



**HAL**  
open science

## **Limiteur de courant de court-circuit supraconducteur résistif: prémices d'un modèle circuit multi-échelle**

Charles-Henri Bonnard, Frédéric Sirois, Gaëtan Didier, Bruno Douine, Jean  
Lévêque

► **To cite this version:**

Charles-Henri Bonnard, Frédéric Sirois, Gaëtan Didier, Bruno Douine, Jean Lévêque. Limiteur de courant de court-circuit supraconducteur résistif: prémices d'un modèle circuit multi-échelle. La Revue 3E.I, 2015, 82, pp.28-32. hal-01224694

**HAL Id: hal-01224694**

**<https://hal.science/hal-01224694>**

Submitted on 10 Nov 2015

**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.

# Limiteur de courant de court-circuit supraconducteur résistif : prémices d'un modèle circuit multi-échelle

Charles-Henri BONNARD<sup>1,2</sup>, Frédéric SIROIS<sup>2</sup>, Gaëtan DIDIER<sup>1</sup>, Bruno DOUINE<sup>1</sup>, Jean LEVEQUE<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université de Lorraine, GREEN  
Faculté des Sciences et Technologies  
54506 Vandoeuvre, France  
*Charles-Henri.Bonnard@polymtl.ca*

<sup>2</sup>Ecole Polytechnique de Montréal, LEE  
2500 chemin de polytechnique  
H3T 1J4  
Montréal, Qc, Canada

**RESUME** – La demande en énergie électrique étant en constante progression, les puissances installées, la complexité et le maillage des réseaux ne cessent de croître, ce qui n'est pas sans impact sur les courants de court-circuit qui peuvent, dans certains cas, dépasser le pouvoir de coupure des appareillages mis en place. Pour éviter un coûteux remplacement des disjoncteurs, tout en bénéficiant des avantages d'un maillage accru du réseau sur la stabilité et la disponibilité de l'énergie, l'installation de limiteur de courant supraconducteur (LCS) permet de limiter l'amplitude des courants de court-circuit et ce, dès le premier pic. À la vue du nombre de prototypes installés et testés ces dernières années, cette technologie pourrait bien, à court terme, intégrer les réseaux. Afin de faciliter l'installation des LCS, il est nécessaire de développer, dans les outils de simulation de réseau, des modèles au comportement précis qui permettent d'étudier au préalable l'impact de ce nouvel appareillage. Ainsi, nous proposons une base de modèle électrothermique multi-échelle, sous forme de circuit électrique, d'un LCS de type résistif.

**ABSTRACT** – With the increase of electricity demand, the level of short circuit current can exceed the breaking capacity of the existing equipment. To avoid expensive replacement of circuit breakers, while enjoying the benefits of increased meshed network stability and availability of energy, superconducting fault current limiter (SFCL) can be a good way to solve the problem. This device can limit the first peak of the short-circuit currents in some ms (about 2 ms). In view of the number of prototypes installed and tested in recent years, this technology could integrate in existing power systems in the short term. To facilitate the SFCL installation, it is necessary to develop, in network simulation tools, precise models that allow to analyses its impact on existing electrical power system. Thus, we propose, in this paper, an electro-thermal multi-scale model of a resistive SFCL based exclusively on electrical circuit.

