

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS SETIF-1
UFAS(ALGERIE)



THESE

Présentée à la faculté des sciences de l'ingénieur
Département d'Electrotechnique

Pour l'obtention du diplôme de
Doctorat en sciences en Electrotechnique
Option : Réseaux électriques

Réalisé par :

NEMDILI SAAD

Thème

Modélisation et simulation du limiteur de courant supraconducteur

Soutenu le 04 / 12 /2013 devant la commission d'examen composée de :

Pr Tarek BOUKTIR	Président	Université Sétif-I
Pr Saad BELKHIAT	Rapporteur	Université Sétif-I
Pr Abdelhafid BAYADI	Examineur	Université Sétif-I
Pr Aissa BOUZID	Examineur	Université de Constantine
Pr Sourî Mohammed Mimoune	Examineur	Université de Biskra
Dr Lotfi ALLOUI	Examineur	Université de Biskra

Remerciements

Je tiens à adresser mes plus vifs remerciements à Monsieur Saad Belkhiat, Professeur à l'université de Sétif-1, pour avoir dirigé ce travail avec beaucoup d'efforts et de patience, son soutien moral, sa compréhension et ses encouragements constants, aussi pour les nombreuses discussions que nous avons eu.

Je tiens à remercier Monsieur Tarek Bouktir, Professeur à l'université de Sétif-1, pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury.

J'adresse également mes remerciements à Monsieur Abdelhafid BAYADI, Professeur à l'université de Sétif-1, pour avoir accepté d'être membre du jury en portant un intérêt particulier à mon travail. Je tiens également à remercier très vivement Monsieur Aissa Bouzid Professeur à l'université de Constantine, Directeur du département de génie électrique, pour l'intérêt qu'il a manifesté pour ce travail en acceptant de faire partie de mon jury de thèse et d'examiner ce travail.

J'adresse mes vifs remerciements à Monsieur Sourî Mohammed Mimoune Professeur à l'université de Biskra, et Monsieur Lotfi ALLOUI Docteur à l'université de Biskra, Département de génie électrique, pour l'intérêt qu'ils ont manifestés pour ce travail en acceptants de faire partis du jury de thèse.

Enfin mes remerciements vont à tous ceux qui ont contribué directement ou indirectement à la réussite de ce travail.

Dédicaces

J'ai l'honneur et le plaisir de dédier ce modeste travail:

*A mes chers parents ;
A tous mes chers frères ;
A ma chère épouse*

Résumé

L'augmentation des courants de défaut dans les grands réseaux électriques ravive l'intérêt pour les limiteurs de courant. Les limiteurs supraconducteurs de courant peuvent limiter quasi-instantanément, sans contrôle ni détection de défaut, les courants de court-circuit. Ceci permet de réduire les contraintes à supporter par les installations électriques situées en amont du défaut. L'objectif principal de cette thèse est la modélisation des supraconducteurs à haut température critique, que nous appliquons particulièrement à la modélisation du limiteur de courant. Le développement d'un modèle de simulation qui décrit le comportement du limiteur de courant supraconducteur est la clé de cette application dans le domaine industriel. Il permet la conception et l'optimisation des performances du dispositif afin d'améliorer la qualité du produit en vue de son exploitation commerciale. Le contenu de cette thèse est répartie en deux parties distinctes : dans un premier temps, nous nous intéressons à la compréhension du phénomène de transition dans le limiteur de courant supraconducteur. Dans ce contexte un modèle électrique à été développé ; Le modèle à été validé en premier dans un réseau monophasé. Les résultats de simulation ont montré la simplicité et l'efficacité de ce modèle. Ensuite nous généralisons le modèle sur un système triphasé, en l'intégrant le dans la bibliothèque de Matlab simulink. Dans la deuxième partie, nous nous focalisons sur la modélisation électrothermique du limiteur de courant supraconducteur en régime de défaut. Pour cet effet un modèle thermique à été développé afin d'étudier les phénomènes d'échauffement du limiteur de courant. Ce modèle tient compte de la nouvelle génération des matériaux supraconducteurs en couches minces. Les résultats obtenus sont encourageant pour la conception et l'optimisation des performances du dispositif. C'est ainsi que nous avons proposé une modification de la géométrie permettant d'éviter un possible choc thermique qui pourrait conduire à la destruction du SFCL. Les résultats numériques obtenus offrent la possibilité d'analyser l'influence des paramètres géométriques ou physiques sans avoir recours à la réalisation de prototypes ou à une phase expérimentale.

Mots clés : Limiteur de courant de défaut supraconducteur, supraconducteur à haut température critique, couches minces, SFCL résistive, Matlab simulink

Abstract

Considering the increase of the fault current level in electrical network, the current limiters become very interesting. The superconducting limiters are based on the quasi-instantaneous intrinsic transition from superconducting state to normal resistive one. Without detection of default or given order, they reduce the constraints supported by electrical installations above the fault. This thesis is focused on the modeling of high-temperature superconductor materials, and in particular, modeling of superconducting fault current limiter. Creating a simulation model which describes the behavior of superconducting fault current limiter is an essential key to the development of the applications in the industrial field, this in order to optimize the performances of the device and to improve the quality of the product for its commercial exploitation. This work is divided into two distinct parts: initially, we are interested in comprehension of the phenomenon of transition in the superconducting fault current, for there we develop a model that we wash named electric model, to simplify the validation of this model we wash integrated firstly in a single-phase network, the simulation results are proven simplicity and effectiveness of this model, follows we generalized this model with the three-phase system, with the integration of this model in the library of Matlab simulink. Then, we focus on the modeling of electro-thermal superconducting fault current limiter system. For this purpose we develop a thermal model. This model is useful for studying of the heating process inside the superconducting fault current limiter. In this model we used in the new generation of superconducting materials or coated conductors. The results can be used in order to optimize the performances of the device according to specific criteria. Thus we have proposed a modification of the geometry to avoid a possible thermal runaway which could lead to the destruction of the SFCL. The obtained results can be used to optimize a device according to specific criteria. In particular, we have proposed geometric modifications for avoiding possible local thermal runaway, which can lead to the destruction of the device.

Keywords Superconducting fault current limiter, High temperature Superconductor (HTS), coated conductor, Resistive SFCL, Matlab simulink.

ملخص

الزيادة الكبيرة في قيمة وشدة التيار الكهربائي عند حدوث اضطرابات أو خلل في الشبكة الكهربائية مثل الدارات القصيرة تزامنا مع الزيادة في طول الشبكات وتعقيدها خاصة ذات الجهد العالي يجبرنا على التفكير في الموصلات الفعالة أو الفائقة السوبركونديكتورات و بالخصوص محددات شدة التيار بالموصلات الفعالة، هذه الأخيرة يمكنها تحديد شدة التيار ذاتيا بدون اللجوء إلى الأنظمة المعقدة للكشف عن الأخطاء في الشبكة. عند خفض شدة التيار في حالة الاضطراب بالموازاة انخفاض الأعباء و المشاكل الكبيرة للمنشآت الكهربائية القريبة من موضع حدوث الدارات القصيرة.

الهدف الرئيسي من لأطروحة هو نمذجة فائقات التوصيل أو السوبركونديكتورات و بالأخص نمذجة محدد شدة التيار الكهربائي بالموصلات الفعالة. تطوير نموذج محاكاة بإمكانه تمثيل سلوك فائقات التوصيل و المحدد الكهربائي هو مفتاح أساسي لتطوير تطبيقاتها في المجال الصناعي. هذه الأطروحة مقسومة إلى جزأين، في الجزء الأول ركزنا على فهم طريقة عمل الموصلات الفعالة في تحديد شدة التيار الكهربائي، ولهذا قمنا بتطوير نموذج سميناه النموذج الكهربائي لمحدد التيار بالموصلات الفعالة، لكي نسهل فهم والمصادقة على النموذج قمنا أولا بوضعه في شبكة كهربائية ثنائية الطور، النتائج المحصل عليها تثبت فعالية وسهولة هذا النموذج، بعد هذا قمنا بتعميم النموذج على شبكة كهربائية ثلاثية الطور مع إدخال النموذج في المكتبة الخاصة ببرنامج المتلاب. في المرحلة الثانية من العمل ركزنا على دراسة الظواهر الداخلية الخاصة بمحدد التيار وخاصة التغير في درجة الحرارة أو التسخين، ولهذا الغرض طورنا نموذج ثاني لمحددات التيار بالناقلات الفعالة سميناه النموذج الحراري، هذا الأخير جد فعال و ضروري لدراسة التوزيع الحراري داخل محدد التيار، استعملنا في تطوير النموذج الجيل الجديد من الموصلات الفعالة أو الموصلات الموضوعية على شكل طبقات رقيقة النتائج المحصل عليها يمكن استعمالها في تطوير تصنيع المحددات الكهربائية بالموصلات الفعالة عن طريق دراسة التوزيع الحراري داخل هذا الأخير و بالمقابل دراسة طرق حماية الموصلات الفعالة من الارتفاع الخطير لدرجة الحرارة وهذا بدون اللجوء إلى تطوير نماذج مخبريه أو حقيقية مكلفة

كلمات مفتاحيه : نضم حماية الشبكات الكهربائية، محدد التيار الكهربائي بالناقلات الفعالة، نمذجة الناقلات الفعالة، ماتلاب

Sommaire

Introduction Générale	1
Chapitre I : Généralités sur la supraconductivité	3
I.1. Introduction.....	3
I.2. Historique	3
I.3. Présentation générale de la supraconductivité.....	4
I.4. Grandeurs critiques	5
I.4.1. Température critique	6
I.4.2. Densité de courant critique.....	6
I.4.3. Champ magnétique critique.....	7
I.5. Classification des supraconducteurs	8
I.5.1. Supraconducteurs de type I	8
I.5.2. Supraconducteurs de type II.....	9
I.6. Comportement magnétique des supraconducteurs	11
I.6.1. Effet Meissner et Ochsensfeld ou diamagnétisme parfait.....	11
I.6.2. Courbe d'aimantation	12
I.6.3. Courants persistants et quantification du flux.....	13
I.6.4. Les vortex.....	14
I.6.4.a. Flux flow	16
I.6.4.b. Flux creep	17
I.7. Longueurs critiques	18
I.7.1. Profondeur de pénétration	18
I.7.2. Longueur de cohérence.....	19
I.8. Modélisation des matériaux supraconducteurs.....	21
I.8.1. Introduction.....	21
I.8.2. Relation $E(J)$	21
I.8.3. Modèle de l'état critique et modèle de Bean	21
I.8.3.a. Modèle de l'état critique	21

I.8.3.b. Modèle de Bean.....	22
I.8.4. Modèle de loi de puissance.....	23
I.8.5. Modèle de KIM.....	23
I.8.6. Résumé des équations.....	24
I.9. Applications des matériaux supraconducteurs.....	24
I.9.1. Physique fondamentale.....	24
I.9.1.a. Composants HF (couches minces).....	25
I.9.2. Applications en électrotechnique.....	25
I.9.2.a. Machines tournantes.....	25
I.9.2.b. Câbles de transport d'énergie.....	26
I.9.2.c. Stockage de l'énergie électrique.....	26
I.9.2.d. Limitation de courant.....	26
I.10. Conclusion.....	27
Chapitre II Supraconductivite dans les materiaux a haut température critique 28	
II.1. Introduction.....	28
II.2. Supraconducteur à haute température critique.....	28
II.2.1. Supraconducteur YBaCuO.....	29
II.2.2. Supraconducteur à base de bismuth.....	31
II.2.3. Propriétés de ces matériaux.....	32
II.3. Les couches minces supraconductrices (coated conductors).....	34
II.3.1. Caractéristiques du substrat.....	34
II.3.2. Caractéristiques des couches tampons.....	34
II.3.3. Caractéristiques du shunt.....	35
II.3.4. Fabrication des conducteurs par dépôt de couche mince.....	35
II.3.5. Dépôt sur substrat texturé.....	35
II.3.6. Dépôt sur substrat polycristallin.....	36
II.3.6.a. Dépôt par faisceau d'ions.....	36
II.3.6.b. Dépôt par pulvérisation cathodique.....	36
II.3.6.c. Dépôt d'ions par substrat incliné.....	37
II.4. Conclusion.....	37

Chapitre III : Limitation de courant	38
III.1. Introduction.....	38
III.2. Présentation générale de la limitation du courant.....	38
II.2.1. Défauts.....	38
II.2.2. Elimination des défauts.....	39
III.2.3. Courants de défaut.....	40
III.3. Principe général des limiteurs de courant.....	41
III.3.1. Limiteurs de courant classiques.....	41
III.3.1.a. Réactance série.....	41
III.3.1.b. Limiteur à redresseurs commandés.....	41
III.3.1.c. Résistance	42
III.3.1.d. Résistance variable.....	42
III. 3.2. Limiteurs de courant supraconducteurs.....	43
III. 3.2.a. Différents types de limiteur de courant supraconducteur.....	44
a) Limiteur résistif.....	44
b) Limiteur inductif.....	45
c) Limiteur de type pont redresseur.....	46
d) SFCL de type contrôleur du courant de défaut.....	47
c) SFCL de type noyaux magnétiques saturés.....	47
III. 3.2.b. Comparaison des différents SFCL.....	48
III. 3.2.c. Avantages et inconvénients propres aux supraconducteurs.....	49
a) Avantages.....	49
b) Inconvénients.....	49
III. 3.2.d Insertion du limiteur de courant dans le réseau électrique	50
III. 4. Conclusion.....	51
Chapitre IV : MODELISATION	52
IV.1. Introduction	52
IV.2. Modèle électrique du SFCL.....	52
IV.2.1. Caractéristiques $E(j)$	53
IV.2.2. Modélisation de la température et de la densité de courant critique.....	56
IV.2.3. Modélisation de la densité de courant du supraconducteur	58

IV.3. Modèle thermique du SFCL.....	59
IV.3.1. Rubans supraconducteurs à haute température critiques.....	59
IV .3.1.1. Première génération de rubans HTS : « poudre en tube » (PIT)	59
IV .3.1.2. Deuxième génération de rubans HTS	60
IV. 3.2. Hypothèses du Modèle thermique proposé	60
a) Courant critique	62
b) Crête de tension.....	63
c) Champ électrique.....	63
d) Température du SFCL.....	63
IV.4. Conclusion.....	65
Chapitre V : RESULTATS ET SIMULATIONS.....	
	66
V.1. Introduction.....	66
V.2. Simulation du modèle électrique	67
V.2.1. Simulation du défaut sans SFCL	69
V.2.2. Simulation du défaut avec SFCL.....	70
V.2.3. Intégration du SFCL dans un réseau triphasé	72
V.3. Simulation du modèle thermique	76
V.3.1. Première proposition	76
V .3.1.1. Description du modèle de simulation	76
V .3.1.2. Mode de fonctionnement normale (sans défaut)	78
V .3.1.3. Mode de fonctionnement en défaut (court-circuit)	79
V. 3.2. Deuxième proposition	91
V .3.2.1. Pic du courant de défaut	93
V .3.2.2. Impact du shunt et du substrat	94
V .3.2.3. Effet du matériau shunt.....	97
V.4. Conclusion	97
Conclusion générale et perspectives.....	99

Liste des figures

Figure I.1. Allure des résistivités d'un supraconducteur et d'un métal normal en fonction de la température.....	5
Figure I.2. Surface critique des matériaux supraconducteurs.....	5
Figure I. 3. Dépendance de la résistivité en fonction de la température pour l'état normale (I) et l'état supraconducteur (II).....	6
Figure I.4. La caractéristique tension courant pour un fil supraconducteur.....	7
Figure I.5. Diagramme de phases d'un supraconducteur de type.....	8
Figure I.6. Diagramme de phases d'un supraconducteur de type II	10
Figure I.7. Différence entre un conducteur parfait et un supraconducteur	12
Figure I.8. Courbe d'aimantation d'un supraconducteur de type I	12
Figure I.9. Courbe d'aimantation d'un supraconducteur de type II	13
Figure I.10. Piégeage du flux magnétique par des courants persistants dans un anneau supraconducteur	14
Figure I.11. Induction magnétique dans les supraconducteurs de type II	15
Figure I.12. Réseau de vortex	15
Figure I.13. Action d'un courant sur un vortex	17
Figure I.14. Structure d'un vortex isolé.....	17
Figure I.15 Caractéristique E(J) d'un supraconducteur avec activation thermique.....	18
Figure I.16. Illustration du réseau de vortex, de la longueur de cohérence ξ et de l'épaisseur de pénétration de London λ pour un supraconducteur dans l'état mixte.....	19
Figure I.17. Variation du champ magnétique et du $ \Psi $ à l'interface supraconducteur-normal pour un supraconducteur de type I, ($\xi > \lambda$).....	19
Figure I.18. Variation de B et $ \Psi $ a l'interface supraconducteur-normal pour un Supraconducteur de type II, ($\xi < \lambda$).....	20
Figure I.19. Caractéristique E(j) d'un supraconducteur.....	22
Figure I.20 Caractéristique E(j) d'un supraconducteur, modèle de l'état critique.....	22
Figure I.21. Boîtier contenant 8 filtres YBaCuO et intégration dans un châssis intégrant le cryogénérateur 30 K.....	25
Figure I.22. Comparaison entre le moteur conventionnelle et le moteur supraconducteur	26
Figure II.1 Structure cristallographique de l'YBaCuO.....	29
Figure II.2. Résistivité de l'YBaCuO en fonction de la température.....	30
Figure II.3. Structure cristallographique de bismuth Bi2223.....	31
Figure II.4. Chaleur spécifique en fonction de la température du Bi2223.....	33
Figure II.5. Architecture générale des couches minces.....	34
Figure II.6. Procédé RABiTS	36
Figure III.1. Cycle OFOFOF pour une ligne aérienne.....	39

Figure III.2. Cycle OFOF pour une ligne souterraine.....	40
Figure III.3. Limitation de courant par transformateur court-circuité.....	41
Figure III.4. Limitation de courant par thyristors contrôlant un circuit raisonnant.....	42
Figure III.5. Courants de court circuit avec et sans limiteur.....	43
Figure III.6. Principe du limiteur de courant résistif.....	44
Figure III.7. Principe du limiteur de courant inductif.....	45
Figure III.8. Principe du limiteur de courant de type pont redresseur.....	46
Figure III.9. Principe du limiteur de courant de type contrôleur de courant de défaut.....	47
Figure III.10. Principe du limiteur de courant du type noyaux magnétiques saturés.....	47
Figure III.11. Insertion de limiteurs de courant de défaut dans un réseau.....	50
Figure IV.1. Variation de la résistivité avec la température de Bi-2223 et YBCO.....	53
Figure IV.2. Diagramme de phase simplifié de l'état supraconducteur.....	53
Figure IV.3. Caractéristique $E(j)$	55
Figure IV.4. Schéma du comparateur.....	55
Figure IV.5. Bloc de modélisation du champ électrique.....	56
Figure IV.6. Caractéristique $E(j)$ à différentes températures.....	56
Figure IV.7. Schéma de modélisation de la température réelle du matériau supraconducteur.....	57
Figure IV.8. Le croquis du matériau supraconducteur.....	58
Figure IV.9. Schémas simplifiés de conducteurs HTS.....	59
Figure IV.10. Schéma simplifié de la conception du SFCL.....	60
Figure IV.11. Schéma réel d'un limiteur de courant supraconducteur.....	61
Figure IV.12. Conception du SFCL par dépôt de couches minces.....	61
Figure IV.13. Schéma électrique équivalent d'un SFCL.....	61
Figure IV.14. Schéma de la couche supraconductrice.....	62
Figure IV.15. Organigramme de fonctionnement du SFCL thermique proposé.....	64
Figure V.16. Circuit électrique du SFCL thermique.....	65
Figure V.1. Dégradation des matériaux due à un échauffement thermique lors d'un test.....	66
Figure V.2. Circuit de simulation du modèle électrique du SFCL.....	67
Figure V.3. Interface graphique du SFCL.....	68
Figure V.4. Circuit de simulation du défaut sans SFCL.....	69
Figure V.5. Allure du courant de défaut sans SFCL.....	69
Figure V.6. Allure de la tension aux bornes de la charge et de l'alimentation sans SFCL.....	70
Figure V.7. Circuit de simulation du SFCL monophasé.....	71
Figure V.8. Allure du courant de défaut avec SFCL.....	71
Figure V.9. Représentation de l'état de transition du SFCL.....	72
Figure V.10. Circuit électrique du SFCL triphasé.....	73

Figure V.11. Circuit de simulation du SFCL triphasé.....	73
Figure V.12. Circuit de commande des résistances supraconductrices dans un SFCL triphasé.....	74
Figure V.13. Vue interne du block de simulation d'un SFCL triphasé.....	75
Figure V.14. Allure du courant dans les trois phases sans SFCL.....	75
Figure V.15. Allure du courant dans les trois phases avec SFCL.....	76
Figure V.16. La conception du première modèle de simulation proposé.....	77
Figure V.17. Allure de courant en fonction du temps pendant l'opération normale (sans défaut)	79
Figure V.18. Allure de la température en fonction du temps pendant l'opération normale (sans défaut)	79
Figure V.19. Circuit électrique dans le mode de fonctionnement en défaut	80
Figure V.20. Allure du courant en fonction du temps pendant le défaut.....	80
Figure V.21. Variation de la résistance en fonction du temps avant et après le défaut.....	81
Figure V.22. Schéma des zones simulées pour le calcul de la température.....	82
Figure V.23. Variation de la température en fonction du temps avant et après le défaut.....	82
Figure V.24. Le courant de défaut correspond à différentes longueurs du SFCL à une épaisseur de 0.002m (k=0.8).....	84
Figure V.25. La température en fonction de différentes longueurs du SFCL à une épaisseur de 0.002m (k=0.8).....	84
Figure V.26. Le courant de défaut correspond à différentes longueurs du SFCL à une épaisseur de 0.009m (k=0.8).....	86
Figure V.27. La température en fonction de différentes longueurs du SFCL à une épaisseur de 0.009m (k=0.8).....	86
Figure V.28. Le courant de défaut correspond à différentes longueurs du SFCL à une épaisseur de 0.002m (k=0.7).....	88
Figure V.29. La température en fonction de différentes longueurs du SFCL à une épaisseur de 0.002 m (k=0.7)	88
Figure V.30. Le courant de défaut correspond aux différentes longueurs du SFCL à une épaisseur de 0.009m (k=0.7).....	89
Figure V.31. La température en fonction de différentes longueurs du SFCL à une épaisseur de 0.009 m (k=0.7).....	89
Figure V.32. Le courant de défaut correspond à différentes longueurs du SFCL à une épaisseur de 0.002m (k=0.9).....	90
Figure V.33. . La température en fonction de différentes longueurs du SFCL à une épaisseur de 0.002 m (k=0.9).....	91
Figure V.34. La conception du deuxième modèle de simulation proposé	91
Figure V.35 Allure de courant en fonction du temps pendant le défaut dans le deuxième modèle thermique.....	93
Figure V.36. Variation de la résistance en fonction du temps avant et après le défaut dans le deuxième modèle thermique.....	94

Figure V.37. Variation de la température en fonction du temps avant et après le défaut pour le deuxième modèle de simulation thermique	95
Figure V.38. Variation de la température en fonction du temps dans la Zone-3, avec et sans le shunt (Ag).	96
Figure V.39. Comparaison de la variation de la température en fonction du temps, entre deux matériaux le (Ag) et (Hastelloy), dans la construction de couche shunt.....	97

Liste des tableaux

Tableau I.1. Liste de quelques matériaux supraconducteurs de type I.....	9
Tableau I.2. Températures critiques de quelques matériaux à haut température critique	10
Tableau I.3. Équations décrivant le comportement électromagnétique d'un matériau supraconducteur.....	24
Tableau II.1. Principales grandeurs caractéristiques pour l'YBaCuO.....	32
Tableau II.2. Principales grandeurs caractéristiques du Bi2223	32
Tableau II.3. Propriétés thermophysiques de l'YBaCuO et du Bismuth	33
Tableau III.1. Comparaison des différents types d'SFCL	48
Tableau V.1. Paramètres de simulation du modèle électrique d'SFCL.....	68
Tableau V.2. Paramètres de simulation du modèle d'SFCL triphasé.....	74
Tableau V.3. Paramètres géométriques du modèle thermique du SFCL.....	77
Tableau V.4. Paramètres électrique du modèle thermique du SFCL.....	77
Tableau V.5. Paramètres thermique du modèle thermique du SFCL.....	78
Tableau V.6. Le courant de défaut et la température correspondant à différentes longueur du supraconducteur à $k= 0.8$, l'épaisseur = 0.002m et la capacité thermique= $6.35 e^5 \text{ kJ(kgk)}^{-1}$	83
Tableau V.7. Le courant de défaut et la température correspondant à différentes longueur du supraconducteur à $k= 0.8$, l'épaisseur = 0.009m et la capacité thermique= $6.35 e^5 \text{ kJ(kgk)}^{-1}$	85
Tableau V.8. Le courant de défaut et la température correspondant à différentes longueur du supraconducteur à $k= 0.7$, l'épaisseur = 0.002m et la capacité thermique= $6.35 e^5 \text{ kJ(kgk)}^{-1}$	87
Tableau V.9. Le courant de défaut et la température correspondant à différentes longueur du supraconducteur à $k= 0.7$, l'épaisseur = 0.009m et la capacité thermique= $6.35 e^5 \text{ kJ(kgk)}^{-1}$	89
Tableau V.10. . Le courant de défaut et la température correspondant à différentes longueur du supraconducteur à $k= 0.9$, l'épaisseur = 0.002m et la capacité thermique= $6.35 e^5 \text{ kJ(kgk)}^{-1}$	90
Tableau V.11. Paramètres géométriques du deuxième modèle d'SFCL thermique.	92
Tableau V.12. Paramètres électrique du deuxième modèle d'SFCL thermique	92
Tableau V.13. Paramètres thermique du deuxième modèle d'SFCL thermique.....	93
Tableau V.14. Conductivité thermique de quelques matériaux à la température $T =77\text{K}$	94
Tableau V.15. Capacité thermique de quelques matériaux à la température $T =77\text{K}$	95

Listes des Acronymes et Symboles

Symboles

T_c : Température critique
 T : Température
 ρ : Résistivité électrique
 J_c : Densité de courant critique
 H_c : Champ magnétique critique
 M : Aimantation
 λ_L : Longueur de pénétration (longueur de London)
 H_a : Champ magnétique appliqué
 E : Champ électrique
 B : L'induction magnétique
 Φ_0 : Quantum de flux (2.10×10^{-15} Wb)
 μ_0 : Perméabilité magnétique du vide ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m)
 H : Champ magnétique
 \mathbf{FL} : Force de Laplace
 Φ : Flux magnétique
 \vec{v} : Vitesse d'électron
 e : Charge d'électron
 c : Vitesse de lumière
 h : Constante de Planck
 ρ_{ff} : Résistivité électrique de Flux Flow
 ρ_n : Résistivité électrique à l'état normal
 ρ_{Taff} : Résistivité électrique dans le régime TAFF
 ξ : Longueur de cohérence
 Ψ : Quantité qui caractérise l'état supraconducteur
 n, α, β : Constantes utilisées dans le modèle $E(J)$
 C_p : Chaleur spécifique
 f : Fréquence du courant de transport sinusoïdal
 I_n : Courant nominal
 U_n : Tension nominal
 I_{cc} : Courant de court-circuit
 I_{lim} : Courant limiter
 S_n : Puissance nominal
 P_{cc} : Puissance de court-circuit
 U_{cc} : Tension de court-circuit
 R_{sup} : Résistance supraconducteur
 L_{sup} : Bobine supraconductrice
 U_{DC} : Tension continu
 I_{DC} : Courant continu
 T_{sk} : Température réelle du matériau supraconducteur
 V_n : Tension nominal continue
 D_{21} : Largeur de la bonde supraconductrice
 D_{22} : Longueur de la bonde supraconductrice
 $R_{S_Thermal}$: Résistance thermique

t_{ss} : Epaisseur de la couche d'acier inoxydable
t_{Bi2223} : Epaisseur de la couche supraconductrice
wth_{ss} : Largeur de la couche d'acier inoxydable
wth_{Bi2223} : Largeur de la couche supraconductrice
L : Longueur du SFCL
K% : Pourcentage de la densité de courant critique
V_{peak} : Valeur crête de la tension
E_{peak} : Champ électrique maximal
T₀ : Température de l'azote liquide
C : Capacité calorifique
N_{ss} : Nombre des couches d'acier inoxydable
N_{Bi2223} : Nombre des couches du matériau Bi2223
L₁ : L'inductance initiale
TT : Température initiale du Bi2223
k_{ss} : Conductivité thermique d'acier inoxydable
k_{Bi2223} : Conductivité thermique du Bi2223
c_{ss} : Capacité thermique spécifique d'acier inoxydable
c_{Bi2223} : Capacité thermique spécifique du Bi2223
t_{Ag} : Epaisseur de la couche shunt (Ag)
t_{Bi2223} : Epaisseur de la couche supraconductrice
t_{Hast} : Epaisseur de la couche substrat (Hastelloy)
wth_{tape} : Largeur des couches du SFCL
N_{Ag} : Nombre de couches d'argent (Ag)
N_{Hast} : Nombre de couches de Hastelloy
k_{Ag} : Conductivité thermique d'argent (Ag)
k_{Hast} : Conductivité thermique de Hastelloy_C276
c_{Ag} : Capacité thermique spécifique d'argent (Ag)
c_{Hast} : Capacité thermique spécifique Hastelloy_C276
Δt: Pas de temps

Acronymes

BCS : Théorie de Bardeen, Cooper et Schrieffer

AC : Courant alternatif (Alternating Current)

DC : courant continu (Direct Current)

HTC : Haute température critique

BTC : Base Température Critique

IRM : Imagerie par Résonance Magnétique

LHC : Large Hadron Collider

ITER: International Thermonuclear Experimental Reactor

HF: Haute Fréquence

SMES: Stockage d'énergie magnétique (Superconducting Magnetic Energy Storage)

SFCL, SCFCL: Limiteur de courant supraconducteur (Superconducting Fault Current Limiter)

CC: Couches minces (Coated Conductors)

YBCO : Supraconducteur à base d'yttrium, de baryum et d'oxydes de cuivre

BSCCO, Bi-2212, Bi-2223 : Supraconducteur à base de bismuth, de strontium, de calcium et d'oxydes de cuivre

Ag: L'Argent

Hc1 : Champ critique 1

Hc2 : Champ critique supérieur

TAFF: Thermally Activated Flux Flow

TAFC: Thermally Activated Flux Creep

RABiTS : Rolling Assisted Biaxially Textured Substrate

MOCVD: Metalorganic Chemical Vapor Deposition

IBAD: Ion Beam Assisted Deposition

MBS : Modified Bias Sputtering

PLD : Pulsed Laser Deposition

MS : Magnetron Sputtering

TE : Thermal Evaporation

ISD : Inclined Substrate Deposition

MS : Magnetron Sputtering

OF: Overture Fermeture

CTP : Coefficient Thermique Positif

THT: Très haut tension

MT: Moyen Tension

SS: Acier inoxydable (Stainless steel)

PIT : Powder In Tube

FACTS : Flexible AC Transmission System

INTRODUCTION GENERALE

La découverte en 1986 de la supraconductivité à haute température a fortement relancé l'intérêt des supraconducteurs. Cependant, la plupart des applications de ces matériaux nécessitent une flexibilité et une résistance mécanique particulières. Les propriétés physiques justifient la récente mise en œuvre et le développement des supraconducteurs déposés sous forme de couche mince. Ces supraconducteurs sont constitués d'un film supraconducteur déposé sur un substrat métallique flexible via une couche tampon, puis recouvert d'un shunt protecteur.

