

MODELISATION DES PHENOMENES ELECTROMAGNETIQUE ET THERMIQUE D'UN LIMITEUR DE COURANT SUPRACONDUCTEUR DE SECONDE GENERATION

S. BELKHIRI, L. ALLOUI, F. BEN MEBAREK, L. KHENE, S. M. MIMOUNE

Laboratoire de Modélisation des Systèmes Energétiques LMSE, Université de Biskra, BP 145, Biskra, Algérie
l.alloui@univ-biskra.dz

RESUME

Nous présentons dans cet article les résultats des simulations du comportement magnétique et thermique d'un limiteur de courant de défaut de deuxième génération conçu à partir des couches minces et une couche supraconductrice à haute température critique. Les résultats sont obtenus à partir d'un code de calcul tridimensionnel, développé et implémenté sous environnement Matlab où la formulation en potentiels vecteur magnétique A et en potentiel scalaire électrique V sont adoptées pour résoudre le problème électromagnétique et la formulation de diffusion de la chaleur est adoptée aussi pour résoudre le problème thermique. Le couplage est assuré par un algorithme alterné et la résolution numérique du problème est assurée par la méthode des volumes finis dans sa version tridimensionnelle afin d'éviter certains problèmes de convergence numérique liée au caractère fortement non linéaire du problème à résoudre. Les résultats des simulations ont montré l'intérêt de concevoir un limiteur de courant supraconducteur à partir des couches minces. Ces dernières améliorent considérablement les contraintes thermiques du limiteur de courant durant le processus de la limitation du courant de défaut par la diminution importante de la température, ainsi ils peuvent prolonger considérablement la durée de vie d'un limiteur de courant supraconducteur de deuxième génération.

MOTS CLES : Méthode des volumes finis, limiteur de courant, supraconducteurs ; haute température critique, couches minces, phénomènes électromagnétique et thermique.

1 INTRODUCTION

L'utilisation des limiteurs de courant de défaut conçus à partir des matériaux supraconducteurs de haute température critique a permis de limiter les courants de défaut dans les réseaux électriques. En cas de court-circuit, ces derniers doivent non seulement pouvoir supporter ce régime de défaut et agir comme étant des régulateurs naturels de courant, mais également de réduire les contraintes mécaniques et thermiques subies par le réseau [1]. Ces limiteurs offrent l'avantage d'une part, d'être invisibles dans le régime assigné ou nominal et de pouvoir limiter les courants de défaut dans un temps de réponse très réduit par rapport aux limiteurs de courant classiques ou de disjoncteurs conventionnels [2]. Ces avantages qui sont spécifiquement offerts par les limiteurs de courant conçus à partir des supraconducteurs à haute température critique ont mené à leurs insertions avec un grand succès dans des réseaux électriques de moyenne et de haute tension [3].

Pour assurer une bonne incrémentation du limiteur de courant supraconducteur, en particulier durant le régime de défaut au sein du réseau électrique, il est indispensable d'étudier

son comportement magnétique et thermique afin d'éviter certains problèmes qui peuvent détériorer le matériau supraconducteur après chaque limitation, tel que, une élévation importante de la température au sein du supraconducteur qui est due à une augmentation importante et rapide du courant de défaut durant le processus de la limitation[4]. Il n'est pas envisageable lors d'un test d'essayer toutes les configurations possibles de court-circuit sur un réseau, selon le type de réseau (aérien ou souterrain), selon l'impédance du défaut, et selon la puissance du réseau. Il est donc intéressant de disposer d'outils de Modélisation permettant de simuler le comportement d'un limiteur de courant supraconducteur et d'extrapoler les résultats obtenus à d'autres configurations de court-circuit et à d'autres niveaux de tension du réseau.

