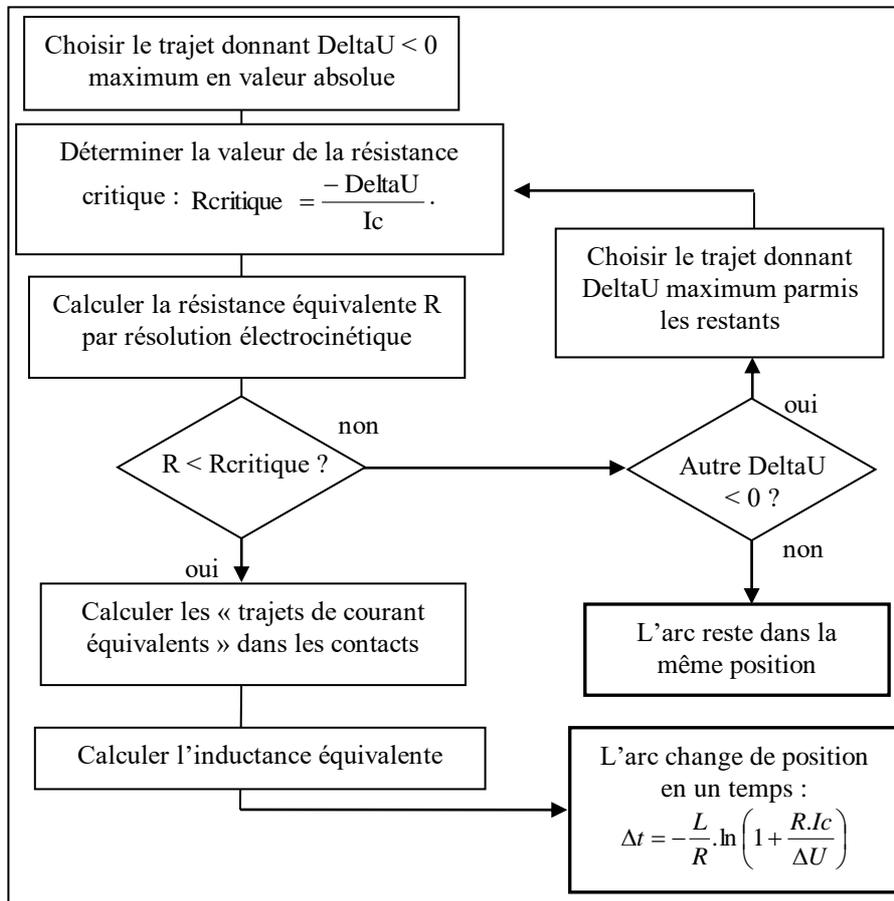


Figure 5. Schéma représentant les opérations à effectuer pour calculer le pas de temps.

4.2.2. Perspectives

Une fois ce calcul implanté, nous pourrions mettre en place le principe général de notre couplage tel que le présente la figure 6. On utilisera une formulation magnétique transitoire $\mathbf{T}-\mathbf{T}_0-\Phi$. Celle-ci permettra de prendre en compte les courants induits, et d'étudier ainsi leur influence.