Les applications des supraconducteurs en électrotechnique ne cessent d'évoluer et sont actuellement envisageables et certains prototypes sont même commercialisés. Les propriétés exceptionnelles de ces matériaux peuvent être utilisées dans la production, le transport et le stockage de l'énergie électrique. Cependant, l'application la plus prometteuse semble être la protection des réseaux par l'utilisation des limiteurs supraconducteurs de courant. Ces dispositifs apportent une solution nouvelle et inaccessible par les techniques conventionnelles. En effet, ils possèdent une résistance nulle dans leurs régimes assignés, mais développent naturellement et rapidement une résistance élevée et par conséquent un champ électrique au moment des défauts dans le réseau électrique.

Les courants de court-circuit des réseaux électriques n'ont cessé de croître pour répondre à l'augmentation de la consommation tout en produisant une meilleure qualité d'énergie. Le nouveau paysage énergétique via la libéralisation du marché de l'énergie électrique, ouvre la voie à une production décentralisée très diversifiée. La protection de ces réseaux nécessite donc l'utilisation de nouveaux systèmes complémentaires aux appareils de protections classiques, limitant rapidement et efficacement le courant de court-circuit. Les limiteurs de courants de défaut supraconducteurs ont double avantages. Ils permettent de réduire le courant de court-circuit à 3 ou 5 fois le courant nominal et de réduire les contraintes mécaniques et thermiques subies par le réseau avant l'isolement le défaut.

L'objectif de notre travail de thèse est de modéliser le comportement électrique et thermique du limiteur de courant supraconducteur, le modèle développé doit décrire le comportement réel du limiteur supraconducteur, et il doit être simple à intégrer dans n'importe quel type de réseau électrique monophasé ou triphasé.

Le présent manuscrit est structuré comme suit :

Le premier chapitre trace un bref historique suivi d'une présentation des principales grandeurs qui permettent de définir l'état supraconducteur. Quelques modèles macroscopiques

seront présentés par la suite pour établir les lois de comportement et de dépendance entre les grandeurs.

Le deuxième chapitre est une présentation des différents matériaux supraconducteurs à haute température critique. Nous montrerons les principales propriétés de ces matériaux, nous expliquerons ensuite l'architecture et les différents procédés de fabrication des conducteurs en couches minces.

Le troisième chapitre est une présentation de la limitation de courant. Nous parlerons de ses avantages et du principe de fonctionnement des limiteurs. Nous donnerons ensuite un état de l'art complet des limiteurs supraconducteurs et nous conclurons par une comparaison des différentes solutions techniques.

Le quatrième chapitre présente, les modèles de limiteur de courant supraconducteur développés au cours de ce travail. Après une présentation des formulations analytiques des deux modèles électrique et thermique, on s'intéressera à améliorer le modèle électrique par l'intégration de celui-ci dans un réseau électrique triphasé, et à l'amélioration du transit de chaleur dans le deuxième modèle thermique par la proposition d'une nouvelle configuration constituée d'une couche shunt en argent et la couche substrat en matériau Hastelloy_C276, qui couvrent la couche supraconductrice Bi2223.

Les résultats de cette étude permettront de conclure sur les mécanismes régissant la limitation de courant dans les réseaux électrique plus particulièrement avec les conducteurs sous forme de couche mince. On termine par les perspectives de ce projet.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LA SUPRACONDUCTIVITE

I.1. Introduction

La compréhension d'un phénomène physique et de l'étendu de ses applications pratique passe forcément par une étude des fondements théoriques et des étapes hésiodiques par lesquelles il est passé depuis sa découverte.

Dans ce chapitre, les aspects physiques caractéristiques de la supraconduction seront d'abord traités. En suite, les espèces de supraconducteurs de type-I et de type-II, présentant des propriétés magnétiques bien différentes, seront considérées. Les mécanismes associés à ces états seront traités. Finalement, Quelques modèles macroscopiques seront présentés pour établir les lois de comportement et de la dépendance entre les grandeurs.

I.2. Historique

Le phénomène de la supraconductivité a été découvert en 1911 par le physicien hollandais **Heike Kamerlingh Onnes** [1], lors de la liquéfaction de l'hélium, il constate que la résistivité chute brutalement à zéro. Ainsi un courant électrique continu peut circuler quasi indéfiniment sans dissipation d'énergie. On dit qu'il y a transition de l'état normal de conducteur vers l'état supraconducteur. Cette transition intervient à une température appelée *température critique*.

En 1933, W. Meissner et R. Ochsenfeld [2], observent qu'hormis les qualités exceptionnelles de conduction de ces métaux, ils possèdent la propriété d'exclure toute pénétration d'un champ magnétique extérieur grâce à la circulation de super-courants dans le supraconducteur. Cet effet de non-pénétration du champ magnétique est nommé effet Meissner.

Une théorie microscopique (BCS) portant les noms de ses auteurs [3], a été émise en 1957 par John Bardeen, Leon N. Cooper et John Schrieffer (tous trois prix Nobel de physique en 1972) pour expliquer la supraconductivité. Cette théorie explique qu'à très basse température, les électrons s'apparient, c'est-à-dire se mettent en couple. On dit qu'ils forment des paires de Cooper. Cet état ordonné résulte de l'existence d'une attraction entre électrons par l'intermédiaire des vibrations du réseau atomique qu'on peut schématiser ainsi : un électron de conduction se déplaçant dans le métal provoque sur son passage une déformation locale et momentanée du réseau par l'attraction qu'il exerce sur les ions positifs. Ces ions se déplaçant créent un excédent de charge positive.

Un deuxième électron sera soumis à cet excédent de charge positive qui a fait écran à la charge négative du premier électron. Comme les électrons circulent beaucoup plus vite que les ions (qui sont nettement plus lourds), le deuxième électron subit l'effet prolongé de la charge positive quand le premier électron est loin de lui. L'interaction entre les deux électrons a donc une grande portée. Les paires d'électrons ainsi formées se déplacent sans dissipation d'énergie dans le réseau cristallin. Les électrons sont des fermions, c'est-à-dire des particules qui ne peuvent se trouver au même endroit dans le même état physique. Mais la véritable explication théorique de la supraconductivité à très basse température repose sur le fait que les paires de Cooper, constituées de deux électrons, forment en définitive des bosons qui, eux, peuvent se trouver en grand nombre dans le même état physique, en l'occurrence dans un état de plus basse énergie. Elles ne peuvent alors pas perdre d'énergie par dissipation, et se propagent donc sans résistance. Tout se passe comme si, pour elles, tous les mécanismes de perte avaient disparu. Cette agglomération d'un grand nombre d'électrons appariés dans un seul et même état physique est ce que les physiciens appellent une condensation de Bose-Einstein. Avec cette théorie, le mécanisme de la supraconductivité ne permettait pas d'obtenir des températures critiques supérieures à une trentaine de Kelvins (au-delà, l'agitation thermique casse les paires). Pour cette raison la découverte en 1986 par Johannes Georg Bednorz et Karl Alexander Müller [4] de la supraconductivité dans un oxyde synthétique de cuivre, lanthane et baryum à une température critique de 35 K, plus élevée que toutes celles connues jusqu'alors, a eu un retentissement considérable. Cette découverte relance alors la recherche dans ce domaine, et permet la mise en évidence de ce phénomène jusqu'à 164 K, en 1998.

I.3. Présentation générale de la supraconductivité

La « première signature » du caractère supraconducteur d'un matériau est sa résistivité nulle (Fig. I.1) en dessous d'une certaine température T_C , appelée température critique qui se traduit par une transition franche, et sépare ainsi le comportement de l'état normal du matériau de celui de son état supraconducteur. L'intervalle de température dans lequel la résistivité change brusquement est très étroit [5]. Ceci indique que l'état supraconducteur est un nouvel état de la matière, autrement dit un état qui correspond à un arrangement particulier du système des électrons. On peut donc dire que le franchissement de la température critique correspond à une transition de phase.

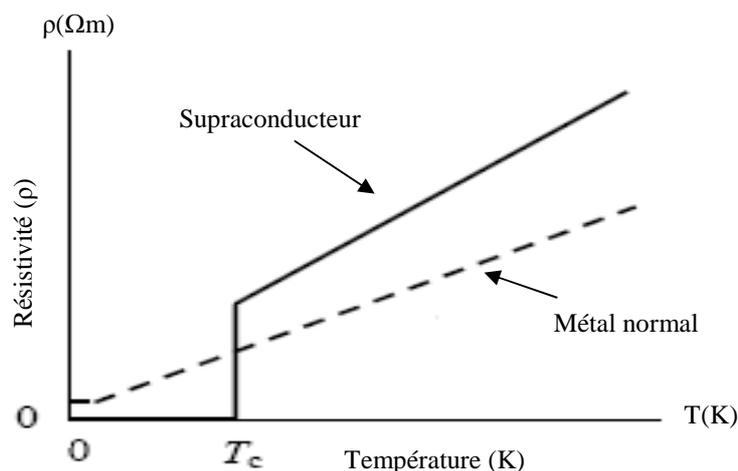


Figure I.1. Allure des résistivités d'un supraconducteur et d'un métal normal en fonction de la température

I.4. Grandeurs critiques

L'état supraconducteur non dissipatif est limité par trois grandeurs, appelées grandeurs critiques, au-delà desquelles le matériau passe dans un état fortement dissipatif. Il s'agit de la densité de courant critique J_c , de la température critique T_c , et du champ magnétique H_c .

Ces trois grandeurs sont fonction les unes des autres et forment ainsi une surface critique au-delà de laquelle le matériau cesse d'être non dissipatif. La figure I.2 représente la surface critique de quelques matériaux supraconducteurs, refroidis à l'azote liquide et l'hélium liquide.

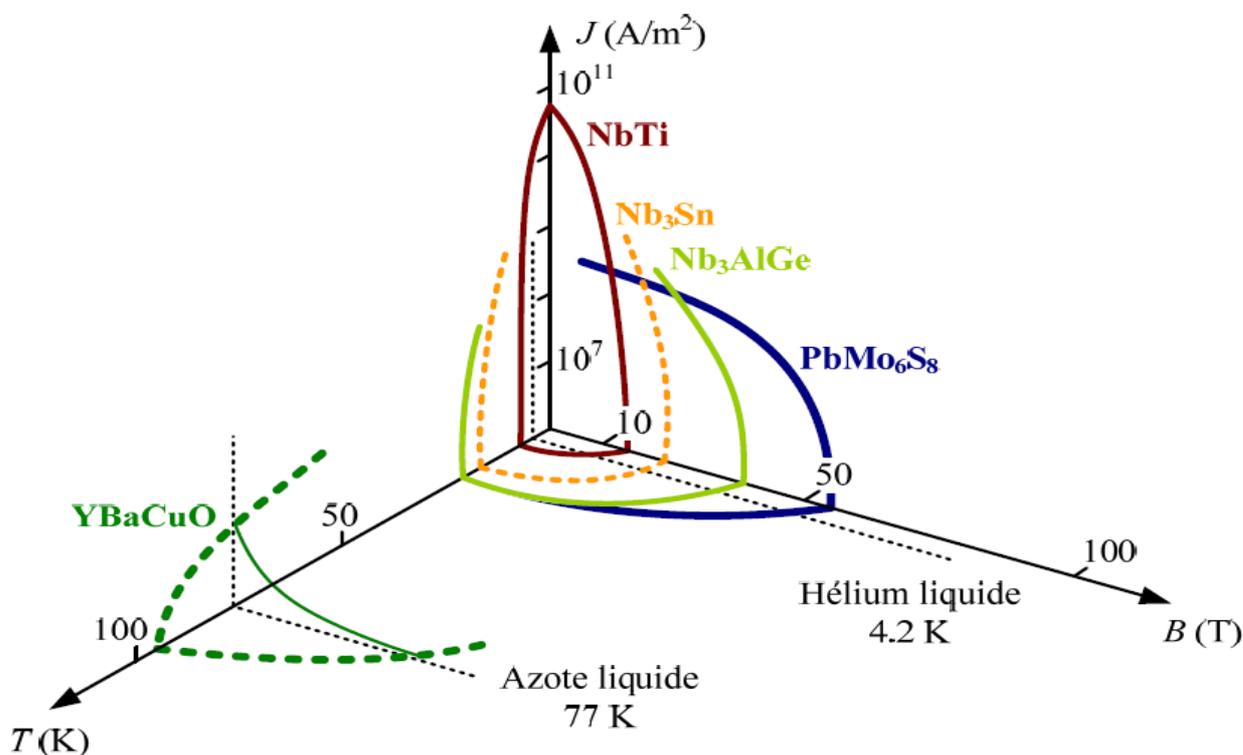


Figure I.2. Surface critique des matériaux supraconducteurs. [6]

Exposons dans les sections suivantes les grandeurs critiques séparément

I.4.1. Température critique

L'état de supraconductivité caractérise la plupart des métaux à condition que la température soit très proche de 0 K. La température en dessous de laquelle un matériau devient supraconducteur est nommée température critique. T_c est également la température de transition qui délimite l'état supraconducteur de l'état normal. A noter que la supraconductivité est obtenue aux températures T_c plus élevées pour les métaux mauvais conducteurs dans l'état normal, comme par exemple le mercure et le plomb. Proche de T_c la variation de la résistivité en fonction de la température est très brutale (voir Figure. I.3). La partie I représente la variation de la résistivité, $\rho(T)$ à l'état normal, correspondante à la relation

$$\rho(T) = CT^5 + \rho_r, \quad (I.1)$$

ou ρ_r est dépendante des impuretés et des défauts du réseau cristallin. La partie II de la courbe (Figure I.3) représente une décroissance spontanée sur un intervalle de température de 0,01 à 0,001 K et caractérise l'état supraconducteur.

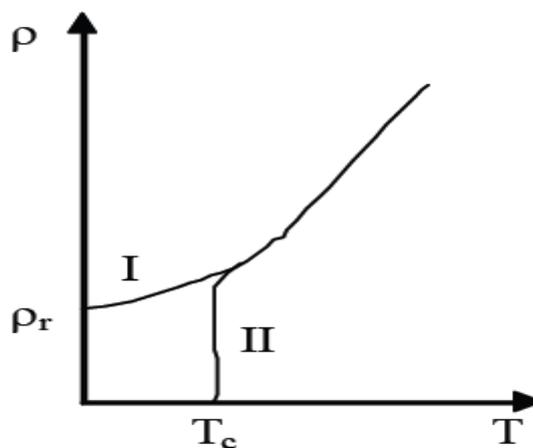


Figure I.3. Dépendance de la résistivité en fonction de la température pour l'état normal (I) et l'état supraconducteur (II)

I.4.2. Densité de courant critique

C'est la deuxième grandeur qui limite l'état supraconducteur. La densité de courant critique est la valeur maximale correspondante au delà de laquelle une résistivité apparaît. Des fils relativement fins réalisés de matériaux supraconducteurs peuvent être employés pour transporter de forts courants puisqu'il n'y a aucune perte d'énergie thermique. Cependant, ces matériaux sont conçus pour transporter un certain courant maximum limite. Au-dessus de ce courant critique ils cessent d'être supraconducteurs et passent à l'état normal même s'ils sont au-dessous de la

température critique. Ce courant critique représenté par sa densité J est utilisé dans les limiteurs de courant supraconducteurs.

La densité de courant critique (J_c) est une fonction non linéaire de la température et du champ magnétique. Plus le supraconducteur est refroidi, plus le courant à transporter sans transition est élevé. La figure I.4 représente la tension en fonction du courant circulant à travers un fil supraconducteur.

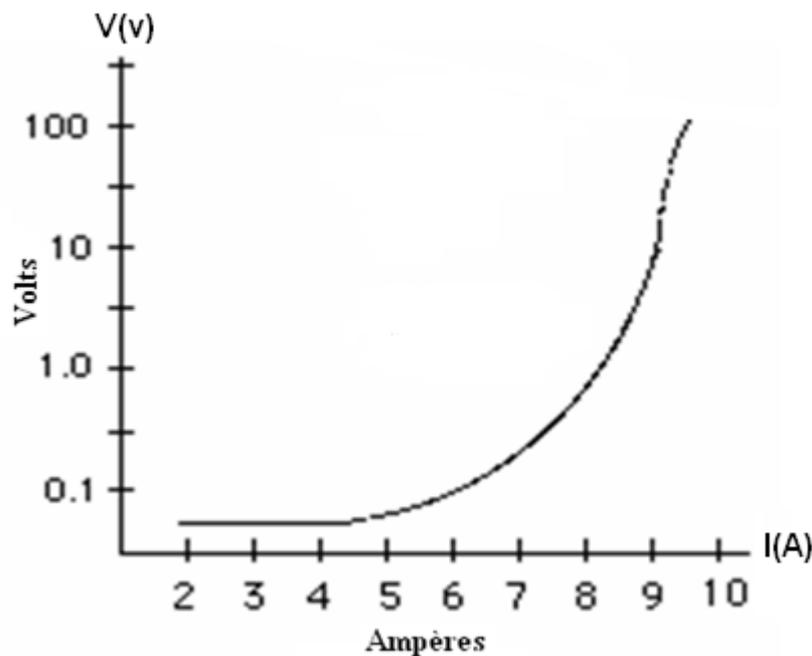


Figure I.4. La caractéristique tension courant pour un fil supraconducteur [7].

I.4.3. Champ magnétique critique

L'état supraconducteur peut disparaître pour un champ magnétique extérieur d'une certaine intensité H_c dépendant de la température. Dans la Figure I.5, la courbe $H_c(T)$ divise le quadrant $H(T)$, ($H > 0$, $T > 0$), en deux régions ; état supraconducteur et état normale. La température maximale à laquelle un matériau est supraconducteur est obtenue pour un champ extérieur nul.

Le supraconducteur présente la propriété nommée **effet Meissner Ochsenfeld**, qui consiste à ce que les lignes de champ magnétique sont expulsées du matériau. Ainsi pour T supérieurs à T_c le matériau est non magnétique (aimantation nulle), par contre pour T inférieurs à T_c il est parfaitement diamagnétique (aimantation négative) si le champ magnétique extérieur n'est pas très élevé ($H < H_c$). Le champ critique varie avec la température suivant la loi approximative :

$$H_c(T) = H_c(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad (I.2)$$

I.5. Classification des supraconducteurs

Il existe deux types de supraconducteurs. Les supraconducteurs de type I, et Les supraconducteurs de type II. Chaque espèce est en réalité un regroupement de différents matériaux présentant les mêmes aspects généraux bien qu'ils soient tous différents.

I.5.1. Supraconducteurs de type I

Les supraconducteurs de type I sont caractérisés par un seul champ critique H_c . Lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique extérieur H l'induction magnétique B est nulle à l'intérieur tant que $H < H_c$ et l'aimantation $\vec{M} = -\vec{H}$. Par contre à la surface du matériau dans une épaisseur de l'ordre de λ_L appelée longueur de London [8], l'induction pénètre le matériau et des courants supraconducteurs d'écrantage se développent.

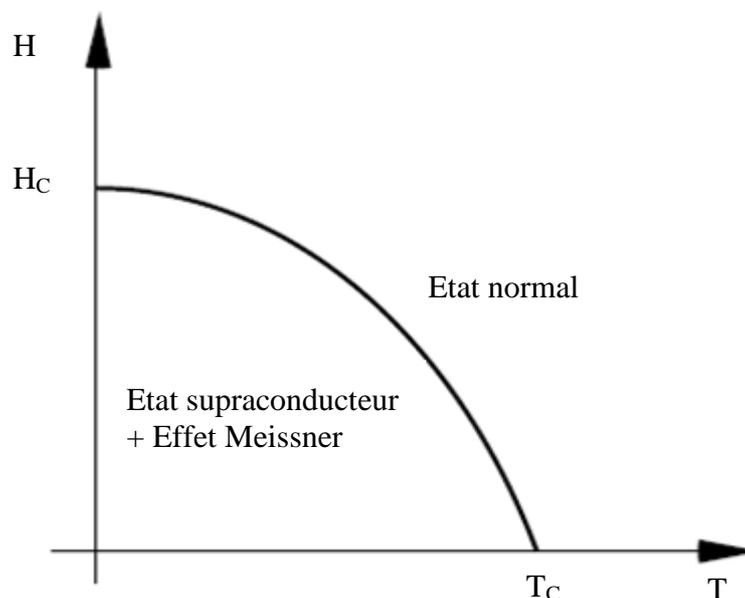


Figure I.5. Diagramme de phases d'un supraconducteur de type I [9].

Les supraconducteurs de type I ont été découverts en premier et requièrent une très basse température pour obtenir la supraconductivité. Ces types de matériaux sont caractérisés par une transition brutale vers un état de supraconductivité et un parfait diamagnétisme (capacité de

repousser un champ magnétique). Le tableau I.1 présente un ensemble de matériaux supraconducteurs de type I et leurs températures critiques de transition.

Tableau I.1. Liste de quelques matériaux supraconducteurs de type I.

Eléments	Température critique
Carbon (C)	15 K
Lead (Pb)	7,2 K
Lanthanum (La)	4,9 K
Mercury (Hg)	4.15 K
Aluminum (Al)	1,175 K
Zinc (Zn)	0,85 K
Uranium (U)	0,20 K
Rhodium (Rh)	0,000325 K

I.5.2. Supraconducteurs de type II

On retiendra de ce qui précède qu'un supraconducteur de type I est un diamagnétique parfait (expulsion du champ magnétique) aussi bien qu'un conducteur parfait (résistivité nulle). Il existe toutefois d'autres supraconducteurs, dits de *type II*, dont les caractéristiques ne sont pas aussi simples.

Une première partie des matériaux de cette catégorie est composée de supraconducteurs dits *classiques*. Bien que découverts il y a plusieurs décennies, ils occupent aujourd'hui encore une grande place dans les applications industrielles de la supraconductivité. Les plus importants d'entre eux sont les alliages à base de niobium tel que le Nb₃Sn, le Nb₃Ge (qui possède la plus haute température critique de cette classe de supraconducteurs : $T_c = 23.4$ K), ou encore les alliages Nb-Ti.

Une autre classe importante de matériaux de type II, beaucoup plus récente, est celle des supraconducteurs dits à **Haute température critique** (HTc). Découverts en 1986 [10]-[11], ces matériaux ont pour point commun une structure cristalline formée de plans d'oxyde de cuivre, d'où leur nom de *cuprates*. Ces plans sont séparés par des couches d'éléments lourds tels que l'yttrium et le barium (YBa₂Cu₃O_{7-d}), le bismuth, le strontium et le calcium (Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+d}), etc. La température critique de ces composés peut dépasser 130 K. Le plus étudié d'entre eux, l'YBaCuO, a une température critique de 90 K environ (variant légèrement en fonction du dopage en oxygène). Ces supraconducteurs, bien qu'encore peu utilisés industriellement, sont très prometteurs et sont

l'objet de la grande majorité des efforts de recherche en supraconductivité. Quelques matériaux supraconducteurs à haute température critique sont donnés dans le tableau I.2.

Pour terminer cette énumération des différentes classes de supraconducteurs de type II, on peut encore mentionner brièvement l'existence de matériaux organiques (soit à base de molécules complexes, comme le BEDT-TTF, soit à base de fullerènes, comme le K3C60), et d'oxydes non cuprates, comme le BaPb1-dBiO3. Ces différents matériaux n'ont jusqu'à ce jour pas permis de dépasser des températures critiques de l'ordre d'une trentaine de Kelvin.

Tableau 0.2. Températures critiques de quelques matériaux à haute température critique

Matériaux	T _c (K)
La _{2-x} Sr _x CuO ₄	38
Eu ₂ Ba ₂ Cu ₃ O _{10-x}	43
Pb ₂ Sr ₂ YCu ₃ O ₈	70
Yba ₂ Cu ₄ O ₈	80
Yba ₂ Cu ₃ O _{6+x}	92
Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	110
Tl ₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	125
HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _{8+x}	135

Le diagramme de phases d'un supraconducteur de type II est plus complexe que celui d'un supraconducteur de type I. Même si l'état Meissner existe aussi, il est séparé de l'état normal par une zone supplémentaire, souvent appelée *état mixte*. On se trouve donc en présence de deux champs critiques différents, notés H_{C1} et H_{C2} :

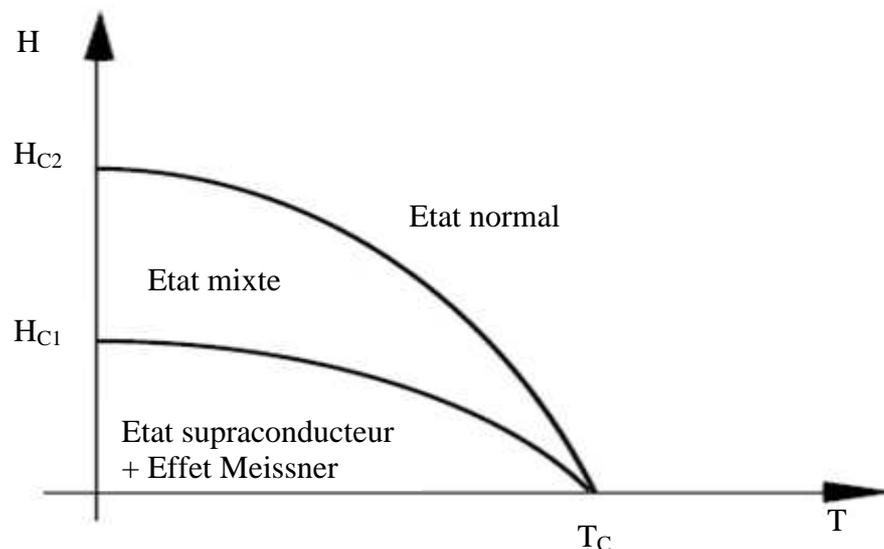


Figure I.6. Diagramme de phases d'un supraconducteur de type II [12].

Dans l'état mixte, le champ magnétique pénètre l'échantillon localement, sous la forme de "lignes de flux" isolées. Ces lignes sont entourées de courants circulaires locaux, d'où leur nom de *vortex* (par analogie avec les tourbillons que l'on trouve dans les fluides). A l'intérieur de ces vortex, l'échantillon est dans l'état normal (c'est-à-dire non supraconducteur). Ces petits "tubes" de champ magnétique ont la propriété de tous contenir exactement le même flux ; les vortex ont une importance fondamentale dans le comportement des supraconducteurs de type II, aussi bien sur le plan des propriétés magnétiques qu'électriques.

I.6. Comportement magnétique des supraconducteurs

I.6.1. Effet Meissner et Ochsensfeld ou diamagnétisme parfait

La « deuxième signature » des matériaux supraconducteurs est leur aptitude à expulser un champ magnétique extérieur appliqué H_a (de faible amplitude $H < H_c$), quand ils sont refroidis en dessous de leur T_c . De la même façon, si l'on refroidit un supraconducteur, puis que l'on applique un faible champ magnétique, les lignes de flux ne pénètrent pas dans le matériau. Le champ magnétique \vec{B} à l'intérieur du matériau est donc nul.

Cette caractéristique appelée « effet Meissner » [13].

La conductivité parfaite ($R = 0$) implique qu'un changement de l'induction magnétique dans le matériau n'est pas possible $dB/dt = 0$. Ainsi, lorsqu'un conducteur parfait, sous champ nul à température ambiante, est refroidi en dessous de T_c puis soumis à un champ magnétique, alors des courants d'écrantage vont être induits pour conserver $B = 0$ à l'intérieur du matériau, voir Figure 1.7(a). Si au contraire, le conducteur parfait est soumis à un champ magnétique avant d'être refroidi, alors, lorsque le champ magnétique extérieur est ramené à zéro, dB/dt doit être conservé et des courants de piégeage seront induits pour piéger l'induction magnétique à l'intérieur, voir Figure 1.7(b). Il en va tout à fait différemment dans le cas d'un supraconducteur :

- ✓ Dans le premier cas, quand le champ magnétique est appliqué après refroidissement, le conducteur parfait et le supraconducteur se comportent de manière identique car l'induction magnétique est toujours nulle dans le matériau, voir Figure 1.7(a).
- ✓ Dans le second cas, l'induction magnétique est expulsée de l'intérieur du supraconducteur ($B = 0$) dès qu'il est refroidi en dessous de sa température critique, voir Figure 1.7(c).