**MOTS-CLES** – Limiteur de courant, supraconducteur, court-circuit, modélisation, LCS

## 1. Introduction

Afin de répondre à une demande en énergie électrique toujours croissante, l'augmentation de la production est inévitable et, dans certains cas, le recours à la multiplication des interconnexions de réseaux permet d'assurer une plus grande flexibilité aux gestionnaires des réseaux d'énergie électrique. Dans le même ordre d'idées, l'ajout de production distribuée dans les réseaux de distribution rendent ces derniers de plus en plus maillés et conduit à en réduire l'impédance équivalente au point de court-circuit. Tous ces éléments conduisent à une augmentation de la valeur des courants de court-circuit sur les réseaux électriques. Les appareillages présents sur ces réseaux (e.g. transformateurs, disjoncteurs, etc.) doivent alors pouvoir supporter momentanément des courants atteignant plusieurs dizaines de  $kA$ , soit, dans certains cas, des valeurs de courants de court-circuit proches de leur pouvoir de coupure. Les limiteurs de courants de court-circuit supraconducteurs (LCS) sont des appareillages à fort-potentiel en alternative au remplacement massif des équipements de protection. Plusieurs technologies ont été proposées au cours des années précédentes [1] [2] [3] mais deux d'entre-elles se démarquent. Il s'agit des technologies 1)résistive et 2)à noyau saturable. Dans cet article, nous nous concentrons exclusivement sur la modélisation de LCS de type résistif qui permet, par ses propriétés intrinsèques, de limiter le courant de court-circuit par dépassement d'un seuil de courant appelé « courant critique ». Afin d'envisager leur intégration dans les réseaux d'énergie électrique, des modèles fiables permettant une simulation dans les logiciels de réseau (type EMTP-RV [4]), dans la continuité des travaux de C. Gandioli [5], D. Colangelo [6] et A. Morandi [7], doivent être développés. La modélisation présentée dans cet article est une étape préliminaire au développement d'un modèle multi-échelle qui permet de reproduire aussi bien les phénomènes de "point chaud" que le limiteur dans sa globalité. Un tel modèle est nécessaire pour les ingénieurs afin de pouvoir définir l'emplacement optimal d'un ou plusieurs LCS dans les réseaux maillés [8] mais aussi l'impact sur la stabilité des générateurs et des systèmes de protection [9]. Afin de satisfaire les exigences de compatibilité avec les logiciels de simulation de réseau, nous utilisons une approche basée sur l'analogie bien connue des systèmes thermiques et électrique pour un limiteur de type résistif basé sur des conducteurs déposés d'YBCO dits de 2<sup>nd</sup> génération [10]. A des fins de validation, le

comportement du modèle présenté est comparé à un modèle de type éléments finis développé sous Comsol Multiphysics.

## 2. Limiteur de courant de court-circuit supraconducteur résistif

Le fonctionnement d'un LCS de type résistif est basé les propriétés intrinsèques des matériaux supraconducteurs. Si ceux-ci sont principalement connus pour leur capacité à conduire un courant électrique sans pertes, ils peuvent également devenir résistif sous certaines conditions. En effet, il est possible de déclencher une transition violente entre l'état supraconducteur et l'état normal (i.e. état résistif) de tout matériau supraconducteur en lui imposant un courant  $I$  supérieur à un seuil de courant  $I_c$  appelé "courant critique". Du fait que cette transition soit très non-linéaire (Éq. 2.2.1), lors d'un quench, on observe une augmentation très rapide de la résistance (typiquement 1-2 ms) [2]. La limitation se fait donc naturellement, sans la nécessité de dispositif de commutation. Le moyen le plus simple de l'utiliser est de l'insérer en série au début du réseau à protéger.

## 3. Modèle électrothermique du limiteur de courant supraconducteur

### 3.1 Rappel sur l'analogie électrothermique

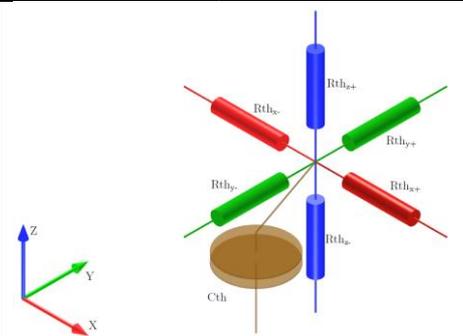
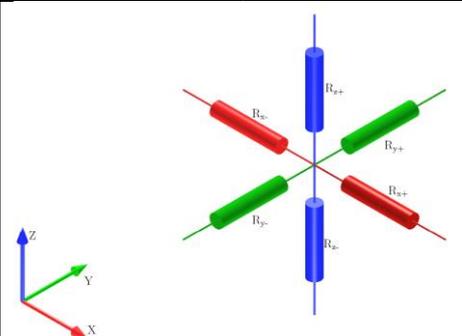
L'équation à résoudre est la suivante :

$$\underbrace{mC_{p(T)} \frac{\delta T}{\delta t}}_1 + \underbrace{\nabla \cdot (-k_{(T)} \nabla T)}_2 - \underbrace{h_{(T)} (T - T_0)}_3 = \underbrace{Q_{(t)}}_4 \quad \text{Éq 2.1.1}$$