Dans ce contexte, plusieurs travaux de simulation ont été proposés. Dans certains de ces travaux, le comportement du supraconducteur est simulé comme étant une vari-résistance [2], [5-6] où le matériau supraconducteur change d'état non dissipatif caractérisé par une résistance nulle dans le régime assigné du réseau vers un état très dissipatif caractérisé par une grande résistance dans le cas des défauts qui peuvent

apparaître durant le fonctionnement du réseau électrique. Ces modèles simple a développé ne reflètent pas de façon satisfaisante le comportement réel du supraconducteur dans son état intermédiaire, en particulier les régimes FLUX-FLOW et FLUX CREEP. Pour cela, d'autres modèles microscopiques ont été proposés dans le but de décrire de façon satisfaisante les régimes FLUX-FLOW et FLUX CREEP [4], [9]. Dans ces modèles, les équations de Maxwell sont adoptées et couplées à l'équation de diffusion de la chaleur, cependant les problèmes électromagnétique et thermique sont résolus dans le cas Monodimensionnel [7] voir Bidimensionnel [8]. Ces modèles ne peuvent pas simuler de façon correcte les limiteurs de courant supraconducteur, en particuliers, les limiteurs de courant supraconducteurs de deuxième génération. Ces derniers conçus à partir de plusieurs couches minces offrent des avantages technique et économique par rapport aux limiteurs de courant classique conçu d'une manière massique est composé seulement d'un matériau supraconducteur, généralement de type II. Les limiteurs de courants supraconducteurs à couches minces sont composés essentiellement de trois couches principales (shunt, supraconducteur, substrat) [4], [9-10] et de plusieurs couches tampons [9-10](Fig.1). Chaque couche possède une ou plusieurs fonctions bien définies [1-10]. Ils sont élaborés par dépôt sur un ensemble composé d'un substrat et de plusieurs couches tampons, dans des conditions thermodynamiques précises [10]. Le substrat et la couche tampon doivent être adaptés afin d'avoir un paramètre de maille proche de celui de l'YBaCuO pour ne pas induire de désorientation [1-10]. Le dépôt ce fait selon l'axe c, perpendiculairement au substrat. L'étude d'une telle configuration nécessite le développement d'un code de calcul tridimensionnel. Pour cela, nous proposons dans cet article un modèle mathématico-numérique tridimensionnel dédié principalement à la modélisation des limiteurs de courant de deuxième génération ainsi, la présentation de quelques résultats des simulations des comportement magnétique et thermique du limiteur de courant supraconducteur à couches minces avant et durant le processus de la limitation.

2 MODELE MATHEMATIQUE ET NUMERIQUE

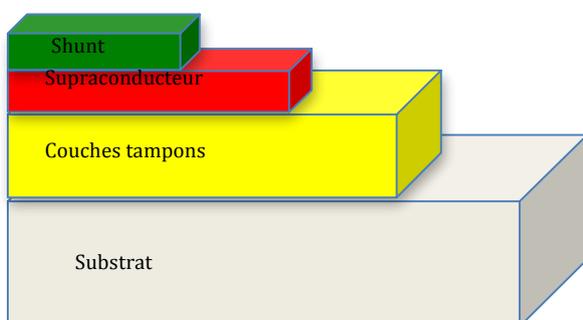


Figure 01 : Architecture générale d'un limiteur de courant supraconducteur de deuxième génération [1, 8, 4, 9]

Les rubans supraconducteurs de seconde génération ont été développés dans le but de s'approcher au plus près des propriétés natives des supraconducteurs parfaitement texturés par croissance épitaxiale. L'architecture de ces rubans est réalisée sous la forme d'un sandwich de quatre couches minces [1, 10]: le substrat, les couches tampons, la couche supraconductrice et le shunt, (Fig.1). Chaque couche possède un rôle dans le fonctionnement du limiteur que nous développons dans le modèle proposé [1, 10]. Le substrat, qui joue le rôle de support, dont la fonction principale est de dissiper la chaleur excessive produite pendant le défaut et protège ainsi l'élément supraconducteur. L'épaisseur du substrat est de l'ordre de 100 μm [1, 10], les alliages utilisés sont à base de Nickel (NiCr, Inconel, Hastelloy, Constantan). Elles permettent d'adapter les contraintes mécaniques, issues d'une part de la différence de coefficient d'expansion thermique entre le supraconducteur et le substrat, d'autre part de la différence du paramètre de maille entre ces deux matériaux. Les couches tampons permettent également de réaliser une barrière chimique de diffusion évitant la pollution du supraconducteur par les éléments du substrat et empêchant l'oxydation de ce dernier pendant la phase de dépôt de l'YBaCuO. Elles permettent aussi de texturer la couche supraconductrice lorsque le substrat ne possède aucune orientation. Pour assurer une forte densité de courant critique à l'YBaCuO la couche tampon doit fournir une texture bi-axiale [1, 10]. L'épaisseur de ces couches varie entre 0,5 μm et 3 μm [1, 10], elles sont constituées d'YSZ, CeO, MgO ou de LZO [1, 10]. La couche supraconductrice généralement d'une épaisseur de l'ordre de 1 μm (l'YBaCuO) se comporte comme étant un conducteur parfait durant le régime assigné du réseau électrique ($R = 0$) et dans le cas bloqué limite le courant de défaut par l'insertion d'une grande résistance dans le réseau. Le shunt a une épaisseur moyenne de 200 nm, elle joue rôle d'un stabilisateur thermique et électrique dans l'état bloqué du limiteur. Généralement les matériaux utilisés pour cette couche sont des matériaux nobles tels que l'or ou bien l'argent [1, 10].