Ce comportement est connu sous le nom d'effet Meissner : il s'agit de l'expulsion de toute induction magnétique de l'intérieur du supraconducteur, qu'elle soit là avant que le spécimen soit devenu supraconducteur ou pas. Le diamagnétisme parfait est une propriété intrinsèque d'un supraconducteur, qui n'est cependant valable que si la température et le champ magnétique sont en tout point inférieurs à leur valeur critique $T < T_c$, $H < H_c$.

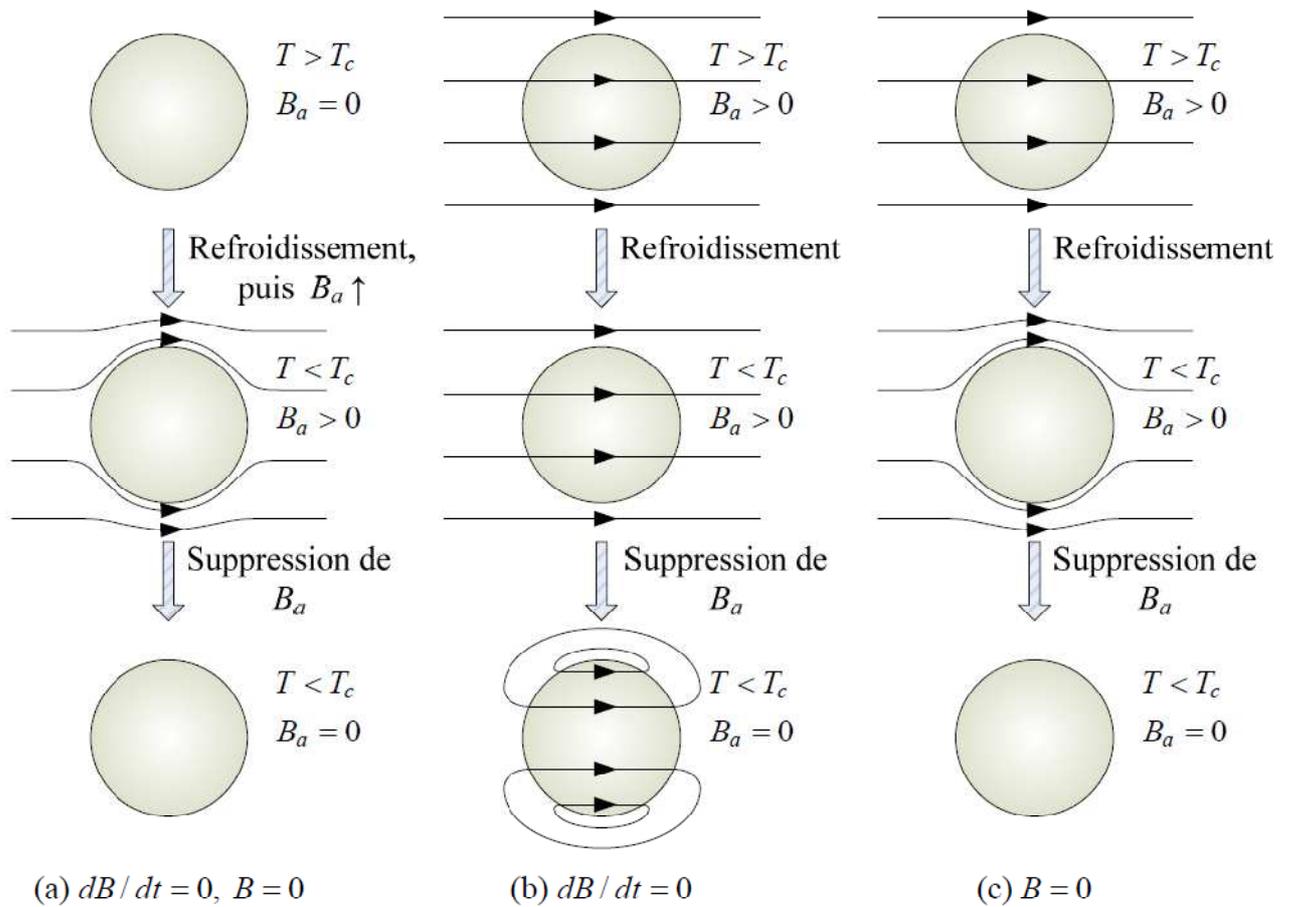


Figure I.7. Différence entre un conducteur parfait et un supraconducteur : l'effet Meissner. (a) S'il n'existe aucun champ magnétique extérieur $B_a = 0$ avant que le matériau soit refroidi, chaque matériau possède un flux magnétique interne nul en dessous de T_c . (b) Un conducteur parfait piège le flux magnétique appliquée avant refroidissement, $B = dB/dt = 0$. (c) Le flux magnétique est toujours exclu par un supraconducteur en dessous de T_c , qu'un champ magnétique soit appliqué avant refroidissement ou non, $B = 0$.

I.6.2. Courbe d'aimantation

La courbe d'aimantation d'un supraconducteur dans les conditions de l'expérience de *Meissner-Oschenfeld* est schématisée ci-dessous (Figure I.8) :

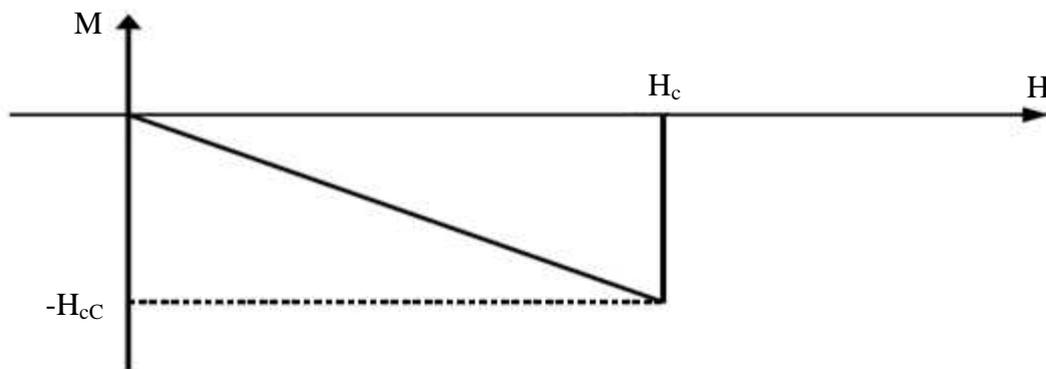


Figure I.8. Courbe d'aimantation d'un supraconducteur de type I

Ceci s'applique de façon quantitative pour des échantillons en forme de cylindres longs, placés dans un champ magnétique longitudinal. Les échantillons de nombreux matériaux purs montrent ce comportement. Ce sont des supraconducteurs de type I. Les valeurs des champs critiques H_c de ces derniers sont faibles et sont utilisés dans des domaines d'application nécessitant un faible champ magnétique. Cependant les matériaux supraconducteurs du deuxième espèce sont caractérisés par la courbe d'aimantation de la figure I.9. Ces matériaux sont, en général, des alliages, ou des métaux de transitions de résistivité électrique élevée dans l'état normal. Il est à noter que les propriétés électriques supraconductrices sont conservées jusqu'au champ H_{c2} , appelé champ critique supérieur. La valeur de H_{c2} peut être 100 fois plus grande que celle qu'on attendait pour H_{c1} . Ceci est dû à des considérations purement thermodynamiques, concernant une phase supraconductrice homogène [14].

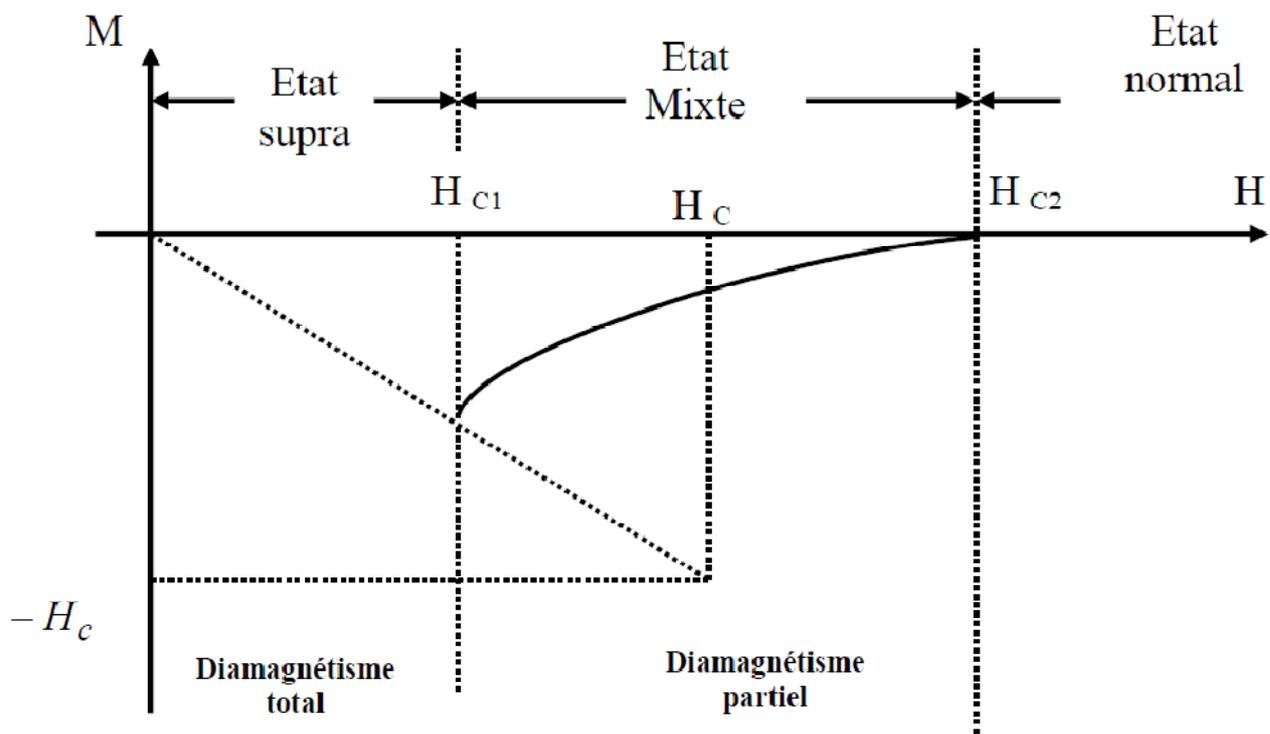


Figure I.9. Courbe d'aimantation d'un supraconducteur de type II

I.6.3. Courants persistants et quantification du flux

Considérons un anneau de métal normal placé dans un champ magnétique perpendiculaire à son plan. Quand on abaisse la température, le métal devient supraconducteur et repousse le flux. Supposons alors que le champ magnétique appliqué soit supprimé. Aucun flux ne peut passer à travers le métal supraconducteur et le flux piégé total doit rester constant ; il est maintenu par des courants persistants circulant dans l'anneau lui-même. Ce flux piégé est quantifié en unité de quantum de flux par:

$$\Phi_0 = 2.10 \times 10^{-15} \text{ Wb} \quad (\text{I.3})$$

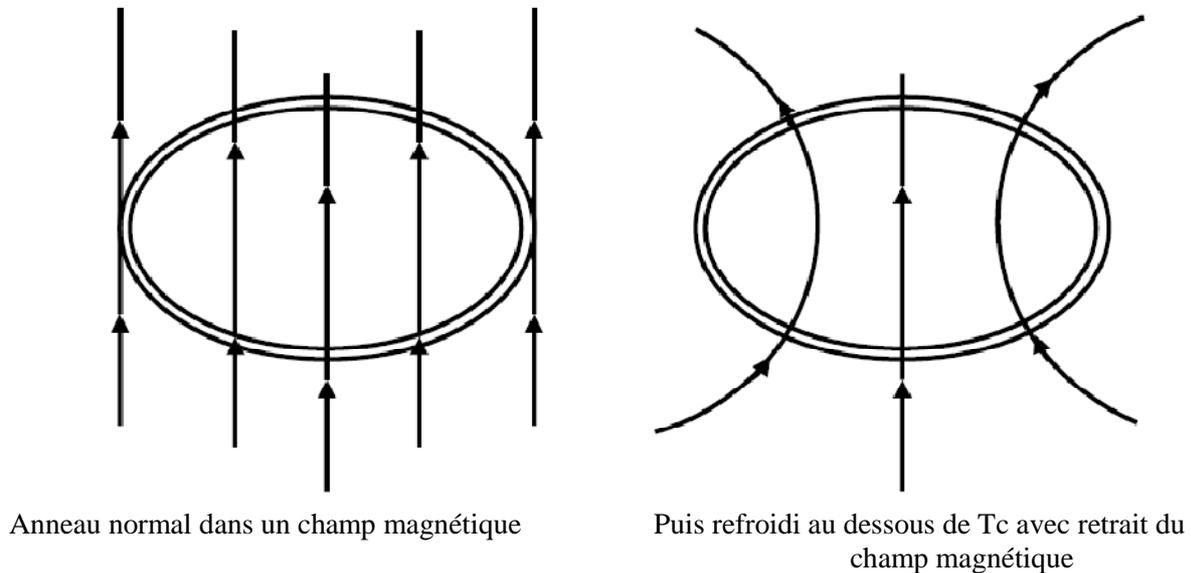


Figure I.10. Piégeage du flux magnétique par des courants persistants dans un anneau supraconducteur

I.6.4. Les vortex

Les supraconducteurs de type II sont les matériaux les plus étudiés. Cet intérêt est dû aux propriétés de leur état mixte caractérisé par de forts paramètres critiques (T_c , H_c , J_c). Ces matériaux représentent, de par le comportement des vortex, un système modèle pour beaucoup de domaines d'application.

Les supraconducteurs de type II possèdent en fait deux champs critiques, H_{C1} en dessous duquel le diamagnétisme est parfait, excepté dans une fine couche à la surface, et H_{C2} au-dessus duquel le matériau cesse d'être supraconducteur et devient normal ($B = \mu_0 H$). Entre H_{C1} et H_{C2} , le matériau est supraconducteur mais dans un état dissipatif (Vortex équivalent au verre liquide amorphe). Entre ces deux champs critiques, le diamagnétisme n'est pas parfait et le champ magnétique pénètre dans le matériau par quantum de flux. Ceci forme un réseau de vortex ordonné Figure I.11.

Dans la pratique, H_{C1} est très petit devant H_{C2} et peut être négligé devant les champs magnétiques de service. Le supraconducteur peut alors être considéré comme amagnétique entre H_{C1} et H_{C2} .

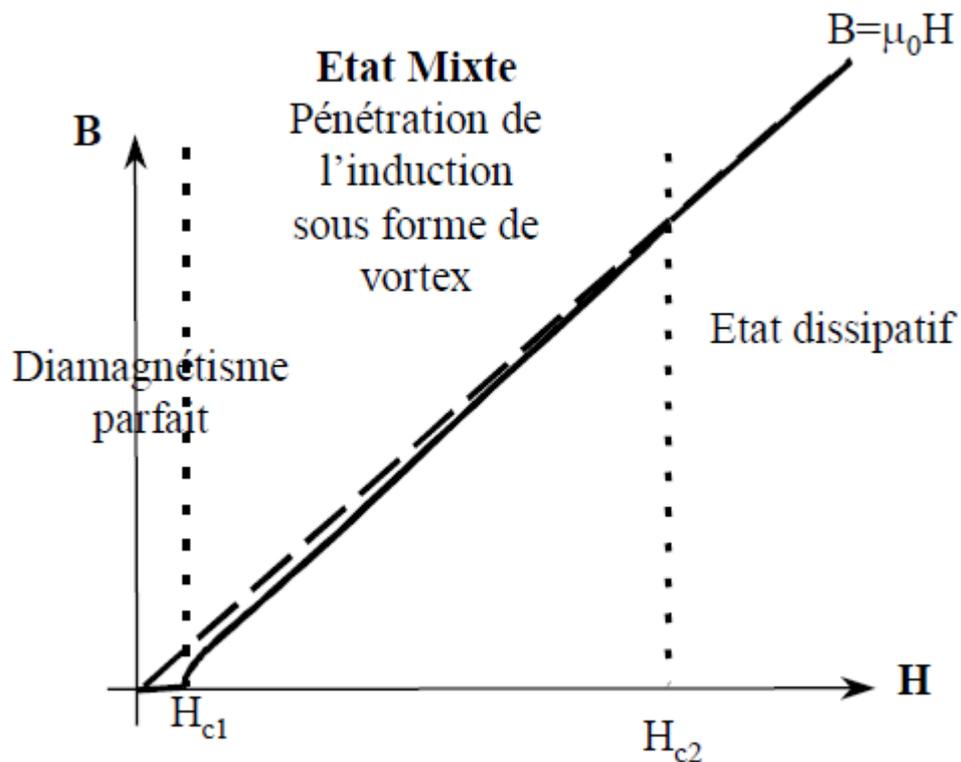


Figure I.11. Induction magnétique dans les supraconducteurs de type II.

Les vortex sont créés sur les bords de l'échantillon puis se déplacent vers le centre. Pour supprimer cet inconvénient, il faut bloquer les vortex. Leur ancrage est possible sur des imperfections microstructurales du matériau, (impureté, défauts, joints de grains,...ete). La présence de défauts entrave ce déplacement et conduit à une distribution très inhomogène des lignes de flux qui restent piégées près des bords, leur concentration (donc l'induction B) est plus forte à la périphérie de l'échantillon qu'elle ne l'est au centre. Cette distribution inhomogène du flux donne lieu à une densité de courant $J(x)$ reliée au gradient local du champ. L'orientation et le sens de ces vortex sont globalement identiques à celle du champ magnétique appliqué B_a , Figure I.12.

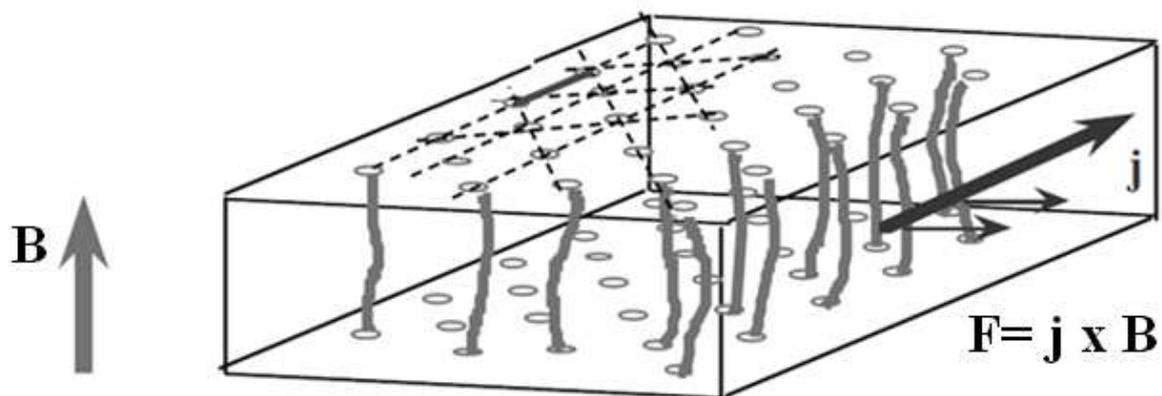


Figure I.12. Réseau de vortex

Il est important de bien comprendre les lois thermodynamique qui régissent la mobilité des vortex, celle-ci étant à l'origine de la transition des supraconducteurs de type II. Cette mobilité fait appel à deux types de mouvements appelés : flux flow et flux creep, figure I.15.

I.6.4.a. Flux flow

Lorsque la densité de courant dépasse une valeur critique notée J_c , les vortex sont arrachés. C'est le régime « flux flow ».

Considérons un vortex libre (sans force de piégeage) dans une matrice supraconductrice, il peut ainsi se déplacer sous l'action de forces extérieures. Par exemple le passage d'un courant dans le matériau engendre une force de Lorentz sur les vortex (donc proportionnelle au courant).

$$\vec{F}_L = \vec{J} \times \vec{\Phi}_0 \quad (I.4)$$

$$F_L = \frac{e \vec{v} \times \vec{B}}{c} \quad (I.5)$$

Avec :

e : Charge de l'électron

\vec{v} : Vitesse de l'électron

\vec{B} : Champ magnétique externe

c : Vitesse de Lumière

J : La densité de courant

Chaque vortex porte le même quantum de flux magnétique

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e} \approx 2.07 \cdot 10^{-15} \text{ Wb} \quad (I.6)$$

Où h est la constante de Planck et e la charge de l'électron.

Tandis qu'une induction magnétique extérieure crée une force de Laplace sur les lignes de flux. Le vortex va alors se déplacer avec une certaine viscosité. Ce mouvement engendre un champ électrique proportionnel à J , le facteur de proportionnalité est appelé résistivité de flux flow notée ρ_{ff} .

$$\rho_{ff} = \frac{H}{H_{C2}} \rho_n \quad (I.7)$$

Avec « ρ_n » la résistivité du supraconducteur à l'état normal.

L'effet du courant sur le déplacement du vortex (par conséquent le phénomène de perte par effet joule), est représenté dans la figure I.13.

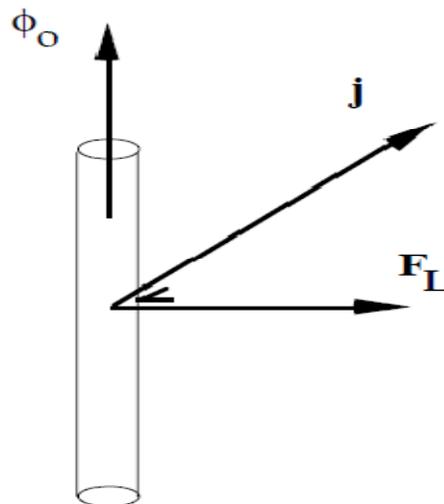


Figure I.13. Action d'un courant sur un vortex

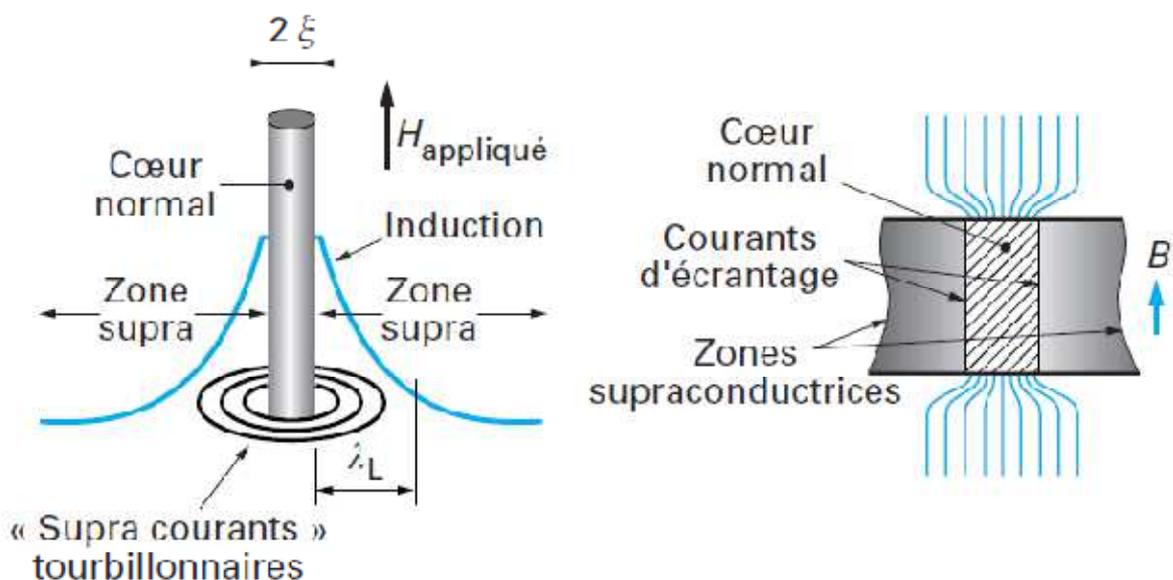


Figure I.14. Structure d'un vortex isolé

I.6.4.b. Flux Creep

Lorsque la force de piégeage est du même ordre que la force de Lorentz créée par le courant appliqué au supraconducteur, le mouvement libre des vortex est contrarié. La viscosité ainsi que la résistivité associée à l'écoulement des vortex n'est plus celle du flux flow. Les vortex se déplacent alors d'un site de piégeage à l'autre. Un mécanisme thermiquement activé (TAFD) confère aux vortex une probabilité non nulle de franchir les barrières de potentiel associées aux centres de piégeage et de sauter de site en site. C'est le régime flux creep [15].

Ce mouvement engendre un champ électrique et une résistance dans le matériau appelée résistance de flux creep. La figure I.15, représente la caractéristique du mouvement flux creep.

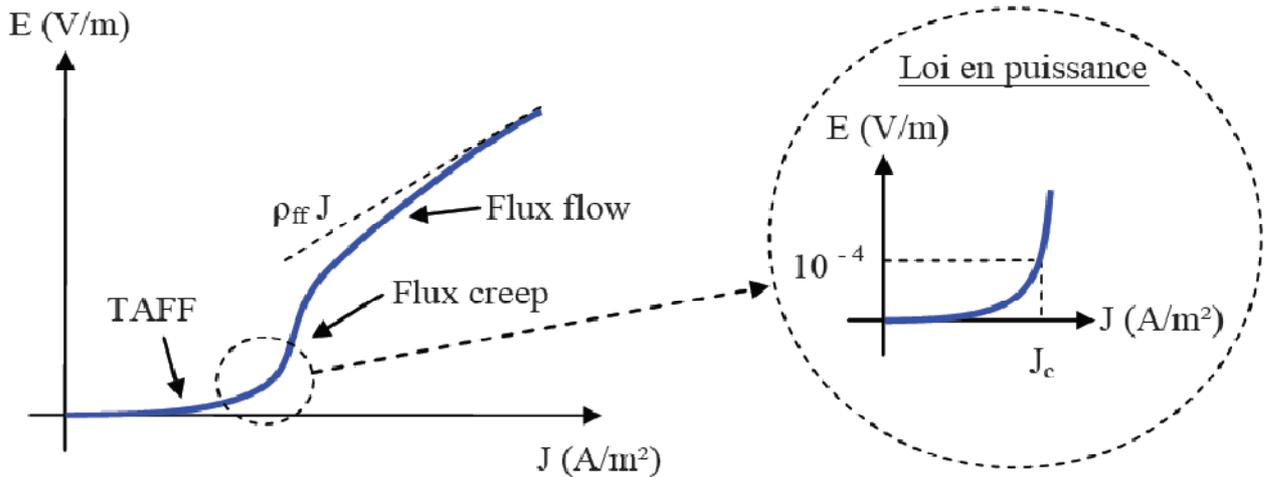


Figure I.15. Caractéristique $E(J)$ d'un supraconducteur avec activation thermique

La zoom de la courbe représentant le déplacement flux creep du vortex est régit par une loi en puissance que nous exposons dans la suite du chapitre.

I.7. Longueurs critiques

I.7.1. Profondeur de pénétration

Les supraconducteurs de type I sont caractérisés par un seul champ magnétique critique H_c , et leur diamagnétique est parfait. L'induction magnétique pénètre sur une épaisseur λ_L , appelée longueur de London, sur laquelle se développent des supra-courants d'ancrage (Figure I.16).

λ_L est l'échelle spatiale sur laquelle les grandeurs électromagnétiques (inductions et supra-courants), peuvent variés [16].

Sa valeur algébrique est comprise entre quelques dizaines et quelques centaines de nanomètres. λ_L est fonction de la température et diverge en particulier à la température critique comme l'indique la relation :

$$\lambda_L(T) = \lambda_L(0) \sqrt{\frac{1}{1-t^4}} \quad (\text{I. 8})$$

Avec $t = \frac{T}{T_C}$

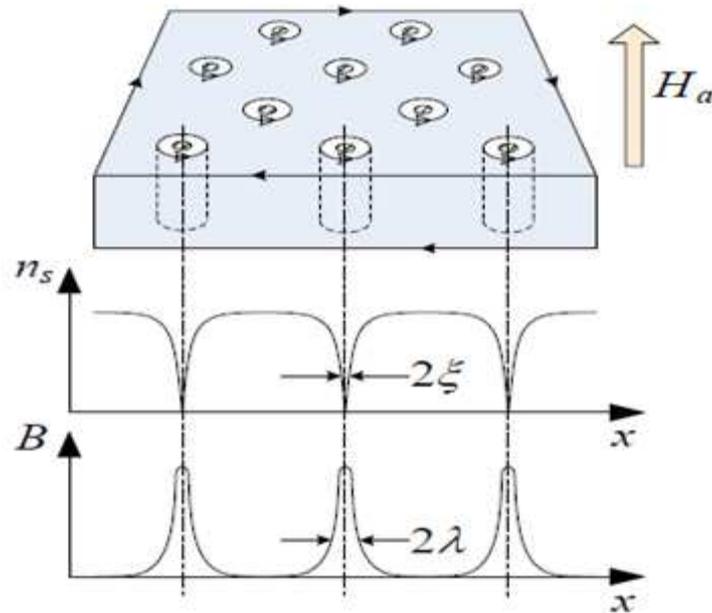


Figure I.16. Illustration du réseau de vortex, de la longueur de cohérence ξ et de l'épaisseur de pénétration de London λ pour un supraconducteur dans l'état mixte.

I.7.2. Longueur de cohérence

L'état supraconducteur est aussi distingué par la longueur de cohérence ξ , elle définit la variation spatiale de l'état supraconducteur. ξ est la zone qui sépare la zone normale de la zone supraconductrice. Le cœur normal du vortex a un rayon ξ .