Le terme 1 correspond à l'énergie emmagasinée par le système, le terme 2 fait référence à la diffusion des flux de chaleur par conduction, le terme 3 correspond au flux de chaleur échangé avec le milieu cryogénique et enfin, le terme 4 correspond à la puissance générée par le système donc aux pertes par effet Joule  $R(T) \cdot i^2(t)$ . Pour considérer un milieu adiabatique, on pourra choisir le coefficient d'échange avec le milieu extérieur  $h=0$ . Dans le cas où la dissipation d'énergie dans le bain d'azote est modélisée, l'utilisation d'une relation non linéaire est nécessaire [11]. Afin de simuler le comportement thermique dans un logiciel de réseau électrique, on utilise une analogie entre les problèmes électrique et thermique résumée dans le tableau 1. Bien que les paramètres proposés dans ce tableau soient non-linéaires et dépendant de la température, nous les noterons simplement  $k$ ,  $C_p$ ,  $\rho$ ,  $R$ ,  $C$ ,  $R_{th}$  et  $C_{th}$  dans un souci de clarté.

Tableau 1. Résumé analogie Thermique/Électrique

Thermique		Électrique	
Température	$T$ [K]	Tension	$V$ [V]
Flux de chaleur	$\Phi$ [W]	Courant	$I$ [A]
Résistance	$R_{th}$ [K/W] = $L/k.S$	Résistance	$R$ [ $\Omega$ ] = $\rho.L/S$
Capacité	$C_{th}$ [J/K] = $\rho_m.Vol.C_p$	Capacité	$C$ [F]
Loi de Fourier	$\Delta T / R_{th}$	Loi d'Ohm	$\Delta V / R$
Éq. du flux	$\Phi = C_{th} dT / dt$	Éq. du courant	$\Phi = C dV / dt$

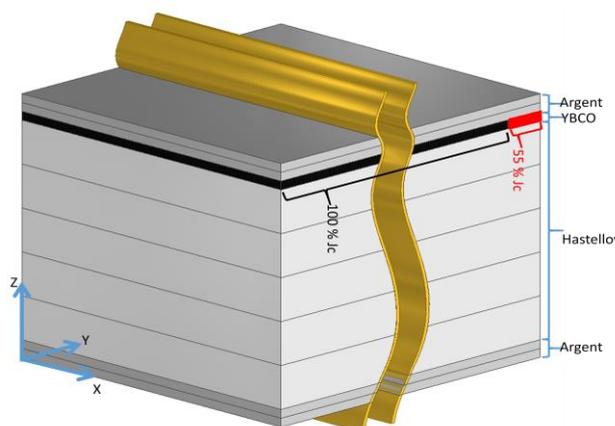
À l'instar de la méthode des éléments-finis, nous utilisons une approche élémentaire pour résoudre notre problème. Ainsi, le système complet sera divisé en sous-blocs contenant chacun un module thermique (Fig. 2) couplé à un module électrique (Fig. 1). Ces derniers sont interconnectés avec leurs voisins respectifs afin d'assurer la répartition du courant et les transferts de chaleur entre les différents éléments.

### 3.2 Modélisation :

La modélisation est basée sur un ruban de deuxième génération existant et commercialisé par Superpower Inc. [10]. Ce dernier comprend 4 couches superposées (Fig. 4), du haut vers le bas, suivant l'ordre présenté dans le Tableau 2. La longueur (y) est de 5 mm et la largeur (x) de 4 mm, chacune étant respectivement divisée en 20 éléments et 1 élément.

**Tableau 2 : caractéristiques géométriques du modèle et discrétisation**

Paramètres	Matériau	Epaisseur(y)[μm]/Nombre d'éléments
Couche 1	Argent	2 μm/2
Couche 2	YBCO	1 μm/1
Couche 3	Hastelloy	50 μm/5
Couche 4	Argent	2 μm/2