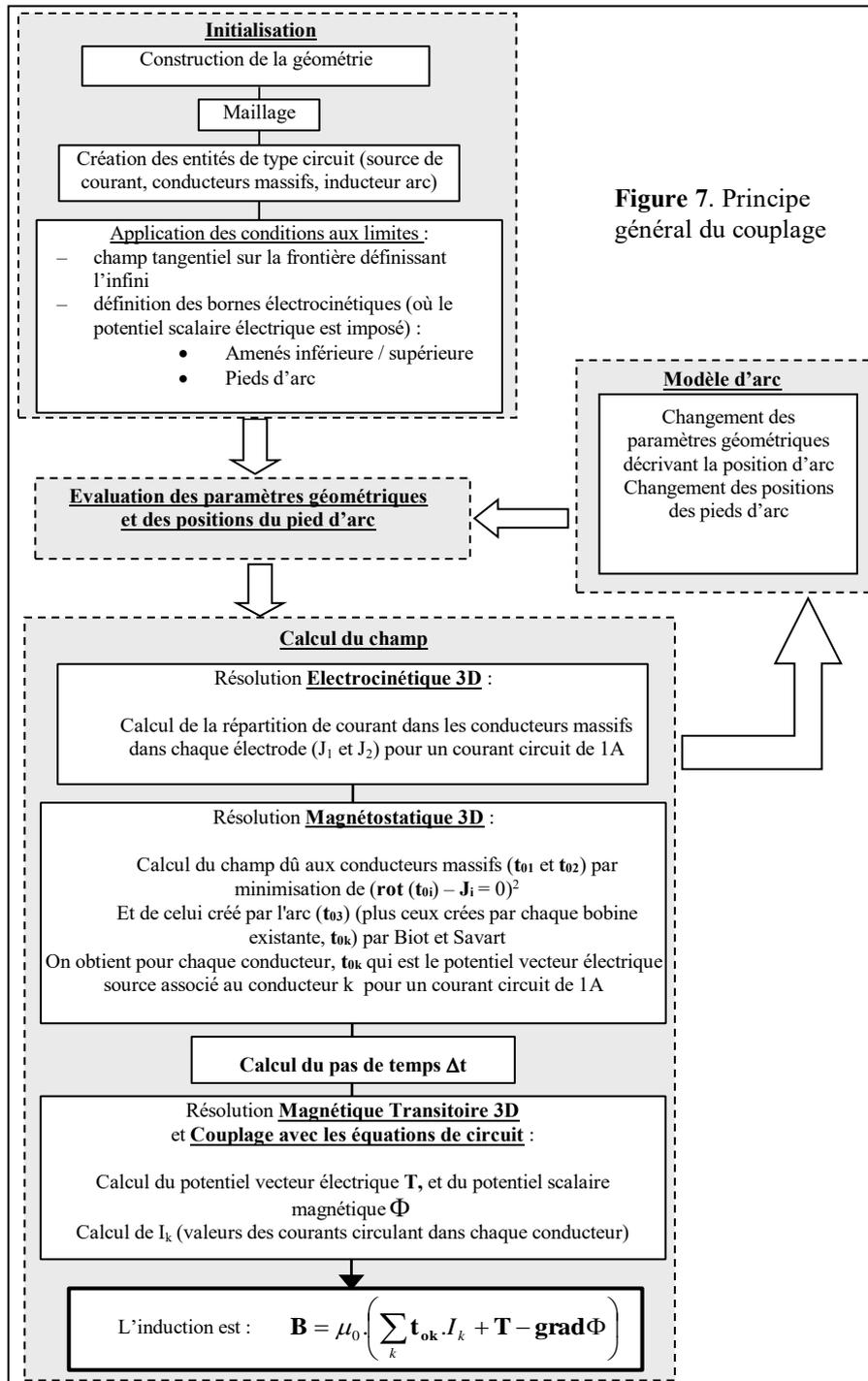


Figure 7. Principe général du couplage

5. Conclusion

Le couplage entre un modèle d'arc dans le vide en mode concentré, et le logiciel de calcul par éléments finis FLUX3D a été mis en place. Pour cela, un dispositif original a été utilisé grâce aux dernières formulations en potentiel scalaire magnétique et potentiel vecteur électrique. Le champ magnétique nécessaire à l'application du modèle est calculé à la fois avec des conducteurs massifs (maillés) et d'autres de type inducteurs (non maillés). De plus ces deux types de conducteurs sont reliés entre eux par un circuit électrique.

Le couplage est fonctionnel, et permet dans un temps raisonnable d'enchaîner plusieurs itérations. On peut ainsi visualiser le mouvement d'un arc. De plus une méthode simple de calcul du temps (et par conséquent de la vitesse) est formulée et attend d'être implantée, en vue d'étudier l'influence des courants de Foucault sur le déplacement de l'arc.

Cependant, il ne s'agit que de la première brique d'une modélisation complexe qui va se poursuivre. L'implantation du couplage ayant été effectuée de la manière la plus générale possible, diverses orientations quant à l'amélioration du code (en plus du calcul du temps) sont envisageables. On pourra par exemple affiner le modèle d'arc en mode concentré ou pourquoi pas essayer d'en formuler un valable pour un arc en mode diffus.

6. Bibliographie

- Braginskii S., *Review of Plasma Physics*, vol. 1., New-York, M. Leontovicht, 1967.
- Landau L, Lifschitz E, *Théorie des champs*, vol. 2 de physique théorique, Moscou, Editions Mir, 1970.
- Le Floch Y., Développement de formulations 3D éléments finis T-Omega pour la prise en compte de conducteurs massifs et bobines avec un couplage circuit, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2002.
- Picot P., Vacuum switching, cahier technique n° 198, mars 2000, Schneider Electric.
- Schellekens H., Arc behaviour in a axial magnetic field vacuum interrupters equipped with an external coil, *18th Conf. On Discharges and Electrical Insulation*, 20 août 1998, Eindhoven.
- Slama A., Modélisation des sources de courant en mouvement et des efforts électrodynamiques dans les appareils de coupure, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2001.