Les propriétés thermiques à la transition supraconducteur normal sont les mêmes en champ nul. La différence entre les deux types est liée aux propriétés de pénétration du champ magnétique dans le métal supraconducteur, plus précisément à la valeur comparée de la longueur de pénétration λ et de la longueur de cohérence ξ :

- Si $\xi > \lambda$, le supraconducteur sera de type I :

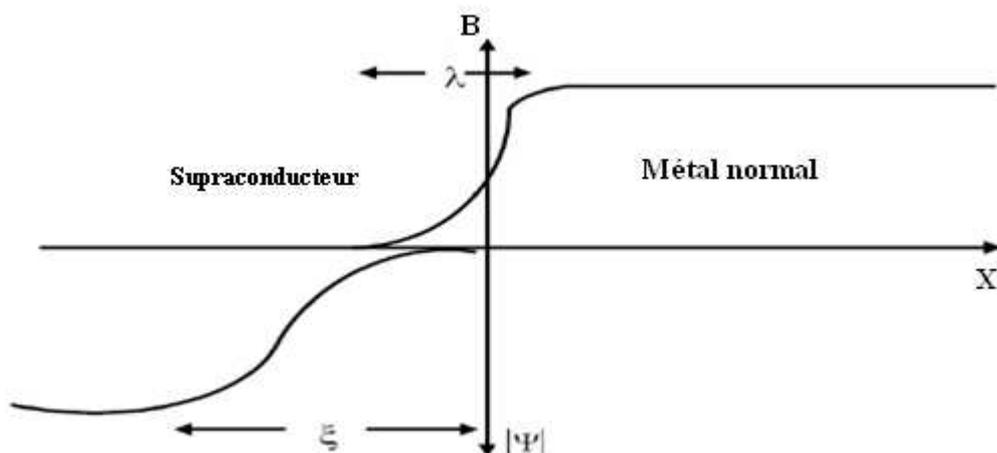


Figure I.17. Variation du champ magnétique et du $|\Psi|$ à l'interface supraconducteur-normal pour un supraconducteur de type I, ($\xi > \lambda$)

Où $|\Psi|$ est le paramètre d'ordre. Ψ est la quantité qui caractérise l'état d'un système physique au cours d'une transition de phase.

Dans notre cas (supraconductivité), les paramètres d'ordre correspondent à des brisures de système internes.

- Si $\xi < \lambda$, le supraconducteur sera de type II :

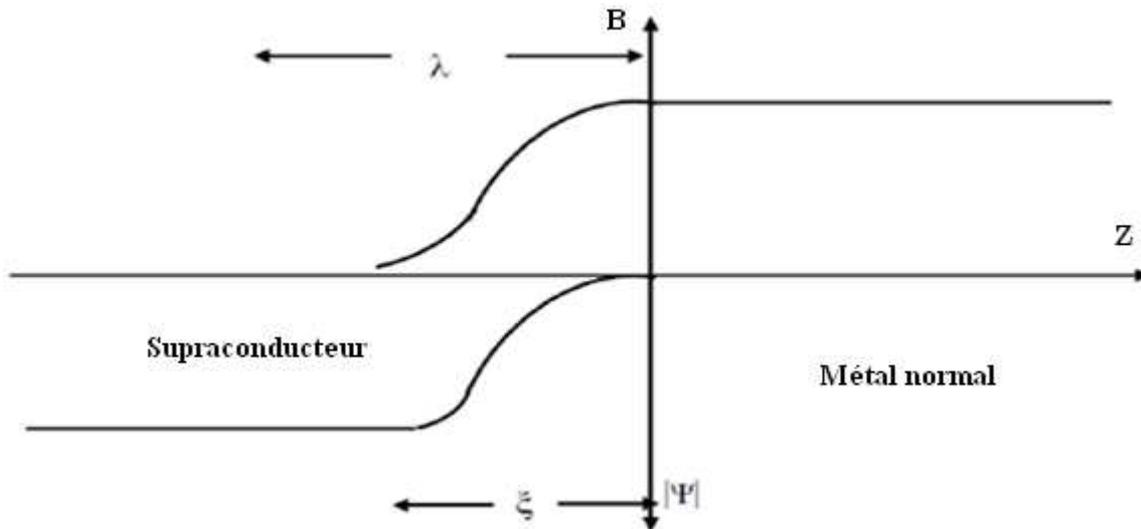


Figure I.18. Variation de B et $|\Psi|$ à l'interface supraconducteur-normal pour un supraconducteur de type II, ($\xi < \lambda$)

Dans le cas du type I, $\xi > \lambda$, le paramètre d'ordre ne peut pas s'annuler sur la longueur de pénétration du champ. Donc celui-ci ne pénétrera pas en volume. Le volume reste supraconducteur jusqu'à H_c .

Dans le cas du type II, $\xi < \lambda$, le paramètre d'ordre peut s'annuler sur une longueur de pénétration du champ. Il peut donc y avoir inclusion d'un volume de phase normale dans la phase supraconductrice.

Les cylindres de phase normale inclus dans le volume supraconducteur s'appellent des lignes de vortex, par analogie avec les lignes de tourbillon des suprafluides.

Le cœur de la ligne de vortex, de taille $\approx \xi$, est dans l'état normal et contient la plus grande partie du flux, mais le champ s'étend dans la région supraconductrice sur une distance $\approx \lambda$.

Chaque ligne de vortex contient un quantum de flux. L'ensemble possède la symétrie de révolution autour de H .

I.8. Modélisation des matériaux supraconducteurs

I.8.1 Introduction

Les modèles présentés ci-après sont des modèles macroscopiques. Ils proposent en fait des relations entre la densité de courant J et le champ électrique E , la relation entre l'induction B et le champ magnétique H ayant été choisie linéaire et amagnétique. Ces relations, bien que reflétant la dissipation due au déplacement des vortex, oublient donc leur existence et considèrent un matériau où le champ magnétique pénètre de façon homogène et continue et non plus sous forme de vortex.

I.8.2. Relation E(J)

À partir de mesures courant-tension sur un échantillon, on peut déduire la caractéristique expérimentale $V(I)$ qui se met habituellement sous la forme d'une loi de puissance. Si l'on admet que cette caractéristique reste valable pour la densité de courant, la relation $E(J)$ s'écrit :

$$E = E_c \left(\frac{J}{J_c} \right)^n \quad (\text{I. 9})$$

Dans l'équation (I.9), l'exposant « n » dépend non seulement du matériau, mais aussi de la température et de l'induction. Plus l'exposant n est élevé, et plus la transition est rapide (figure I.19). Le paramètre « n » est parfois considéré comme un indicateur de la qualité d'un ruban supraconducteur; plus il est élevé et plus le matériau est d'excellente qualité. En effet, dans ce cas, le courant critique peut alors être déterminé sans ambiguïté dès lors qu'une tension apparaît aux bornes de l'échantillon.

La relation (I.9) peut être résolue au moyen d'un programme informatique afin de déterminer les grandeurs électromagnétiques. Analytiquement, elle devient cependant difficilement utilisable, sauf dans le cas où « n » est grand. Alors, ce paramètre peut être considéré comme infini. Cette hypothèse conduit au modèle de l'état critique que nous développons ci-après.

I.8.3. Modèle de l'état critique et modèle de Bean

I.8.3.a. Modèle de l'état critique

Le modèle de l'état critique stipule qu'à température donnée la densité de courant dans un supraconducteur est, soit nulle, soit égale à la densité de courant critique J_c . D'un point de vue mathématique, dans les équations de Maxwell, cela se traduit par :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{B} = \pm \mu_0 \vec{J}_c \quad \text{ou} \quad \overrightarrow{\text{rot}} \vec{B} = 0 \quad (\text{I. 10})$$

$$\|\text{rot } H\| = \|J\| = -J_c$$

L'hypothèse de ce modèle est que le coefficient n est considéré comme infini. Ainsi, la caractéristique $E(J)$, représentée à la figure I.19 se traduit mathématiquement par l'expression suivante :

$$J = J_c (|B|) \frac{E}{|E|} \quad (\text{I. 11})$$

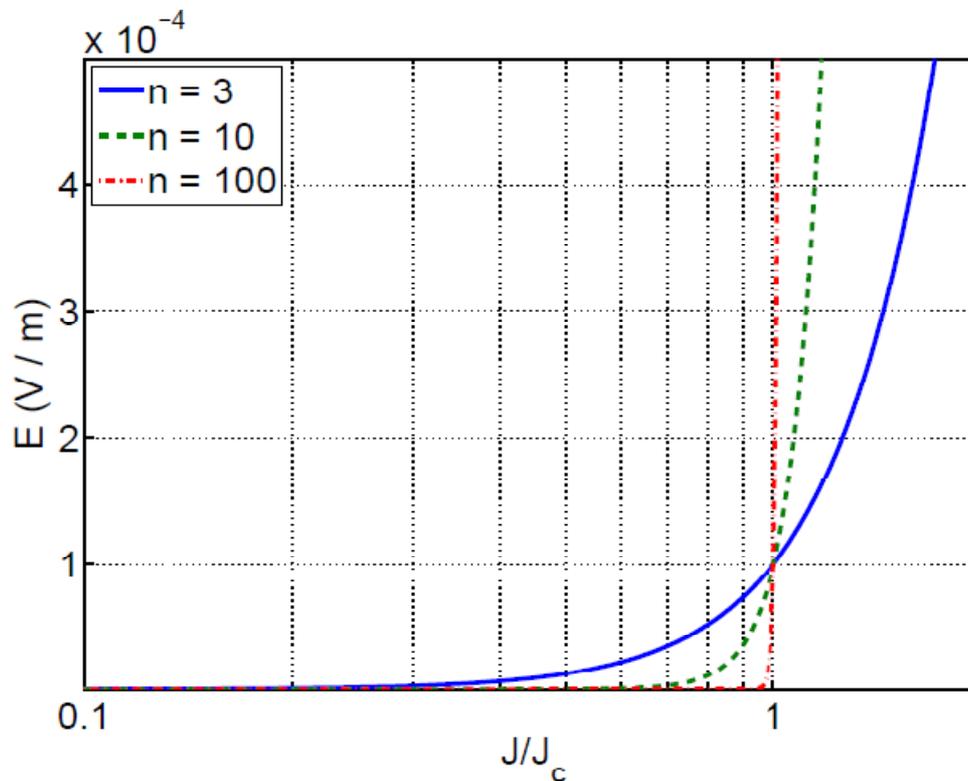


Figure I.19. Caractéristique $E(j)$ d'un supraconducteur

Par conséquent, la densité de courant J ne peut prendre que trois valeurs distinctes : $-J_c$, 0 ou $+J_c$. Néanmoins, dans ce modèle, la valeur de J_c peut-être dépendante de l'induction B .

. I.8.3.b. Modèle de Bean

Le modèle de Bean [17]-[18], suppose, en plus que la densité de courant critique est indépendante de la valeur de l'induction magnétique B (Figure I.20).

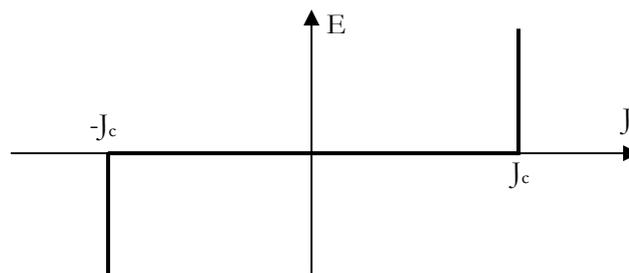


Figure I.20. Caractéristique $E(j)$ d'un supraconducteur, modèle de l'état critique.

Ce modèle à l'avantage d'être assez simple mathématiquement et permet pour des géométries simples, d'avoir des expressions analytiques et d'étudier les grandeurs importantes pour les pertes A.C. par exemple. Cependant, la discontinuité de ce modèle le rend peu utilisable pour des développements numériques ; de plus, il ne reflète pas toujours de façon satisfaisante le comportement des supraconducteurs.

I.8.4. Modèle de loi de puissance

C'est un modèle qui modélise bien le comportement des supraconducteurs à haut température critique (HTC) autour de J_c [19].

$$\vec{E}(\vec{J}) = \frac{E_c}{J_c} \left[\frac{J}{J_c} \right]^{n-1} \vec{J} \quad (\text{I.12})$$

$$\vec{B}(\vec{H}) = \mu_0 \vec{H}$$

Les paramètres de variation de cette loi sont la densité de courant critique, J_c et l'exposant, « n ». Avec ce modèle on peut faire varier les courbes $E(J)$ de sorte qu'on peut modéliser un conducteur normal pour $n = 1$ (loi de comportement linéaire) jusqu'à l'obtention d'une courbe raide comme dans le cas du modèle de l'état critique pour un $n > 100$ [20].

I.8.5. Modèle de KIM

Le modèle de Bean ainsi que la loi en puissance considèrent le matériau supraconducteur isotrope et isotherme. Ils ne tiennent pas compte de l'échauffement éventuel du conducteur sous l'effet des pertes qui entraînerait une diminution du courant critique. Dans le modèle de Bean, la densité de courant critique est supposée constante quelque soit le champ magnétique extérieur. Dans la réalité la densité de courant dépend fortement de son orientation par rapport au champ et de l'induction magnétique, B . Une expression de $J_c(B)$ dans le cas isotrope a été donnée par Kim et al.

$$J_c(|B|) = \frac{J_{c0} B_0}{|B| + B_0} \quad (\text{I.13})$$

C'est le modèle le plus utilisé pour la modélisation de la dépendance de la densité de courant critique avec l'induction magnétique [21].

I.8.6. Résumé des équations

Les équations décrivant le comportement électromagnétique d'un supraconducteur sont résumées dans le tableau I.2 suivant :

Tableau 0.3. Équations décrivant le comportement électromagnétique d'un matériau supraconducteur

Equations de Maxwell	$\overrightarrow{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \quad \overrightarrow{rot} \vec{H} = \vec{J}; \quad div \vec{B} = 0$
Milieu non magnétique	$\vec{B}(\vec{H}) = \mu_0 \vec{H}$
Relation E(J)	$E = E_c \left(\frac{J}{J_c} \right)^n$
Modèle de l'état critique	$J=0 \quad \text{ou bien} \quad J = \pm J_c$ $\overrightarrow{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \quad \text{et} \quad \overrightarrow{rot} \vec{B} = \mu_0 J_c(B) \frac{\vec{E}}{ E }$
Modèle de Bean	$J_c \text{ indépendant de } \vec{B} $ $\overrightarrow{rot}(\vec{H}) = \pm J_c \quad \text{OU} \quad 0$

I.9. Applications des matériaux supraconducteurs

La spectroscopie du solide et l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) sont actuellement les seules applications industrielles [22]. Cependant, les excellentes propriétés en transport de courant, notamment grâce à des densités de courant de plusieurs kA/mm², en font un matériau très prisé pour les applications de pointe en physique fondamentale et en électrotechnique. Le principal frein restant la cryogénie, celle-ci tend à s'améliorer grâce aux progrès de fabrication des HTS et des systèmes de refroidissement comme les tubes à gaz pulsé.

I.9.1. Physique fondamentale

Beaucoup de systèmes nécessitant la création de champs magnétiques intenses utilisent des supraconducteurs. Les grands instruments pour la recherche, comme le Large Hadron Collider (LHC) de Genève ou le projet « International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) » de Cadarache, utilisent les supraconducteurs comme aimants d'accélération, de guidage et de confinement du plasma.

I.9.1.a Composants HF (couches minces)

Ces dernières années, la maîtrise des procédés de fabrication des couches minces supraconductrices à base des supraconducteurs haute température HTC, a permis la commercialisation rapide de nombreux composants dans le domaine des communications.

L'utilisation de ces couches dans la gamme de température comprise entre 30 et 60 K (compatible avec des cryogénérateurs compacts et performants), permet de gagner un facteur supérieur à 103 sur la résistance de surface du cuivre. Cela a rendu possible la conception de dispositifs divers : oscillateurs, lignes à retard, filtres, etc. offrant des performances largement supérieures aux composants classiques.

Ci dessous une réalisation de circuit de filtrage ultra sélectif pour les communications dans la bande de 2GHz :



Figure I.21. Boîtier contenant 8 filtres YbaCuO, et intégration dans un châssis intégrant le cryogénérateur 30 K.

I.9.2. Applications en électrotechnique

I. 9. 2. a. Machines tournantes

L'utilisation des supraconducteurs dans les cryoalternateurs est à l'origine de nombreux prototypes [23]. Le remplacement des bobinages en cuivre par des enroulements supraconducteurs permet un gain de masse grâce aux grandes densités de courant du fil et à la disparition du circuit magnétique. Le fort couple massique de ces machines en fait une application intéressante pour les systèmes embarqués.

Des moteurs d'une puissance nominale de 5 MW ont été testés avec succès. En projet aux Etats Unis (pour 2006) construction d'un moteur de 36 MW, 120 rpm, 70 Tonnes. L'intérêt principal est la réduction en volume et en poids, leur stabilité et leur efficacité (coût réduit de fonctionnement) pour une valeur d'investissement comparable.

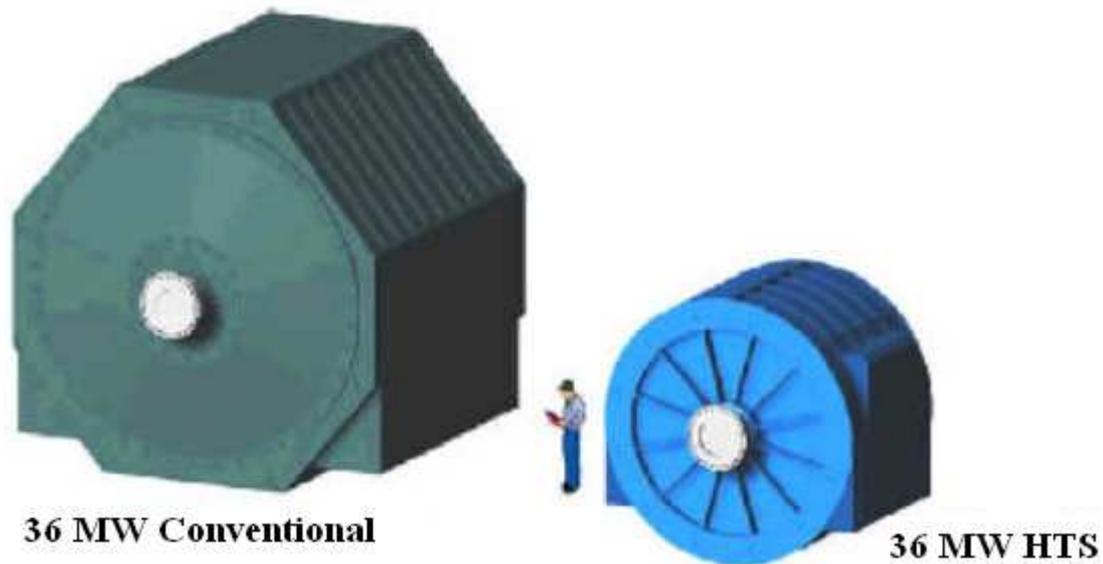


Figure I.22. Comparaison entre le moteur conventionnelle et le moteur supraconducteur

I. 9. 2. b. Câbles de transport d'énergie

Les supraconducteurs créant nettement moins de pertes que les câbles classiques, ils sont très intéressants pour les applications de transport d'énergie. Cependant le problème de la cryogénie sur de grandes longueurs peut s'avérer difficile à résoudre. Une solution consiste à faire circuler un fluide cryogénique dans un tube au centre du câble et à enrouler le fil supraconducteur autour. Avec l'accroissement de la demande en énergie, certaines lignes électriques nécessitent d'être renforcées. Cependant l'espace nécessaire à la pose de nouveaux câbles n'est pas toujours suffisant, dans ce cas les supraconducteurs offrent une solution intéressante.

I. 9. 2. c. Stockage de l'énergie électrique

Le principal inconvénient de l'énergie électrique est qu'elle est difficilement stockable. Le Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) [24] permet de stocker de l'énergie sous forme magnétique, cette dernière pouvant être restituée avec un très bon rendement. Son fonctionnement consiste à court-circuiter une bobine supraconductrice, permettant ainsi au courant de se reboucler indéfiniment. Le SMES peut servir comme réservoir d'énergie pour réguler les réseaux électriques, il peut également être utilisé comme source d'énergie impulsionnelle pour les lanceurs électromagnétiques ou le formage magnétique.

I. 9. 2. d. Limitation de courant

Le limiteur supraconducteur permet de protéger le réseau électrique des courants de court-circuit en agissant comme un régulateur naturel de courant. C'est le sujet de notre étude, son fonctionnement est détaillé dans les prochains chapitres.

I. 10. Conclusion

Dans se premier chapitre on a exposé un bref historique de la supraconductivité, les principaux phénomènes caractérisant les matériaux supraconducteurs et leurs applications, ainsi que les principale théories phénoménologiques qui ont tenté d'expliques le phénomène de supraconductivité, notamment le modèle d'état critique, et le modèle de Bean qui à été brièvement exposée à la fin de ce chapitre.

Il est note que malgré toutes les tentatives pour l'interprétation du phénomène de supraconductivité il subsiste toujours des points d'ombres, surtout avec l'avènement des supraconducteurs à haute température critiques (HTC), qui ont remis en question la théorie microscopique de (BCS), relançons ainsi le débat sur les origines microscopiques de la supraconductivité.

CHAPITRE II

SUPRACONDUCTIVITE DANS LES MATERIAUX A HAUTE TEMPERATURE CRITIQUE

II.1. Introduction

Les supraconducteurs les plus intéressants d'être utilisés dans une application industrielle sont les supraconducteurs à haute température critique. Du fait de leur espèce, ils sont fortement marqués par leur comportement plus complexe que ceux à basse température critique, en particulier à cause de leur diagramme de phase complexe et plus particulièrement du mouvement des vortex. La présente étude est focalisée uniquement sur les supraconducteurs à haute température critique car ils sont prometteurs d'être employés pour des applications industrielles au cours des années à venir.

Nous présenterons dans ce chapitre brièvement les deux grandes familles de supraconducteurs à haute température critique. Dans un premier temps nous parlerons de l'intérêt du supraconducteur à haute température critique, nous présenterons ensuite l'architecture et les différents procédés de fabrication des supraconducteurs formés de couches minces appelés en anglais coated conductors.

II. 2. Supraconducteur à haute température critique

Le principal inconvénient des supraconducteurs à basse température critique comme son nom l'indique, est le fonctionnement à très basse température allant jusqu'à 4 K, et l'équipement cryogénique qu'ils impliquent. La découverte des supraconducteurs haute température critique a relancé l'intérêt de ces matériaux car il devient possible d'utiliser l'azote liquide comme dispositif cryogénique dont la température de liquéfaction est de 77K. Depuis leurs découvertes, en 1986 les céramiques supraconductrices du deuxième espèce constituent une bonne base pour le développement des applications supraconductrices.

Vu donc leur intérêt du point de vue application, deux grandes familles apparaissent comme les plus prometteuses, ceux à base d'Yttrium (YBaCuO) et ceux à base de Bismuth (BiSrCaCuO). Notre étude sur le comportement des matériaux supraconducteurs à haute température critique utilisé pour la limitation de courant de défaut a été menée essentiellement sur

ces deux composés ; Leur structure cristallographique est très anisotrope. La caractéristique commune de ces composés est la présence du plan cristallin CuO_2 , qui est le siège de la supraconductivité.

L'intérêt du composé $YBaCuO$ réside principalement dans sa bonne tenue sous des champs magnétiques élevés (~ 7 T) à 77 K, due à une forte énergie d'ancrage magnétique bien supérieure à celle des oxydes supraconducteurs à base de bismuth ($Bi2212$ et $Bi2223$).

II. 2.1. Supraconducteur $YBaCuO$

Comme tous les composés à base d'oxyde de cuivre, l' $YBaCuO$ doit ses caractéristiques supraconductrices à la présence du plan cristallin CuO_2 . Sa structure cristallographique est donc très anisotrope et ses propriétés physiques varient fortement selon la direction considérée. Ainsi le siège de la supraconductivité CuO_2 est appelé plan ab et l'axe perpendiculaire à ce plan et nommé axe c (Figure II.1).

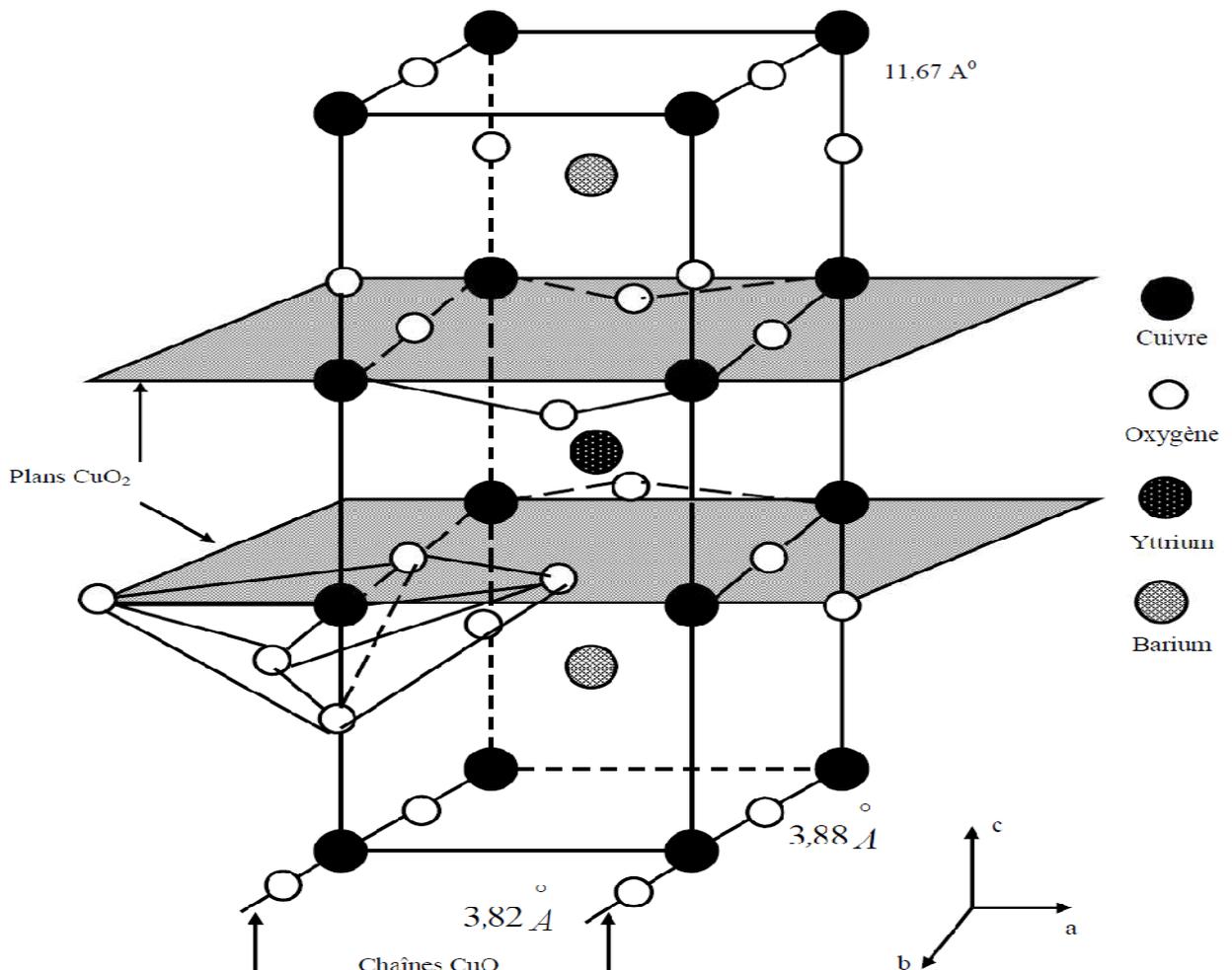


Figure II.1. Structure cristallographique de l' $YBaCuO$

Les céramiques massives obtenues par frittage de poudre présentent des caractéristiques de connexions électriques entre grains adjacents très médiocres. Ces joints de grains agissent directement sur la densité de courant critique. A l'inverse, les films minces d'YBaCuO ayant de bonnes qualités épitaxiales possèdent des densités de courant J_c , importantes sous champ magnétique élevés, ceci grâce à l'alignement quasi parfait des joints de grain [25] [26]. Le composé $YBa_2Cu_3O_7$ est un conducteur alors que le composé $YBa_2Cu_3O_6$ est un semi-conducteur antiferromagnétique. Le composé $YBa_2Cu_3O_7$ perd de l'oxygène lorsqu'il est porté à des températures supérieures à 400 C° .

Le dopage en oxygène, pour atteindre la bonne stoechiométrie, peut nécessiter alors des jours de recuit en fonction de la taille des échantillons car l'oxygène doit pénétrer dans le matériau par diffusion en sautant de lacunes en lacunes. Durant la solidification de l'YBaCuO deux phases principales sont présentes [27]: la phase dite Y-123 ($Y_1Ba_2Cu_3O_7$) supraconductrice et la phase Y-211 ($Y_2Ba_1Cu_1O_5$, dite "phase verte") non supraconductrice.

La phase verte est utile dans l'élaboration des échantillons car lors de la solidification, elle se présente sous forme d'inclusions qui introduiront des centres de piégeage pour les vortex. L'ajout de cette phase permet d'augmenter de façon notable le champ d'irréversibilité ainsi que la densité de courant critique des échantillons élaborés.

Le diagramme de phase de l'YBaCuO est relativement simple, ce qui permet une élaboration "simple". Par contre ce composé est sensible aux agents corrosifs, en particulier H_2O et CO_2 . La résistivité de l'YBaCuO en fonction de la température sont représentés ci-dessous (Figure II.2).