**Figure 3 : Représentation géométrique du ruban supraconducteur utilisé pour les simulations.**

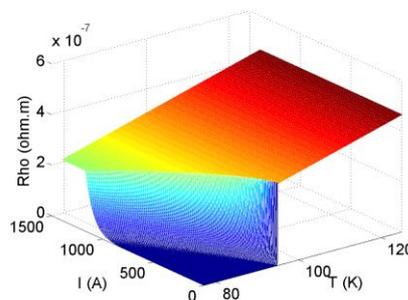
La résistivité de la partie supraconductrice est modélisée à partir de la loi en puissance (Éq 2.2.1). Cette équation permet de représenter la variation de la résistivité du matériau en fonction du courant  $I$  le traversant. Cette valeur a été volontairement tronquée à la valeur de la résistivité lorsque le matériau supraconducteur est à l'état normal en utilisant la relation 2.2.2 issue de Friedmann et al [12]. La dépendance en température est incluse dans les valeurs de  $n$  et  $J_c$  tel que l'on peut le voir dans les équations 2.2.3 et 2.2.4. issues de [13]. La variation de la résistivité pour l'YBCO, en prenant comme valeurs de paramètre,  $n_0=15$ ,  $E_c=1\mu\text{V/cm}$ ,  $J_{c0}=25\text{ GA/m}^2$ ,  $T_0=77\text{ K}$  et  $T_c=90\text{ K}$  est présentée à la figure 4.

$$\rho_{supra}(I) = \frac{E_c}{J_c} \left( \frac{I}{I_c} \right)^{n-1} \quad \text{Éq. 2.2.1}$$

$$\rho(T)_{77 \rightarrow T} = 24.013 * 10^{-8} + 0.4657 * 10^{-8}(T - 77) \quad \text{Éq. 2.2.2}$$

$$n(T) = (n_0 - 1) \left( \frac{T_{c0} - T}{T_{c0} - T_0} \right)^{1/4} + 1 \quad \text{Éq. 2.2.3}$$

$$J_c(T) = J_{c0} \left( \frac{T_{c0} - T}{T_{c0} - T_0} \right) \quad \text{Éq. 2.2.4}$$



**Figure 4 : Allure de la résistivité de l'YBCO en fonction du courant et de la température**

Concernant l'évolution de la résistivité, de la conductivité thermique et de la capacité thermique en fonction de la température des parties métalliques du ruban supraconducteur, les données utilisées dans le modèle présenté sont issues de Ekin [14] et Roy [13].

#### 4. Résultats de simulation

Un défaut (imperfection, détérioration, etc.), avec un abaissement de la densité de courant critique à 55 % de  $J_{c0}$  sur une longueur de 1 mm, a volontairement été créé à l'extrémité du ruban supraconducteur tel que l'on peut le voir à la figure 3. Cela permet d'observer les phénomènes de propagation de la zone normale du matériau supraconducteur, d'en mesurer sa vitesse, et de comparer le modèle circuit avec la simulation utilisant la méthode des éléments-finis. Le courant d'alimentation  $I$  est égal à la valeur du courant critique  $I_c$  du ruban, soit 100 A. Il y a alors des transferts de chaleur et de courant dans les directions  $\vec{y}$  et  $\vec{z}$ .

Concernant le calcul des températures présenté à la figure 5, on observe un très bon accord entre les simulations sur EMTP-RV et Comsol. En effet, l'erreur relative sur le calcul de la température, avec Comsol pris pour référence, est inférieure à 5 %. On observe également des résultats très proches (erreur relative inférieure à 5 %) pour l'amplitude des champs électriques relevés entre deux points de mesures, comme on peut le voir sur la figure 6. La vitesse de propagation de la zone normale (ou du front de chaleur) le long de l'axe  $\vec{y}$  a été mesurée entre deux fronts pour un critère de 0.5 V/m pour le champ électrique et 90 K pour la température. Dans les deux cas, la vitesse est très faible, de l'ordre de 11.9 cm/s (cf. tableau 3, typique de ce genre de ruban [6] [15], ce qui les rend très vulnérable au phénomène de point chaud. Cette vulnérabilité nécessite donc une modélisation fine de ce genre de phénomènes dans les logiciel de réseau électrique afin de pouvoir anticiper leur détection dans les cas où cela pourrait se produire (surcharge temporaire, énergisation de transformateur, défaut impédant, etc.) et éviter la destruction du LCS par fusion locale du ruban supraconducteur. En effet, il suffit de seulement quelques dizaines de millisecondes pour atteindre des températures destructrices. De nouvelles architectures, comme par exemple l'augmentation de la résistance d'interface [15], l'utilisation de « flow-diverter » [16], permettent désormais d'accélérer la vitesse de propagation de la zone normale augmentant ainsi la fiabilité du LCS.