Pour modéliser le comportement magnétique du problème présenté, nous avons adopté la formulation en potentiels vecteur magnétique \mathbf{A} et en potentiel scalaire électrique V , celle-ci est décrite par la formulation ci-dessous :

$$\begin{aligned} \nabla \times (\nu \nabla \times \mathbf{A}) - \nabla (\nu \nabla \cdot \mathbf{A}) + \sigma(E, T) \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla V \right) &= \mathbf{J}_s \\ \nabla \cdot \left\{ -\sigma(E, T) \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla V \right) \right\} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

ν et σ représentent respectivement la réductivité

magnétique et la conductivité électrique des couches minces. Dans le cas de notre application, les matériaux utilisés sont des matériaux amagnétiques, la réductivité magnétique est celle du vide. Concernant la conductivité

électrique, elle a été définie comme étant une fonction de la température pour le substrat et le shunt, ces fonction ont été extraire de la littérature. Concernant la conductivité électrique apparente du matériau supraconducteur, dans son état non-dissipatif, elle est définie par le rapport de J sur E [11] et [12], ce rapport est déduit à partir de la caractéristique E-J du supraconducteur donnée par la relation :

$$\sigma_s(E, T) = \frac{J}{E} = \frac{Jc(T)}{Ec} \left(\frac{E}{Ec} \right)^{\frac{1}{n(T)} - 1} \quad (2)$$

Cette relation traduit les régimes, Flux-Flow et Flux-Creep du supraconducteur, c'est à dire seulement si le supraconducteur est dans un état non-dissipatif, pour compléter l'expression de la conductivité électrique du supraconducteur dans le régime dissipatif, nous rajoutons un terme supplémentaire σ_n qui traduit l'augmentation de la résistance du supraconducteur. Ainsi, la conductivité électrique apparente du supraconducteur est déduite par la relation :

$$\sigma(E, T) = \sigma_s(E, T) + \sigma_n(T) \quad (3)$$

Jc et Ec représentent respectivement, la densité du courant critique et le champ électrique critique. Selon la relation (3), la conductivité apparente du supraconducteur dépend du champ électrique E et de la température T atteinte au sein du matériau. Le champ électrique E sera déterminé à partir de la résolution du problème électromagnétique décrit par l'équation aux dérivées partielles présentée par la formulation (1). La température sera déterminée à partir de la résolution du problème de diffusion de la chaleur présenté par :

$$\rho C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (\kappa(T) \nabla T) = W \quad (4)$$

Où $\lambda(T)$, ρ , $C_p(T)$ sont respectivement la conductivité thermique en (W/K/m), la masse volumique en (Kg/m³) et la chaleur spécifique du matériau en (J/K/Kg), W est une puissance volumique en (W/m³), elle exprime l'ensemble des pertes générés dans le limiteur de courant supraconducteur exprimé par :

$$W = E \cdot J \quad (5)$$

La résolution du système d'équations 1 et 4 permet de résoudre les problèmes électromagnétique et thermique.