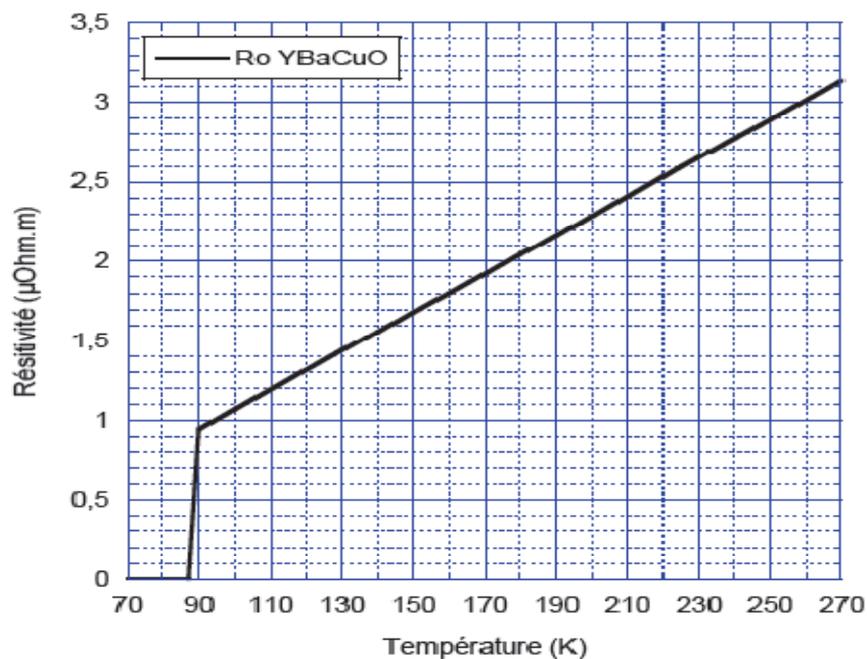


Figure II.2. Résistivité de l'YBaCuO en fonction de la température [28].

Il apparaît sur la courbe de résistivité de la l'YBaCuO (Figure II.2), qu'au delà de sa température critique celui-ci est un mauvais conducteur électrique ($\rho_{\text{YBaCuO}} > 100 \times \rho_{\text{Cu}}$). Ainsi dans son état supraconducteur, la résistivité nulle de l'YBaCuO n'entraîne pas de perte, le HTS est donc totalement transparent (comme court-circuit), pour le fonctionnement normal du réseau électrique. Cependant, dans son état normal, il est caractérisé par une importante résistance élevée permettant de limiter le courant.

II. 2.2. Supraconducteur à base de bismuth

Il existe principalement deux composés dans cette famille: le $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ (ou Bi2212) ayant une température critique proche de 85 K ($85 \text{ K} < T_c < 90 \text{ K}$), découvert en 1987 [29] et le $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (ou Bi2223) avec une température critique d'environ 110 K [30]. Leurs mailles respectives sont représentées sur la Figure II.3. Ces composés présentent une grande inertie par rapport aux agents corrosifs comme l'eau H_2O et le CO_2 .

En revanche les phases au bismuth sont difficiles à synthétiser à cause de la complexité de leur diagramme de phase [31]. Les deux composés supraconducteurs à base de bismuth sont utilisés l'un et l'autre en fonction de l'application recherchée. Le Bi2212 est le plus simple à synthétiser. Cependant, ces performances ($J_c(B,T)$) sont moins bonnes que celles du Bi2223 sauf à très basse température (4,2 K) où il présente de meilleures densités de courant critique sous forte induction.

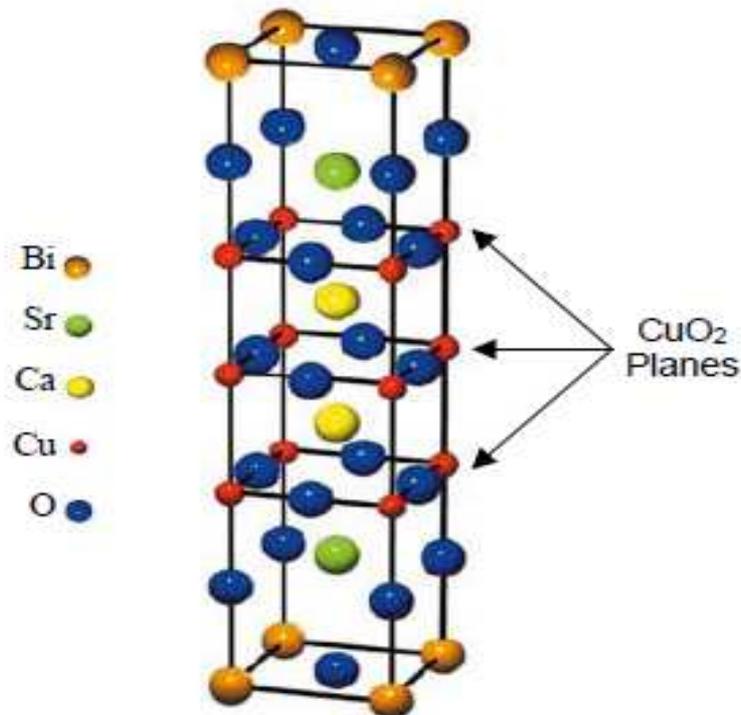


Figure II.3. Structure cristallographique de bismuth Bi2223

La structure quasi-bidimensionnelle des supraconducteurs à base de bismuth a pour effet d'induire une anisotropie des propriétés supraconductrices. La conductivité électrique et la densité de courant sont très grandes le long des plans ab alors qu'elles sont beaucoup plus faibles dans la direction perpendiculaire. Les composés au bismuth ont une structure lamellaire constituée de feuillets d'oxydes de bismuth ou de thallium peu conducteurs, auxquels sont juxtaposées des couches cuivre-oxygène supraconductrices qui peuvent facilement glisser les unes sur les autres, ce qui permet une mise en forme du matériau par compression.

II. 2. 3. Propriétés

Les principales caractéristiques de l'YBaCuO et du Bi2223 sont présentées ci dessous. Les principales grandeurs physiques du matériau YBaCuO sont présentées dans le Tableau II.1.

Tableau II.1. Principales grandeurs caractéristiques pour l'YBaCuO

	λ (nm) à 0 K	ξ (nm) à 0 K	H_{c1} (T) à 77 K	H_{c2} (T) à 77 K	ρ ($\mu \Omega$ cm) à 100 K	J_c (A/mm ²) à 77 K et 0 T
Plan ab	150	15	25×10^{-3}	150	100	10^4
Axe c	600	4	90×10^{-3}	40	10000	60

Les propriétés supraconductrices en champ fort et à basse température (vers les 20 K) des composés au bismuth sont bonnes. Le tableau ci-dessous résume les principales grandeurs physiques pour le Bi2223.

Tableau II.2. Principales grandeurs caractéristiques du Bi2223

	λ (nm) à 0 K	ξ (nm) à 0 K	H_{c1} (T) à 77 K	H_{c2} (T) à 77 K	ρ ($\mu \Omega$ cm) à 300 K	J_c (A/mm ²) à 77 K et 0 T
Plan ab	200	13	Quelques mT	250	200	50
Axe C	1000	2		30	2000	10

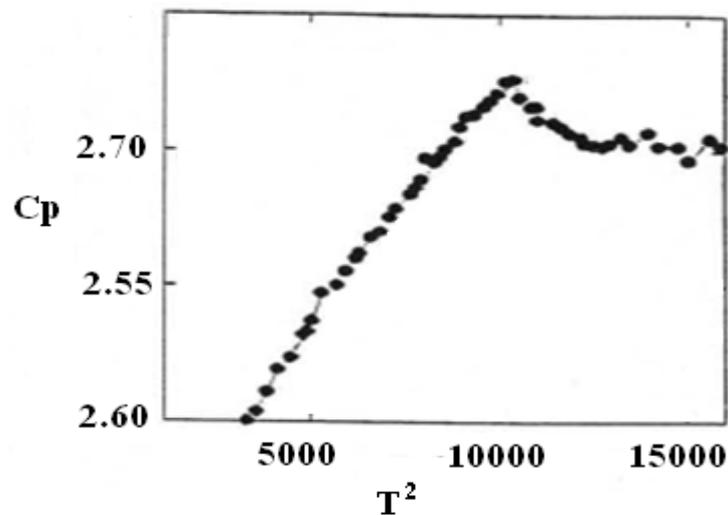
Le Tableau II.3 présente les principales grandeurs thermophysiques pour l'YBaCuO et le Bi2223

Tableau II. 3. Propriétés thermophysiques de l'YBaCuO et du Bismuth

	T_c (T)	C_p (77 K) ($J.m^{-3}.k^{-1}$)	Conductivité (77 K) ($W.m^{-1}.k^{-1}$)	
			K_{ab}	K_c
YBaCuO	93	10^6	2 à 13	0.3
Bi2223	110	$1.9 \cdot 10^6$	≈ 2	

La chaleur spécifique est donnée à 77 K puisqu'il s'agit de la température usuelle d'utilisation des oxydes supraconducteurs. Travailler à plus basse température demande des moyens cryogéniques plus sophistiqués.

Lorsqu'une résistance apparaît dans un supraconducteur transportant du courant (par exemple lors de sa transition), celui-ci s'échauffe. Puisque la chaleur spécifique varie en fonction de la température T . La figure II.4 montre l'évolution de la chaleur spécifique en fonction de la température du matériau Bi2223. [32] :

**Figure II.4.** Chaleur spécifique en fonction de la température du Bi2223

II.3. Les couches minces supraconductrices (coated conductors)

Les applications industrielles ont besoin de supraconducteurs souples, résistant aux efforts mécaniques et flexibles pour être bobinés. Les couches conductrices (CC), sont constituées d'un substrat métallique souple sur lequel une ou plusieurs couches céramiques texturées sont déposées, suivies d'un film supraconducteur et d'un shunt métallique de protection (Figure II.5). Un supraconducteur en couche mince est élaboré par dépôt sur un ensemble composé d'un substrat et de plusieurs couches tampons, dans des conditions thermodynamiques précises. Le substrat et la couche tampon doivent être adaptés afin de ne pas induire de désorientation. Le dépôt se fait selon l'axe c , perpendiculairement au substrat.

Chaque couche composant un CC possède une ou plusieurs fonctions bien définies et fait l'objet d'études très poussées sur ces propriétés physiques.

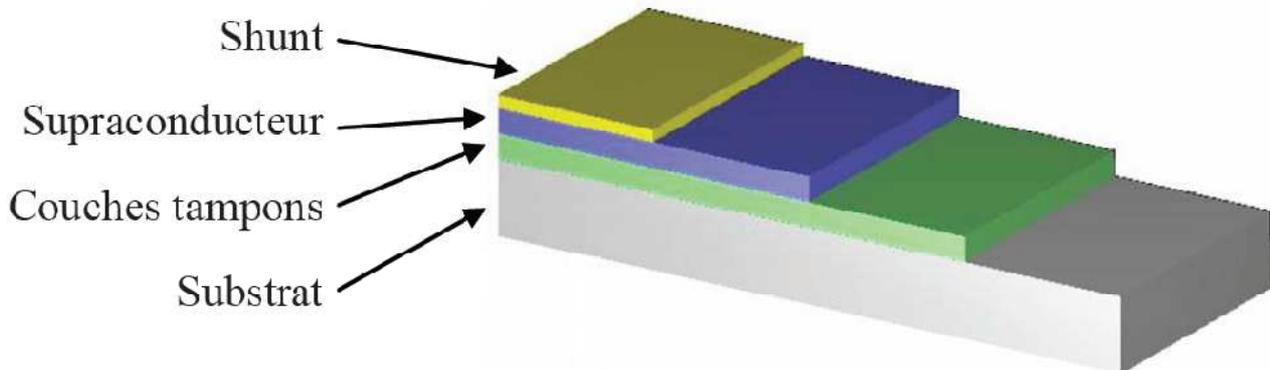


Figure II. 5. Architecture générale des couches minces

II.3.1. Caractéristiques du substrat

Le substrat doit être un métal inerte, de préférence non-magnétique pour les applications AC et doit avoir un coefficient de dilatation thermique semblable à celui de l'YBaCuO. Il doit être flexible et doit posséder un bon état de surface, enfin il ne doit pas s'oxyder lors du dépôt. L'épaisseur du substrat est de l'ordre de 100 μm , les alliages utilisés sont à base de Nickel (NiCr, Inconel, Hastelloy, Constantan).

II.3.2. Caractéristiques des couches tampons

Le dépôt de la couche supraconductrice sur le substrat métallique nécessite une ou plusieurs couches tampons intermédiaires. 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 du matériau supraconducteur.

Enfin les couches tampons permettent de texturer la couche supraconductrice lorsque le substrat ne possède aucune orientation. Pour assurer une forte densité de courant critique la couche tampon doit fournir une texture bi-axiale. L'épaisseur de ces couches varie entre 0,5 μm et 3 μm , elles sont constituées d'YSZ, CeO, MgO ou de LZO.

II.3.3. Caractéristiques du shunt

Les couches conductrices (coated conductors), sont recouvertes d'un shunt métallique constituant une barrière chimique de protection contre les polluants extérieurs comme l'eau. De part sa faible résistance électrique avec le supraconducteur, il protège électriquement le supraconducteur en cas de transition et facilite également l'injection du courant. Le shunt à une épaisseur moyenne de 200 nm, il est composé de métaux nobles comme l'Or ou l'Argent.

II.3.4. Fabrication des conducteurs par dépôt de couche mince

La fabrication des couches minces consiste à faire croître une couche supraconductrice sur un support à texture biaxiale afin de lui transférer cette texture et assurer de bonnes propriétés supraconductrices (croissance cristalline).

Il est possible d'utiliser un substrat texturé dont la texture sera transmise à la couche supraconductrice par une couche tampon ou bien d'utiliser un substrat polycristallin sur lequel sera déposée une couche tampon à texturer.

II.3.5. Dépôt sur substrat texturé

En reproduisant l'orientation de surface d'un substrat texturé il est possible d'obtenir de bonnes propriétés supraconductrices. Le procédé RABiTS (Rolling Assisted Biaxially Textured Substrate) (Figure II.6) développée sur du Nickel [33], utilise une déformation par laminage du substrat, suivi d'un recuit permettant de créer une texture cubique. Cette dernière se transmettra ensuite dans les couches tampons puis supraconductrices lors de leurs croissances cristallines, à condition que les paramètres de maille de chaque couche soit proches. Des alliages comme le NiCr [34] ont permis de réaliser de grandes longueurs possédant une bonne texturation.

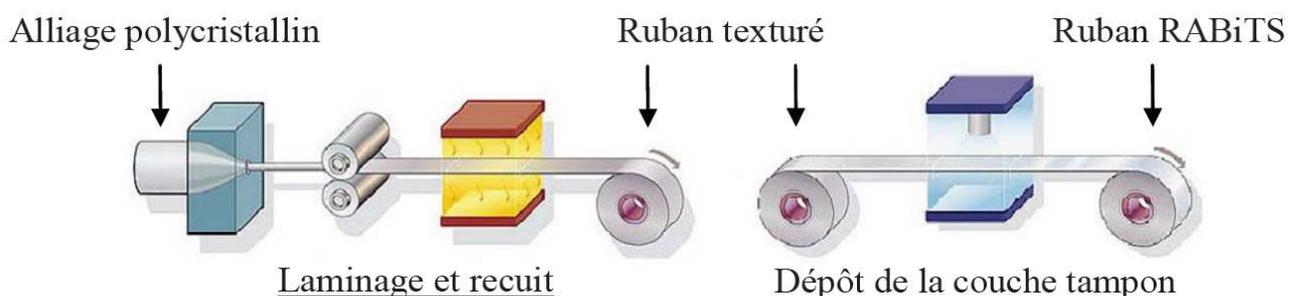


Figure II.6. Procédé RABiTS

Les couches tampons sont ensuite déposées par voie chimique, deux méthodes sont utilisées.

- Dépôt par CVD [35] ou MOCVD [36] (Metal organic Chemical Vapor Deposition) qui utilise des précurseurs volatiles : le supraconducteur est déposé juste après la réaction chimique à la surface du substrat.
- Dépôt par pyrolyse, Spray pyrolyse [37] et Sol-Gel [38], cette méthode est divisée en deux étapes. Dans un premier temps un film précurseur est déposé sur le substrat, puis vient l'étape de recristallisation pendant laquelle le film supraconducteur se forme par une réaction à l'état solide.

II.3.6. Dépôt sur substrat polycristallin

Une couche tampon est déposée par méthode physique sur un substrat polycristallin, celle-ci étant texturée pendant ou après le processus de dépôt. L'avantage de cette méthode est qu'elle permet un large choix de substrats, la seule exigence étant le faible degré d'oxydation.

Trois procédés de fabrication sont utilisés.

II.3.6.a. Dépôt par faisceau d'ions

IBAD est le premier procédé de fabrication des CC [39]. Il permet l'orientation biaxiale d'une couche tampon d'YSZ ou de MgO déposé sur un substrat non texturé. Deux canons à ions sont nécessaires, un premier est utilisé pour l'ablation de la cible du matériau à déposer tandis qu'un second assiste le processus d'élaboration en bombardant directement le substrat pendant le dépôt. Ce bombardement induit la croissance d'une couche bi-texturée, par un phénomène de canalisation des ions qui est combiné à une ablation des cristallites mal orientés. L'inconvénient de cette méthode est le coût élevé et le temps de fabrication relativement long (0,3 nm/s).

II.3.6.b. Dépôt par pulvérisation cathodique

MBS [40] réalise une texture bi-axiale de la couche tampon dans une enceinte de dépôt par pulvérisation cathodique RF, sans source d'ions supplémentaire.

II.3.6.c. Dépôt d'ions par substrat incliné

ISD [41] est le procédé le plus simple d'utilisation. La texture bi-axiale de la couche tampon est réalisée par inclinaison du substrat à un angle donné lors du dépôt. La croissance de cette couche subit un phénomène d'ombre et se fait selon l'axe 110 orienté préférentiellement dans la direction de l'ablation. Le supraconducteur est souvent déposé par procédé physique opérant à basse pression comme l'ablation laser PLD (Pulsed Laser Deposition), la pulvérisation réactive MS (Magetron Sputtering) ou l'évaporation thermique TE (Thermal Evaporation).

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté, les principales caractéristiques des supraconducteurs à haute température critique, en se concentrant sur les deux familles les plus prometteuses, ceux à base d'yttrium (YBaCuO), et à base de bismuth (BiSrCaCuO). Une étude comparative entre les deux familles sera faite, où nous avons mentionné leurs formes cristallographiques, leur température critique, ainsi que leur mode de fabrication.

Ensuite les caractéristiques de différentes couches (shunt, substrat et tampons) ont été mentionnées. Dans la dernière partie nous avons rappelé les différentes techniques de fabrication des couches minces.

CHAPITRE III

LIMITATION DE COURANT

III.1. Introduction

Un réseau électrique doit non seulement être dimensionné pour supporter son régime nominal (courant nominal I_n et tension nominale U_n), mais aussi, en cas de défaut, un régime de court-circuit (courant de court-circuit I_{cc} et tension nominale U_n). Le courant de court-circuit peut atteindre vingt à quarante fois le courant nominal de la ligne. Ainsi tout le réseau (disjoncteurs, câbles, transformateurs, jeux de barres..) doit être surdimensionné en dimension et mécaniquement afin de supporter de tels courants et de tels efforts électromécaniques (la puissance de court-circuit étant supérieure de vingt à quarante fois la puissance nominale). Il apparaît donc intéressant et nécessaire d'introduire sur le réseau des appareils capables de réduire le courant de court-circuit I_{cc} sans pour autant modifier le courant nominal ; ce sont des limiteurs de courant. Plusieurs types de limiteurs existent selon la spécificité de la ligne sur laquelle ils sont installés et les performances recherchées.

Nous présentons dans ce chapitre les limiteurs de courants de défaut et leur importance dans les réseaux électriques par les matériaux supraconducteurs. Dans la première partie, nous parlerons des intérêts apportés par ces systèmes puis nous présenterons leurs principes de fonctionnement et leurs avantages. Dans une deuxième partie de ce chapitre nous donnerons un état de l'art complet des différents types des limiteurs de courant de défaut supraconducteurs puis nous terminerons par un état comparatif entre les différentes solutions techniques.

III. 2. Présentation générale de la limitation du courant

Après une rapide présentation des réseaux et de leurs défauts, les solutions utilisées actuellement pour limiter le courant seront exposées.

III. 2.1. Défauts

De nombreux types de défauts existent selon le réseau de distribution (ligne aérienne ou câble souterrain), selon le lieu du défaut (sur la boucle de distribution, sur le tableau de distribution), selon les phases touchées (défaut monophasé entre une phase et la terre, défaut biphasé ou triphasé entre deux ou trois phases, défaut évolutif passant par exemple de monophasé à

triphasé), selon la durée du défaut (fugitif lorsqu'il est inférieur à 0,3 secondes, semi-permanent pour des défauts inférieurs à 15 secondes ou permanents). Beaucoup d'autres facteurs peuvent encore intervenir sur le type de défaut, comme le mode d'exploitation, le régime de neutre ou les performances des protections.

Les courants de court-circuit sont nuisibles pour le réseau, soit pour des raisons thermiques (fusion des conducteurs, dégradation des isolants), soit pour des raisons mécaniques à cause des déformations provoquées par les forces électromagnétiques, soit pour des raisons de coût car ils contribuent aux vieillissements prématurés du matériel. Il est donc nécessaire d'éliminer le défaut (en général en ouvrant le circuit) pour permettre l'auto-extinction du défaut ou une réparation si celui-ci persiste. De plus, il est nécessaire de limiter la valeur crête du courant de défaut (en particulier la première demi onde qui peut être très importante si le court-circuit est en pleine asymétrie) avant son élimination.

III. 2.2. Elimination des défauts

Lorsque deux fils se touchent, par exemple à cause du vent, (défaut fugitif car le contact entre les deux fils est inférieur à 0,3 s), il y a création d'un arc électrique entre les conducteurs. Il faut alors couper le courant pour éteindre l'arc et attendre quelques centaines de millisecondes afin de permettre à l'air de se désioniser sinon l'arc réapparaîtra lors de la remise sous tension du réseau. Ainsi, de manière générale, l'exploitant utilise des cycles **d'Ouverture- Fermeture** (cycles **OF**) des protections (disjoncteurs) afin de tenter de perturber le moins possible la distribution tout en favorisant l'auto-extinction du défaut avant d'être obligé d'ouvrir définitivement la ligne si celui-ci persiste. Ces cycles dépendent principalement du défaut (monophasé ou triphasé) et de son type.

Les cycles les plus répandus sont:

- **Pour les lignes aériennes:**

T=0 : Court-circuit

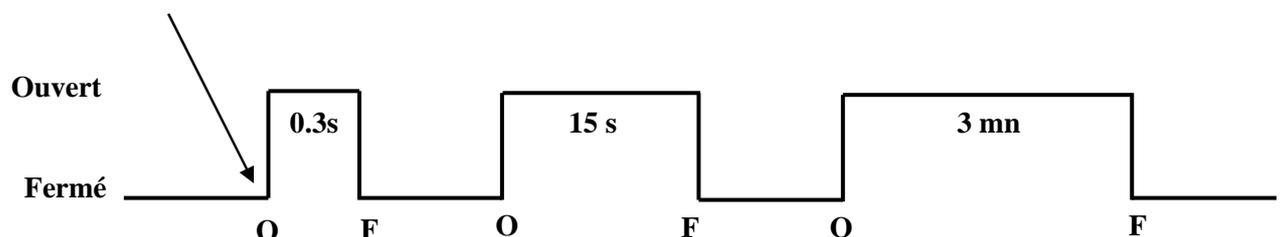


Figure III.1. Cycle OFOFOF pour une ligne aérienne [42].

Lors de l'apparition d'un défaut ouverture de la ligne pendant 0,3 s. Si le défaut persiste, nouvelle ouverture pendant 15 s. Enfin, ouverture pendant 3 mn (si nécessaire) avant une ouverture définitive du disjoncteur si le défaut ne s'est pas résorbé.

➤ **Pour les câbles souterrains :**

T=0 : Court-circuit

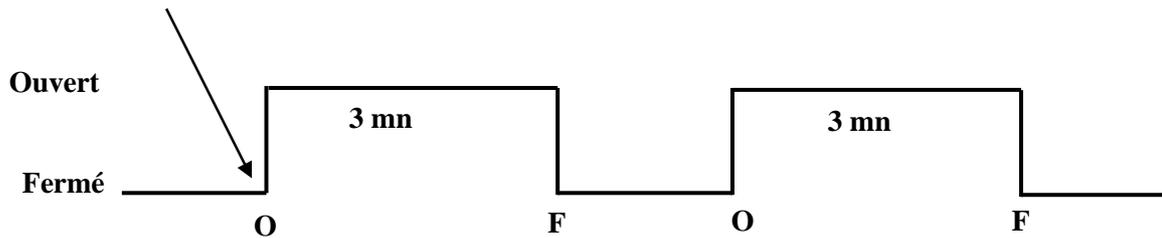


Figure III.2. Cycle OFOF pour une ligne souterraine [42].

Pour les câbles souterrains le schéma est différent car en général un défaut provient d'un endommagement accidentel de la ligne (i.e., pelleteuse lors de travaux). Dans ces installations l'ouverture des protections dure trois minutes. Si le défaut persiste la ligne est définitivement ouverte.

En insérant un limiteur de courant en série avec les appareils de protection, leur taille et leur temps de coupure peuvent alors être réduits grâce à la diminution du courant de court-circuit. Après la limitation, le limiteur devra être de nouveau opérationnel avant la fermeture des organes de protection. Il est donc souhaitable qu'un limiteur de courant puisse être réinséré dans le réseau après 0,3 secondes ; il est important qu'il puisse être inséré après 15 secondes, et il est vital qu'il puisse être inséré 3 mn après la limitation du défaut.

III. 2. 3. Courants de défaut

Le courant nominal I_n (ou courant assigné) est le courant maximal autorisé en régime permanent dans la ligne électrique alors que le courant de ligne I_l est le courant circulant réellement dans celle-ci. En revanche, le courant d'utilisation de la ligne est la valeur moyenne du courant de ligne. La puissance nominale S_n (ou puissance assignée) d'un réseau de niveau de tension entre phase U_n (et de niveau de tension phase- neutre V_n) est égale à :

$$S_n = \sqrt{3}U_n I_n \quad (\text{III.1})$$

Lors d'un court-circuit, le courant en régime de défaut établi est appelé courant de court-circuit I_{cc} . La puissance de court-circuit P_{CC} de la ligne pour un réseau de niveau de tension U_n est alors égale à :

$$P_{CC} = \sqrt{3}U_n I_{CC} \quad (\text{III.2})$$

III. 3. Principe général des limiteurs de courant

La limitation de courant utilise le principe d'une impédance variable en série avec le réseau. Celle-ci pouvant être purement résistive dans le cas des réseaux DC mais également inductive dans le cas des réseaux AC. Le courant est limité par une augmentation brutale de l'impédance. Cette augmentation doit être suffisamment rapide (<1 ms) pour limiter le premier pic de courant à une valeur seuil, nettement inférieure à la valeur théorique de court-circuit. Lors d'un défaut le limiteur est pratiquement soumis à la pleine tension du réseau, la puissance dissipée est donc très importante.

III. 3.1. Limiteurs de courant classiques

Peu de solutions classiques permettent de limiter naturellement un courant de défaut. Le fusible est la solution la plus utilisée en basse et moyenne tension, mais ils présentent l'inconvénient majeur de ne pas être réutilisables et de nécessiter une intervention humaine pour la remise sous tension du système. Par contre, l'utilisation de circuits auxiliaires commandés permet d'augmenter l'impédance apparente d'un système lors d'une montée de courant.

III.3.1.a. Réactance série

L'insertion permanente de réactances en série dans les réseaux permet de limiter les courants de défauts mais dégrade la stabilité transitoire et introduit des surtensions transitoires durant les séquences de refermeture des appareils de coupure. De plus, les chutes de tensions en régime nominal et l'encombrement n'étant pas négligeables, De fait, cette solution introduit une composante inductive qui peut être gênante pour certains types de réseau.

III.3.1.b. Limiteur à redresseurs commandés

Pour limiter ces inconvénients, il est préférable d'introduire des composants de commutation telle que les thyristors au moment du défaut. Un des dispositifs de référence est le transformateur série court-circuité par des thyristors [43] (Figure III.3). Lorsque les thyristors sont passants le transformateur est en court-circuit, l'impédance série est négligeable devant la charge. Cependant lorsque les thyristors sont bloqués, le transformateur est en circuit ouvert et son impédance augmente fortement.

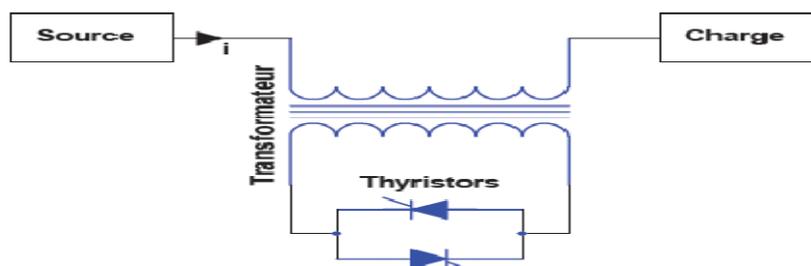


Figure III.3. Limitation de courant par transformateur court-circuité

Il est également possible d'utiliser des dispositifs à résonance [44] insérés en série avec des thyristors (Figure III.4), permettant de contrôler l'impédance du circuit LC en modifiant la commande de l'angle d'amorçage.

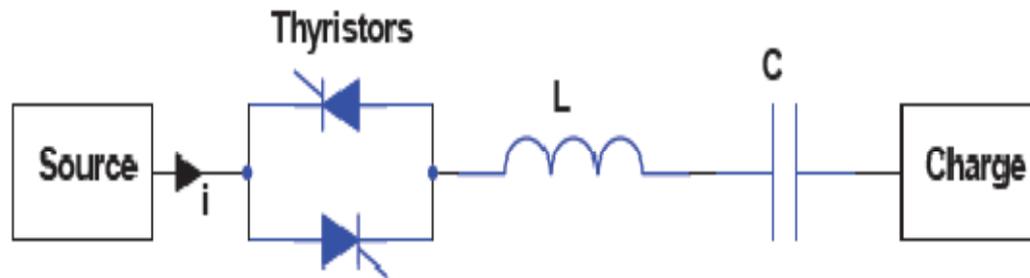


Figure III.4. Limitation de courant par thyristors contrôlant un circuit raisonnant [45].