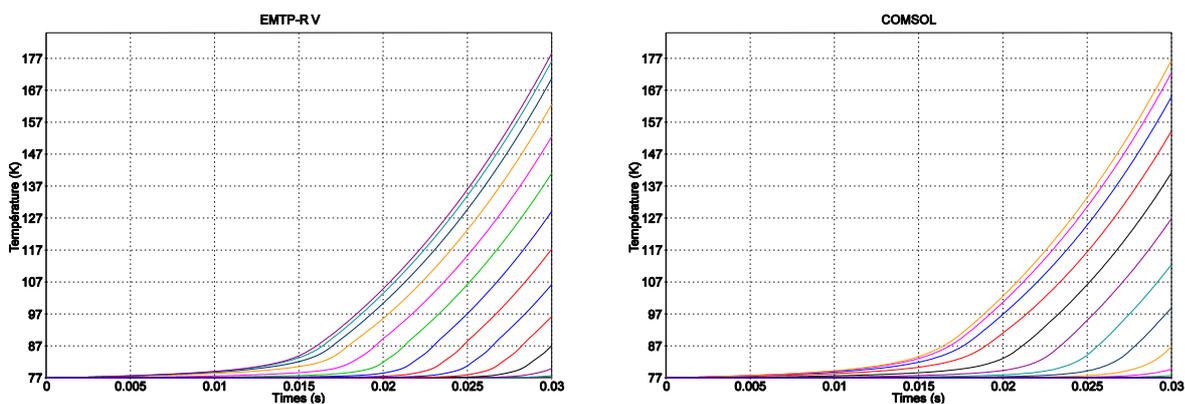


Figure 5 : Résultats du calcul des températures dans EMTP-RV et Comsol Multiphysics dans pour un courant continu  $I=I_c$

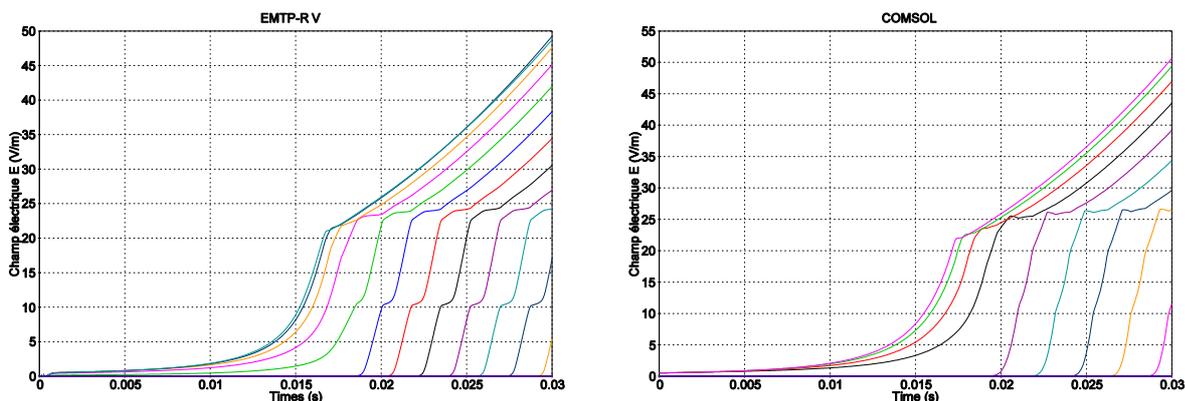


Figure 6 : Résultats du calcul des champs électriques dans EMTP-RV et Comsol Multiphysics dans pour un courant continu  $I=I_c$

**Tableau 3: Vitesse de propagation de la zone normale. Critères choisis à 0.5 V/m pour E et 90 K pour T**

EMTP-RV		Comsol		Unité	Erreur relative
T	E	T	E		
12.3	12.15	11.95	11.97	cm/s	+3.01 %

## 5. Conclusion

Nous présentons les prémices d'une méthode de modélisation électrothermique des limiteurs de courant de court-circuit supraconducteurs parfaitement adaptée à la simulation sur des logiciels de réseau électrique commercialement disponibles. Cette dernière permet, en prenant en compte des paramètres non-linéaires, de reproduire de manière précise la physique des phénomènes mis en jeu. Ce type de modélisation permet une représentation multi-échelle de l'élément supraconducteur grâce à sa souplesse de construction. En effet, chaque élément étant indépendant, il devient aisé de concevoir des modules plus long, exempts de défauts, séparés par des parties à la physique plus détaillée comportant un maillage plus fin de sorte à modéliser les phénomènes de « points chaud » typiques des conducteurs de 2<sup>nd</sup> génération. Cette souplesse de conception autorise également la possibilité de modéliser des architectures de rubans supraconducteurs innovantes pour optimiser leur design, et ainsi minimiser l'impact des points chaud en maximisant la vitesse de propagation de la zone normale. Ce modèle permet donc de simuler dans un temps plus ou moins long (en fonction de la précision choisis) un limiteur de courant de court-circuit supraconducteur dans un logiciel de simulation de réseau électrique tout en intégrant les phénomènes physiques pouvant poser problèmes (points chauds). L'avantage de ce modèle réside dans le fait qu'il n'utilise que des éléments électriques, ce qui lui permet d'être intégré à tout type de logiciel existant actuellement sur le marché.