Ces derniers sont définis par des équations fortement non-linéaires. Pour résoudre un tel problème, plusieurs méthodes ont été utilisées principalement la méthode des éléments finis [4-9], celle-ci ne peut assurer la convergence du problème à résoudre en particulier lors de la présence d'un matériau supraconducteur où on utilise une loi de type de puissance pour définir la conductivité électrique (Equation 2). Pour éviter ce type de problème nous avons utilisé la méthode des volumes finis dans sa version tridimensionnelle [13, 14]. Le maillage adopté est de type Cartésien ou structuré, il est constitué de volumes élémentaires de forme hexaédrique ou cubique. A chaque volume D_p de forme hexaédrique, on associe un nœud dit principal P et six facettes : e et w selon la direction x, n et s selon la direction y, t et b selon la direction z (Fig.2). Les volumes voisins de D_p , sont représentés par leurs nœuds voisins proches : E et W suivant l'axe x, N et S suivant l'axe y, T et B suivant l'axe z [13, 14].

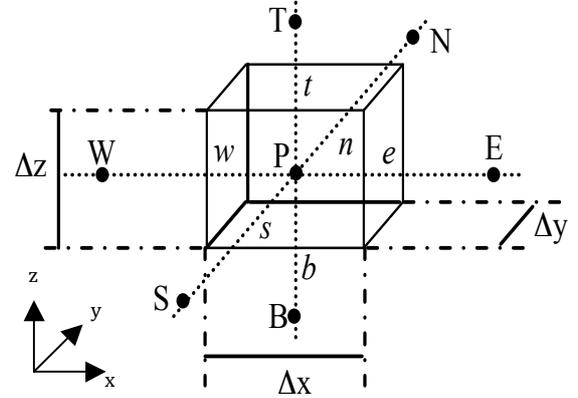


Figure 02 : Volume fini élémentaire D_p

$$\begin{aligned} \iiint_{D_p} \nabla \times (v \nabla \times A) dt - \iiint_{D_p} \nabla (v \nabla \cdot A) dt + \iiint_{D_p} \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla V \right) dt &= \iiint_{D_p} J_s dt \\ \iiint_{D_p} \nabla \cdot \left\{ -\sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla V \right) \right\} dt &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \iiint_{w s b}^{e n t} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dt &= \\ \iiint_{w s b}^{e n t} \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \right) dt + \iiint_{w s b}^{e n t} \frac{\partial}{\partial y} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial y} \right) dt + \iiint_{w s b}^{e n t} \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial z} \right) dt + \iiint_{w s b}^{e n t} W dt & \end{aligned} \quad (7)$$

Pour calculer les termes en dérivées dans (6) et (7), on

considère dans notre étude une variation linéaire des potentiels magnétiques et la température à travers les facettes d'intégration du volume fini. Après intégration, on aboutit à un système d'équation algébriques ci dessous qui sera résolu par une des méthodes algébrique tel que la méthode de gausse Seidel qui sera adoptée dans notre problème.

$$cpA_x^P + \sigma_p D_p A_x^{\bullet P} = \left[\sum_{m=e,w,\dots} c_m A_x^M + \sum_{\substack{i=y,z \\ m=e,w,\dots}} q_m A_i^M + \frac{\sigma_p D_p}{\Delta x_e + \Delta x_w} (V^E - V^W) + J_{sx} D_p \right] \quad (8)$$

$$cpA_z^P + \sigma_p D_p A_z^{\bullet P} = \left[\sum_{m=e,w,\dots} c_m A_z^M + \sum_{\substack{i=x,y \\ m=e,w,\dots}} q_m A_i^M + \frac{\sigma_p D_p}{\Delta z_t + \Delta z_b} (V^T - V^B) + J_{sz} D_p \right] \quad (9)$$

$$V^P = \frac{1}{u_p} \left[\sum_{m=e,w,\dots} u_m V^M + \sum_{\substack{i=x,y,z \\ m=e,n,\dots}} cv_m A_i^{\bullet M} \right] \quad (10)$$

$$[C][\dot{T}] + [K][T] = [Q] \quad (11)$$

3 RESULTATS ET INTERPRETATION

Dans cette partie, nous présentons les résultats des simulations du comportement magnétique et thermique d'un limiteur de courant à couches minces doté d'une couche supraconductrice à haute température critique. Ce dernier subit un courant de ligne qui augmente progressivement dans le temps :