L'inductance et la capacité sont choisies et raccordées de façon à ne pas dépasser les limites de di/dt des thyristors. Les dispositifs commandés comme les disjoncteurs statiques, permettent de commuter très rapidement le courant d'une branche de faible impédance à une branche d'impédance élevée. Dans tous les cas, la synchronisation des dispositifs semi-conducteurs de commutation est délicate ; ces systèmes restent difficiles à adapter aux fortes puissances et à la haute tension et les composants de puissance présentent des chutes de tension non négligeables à l'état passant.

III.3.1.c. Résistance

Cette méthode consiste à réduire à l'aide d'une simple résistance le courant de court-circuit. Celle-ci est intéressante lorsque le rapport I_c/I_n est très élevé. L'opportunité d'utilisation d'un tel système doit se décider en fonction de la chute de tension engendrée et de la dissipation de l'énergie locale qui s'ensuit.

Une autre solution consiste à ajouter, comme dans le cas de l'utilisation de capacités, des disjoncteurs statiques afin de commuter le courant dans une branche plus résistive. Les inconvénients des systèmes de commutation comme dans le limiteur de courant par thyristors décrits ci dessus, propres à ce système, persistent.

III.3.1.d. Résistance variable

Une des solutions les plus efficaces consiste à utiliser une résistance variable en série avec le réseau. Cette variation doit provenir d'un changement de phase ou de l'état du matériau. Le phénomène physique responsable du changement peut être (thermique, mécanique, magnétique...) ou autre, mais il est toujours liée au courant. Cependant ce système présente deux problèmes, d'une

part les variations par changement de phase nécessitent une énergie qui tend à diminuer la vitesse de transition. D'autre part les variations par changement d'état soulèvent le problème de l'inhomogénéité qui tend à concentrer la puissance localement et ainsi affaiblir le matériau. Les matériaux à Coefficient Thermique Positif (CTP) ayant une résistance contrôlée thermiquement sont des candidats potentiels pour la limitation de courant. Il existe deux familles de CTP, d'une part les résistances homogènes métalliques (Fer, Tungstène...) pour lesquelles la résistivité augmente d'un facteur 7 à 17 entre la température ambiante et la température du point de fusion. D'autre part les polymères chargés (carbone ou céramiques conductrices) qui offrent des facteurs de résistivité supérieurs à 100. Ces matériaux sont principalement utilisés en basse tension pour limiter les arcs électriques à l'ouverture des disjoncteurs [46].

III. 3.2. Limiteurs de courant supraconducteurs

Un réseau électrique doit être dimensionné pour supporter son régime assigné mais aussi en cas de défaut, un régime de court-circuit. Dans un réseau de distribution, le courant de court-circuit peut atteindre 30 fois la valeur du courant assigné, ainsi tout le réseau (générateurs, transformateurs, jeux de barres...) doit être surdimensionné électriquement et mécaniquement, ceci étant très coûteux. Il est donc intéressant d'introduire des appareils capables de réduire le courant de court-circuit. Le principe d'un limiteur de courant supraconducteur (Superconducting Fault Current Limiter) [47], consiste à introduire une impédance supplémentaire lorsqu'un défaut apparaît. En utilisant la transition de l'état supraconducteur vers un état résistif, on réalise une impédance variable. Par simple dépassement du courant critique d'un élément supraconducteur inséré dans la ligne électrique, le matériau va transiter naturellement lors d'un court-circuit, sans avoir besoin d'appareil de détection pour provoquer cette transition (Figure III.5).

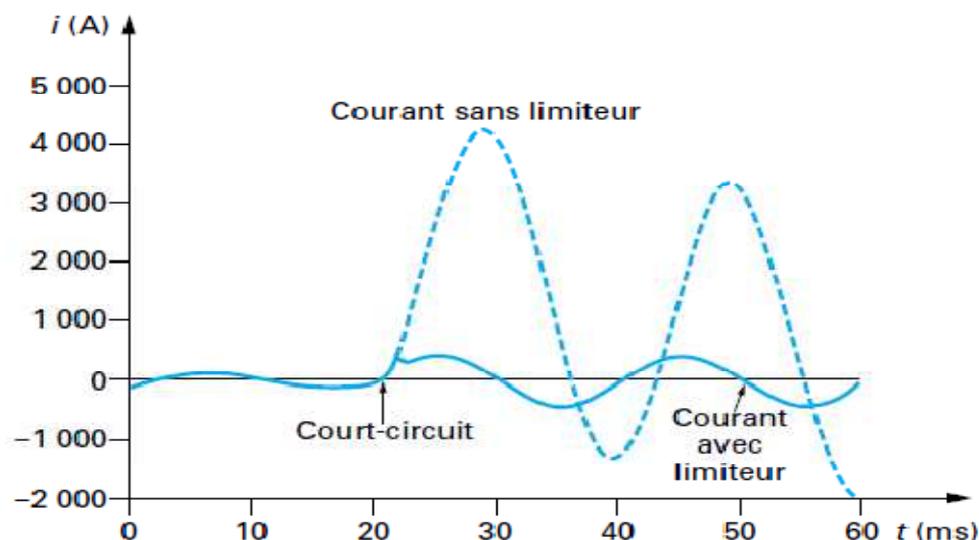


Figure III.5. Courants de court circuit avec et sans limiteur

Ce principe simple et inaccessible par des techniques conventionnelles de limitation du courant est très attractif pour permettre l'amélioration de la qualité de service des réseaux actuels. De plus son fonctionnement est répétitif et autonome. C'est le fusible permanent qui ne nécessite ni d'être changé ni l'intervention d'un opérateur humain. Ainsi, le courant de court-circuit deviendrait une notion théorique qui ne serait jamais atteinte. Si les courants limités n'excèdent pas, par exemple, huit fois le courant nominal, la puissance dissipée lors d'un court-circuit devient alors plus de six fois inférieure à la valeur actuelle.

Il est même possible d'imaginer de dimensionner de manière totalement différente les réseaux futurs, surtout dans les pays en voie de développement où le réseau est entièrement à construire. Le transport du courant pourrait se faire non plus par les lignes de THT mais par des lignes supraconductrices en MT avec des courants importants grâce à l'insertion systématique de limiteurs de courant. Tous les disjoncteurs pourraient être remplacés par de simples interrupteurs.

III. 3.2.a. Différents types de limiteur de courant supraconducteur

a) Limiteur résistif

Le principe du limiteur de courant résistif est simple, il s'agit d'insérer en série dans la ligne à protéger un élément supraconducteur qui transite naturellement par dépassement de son courant critique lors d'un court-circuit. Le courant est alors limité par la transition brutale de l'état supraconducteur à l'état normale [48]-[49]-[50].

Un disjoncteur en série, rapide, mais de faible pouvoir de coupure, permet d'isoler le défaut et protéger le limiteur contre une excursion en température excessive (figure III.6).

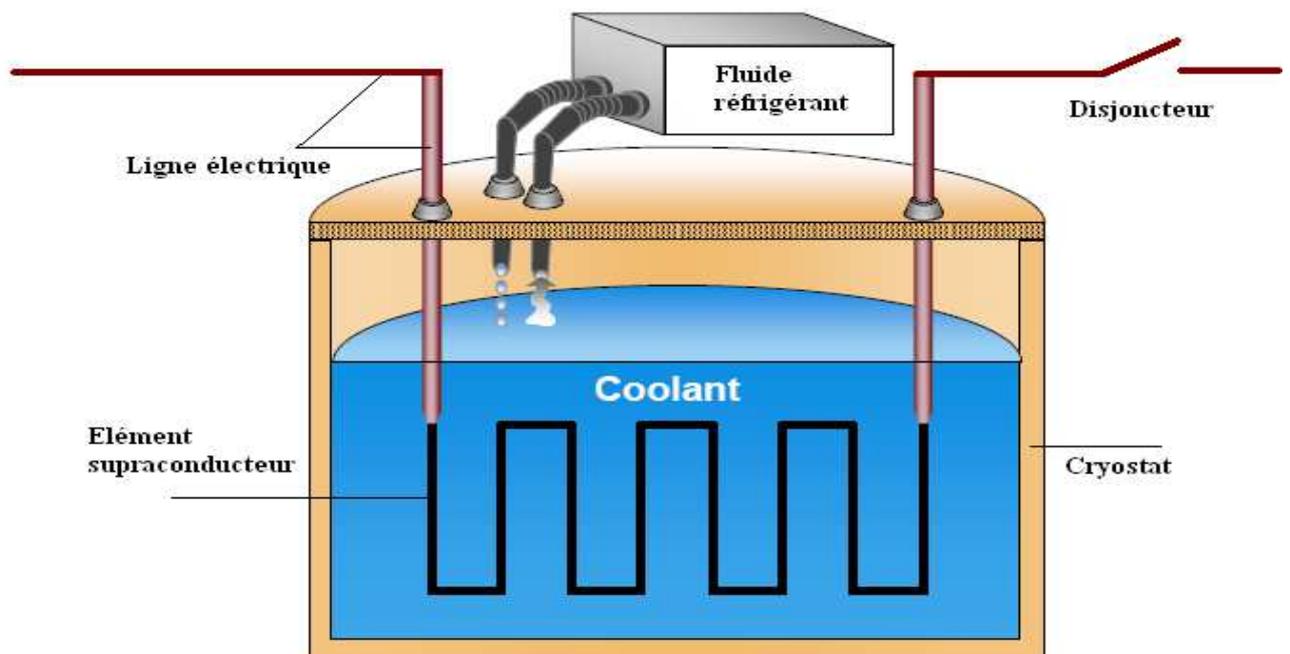


Figure III.6. Principe du limiteur de courant résistif

Une impédance en parallèle peut permettre d'adapter l'impédance de limitation et de réduire les éventuelles surtensions [51]. La structure non inductive a par ailleurs les avantages suivants :

- Les courants de fuite et les pertes par courant de Foucault au niveau des structures (supports et cryostat) qui peuvent être métalliques sont réduits ;
- Les pertes du supraconducteur qui n'est soumis qu'à son champ propre sont réduites ;
- L'énergie magnétique stockée dans l'enroulement supraconducteur au moment de la transition est négligeable ;
- Le courant de court-circuit étant essentiellement ohmique, l'utilisation du disjoncteur auxiliaire de coupure est plus simple.

Par contre, le limiteur est en série avec la ligne, il nécessite des conducteurs supraconducteurs capables de porter de forts courants ($I_n / I_{lim} \approx 0,2$ à $0,3$) qui restent difficiles à réaliser sans passer par la mise en parallèle de plusieurs bobinages.

b) Limiteur inductif

La structure inductive met en jeu un transformateur dont les enroulements secondaires sont supraconducteurs (sauf dans le cas du limiteur hybride où le secondaire d'un transformateur est court-circuité par une résistance supraconductrice [52]). Le limiteur est placé en série dans le circuit à protéger. La Figure III.7 présente schématiquement le principe. En régime nominal, le secondaire étant dans son état supraconducteur, le transformateur est court-circuité, et seule l'impédance de fuite est vue par le système [53]. En cas de court-circuit sur le réseau, le secondaire transite et le limiteur se comporte comme une forte réactance. L'avantage de ce type de limiteur est de pouvoir dimensionner les parties supraconductrices à des intensités ou des tensions bien inférieures aux valeurs du réseau, les enroulements primaires étant réalisés en cuivre. Le rapport de transformation laisse toute latitude d'adaptation. Une des difficultés de cette structure est de limiter l'inductance de fuite à des niveaux acceptables pour le système. Un autre inconvénient réside dans l'encombrement et le poids de telles structures.

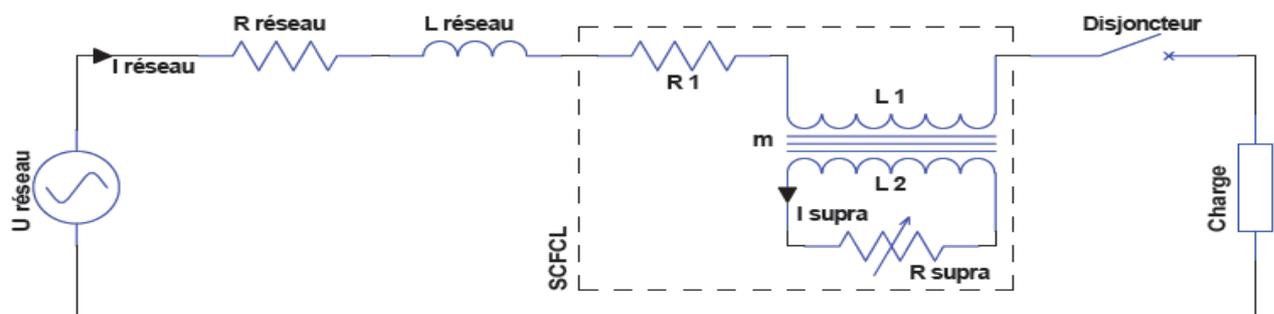


Figure III.7. Principe du limiteur de courant inductif

Le limiteur inductif permet de limiter efficacement les courants de court-circuit, mais son principe est plus compliqué que celui du limiteur résistif. De plus, sa réalisation peut être délicate car il nécessite en général un bon couplage entre le circuit primaire et le circuit secondaire qui ne sont pas forcément à la même température. Le limiteur résistif quant à lui ne présente pas ces inconvénients.

c) Limiteur de type pont redresseur

Ce type de SFCL a été inventé par Boenig en 1983 [54]-[55]. Il est composé d'un pont redresseur à diodes ou thyristors, d'une bobine supraconductrice L_{supra} et d'une source de tension continue U_{dc} (Figure III.8).

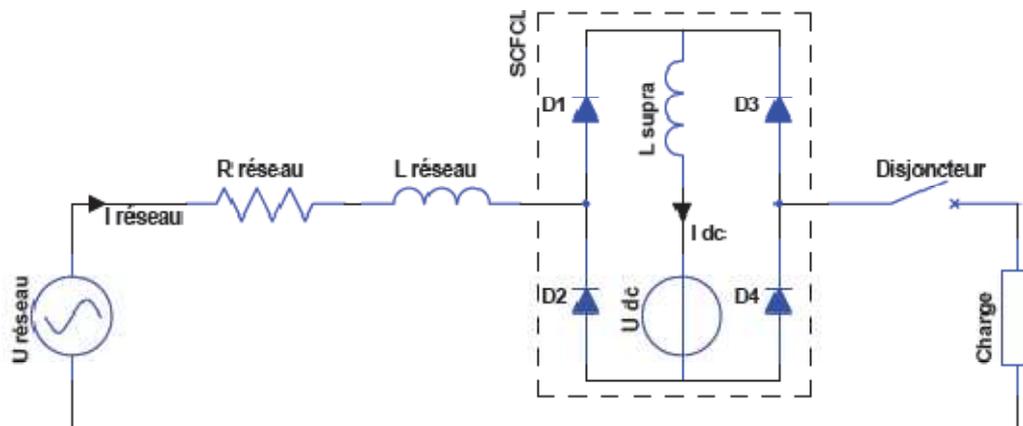


Figure III.8. Principe du limiteur de courant de type pont redresseur

Un courant continu I_{dc} traversant une bobine supraconductrice L_{supra} est délivré par une source de tension U_{dc} . En régime assigné le courant $I_{\text{réseau}}$ étant inférieur au courant I_{dc} , les diodes sont passantes et le courant $I_{\text{réseau}}$ ne traverse pas l'inductance L_{supra} . Dans ce cas l'impédance du SFCL est faible et seule l'électronique de puissance génère des pertes. Si le courant $I_{\text{réseau}}$ excède le courant I_{dc} , les diodes (D1, D4) ou (D2, D3) selon l'alternance concernée par le court-circuit, se bloquent. Ce quasi fonctionnement en pont redresseur fait circuler le courant $I_{\text{réseau}}$ dans la bobine L_{supra} qui limite le courant par sa forte inductance.

En remplaçant les diodes par des thyristors il devient possible de stopper le court-circuit au passage par zéro du courant. De plus, le courant de déclenchement est réglable par I_{dc} et peut facilement être adapté aux besoins du réseau. Cependant le fonctionnement reste peu fiable, en effet en régime de défaut un dysfonctionnement d'une diode court-circuitera la bobine, annulant ainsi le phénomène de limitation de courant.

d) SFCL de type contrôleur de courant de défaut

Ce type de SFCL a été développé par Kuperman et Juengst en 2000 [56]. Il est composé de deux thyristors T1 et T2 montés en opposition-série et court-circuités respectivement par les inductances supraconductrices L1 et L2 (Figure III.9).

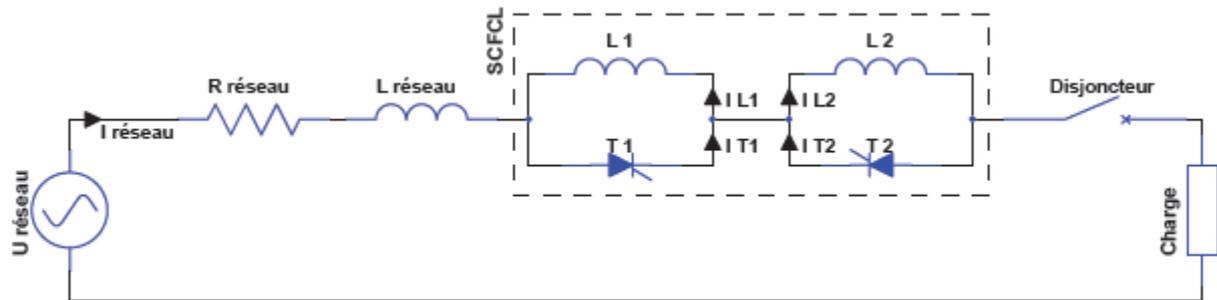


Figure III.9. Principe du limiteur de courant de type contrôleur de courant de défaut.

En régime assigné l'amplitude du courant $I_{réseau}$ étant inférieure à I_{dc} , les thyristors conduisent en permanence et l'impédance du SFCL correspond à la chute de tension des thyristors.

En régime de défaut le courant $I_{réseau}$ dépasse I_{dc} , ceci bloque alternativement les thyristors et aiguille ainsi le courant dans les inductances qui leur sont associées. Par conséquent les inductances supraconductrices L1 et L2 sont alternativement insérées sur le réseau à chaque passage par zéro du courant, cette augmentation d'impédance permet ainsi de limiter le courant. Cette architecture possède les mêmes caractéristiques que le SFCL avec pont redresseur mais exige une source de tension et le circuit de commande des thyristors.

e) SFCL de type noyaux magnétiques saturés

Pour limiter le courant de court-circuit, une impédance non-linéaire peut être obtenue en reliant les enroulements L1 et L2 de deux noyaux magnétiques saturés par des bobines supraconductrices L_{supra1} et L_{supra2} parcourues par des courants continus (Figure III.10).

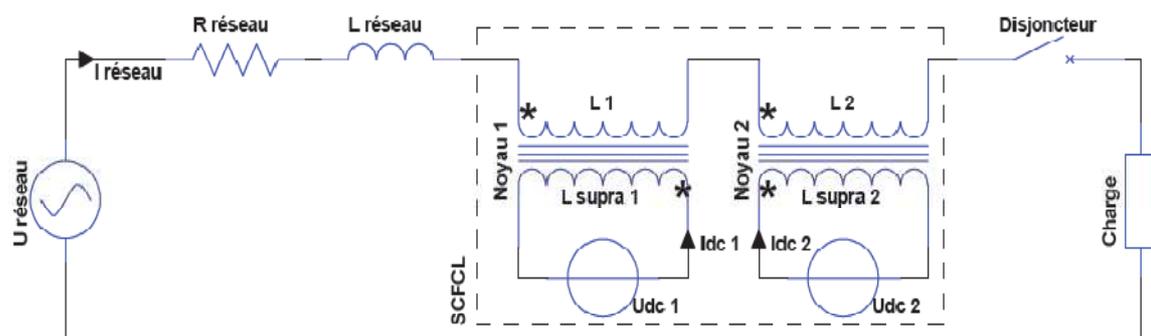


Figure III.10. Principe du limiteur de courant du type noyaux magnétiques saturés.

Les deux noyaux étant saturés, l'inductance apparente du SFCL est faible et correspond à la somme des résistances et des réactances de L1 et L2. En régime assigné, $I_{\text{réseau}}$ est assez faible pour maintenir les noyaux entièrement saturés, assurant ainsi la faible impédance du SFCL. Dans le cas d'un défaut, l'augmentation de $I_{\text{réseau}}$ conduit alternativement les deux noyaux hors de leur saturation, dans leur zone de perméabilité élevée. Ceci entraîne une importante augmentation de l'impédance apparente du SFCL, développant ainsi un champ électrique permettant de limiter le courant. L'enroulement supraconducteur n'étant que très faiblement traversé par le courant variable, les pertes à basse température sont faibles et ne nécessitent pas de système de refroidissement important. Cependant, le noyau de fer et toute l'installation restent relativement encombrants.

III. 3.2.b. Comparaison des différents SFCL

Actuellement aucun SFCL n'est commercialisé et il est difficile de prévoir quel type sera le plus prometteur pour l'avenir. Cependant il est possible de les distinguer en fonction de 4 principales caractéristiques :

- Le faible temps de récupération après une phase de limitation.
- La sûreté de fonctionnement du SFCL en régime défaillant
- Les faibles pertes AC et chutes de tension et régime assigné
- Le gain en volume et en poids

Tableau 0I.1. Comparaison des différents types d'SFCL

Type de SCFCL	Localisation des pertes	Sûreté après défaillance	Volume de supra	Taille	Temps de récup
Résistif	Supraconducteur (AC)	Oui	Moyen	Petit	Secondes ⇕ Minutes
Noyau magnétique écrané	Bobine primaire Supraconducteur (AC)	Oui	Moyen	Grand	Secondes
Pont redresseur	Semiconducteur	Non	Réalisable sans supra.	Moyen	Immédiat
Contrôleur de courant de défaut	Semiconducteur Bobine de limitation	Non	Réalisable sans supra.	Moyen	Immédiat
Noyau magnétique saturé	Noyau magnétique Bobine primaire	Oui	Petit	Moyen ⇕ Grand	Immédiat

En général, parmi l'ensemble des SFCL c'est le résistif qui est le plus compact, cependant les SFCL n'utilisant pas la transition du supraconducteur possèdent de meilleurs temps de récupération. Les SFCL utilisant des composants d'électroniques de puissance sont généralement moins fiables car il n'y a aucune limitation intrinsèque en cas de défaillance du système.

III. 3.2.c. Avantages et inconvénients propres aux supraconducteurs

L'utilisation d'une technologie nouvelle doit apporter un certain nombre d'avantages par rapport aux techniques classiques éprouvées. Dans le cas du limiteur de courant, la fonction de limitation est intrinsèque au matériau supraconducteur qui transite rapidement et automatiquement de l'état non résistif à l'état résistif. Cet avantage peut être contrebalancé par les besoins de réfrigération, de maintenance et les contraintes économiques si le coût et la mise en œuvre de ces matériaux sont prohibitifs.

a) Avantages

Les avantages attendus par rapport aux systèmes classiques sont :

- Une limitation immédiate et non différée du courant, ce qui garantit la protection des matériels contre les efforts électromagnétiques intenses qu'occasionnent les surintensités ;
- Une fonctionnalité nouvelle sans équivalent classique ;
- Un fonctionnement autonome et naturel ;
- une intégration des dispositifs de détection et de limitation ;
- Une faible chute de tension et de faibles pertes en régime normal ;
- Une masse et un volume réduits ;
- Un fonctionnement répétitif, la transition de l'état supraconducteur à l'état normal étant non destructive si elle est bien maîtrisée ;
- Une auto-protection en cas de dysfonctionnement automatique puisque, en cas de panne cryogénique par exemple, le supraconducteur se trouve naturellement dans l'état normal résistif ;
- Une bonne tenue diélectrique pour les applications en haute tension ;
- Une réponse possible aux besoins accrus de la qualité de la fourniture d'énergie électrique.

b) Inconvénients

Les inconvénients qu'il convient de minimiser par des dispositifs adaptés sont :

- Les pertes cryogéniques ;
- Le temps de récupération ;
- La compatibilité et la connectique avec le réseau (amenées de courant) ;
- Les besoins de maintenance.

III. 3.2.d. Insertion du limiteur de courant dans le réseau électrique

L'insertion d'un limiteur dans un réseau de distribution peut être envisageable en plusieurs endroits. Selon l'emplacement choisi, le limiteur de courant pourrait avoir des caractéristiques différentes (courant nominal, courant à limiter, temps de récupération ...) [57]. Ainsi, en fonction de son emplacement, le type de matériau supraconducteur utilisé pourra être différent.

Une des plus intéressantes configurations consiste à installer un limiteur entre deux jeux de barres (Figure III.11) afin d'augmenter le maillage du réseau (afin d'accroître la continuité de service). Actuellement, certains réseaux moyens tension ne peuvent pas être interconnectés entre eux car les courants de court-circuit engendrés seraient trop importants. La sensibilité accrue de l'opinion publique et le coût engendré vis à vis de l'installation de nouvelles lignes de transport, poussent à tirer le meilleur parti des infrastructures existantes. Ainsi en haute tension, le bouclage de deux réseaux évite d'amener une autre source pour sécuriser les départs.

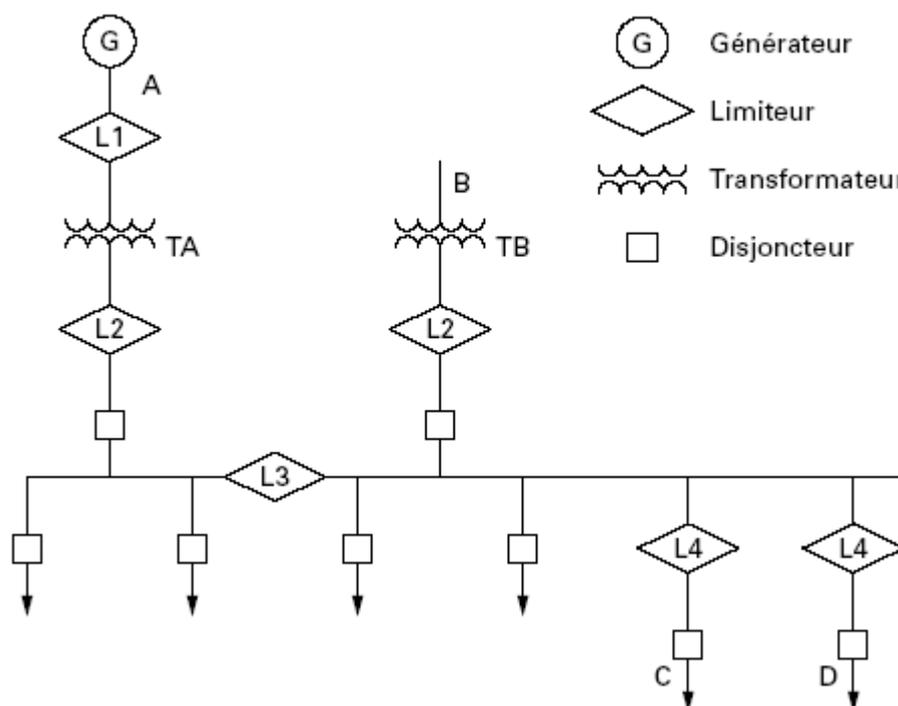


Figure III.11. Insertion de limiteurs de courant de défaut dans un réseau.

- Le limiteur L1 protège le générateur et améliore sa stabilité
- Les limiteurs L2 permettent de maintenir la liaison L3 en cas de défaut sur B
- Le limiteur L3 permet de déconnecter les deux sections A et B et d'éviter que A ou B ne débitent sur un même court-circuit (l'interconnexion n'aggrave pas les courants de défaut)
- Les limiteurs L4 permettent de protéger sélectivement les départs C et D

Une autre possibilité intéressante dans les réseaux actuels consiste à placer le limiteur en aval du transformateur *HT / MT* avant le jeu de barre, au niveau de l'arrivée MT. Ainsi, sur un réseau existant, il est possible de rajouter des départs sur le jeu de barre et de conserver les mêmes protections (disjoncteurs). Sans limiteurs, les courants de court-circuit auraient été trop importants. Pour le dimensionnement d'un réseau futur, un limiteur placé en aval d'un transformateur permettrait de réduire la tension de court-circuit U_{cc} du transformateur et donc de diminuer la chute de tension à ces bornes.

Actuellement les transformateurs sont dimensionnés avec des U_{cc} importants afin justement de réduire les courants de court-circuit.

De nombreux emplacements sont encore possibles, comme au niveau d'un départ, après le jeu de barre afin de sécuriser une installation sensible. Ou encore entre un réseau existant et un générateur isolé que l'on veut relier à celui-ci.

Lors de la conception des réseaux futurs, un limiteur de courant peut être prévu après l'arrivée MT sur les transformateurs afin de limiter les courants de court-circuit et ainsi éviter de surdimensionner le réseau.

III. 4. Conclusion

Nous avons décrit dans ce chapitre les différents types de limiteurs et leurs configurations dans un réseau électrique. Les limiteurs de courant à base de semi conducteur sont peu fiables après défaillance et encombrants.

Le limiteur de courant supraconducteur peut constituer un élément clé pour la protection des équipements électriques, l'extension des puissances transitées sur les réseaux existant, l'accroissement du degré d'interconnexion des réseaux et de la qualité de service.

Cette propriété peut être soit utilisée directement (limitation purement résistive) soit indirectement, l'élément supraconducteur étant alors un organe de détection et de déclenchement d'un processus auxiliaire de limitation

CHAPITRE IV

MODELISATION

IV.1. Introduction

La technologie du limiteur de courant supraconducteur est assez complexe. Diverses structures du types, résistives ou inductives, à base de BTc ou HTc, ont été proposées et testées.

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.