## Références

- [1] CIGRE Working Group A3.23, "Applications and feasibility of fault current limiters in power systems," 2012.
- [2] P. Tixador, "Limiteur supraconducteur de courant défaut," *Techniques de l'ingénieur*, vol. Base documentaire : TIB249DUO, no. no. ref. article : d3662, 2013.
- [3] M. Noe and M. Steurer, "High-temperature superconductor fault current limiters : concepts, applications, and development status," *Superconductor Science and Technology*, vol. 20, no. 3, p. R15, 2007.
- [4] Powersys, "Overview | EMTP-RV," [Online]. Available: <http://emtp.com/Overview>. [Accessed Mars 2015].
- [5] C. Gandioli, "Du dimensionnement à l'intégration dans le réseau électrique du limiteur supraconducteur de courant," Thèse de Doctorat : Université de Grenoble, 2013.
- [6] D. Colangelo, "Modelling of 2g hts coated conductors for fault current limiter applications," Thèse de Doctorat : École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2013.
- [7] A. Morandi, M. Fabbri, B. Gholizad and G. Marconi, "Modeling of the resistive type superconducting fault current limiter for power system analysis and optimization," Université de Bologne, [Online] : <http://www.elu.sav.sk/htsmod2014/Morandi.pdf>, 2014.
- [8] G. Didier, J. Leveque and A. Rezzoug, "A novel approach to determine the optimal location of sfcl in electric power grid to improve power system stability," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 978-984, 2013.
- [9] M. Dione, F. Sirois and C.-H. Bonnard, "Evaluation of the impact of superconducting fault current limiters on power system network protections using a rts-phil methodology," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 21, no. 3, pp. 2193-2196, 2011.
- [10] Superpower Inc., "2G HTS Wire Specifications," Superpower Inc., février 2012. [Online]. Available: [http://www.superpower-inc.com/system/files/SP\\_2G+Wire+Spec+Sheet\\_for+web\\_2012FEC\\_v2\\_1.pdf](http://www.superpower-inc.com/system/files/SP_2G+Wire+Spec+Sheet_for+web_2012FEC_v2_1.pdf). [Accessed mars 2015].
- [11] J. E. Jankowski, "Convective heat transfer model for determining quench recovery of high temperature superconducting YBCO in liquid nitrogen," Massachusetts Institute of Technology : Mémoire de maîtrise, 2004.
- [12] T. A. Friedmann, M. W. Rabin, J. Giapintzakis, J. P. Rice and D. M. Ginsberg, "Direct measurement of the anisotropy of the resistivity in the a - b plane of twin-free single-crystal, superconducting yba2cu3o7-d," *Physical*

*Review B*, vol. 42, pp. 6217-6221, 1990.

- [13] F. Roy, "Modeling and characterization of coated conductors applied to the design of superconducting fault current limiters," Thèse de Doctorat : École Polytechnique Fédérale de Lausanne no. 4721, 2010.
- [14] J. W. Ekin, *Experimental Techniques for Low-temperature Measurements : Cryostat Design, Material Properties and Superconductor Critical-current Testing.*, Oxford: Oxford University Press, 2007.
- [15] C. Lacroix, J.-H. Fournier-Lupien, K. McMeekin and F. Sirois, "Normale zone propagation velocity in 2g hts coated conductor with high interfacial resistance.," *IEEE Transactions on applied Superconductivity*, vol. 23, no. 3, 2013.
- [16] C. Lacroix, Y. Lapierre, J. Coulombe and F. Sirois, "High normal zone propagation velocity in second generation high-temperature superconductorcoated conductors with a current," *Superconductor Science and technology*, vol. 27, no. 5, p. 055013, 2014.