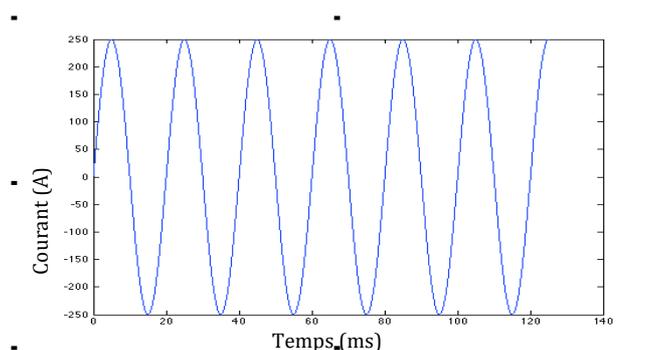


Figure 03: Variation temporelle du courant appliqué

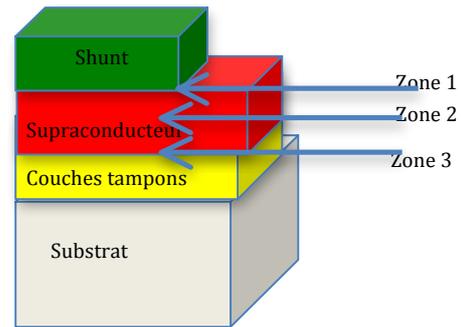


Figure 04: Architecture générale d'un limiteur de courant supraconducteur de deuxième génération

Le limiteur de courant supraconducteur transite d'un état non-dissipatif vers un état fortement dissipatif si une des grandeurs, qui sont respectivement, la température, la densité de courant et enfin le champ amagnétique dépasse un seuil critique. Ces grandeurs sont respectivement, la température critique T_c , la densité de courant critique J_c , et enfin le champ magnétique critique H_c . Dans le cas du limiteur de courant, la température provoque la transition d'un état vers un autre. La fig.5. représente la variation temporelle de la température au sein du limiteur de courant dans trois points situées respectivement dans les zones, 1, 2 et 3 (voir Fig.4). Ces points sont situés respectivement, dans la zone intermédiaire entre le supraconducteur et le shunt, dans le centre du supraconducteur et enfin dans la zone intermédiaire du supraconducteur et des couches tampons. Selon les résultats présentés, nous constatons que :

la température atteinte au sein du supraconducteur dépasse la valeur de la température critique ($T_c = 92^\circ K$) à l'instant $t = 0.0025$ s. A partir de cet instant, le limiteur de courant transite ainsi où il intervient dans le réseau électrique afin de limiter le courant dans le réseau électrique par augmentation de la résistance. Notons aussi que cette température n'est pas homogène sur toute la section du limiteur, en effet, elle est maximale au centre du supraconducteur mais elle est minimale dans les zones intermédiaires. La température qui apparaît dans les couches minces à l'instant $t \leq 0.0025$ s est due principalement au transfert de la chaleur entre la couche supraconductrice et les couches minces. En effet, durant l'intervalle de temps $t \leq 0.0025$ s, tout le courant traverse la couche supraconductrice vue sa résistivité considéré comme négligeable comparée aux résistivités des autres couches. Cela veut dire que l'utilisation des couches minces dans la conception d'un limiteur de courant présente un grand avantage car ils ont diminué considérablement la température au sein du limiteur du courant durant le processus de la limitation du courant de défaut. La diminution de la température atteinte durant le fonctionnement du limiteur de courant, peut prolongé la durée de vie d'un limiteur de courant supraconducteur.