Puisque il n'y a pas jusqu'à maintenant un modèle prédéfini du SFCL dans le logiciel MATLAB ou n'importe quelle autre logiciel de simulation, nous développerons premièrement un modèle électrique permettant de simuler le comportement de notre limiteur de courant sur un réseau. Le modèle généralisé est intégré dans la bibliothèque de MATLAB Simulink. Nous développerons ensuite dans la deuxième partie du chapitre un modèle thermique expliquant le phénomène de transition. Les deux modèles sont généralisés pour différents matériaux, et implémentés dans la bibliothèque de MATLAB Simulink.

IV.2. Modèle électrique du SFCL

De part leurs excellentes performances en limitation de courant et leur simplicité de réalisation alliant gain en volume et en coût, les limiteurs résistifs sont aujourd'hui le centre de nombreuses recherches. Ainsi dans le cadre de notre étude, le SFCL étudié est du type résistif à base de conducteur Bi-2223. Ce dernier est préféré pour la limitation de courant de défaut par rapport à l'YBCO, pour deux raisons :

- Parce que l'augmentation de la résistivité par rapport à la température est plus rapide dans le matériau Bi-2223 (figure IV.1) [58].
- La température de transition (T_c) est plus élevée que celle de l'YBCO.

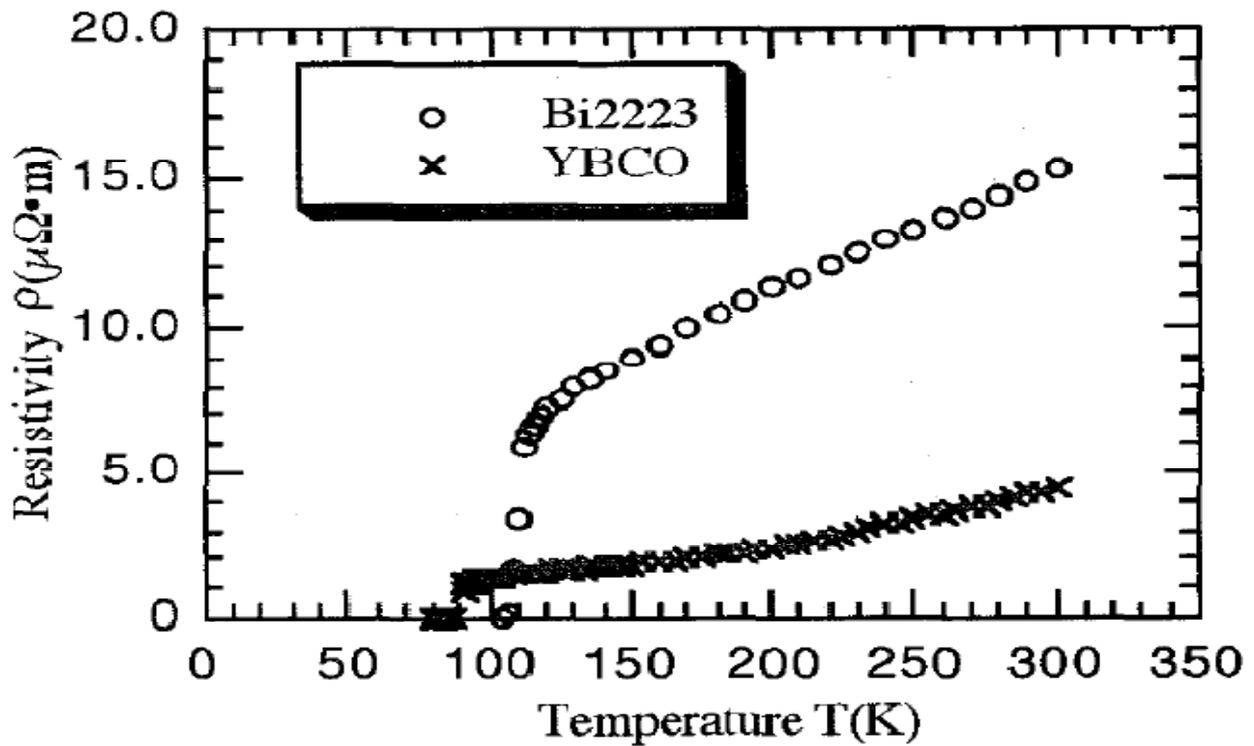


Figure IV.1. Variation de la résistivité avec la température de Bi-2223 et YBCO

IV.2.1. Caractéristiques E(j)

La figure IV.1 montre un diagramme de phase simplifié de l'état supraconducteur. Il est divisé en trois régions notamment, « régime supraconducteur » ($\rho=0$), « régime flux-flow » ($\rho=\rho(j,T,B)$), et « régime de conduite normale » ($\rho=\text{constant}$).

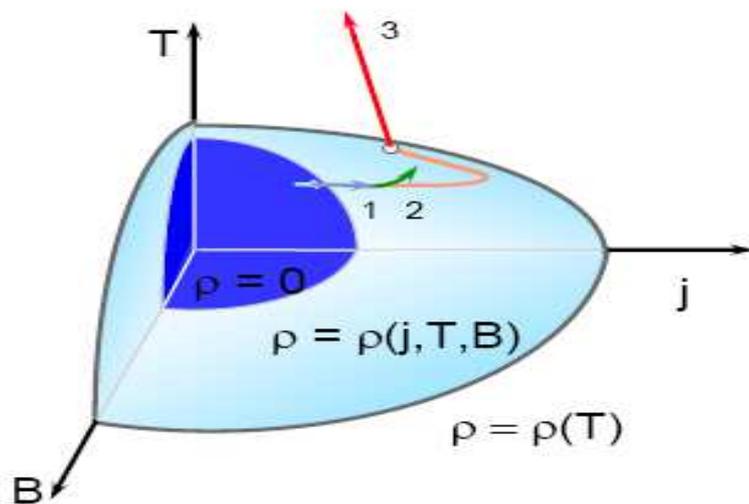


Figure IV.2. Diagramme de phase simplifié de l'état supraconducteur

Les équations employées pour généraliser le comportement d'un supraconducteur sont divisées en trois régions. Dans chacune des trois régions la caractéristique $E(j)$ est rapprochée par une loi de puissance [59].

➤ **Région « supraconductrice » :**

$$E_1 = E_C \left(\frac{J}{J_C(T)} \right)^{\alpha(T)} \quad (IV.1)$$

Avec J_C est la densité de courant critique définie à $E_C = 1\mu\text{V/cm}$. $J_C(T)$ est adapté aux données expérimentales. La diminution de la densité de courant mène ainsi à une diminution en valeur de $\alpha(T)$. L'équation employée pour calculer la valeur exacte est donnée par la relation suivante:

$$\alpha(T) = \max [\beta, \alpha'(T)] \quad (IV.2)$$

Avec

$$\alpha'(T) = \frac{\log\left(\frac{E_0}{E_C}\right)}{\log\left[\left(\frac{J_C(77K)}{J_C(T)}\right)^{\left(1-\frac{1}{\beta}\right)} \left(\frac{E_0}{E_C}\right)^{\frac{1}{\alpha(77K)}}\right]} \quad (IV.3)$$

➤ **Région « Flux-Flow » :**

Représente en fait la région intermédiaire entre l'état supraconducteur et l'état normal (c'est l'état mixte).

$$E_2 = E_0 \left(\frac{E_C}{E_0} \right)^{\frac{\beta}{\alpha(77K)}} \left(\frac{J_C(77K)}{J_C(T)} \right) \left(\frac{J}{J_C(77K)} \right)^\beta \quad (IV.4)$$

➤ **Région « Conducteur normal » :**

$$E_3 = \rho(T_C)J \quad (IV.5)$$

Où ρ est la résistivité normale et T_C est la température critique du supraconducteur.

Le champ électrique et la température sont les principaux facteurs qui déterminent la performance d'un supraconducteur. Si on connaît la valeur du champ électrique et le courant qui traverse le matériau supraconducteur, on peut alors calculer facilement la résistance supraconductrice à l'aide de l'équation suivante :

$$R_s = \frac{E L}{I_s} \quad (\text{IV. 6})$$

Où L est la longueur du matériau supraconducteur et I_s est le courant qui le traverse.

La résolution numérique des équations, IV.1, IV.4, IV.5, relatives aux différentes régions permettent de calculer le champ électrique (figure IV.3). Les trois équations (E1, E2, E3) sont calculées de façon continue et les résultats (des trois équations) sont introduits dans un comparateur afin de déduire la valeur minimale. Le résultat le plus petit (en valeur absolue) de l'un des trois équations correspond à la densité de courant du fonctionnement du limiteur. La courbe de cette densité est appelée courbe réelle (figure IV.3).

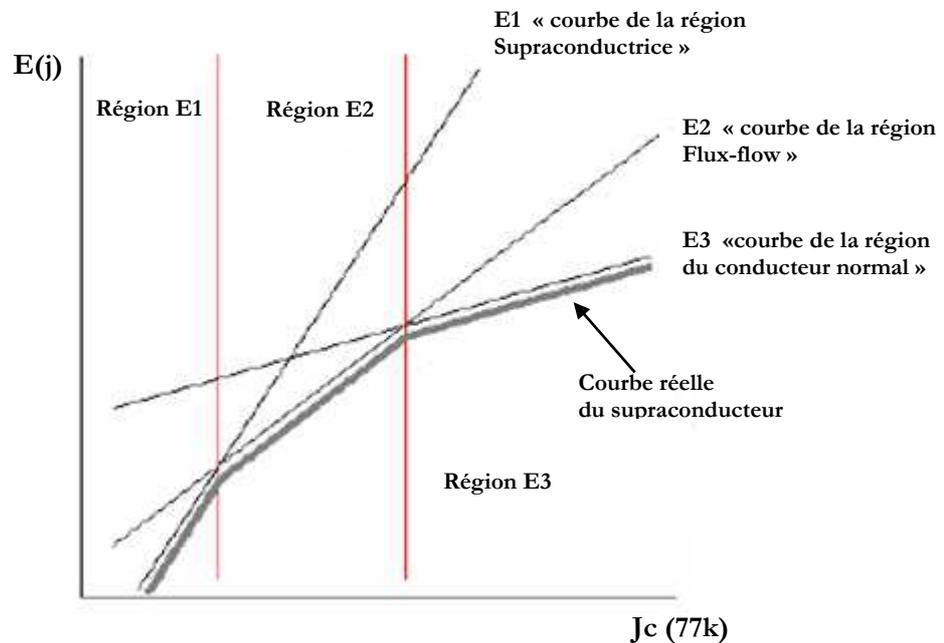


Figure IV.3. Caractéristique $E(j)$

Les trois courbes qui composent la courbe caractéristique supraconductrice sont montrées sur la figure IV. 3. Il est clairement illustré que la plus basse courbe évaluée de chaque région domine les caractéristiques du supraconducteur. Le schéma du comparateur employé pour calculer le champ électrique est montré sur la Figure IV.4.

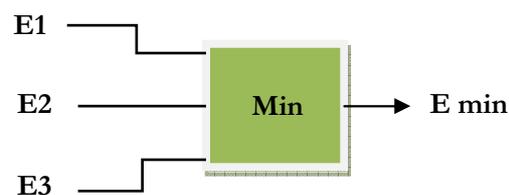


Figure IV. 4. Schéma du comparateur

Le bloc contenant les équations et les sous-ensembles est montré sur la figure IV.5.

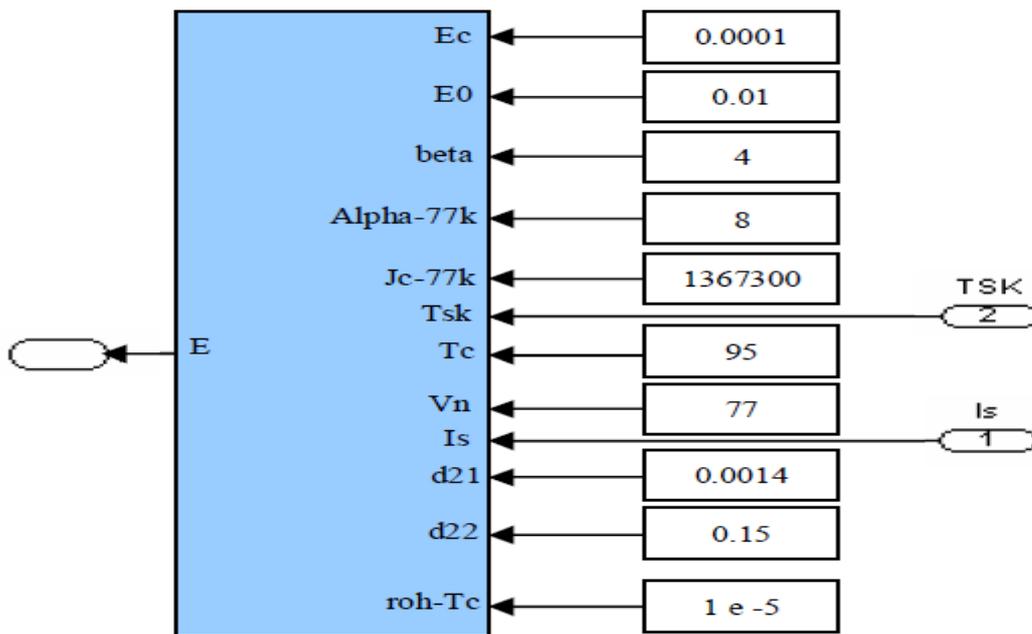


Figure IV. 5. Bloc de modélisation du champ électrique.

IV.2.2. Modélisation de la température et de la densité de courant critique

Les courbes caractéristiques de $E(j)$ sont différentes pour chaque température. Si les températures s'approchent de la température critique, la courbe caractéristique de $E(j)$ ressemble davantage à la courbe de conduction normale (sans défaut). A haute températures, le champ électrique et respectivement la densité de courant pour les régions E1 et E2 augmentent. La Figure IV.6 illustre cet aspect du supraconducteur. Cette réaction aux hautes températures mène également à une augmentation de l'impédance pour ces régions.

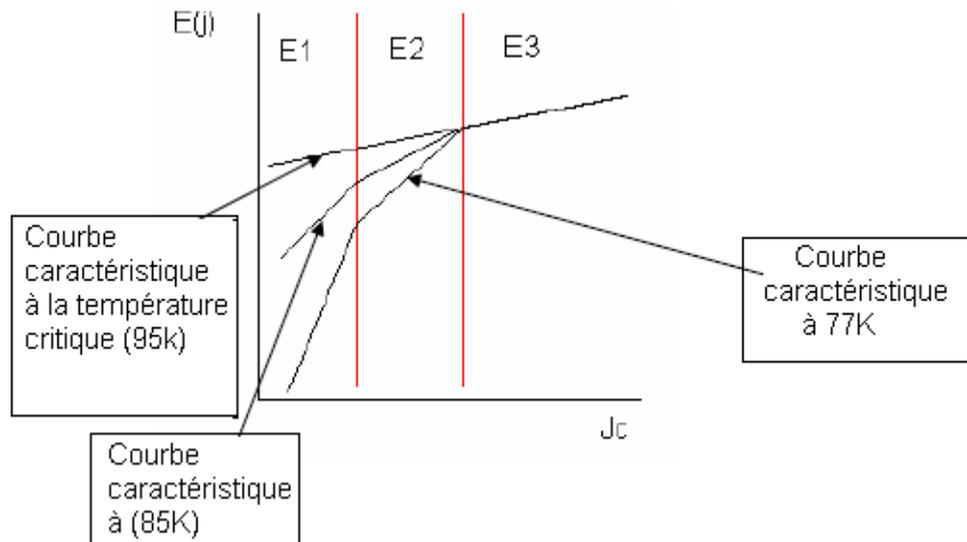


Figure IV.6. Caractéristique $E(j)$ à différentes températures

Les courbes caractéristiques du supraconducteur aux différentes températures jouent un rôle important dans son fonctionnement. On voit facilement que les températures les plus élevées sont à l'origine de plus grands champs électriques et influencent les densités de courant correspondantes.

Dans notre modèle la température critique (T_c) du matériau est 95K. Le choix de cette valeur est basé sur la valeur approximative de la température critique du matériau, Bi-2223, utilisé pour simuler le modèle. La densité de courant ($J_c(T)$) est exprimée en fonction de la température critique et la température réelle.

Dans notre modèle électrique on a représenté la température réelle du matériau supraconducteur (T_{sk}) par la variation de la tension aux bornes d'un condensateur (C) [60]. La source de tension continue V_s représente la température critique qui est prise comme valeur constante (77K), et correspondant à la température de liquéfaction de l'azote pour le maintien de l'état supraconducteur. (I_s) est le courant dans le circuit primaire. Le schéma de ce circuit est montré dans la Figure .IV.7.

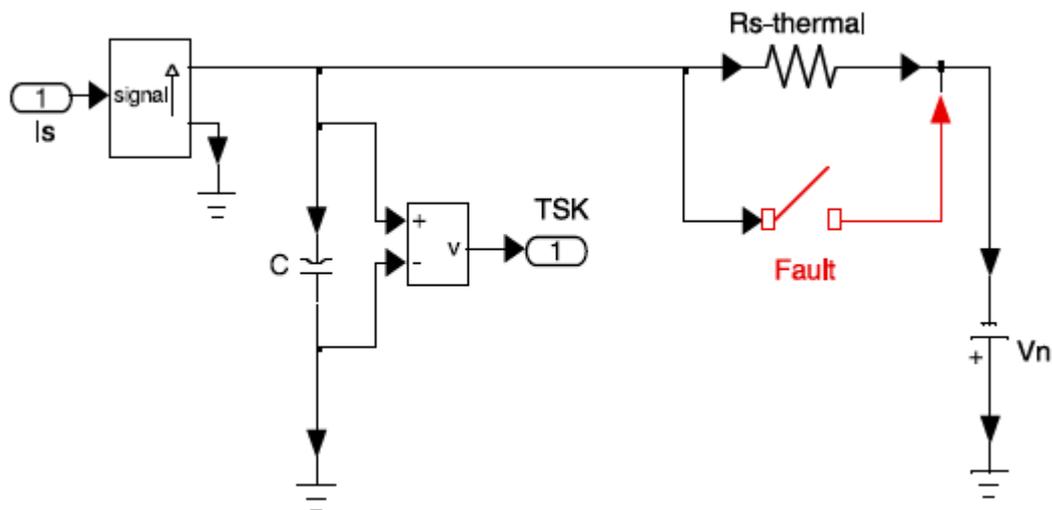


Figure IV.7. Schéma de modélisation de la température réelle du matériau supraconducteur

Cependant, la variation de la température dans un matériau supraconducteur est représentée par la variation de l'énergie stockée dans un condensateur. La charge du condensateur augmente avec la quantité d'énergie stockée.

La valeur de (T_{sk}) est prise en tant que température du matériau supraconducteur. Celle-ci est introduite dans l'équation (IV. 7) qui permet le calcul de la densité de courant en fonction du temps $J_c(t)$. Elle est donnée par la relation :

$$J_c(t) = \left[\frac{(T_c - T_{sk})}{(T_c - V_n)} \right] J_{c(77k)} \quad (\text{IV. 7})$$

$J_{c(77k)}$: est la densité de courant à 77k.

IV.2.3. Modélisation de la densité de courant du supraconducteur

Le facteur dominant qui détermine le champ électrique concernant les régions « supraconducteur » et « flux-flow » est la valeur de la densité de courant de fonctionnement. Cette valeur est fonction des dimensions du matériau supraconducteur et le courant qui le traverse. L'équation utilisée pour calculer cette valeur est la suivante :

$$J_s = \frac{I_s}{D_{21} D_{22}} \quad (\text{IV. 8})$$

Une résistance thermique ($R_{S_Thermal}$), est placée dans le circuit (Fig.IV.7). Sa fonction principale consiste à régler la valeur de la température critique. La valeur de l'impédance thermique est basée sur les dimensions de l'élément supraconducteur. L'expression (IV. 9) permet le calcul de cette valeur :

$$R_{S_Thermal} = \frac{D_{22}}{4 K_s D_{21} L} \quad (\text{IV. 9})$$

Dans notre modèle $R_{S_Thermal}$ prend la valeur constante de 2.602mΩ. La constante « k_s » est égale à 1.6875e5 [61]; cette constante a été ajoutée pour améliorer la caractéristique graphique de la simulation. Les dimensions du SFCL utilisés sont celles du modèle expérimental de « James Langston [62] » de la céramique du type Bi-2223. Les dimensions du matériau supraconducteur sont montrées sur la figure IV.8.

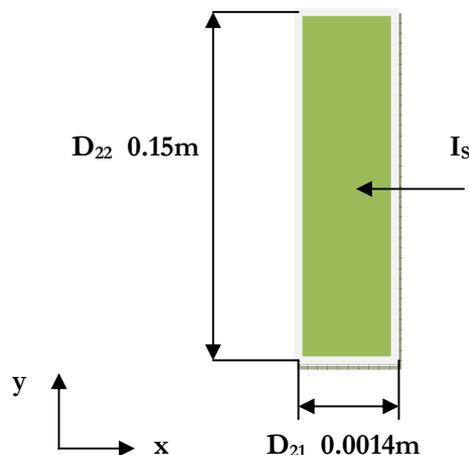


Figure IV.8. Le croquis du matériau supraconducteur

Les dimensions (D_{21} et D_{22}), sont respectivement la longueur et la largeur de la bande supraconductrice. La longueur de l'enroulement supraconducteur « L » est égale à 0.061 m.

IV.3. Modèle thermique du SFCL

L'étude thermique du limiteur de courant a pour but d'appréhender l'échange thermique dans les couches du limiteur pendant la limitation de courant de court-circuit, et l'influence des différents matériaux sur l'échange thermique au niveau des différentes zones d'échange. Ainsi dans le cadre de notre étude, le SFCL étudié est du type résistif à base de couche mince en Bi-2223. Dans cette partie nous présentons les différentes étapes de la modélisation du limiteur de courant de défaut supraconducteur thermique proposé.

IV.3.1. Rubans supraconducteurs à haute température critiques

IV.3.1.1. Première génération de rubans HTS : « poudre en tube » (PIT)

Il n'y a pas longtemps les rubans de $\text{Bi}_2\text{Sc}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10-x}$ (BSCCO-2223) et de $\text{Bi}_2\text{Sc}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_{8-x}$ (BSCCO-2212), ayant une température T_c de l'ordre de 110 K, constituaient les seuls matériaux ayant eu un succès du point de vue industrie des supraconducteurs HTS.

Ces rubans supraconducteurs sont actuellement produits en longueurs kilométriques par plusieurs compagnies, dont Sumitomo Electric Industries, Nexans.

Les rubans de BSCCO sont obtenus par la technique PIT (Powder In Tube). Cette technique consiste à comprimer un mélange stœchiométrique de précurseurs (Bi, Sr, Ca, Cu) dans une gaine en argent. Des traitements thermiques associés à des opérations de tréfilage et de laminage permettent d'obtenir des monofilaments supraconducteurs. Ces filaments peuvent être compactés dans une matrice en argent et laminés pour former un ruban multifilamentaire (Figure IV.9.a).

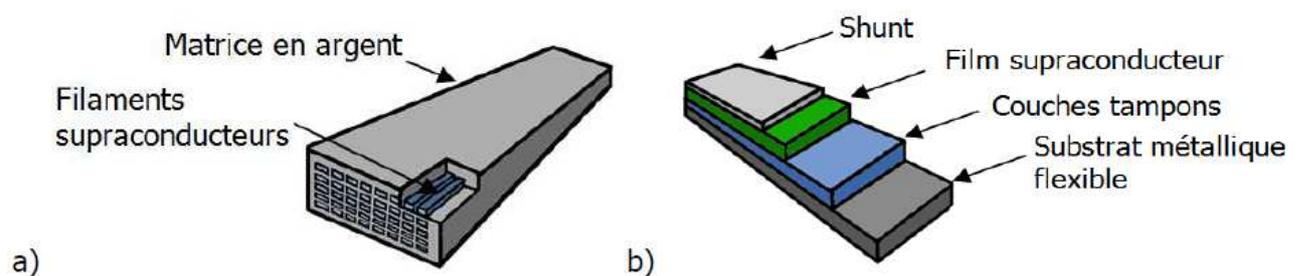


Figure IV.9. Schémas simplifiés de conducteurs HTS : a) première génération, conducteur PIT; b) seconde génération, conducteur en couche mince

Malgré la maîtrise du procédé de mise en forme de ces conducteurs, le BSCCO présente des inconvénients. Ses propriétés sous champ magnétique à 77 K (température de l'azote liquide) sont médiocres et ne lui permettent que des applications en champ propre [63]. De plus, l'utilisation

d'une grande quantité d'argent pour la réalisation de la gaine induit un cout de matières premières très élevé, ce qui pousse de nombreux industriels, comme AMSC, Theva et Nexans à réorienter leurs efforts vers des rubans supraconducteurs HTS de seconde génération.

IV.3.1.2. Deuxième génération de rubans HTS

Les rubans supraconducteurs de seconde génération ont été développés dans le but de palier aux problèmes de texturation des oxydes supraconducteurs des rubans de première génération et 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 : le substrat, la ou les couches tampon, la céramique supraconductrice et le shunt, Figure IV.9.b. Chaque couche possède un rôle dans le fonctionnement du limiteur que nous développons dans le modèle proposé.

IV.3.2. Hypothèses du Modèle thermique proposé

Le limiteur étudié est de type résistive, il se compose de trois matériaux déposés sous forme de couche mince:

- Une couche inoxydable ou substrat, qui joue le rôle de support, dont la fonction principale est de dissiper la chaleur excessive produite pendant le défaut et protéger ainsi l'élément supraconducteur.
- Le supraconducteur Bi-2223, est bon conducteur dans le cas passant ' $R=0$ ' et dans le cas bloqué limite le courant de défaut par l'insertion d'une grande résistance dans le circuit.
- La troisième couche shunt joue le rôle d'un stabilisateur thermique et électrique dans l'état bloqué du limiteur (couche supraconductrice). Les matériaux utilisés pour cette couche sont des matériaux nobles l'or ou bien l'argent figure (IV.10).

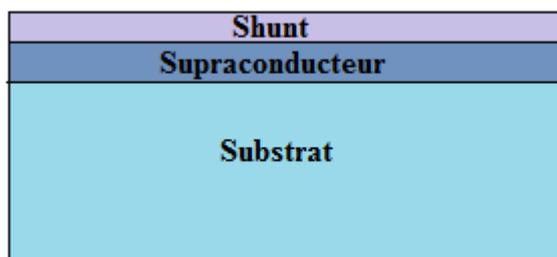


Figure IV.10. Schéma simplifié de la conception du SFCL

Les procédés de fabrication des conducteurs en couches minces conduisent généralement à un court-circuit entre les différentes couches du ruban. En effet, le dépôt de la couche shunt est en contact direct avec le supraconducteur mais également avec le substrat par les bords du ruban. Il est aussi important de noter que les deux amenées de courant aux bornes du conducteur déposé

contribuent également au court-circuit des différentes couches. Le schéma électrique équivalent est donné dans la Figure IV.13.



Figure IV.11. Schéma réel d'un limiteur de courant supraconducteur

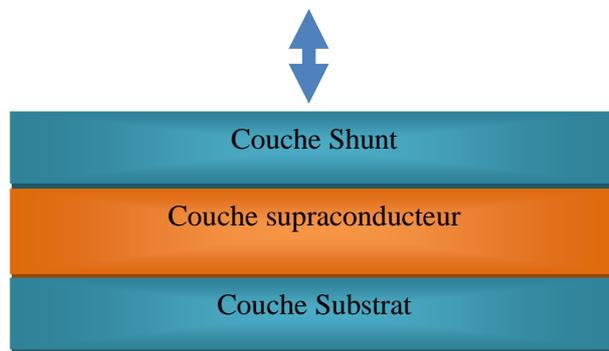


Figure IV.12. Conception du SFCL par dépôt de couches minces

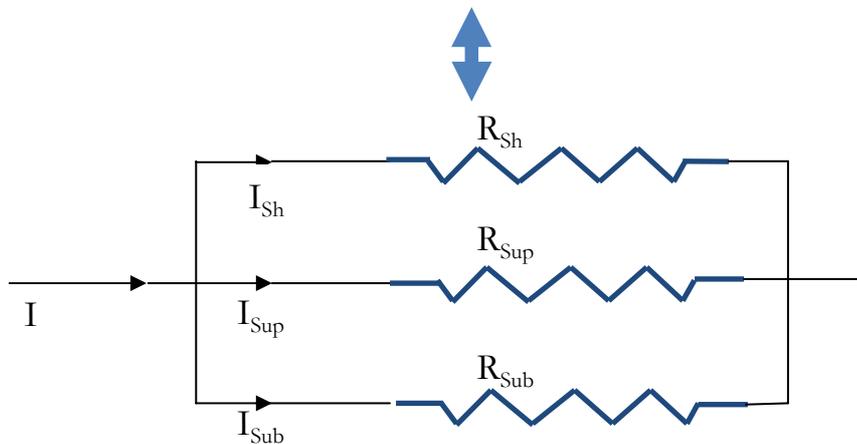


Figure IV.13. Schéma électrique équivalent d'un SFCL

L'étude théorique tient compte du comportement de ces couches en fonction de leurs états électriques et thermiques. Les différents phénomènes physiques d'une phase de limitation de courant sont considérés comme homogènes le long du ruban.

Pour simplifier la compréhension de la transition de chaleur dans un limiteur supraconducteur en cas de défaut, un modèle a été développé sous environnement MATLAB [64], permettant de

calculer le courant qui traverse le SFCL, en résolvant les équations différentielles régissant le transfert de la chaleur, à l'aide de la méthode range-kutta. Les paramètres considérés étant :

- L'épaisseur du matériau supraconducteur qui constitue le SFCL
- La longueur du SFCL
- La capacité de la chaleur spécifique du SFCL
- La résistance spécifique (résistivité) du SFCL
- La conductivité thermique du SFCL

Les caractéristiques spécifiques du modèle sont exposées ci-dessous :

a). Courant critique

En fonctionnement normale la densité de courant est donnée par le rapport du courant qui le traverse (I), par la section qu'il pénètre (A).

$$J = \frac{I}{A} \quad (\text{IV. 10})$$

Et la densité de courant critique est calculée par :

$$J_c = \frac{I_p}{A} \quad (\text{IV. 11})$$

Où I_p est le pic de courant qui travers le SFCL.