Afin de vérifier l'amélioration du comportement thermique du limiteur de courant conçu à partir des couches minces, nous avons comparé l'évolution de la température atteinte

au centre de la couche supraconductrice dans les deux cas, où le limiteur de courant est composé seulement d'une couche supraconductrice et dans le cas où il est composé de plusieurs couches autre que la couche supraconductrice. Les résultats obtenus sont présentés dans la Fig.6. Selon les résultats présentés nous dirons que l'utilisation des couches minces a amélioré considérablement le comportement thermique du limiteur de courant par diminution importante de la température d'une part, aussi les couches intermédiaires ont amélioré le temps de transition ou le limiteur de courant intervient dans un temps plus bref. Afin d'étudier le comportement thermique du limiteur de courant conçu à partir des couches minces après limitation de courant de défaut, nous avons calculé la répartition tridimensionnelle des courants et de la température au sein du limiteur de courant à l'instant $t = 0.06$ s présenté respectivement dans les figures, Fig. 7 et Fig.8. Selon les résultats présentés on peut dire que la présence des couches minces assure le maintien de la température au voisinage de 110 °K.

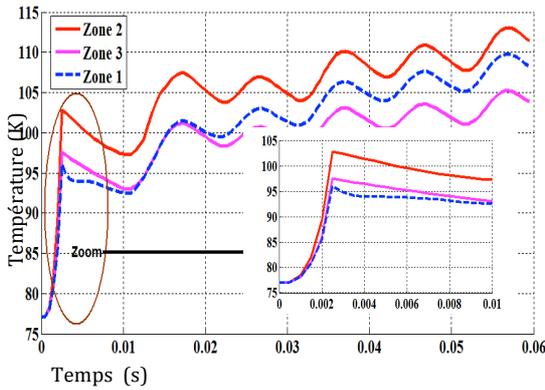


Figure 05: Variation temporelle de la température dans trois zones différentes : le centre du supraconducteur, et dans les zones intermédiaires

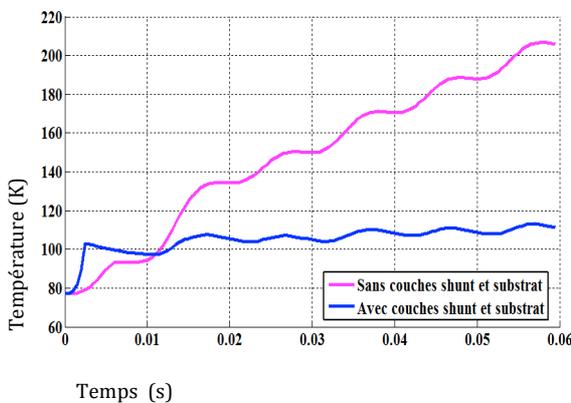


Figure 06: Variation temporelle de la température au centre du supraconducteur dans les cas où le limiteur de courant est composé de couches minces et dans le cas où il est composé seulement d'une couche supraconductrice

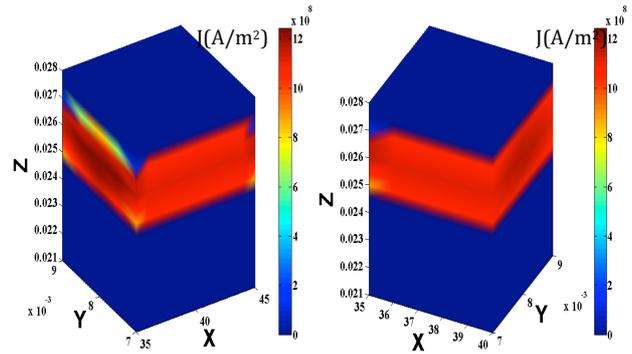


Figure 07: Répartition spatiale de la densité du courant J au sein de la pastille à l'instant $t = 0.06$ s pour YBaCuO

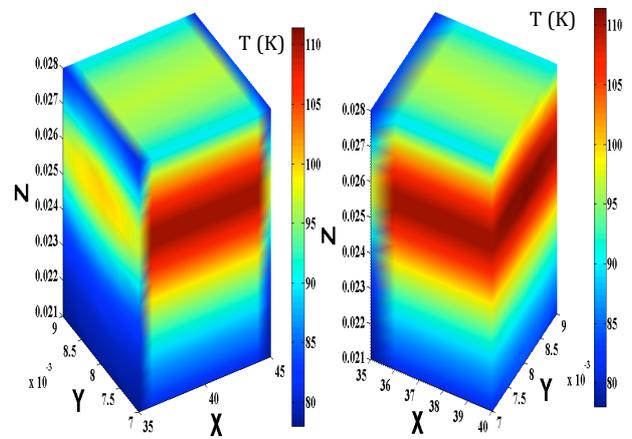


Figure 08: Répartition spatiale de la température au sein de la pastille à $t = 0.06$ s pour YBaCuO

4 CONCLUSION

Les résultats des simulations présentés ont montré l'intérêt et l'efficacité des couches minces introduit dans la conception d'un limiteur de courant supraconducteur. Ces derniers améliorent considérablement les contraintes thermiques durant le processus de la limitation de courant de défaut par diminution importante de la température au sein du limiteur de courant.

REFERENCES

- [1] Yannick Cointe. Thèse de doctorat 'LIMITEUR SUPRACONDUCTEUR DE COURANT CONTINU'. Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2007. Français. <tel-00300552>.
- [2] Nemdli Saad, thèse de doctorat, Université de Setif, 'Modélisation et simulation du limiteur de courant supraconducteur', 2013.
- [3] H. Kado and M. Ichikawa, 'Performance of AHigh-TcSuperconductingFaultCurrent Limiter - Design of A 6.6kV MagneticShielding Type

- perconducting Fault Current Limiter,' IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 07, no. 2, pp. 993-996, June. 1997.
- [4] Wan Kan Chan and al, 'Three-Dimensional Micrometer-Scale Modeling of Quenching in High-Aspect-Ratio YBa₂Cu₃O_{7-δ} Coated Conductor Tapes—Part I: Model Development and Validation,' IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 20, no. 6, pp. 2370-2379, December. 2010.
- [5] Jin Bae Na and al, 'Design and Tests of Prototype Hybrid Superconducting Fault Current Limiter With Fast Switch,' IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 22, no. 3, pp. 5602604, June. 2012.
- [6] H. Yamaguchi and al, 'Current Limiting Characteristics of Transformer Type Superconducting Fault Current Limiter With Shunt Impedance,' IEEE Trans. Appl. Supercond, vol. 17, no. 2, pp. 1919-1922, June. 2007.
- [7] Kwanwoo Nam and al, 'Thermal and Electrical Analysis of Coated Conductor Under AC Over-Current,' IEEE Trans. Appl. Supercond, vol. 17, no. 2, pp. 1923-1926, June. 2007.
- [8] Casali and al, 'Two-Dimensional Anisotropic Model of YBCO Coated Conductors,' IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 25, no. 1, pp. 6600112, February. 2015.
- [9] Wan Kan Chan and al, 'Three-Dimensional Micrometer-Scale Modeling of Quenching in High-Aspect-Ratio YBa₂Cu₃O_{7-δ} Coated Conductor Tapes—Part II: Influence of Geometric and Material Properties and Implications for Conductor Engineering and Magnet Design,' IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 21, no. 6, pp. 2628-2634, June. 2011.
- [10] Olivier Belmont, 'Limitation de courant à base d'oxydes supraconducteurs et réalisation d'un appareil 100 A-1 KV'. These de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 1999. Français. <tel-00763892>.
- [11] Y. Yoshida, M. Uesaka, and K. Miya, "Magnetic field and force analysis of high T_c superconductor with flux flow and creep," IEEE Trans. Magn, vol. 30, no. 5, pp. 3503-3506, Sep. 1994.
- [12] T. Fujioka. "3-D analysis of current distribution and AC loss induced by external AC magnetic field in multifilamentary superconducting wires," IEEE Trans on Magnetics, vol. 32, no. 3, pp. 1140-1143, May. 1996.
- [13] L. Alloui, F. Bouillault and S.M. Mimoune., "Modélisation 3D par la méthode des volumes finis des phénomènes électromagnétiques et thermiques couplés dans les matériaux supraconducteurs à haute température critique", to be published in Revue internationale de Génie électrique, RIGE, 2009.
- [14] L. Alloui, F. Bouillault and S. M. Mimoune, "Numerical Study of the Influence of flux creep and of Thermal Effect on Dynamic Behaviour of Magnetic Levitation Systems with a high-T_c superconductor using control volume method", EPJ. App. Phys., Vol. 37, No. 2, pp. 191-195, Feb. 2009.