En fonctionnement normale (sans défaut), la densité de courant ne devrait pas dépasser un pourcentage ($k\%$) de la densité de courant critique J_c , la valeur du pourcentage dépend du matériau employé dans le modèle.

Ainsi la valeur de la densité de courant devrait être calculée par la relation suivante :

$$J_c = \frac{I_p}{(K A)} \quad (\text{IV. 12})$$

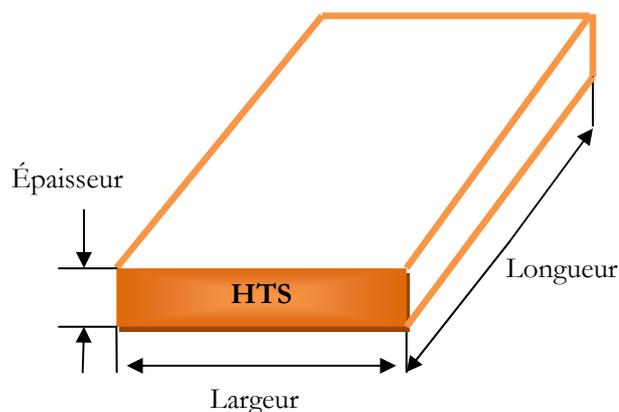


Figure IV.14. Schéma de la couche supraconductrice

b). Crête de tension

La valeur crête de la tension (V_{peak}) du système est liée au champ électrique maximal (E_{peak}) et la longueur du SFCL par l'équation suivante :

$$V_{peak} = E_{peak} L_{HTSFCL} \quad (IV. 13)$$

Différents valeurs de E_{peak} ont été utilisées dans ce travail. Les résultats avec différentes longueurs du supraconducteur sont donnés et analysés dans le Chapitre V.

c). Champ électrique

La limitation du courant de défaut dans un matériau supraconducteur est liée directement avec la caractéristique $E(J)$. Le calcul du champ électrique est divisé en trois régions, (régime supraconducteur, régime flux-flow, et le régime de conduite normale). Dans chacune des trois régions $E(j)$ est rapproché par une loi de puissance du type [65] :

$$E(J) = \begin{cases} E_C \left(\frac{J}{J_C(T)} \right)^{\alpha(T)} & T < T_C, J \leq J_C \quad \text{“SC state”} \\ E_0 \left(\frac{E_C}{E_0} \right)^{\frac{\beta}{\alpha(T)}} \left(\frac{I_c(77k)}{J_c} \right) \left(\frac{J}{J_c(77k)} \right)^\beta & T < T_C, J > J_C \quad \text{“FluxFlow”} \\ \rho(T_C) \left(\frac{T}{T_C} \right) J & T \geq T_C \quad \text{“Conducting”} \end{cases} \quad (IV. 14)$$

Les valeurs des paramètres, (E_0 , α , β à 77k) dépendent des conditions de traitement du matériau supraconducteur. Ils sont limités comme suit:

- $0.1 \leq E_0 \leq 10$ mV/cm.
- $5 \leq \alpha \leq 15$.
- $2 \leq \beta \leq 4$

d). Température du SFCL

Dans le cas de l'état adiabatique, la chaleur dissipée dans le supraconducteur ne sera pas transférés à l'azote liquide, de sorte que le processus de refroidissement peut être négligé. Par conséquent, l'expression de l'élévation de la température en fonction du temps est donnée par l'équation suivante:

$$T = T_0 + \frac{1}{C} \int (E(J, T) \cdot J(t)) dt \quad (IV. 15)$$

Où « T_0 » est la température de l'azote liquide et "C" est la capacité calorifique par unité de volume. La résistance du supraconducteur peut être obtenue à partir de l'équation suivante :

$$R_s = \frac{E L}{A} \tag{IV.16}$$

Où L et A est la longueur du SFCL. L'algorithme représentant le comportement du limiteur de courant supraconducteur du point de vue fonctionnement thermique du SFCL est représenté dans la Figure. IV.15.

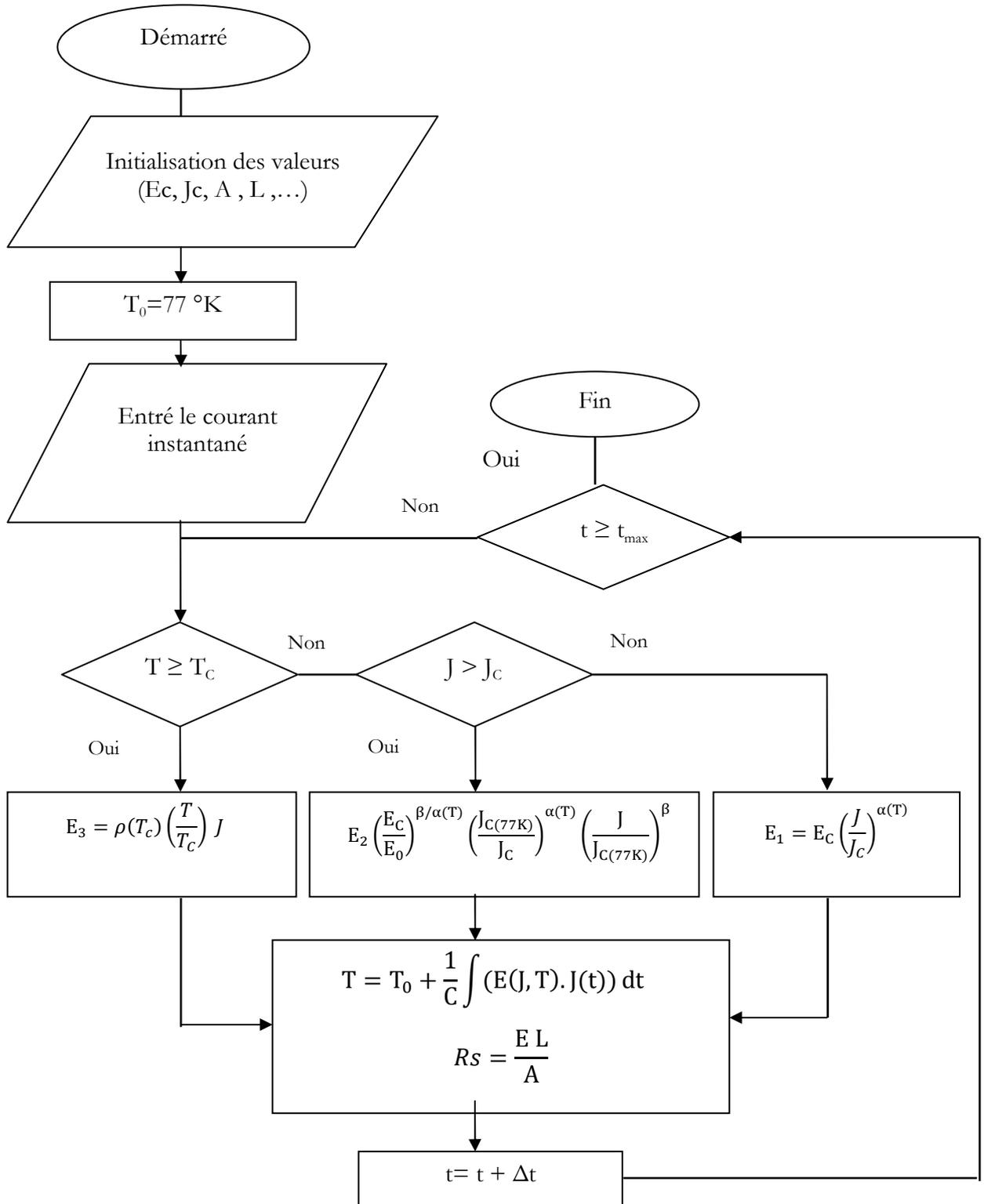


Figure IV.15. Organigramme de fonctionnement du SFCL thermique proposé.

Le réseau électrique peut être modélisé par une source de tension (V) délivrant un courant (I), d'un disjoncteur et d'une charge. Comme le SFCL est de type résistif, nous intégrons le limiteur de courant supraconducteur thermique en série dans le réseau (IV.16) [64].

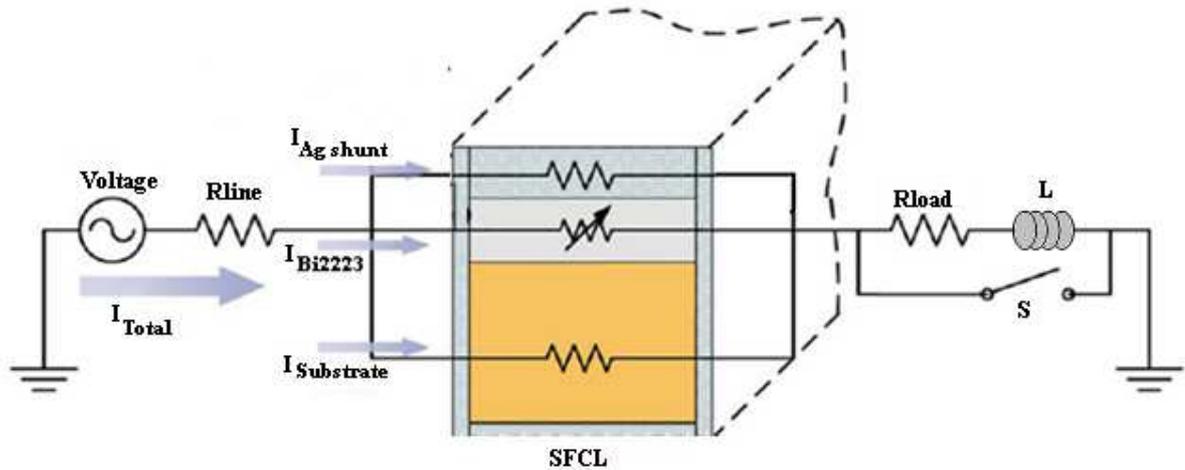


Figure IV.16. Circuit électrique du SFCL thermique

IV.4. Conclusion

Deux modèles, électrique et thermique, du limiteur de courant supraconducteur ont été développés dans ce chapitre.

Le premier modèle électrique, facile à intégrer dans n'importe quel réseau électrique à été présenté où les lois de puissance et la caractéristique $E(j)$ ont été exposés. A cet effet la température réelle du supraconducteur a été modélisée par la mesure de la tension aux bornes d'un condensateur. Le modèle électrique étant très utile dans l'étude et la compréhension du phénomène de transition du limiteur de courant supraconducteur.

Dans le deuxième modèle thermique on a utilisé une nouvelle technologie, ou la modélisation des limiteurs de courants supraconducteurs par la deuxième génération des matériaux supraconducteurs (les conducteurs déposés sous forme de couches minces); Ce modèle est très important pour l'étude des échanges thermiques à l'intérieur d'un limiteur de courant supraconducteur d'où le nom de modèle thermique.

CHAPITRE V

RESULTATS ET SIMULATIONS

V.1. Introduction

Un limiteur de courant est un dispositif qui, lorsqu'il est inséré dans un réseau électrique, permet la variation rapide de l'impédance d'une ligne électrique lorsqu'un défaut se produit.

Ainsi, il est possible de diminuer le courant de défaut, qui peut atteindre jusqu'à dix fois le courant nominal I_n de la ligne sans sa présence. À cet égard, il n'a pas pour fonction de remplacer la fonction essentielle de coupure que fournit l'ouverture d'un disjoncteur ou la destruction d'un fusible, mais vient en complément de ces installations. Bien que cette fonction de limitation puisse être intégrée à des dispositifs électroniques, comme les FACTS (Flexible AC Transmission System) par exemple [66], il est possible de s'affranchir d'un système de détection et de commande en exploitant les propriétés électriques des supraconducteurs, et plus particulièrement leur capacité naturelle à devenir très résistif lorsque le courant dépasse le courant critique du dispositif.

Durant la phase de limitation, les pertes dans le limiteur sont très importantes parce qu'une tension apparaît aux bornes du dispositif. Ces pertes provoquent une augmentation de la température et entraînent ainsi une modification des propriétés électriques et thermiques du système, pouvant aller jusqu'à provoquer la destruction des matériaux, et donc du système complet (figure V.1).

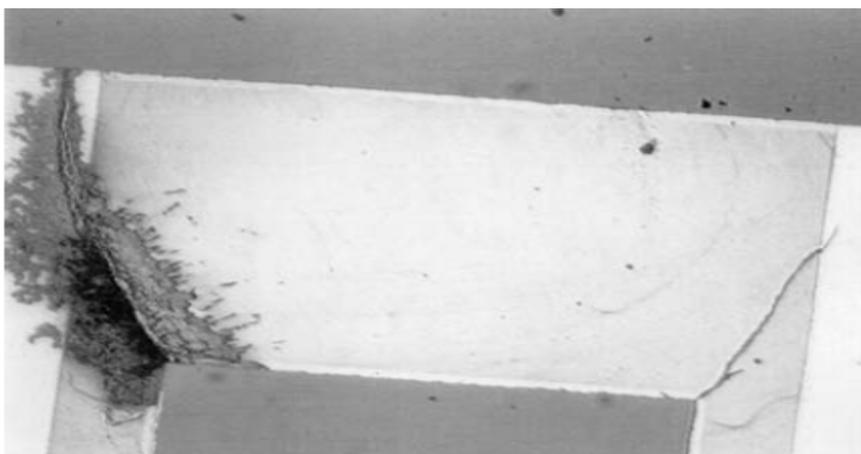


Figure V.1. Dégradation des matériaux due à un échauffement thermique lors d'un test (Université de Genève).

Afin de mieux comprendre le comportement du système et éviter que de tels phénomènes se produisent en phase d'exploitation, nous avons développé deux modèles de simulation basé sur le

logiciel MATLAB, qui permettent l'analyse des grandeurs physiques, telles que les pertes locales, la température, la densité de courant J conséquent par le courant et la tension aux bornes du dispositif.

La modélisation se fera en deux étapes : dans un premier temps, nous simulerons le limiteur de courant supraconducteur par un modèle « électrique », qui est basée sur les équations et les sous ensemble représentés dans le chapitre IV. Ensuite, nous présentons les résultats de simulation du modèle thermique du SFCL proposé. Ce modèle nous donne accès à des variables telles que la répartition de la température au sein du dispositif qui sont difficilement mesurables sans un système de mesures souvent couteux complexe. Les deux modèles proposés sont simulés dans le cas de court-circuit dans un réseau électrique.

V.2. Simulation du modèle électrique

Le modèle utilisé pour simuler le limiteur de courant de défaut avec l'utilisation des caractéristiques supraconductrices est une résistance variable R_s qui est commandée par les équations et les sous-ensembles qui régissent les caractéristiques du supraconducteur à hautes températures correspondant au matériau supraconducteur Bi2223.

L'impédance variable R_s est l'impédance du matériau qui permet la commutation dans les trois états de l'état supraconducteur, l'état normal et l'état intermédiaire. La Figure V.2 représente le circuit de simulation d'un SFCL raccordée dans un réseau électrique. Le circuit de simulation est alimenté par une source de tension alternative V , les pertes dues à la résistance et à l'inductance du fil sont modélisées par une inductance L_{lign} en série avec une résistance de R_{lign} , et à la fin de la ligne une charge court-circuité par un disjoncteur commandé.

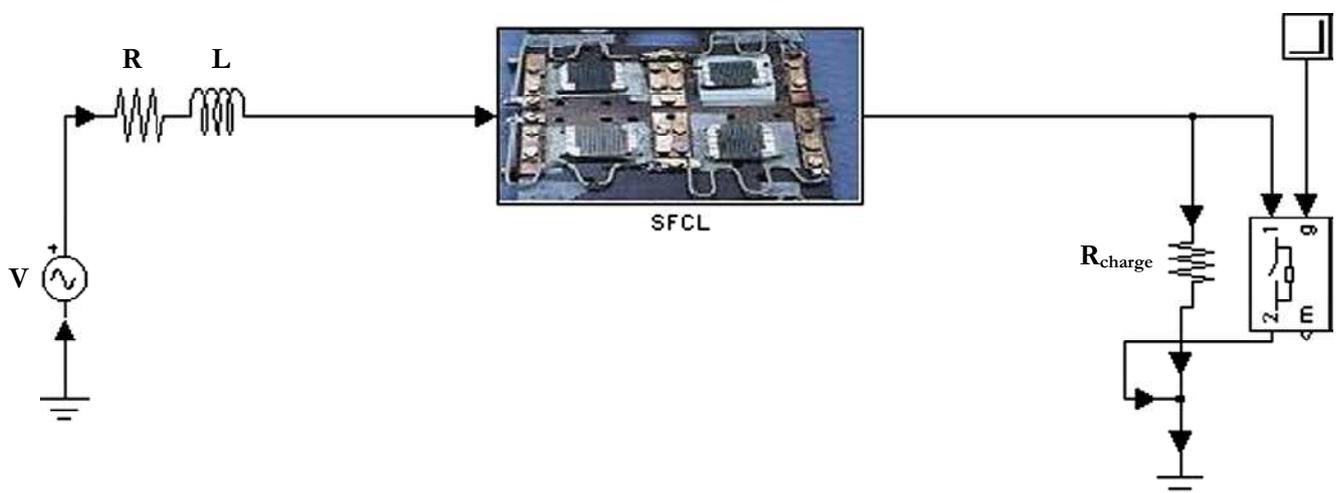


Figure V.2. Circuit de simulation du modèle électrique du SFCL

Les paramètres de simulation sont montrés dans le tableau V.1.

Tableau V.1. Paramètres de simulation du modèle électrique d'SFCL

Paramètre	Valeur
E_C	0.0001 V/m
E_0	0.01 V/m
β	4
α_{-77K}	8
$\rho (T_C)$	$1e^{-5} \Omega m$
J_{C-77K}	$13.673 e^6 A/m^2$

Pour simplifier l'intégration des paramètres de simulation et pour rendre notre modèle plus flexible, une interface graphique à été développée dans le logiciel MATLAB, qui permet en un simple clic sur notre modèle du SFCL, d'affichés la fenêtre de la figure V.3.

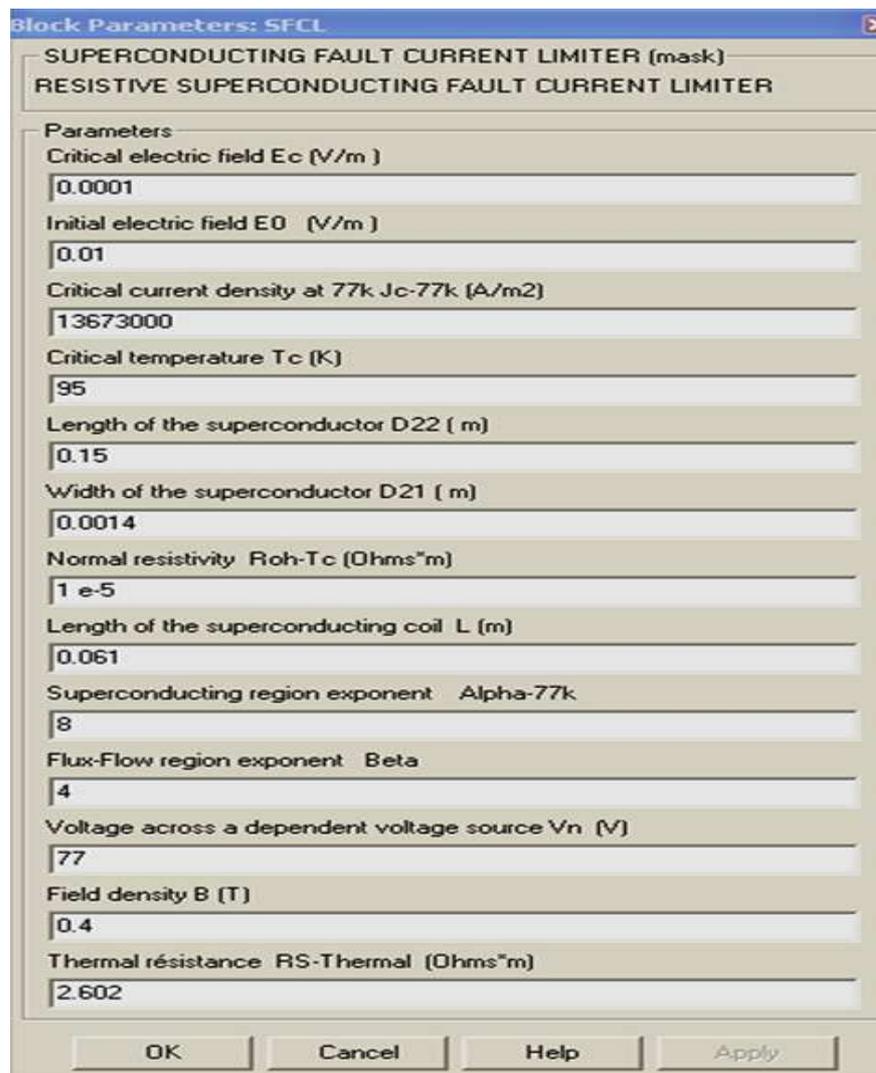


Figure V. 3. Interface graphique du SFCL

V.2.1. Simulation du défaut sans SFCL

En fonctionnement normal chaque cycle se répète. L'élément supraconducteur est vu en tant qu'élément négligeable en fonctionnement normal.

$$I(\text{crête sans défaut}) = \frac{110\text{V}}{2.001\ \Omega} = 54.97\ \text{Amps} \quad (\text{V.1})$$

$$I(\text{crête d défaut}) = \frac{V_s}{\text{résistance de défaut}} = \frac{110\ \text{V}}{(10\ \text{m}\Omega // 2\ \Omega + Z(\text{inductance}))} \approx 1\ \text{kA} \quad (\text{V.2})$$

La figure V.4 représente le circuit de simulation du défaut sans l'intégration du limiteur de courant.

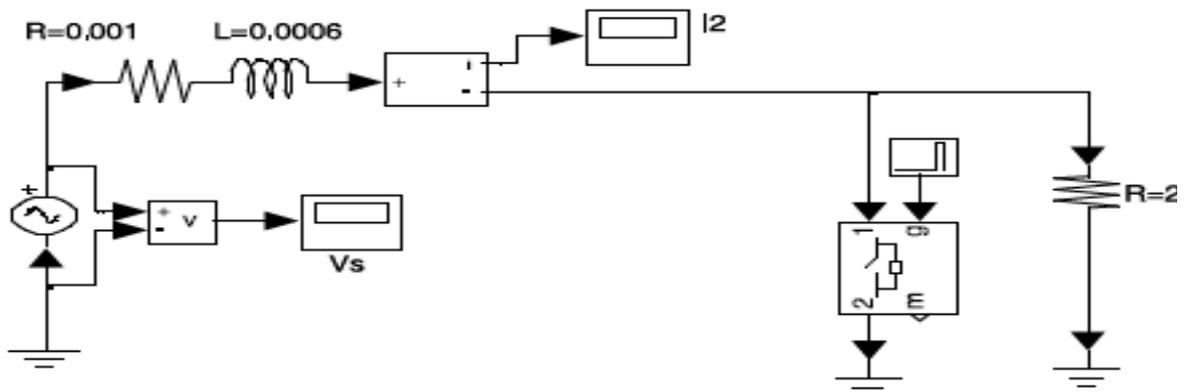


Figure V. 4. Circuit de simulation du défaut sans SFCL

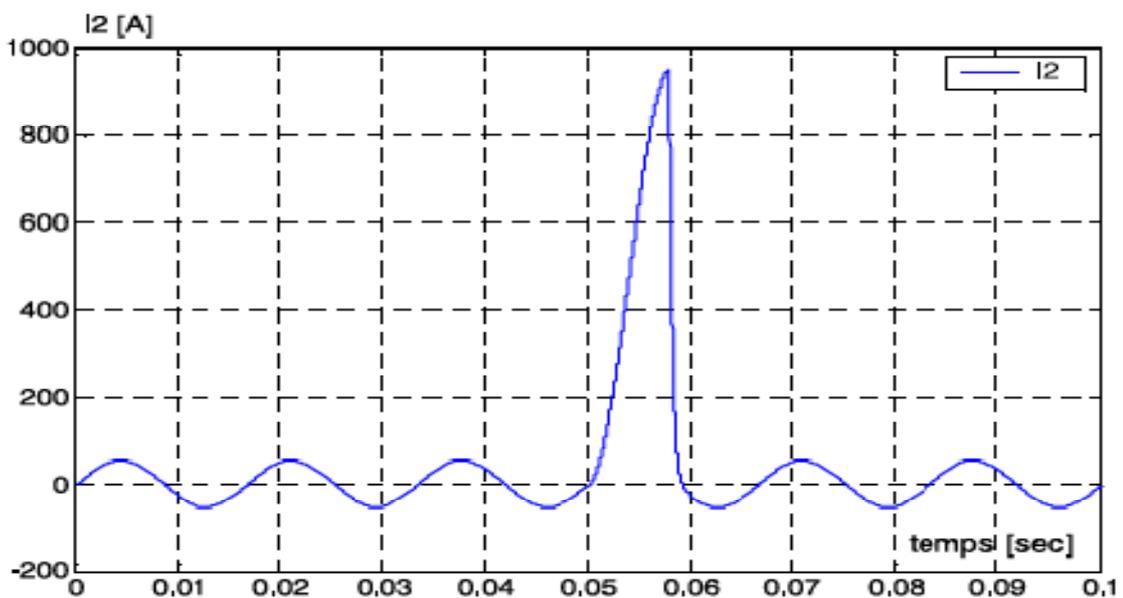


Figure V. 5. Allure du courant de défaut sans SFCL

Le courant de défaut sur la figure-V.5 est environ 900 ampères. Ce défaut est 16.36 fois plus grand que la crête du courant sans défaut. La tension pendant la crête de défaut est 1.9 kV (voir figure V.6), qui est 17.27 fois plus grand que la valeur correspondante à la tension dans les conditions de fonctionnement normale ou sans défaut.

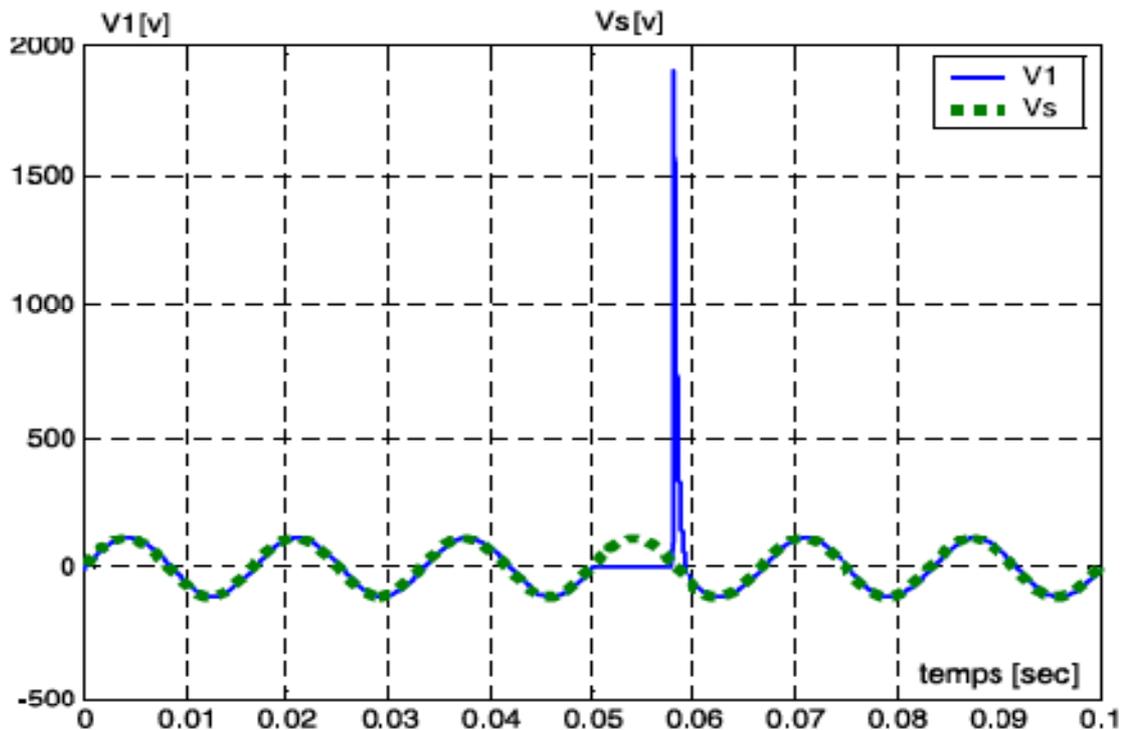


Figure V. 6. Allure de la tension aux bornes de la charge et de l'alimentation sans SFCL

Sur la figure V.6 on a représenté la tension mesurée (V1), aux bornes de l'alimentation, et la tension aux bornes de la charge. On voit clairement que la tension au borne de la charge est nulle pendant la période de défaut, puis il ya un pic de tension pendant la fermeture du disjoncteur.

V.2.2. Simulation du défaut avec SFCL

La protection de défaut devrait limiter le courant de court-circuit imposé par le défaut. On s'attend à ce que le courant de défaut soit limité par les caractéristiques supraconductrices du circuit, en faisant transiter le matériau de son état supraconducteur à son état normal.

Sur la figure V.7 est représenté le circuit proposé pour la simulation du défaut dans lequel est introduit le SFCL qu'on a développé. Pour simuler un défaut sur le réseau on ferme le disjoncteur ; on court-circuite la charge pendant une période réglable et on visualise le comportement du SFCL pour la limitation du courant de défaut. La figure V.8, montre la forme d'onde du courant de défaut en présence du SFCL dans la ligne. On voit bien que le courant de défaut est réduit de 1 KA, sans

SFCL (figure V.5), à 166 A, après avoir intégré un SFCL (figure V.8). Le courant de défaut est réduit d'un facteur 5 fois moins.

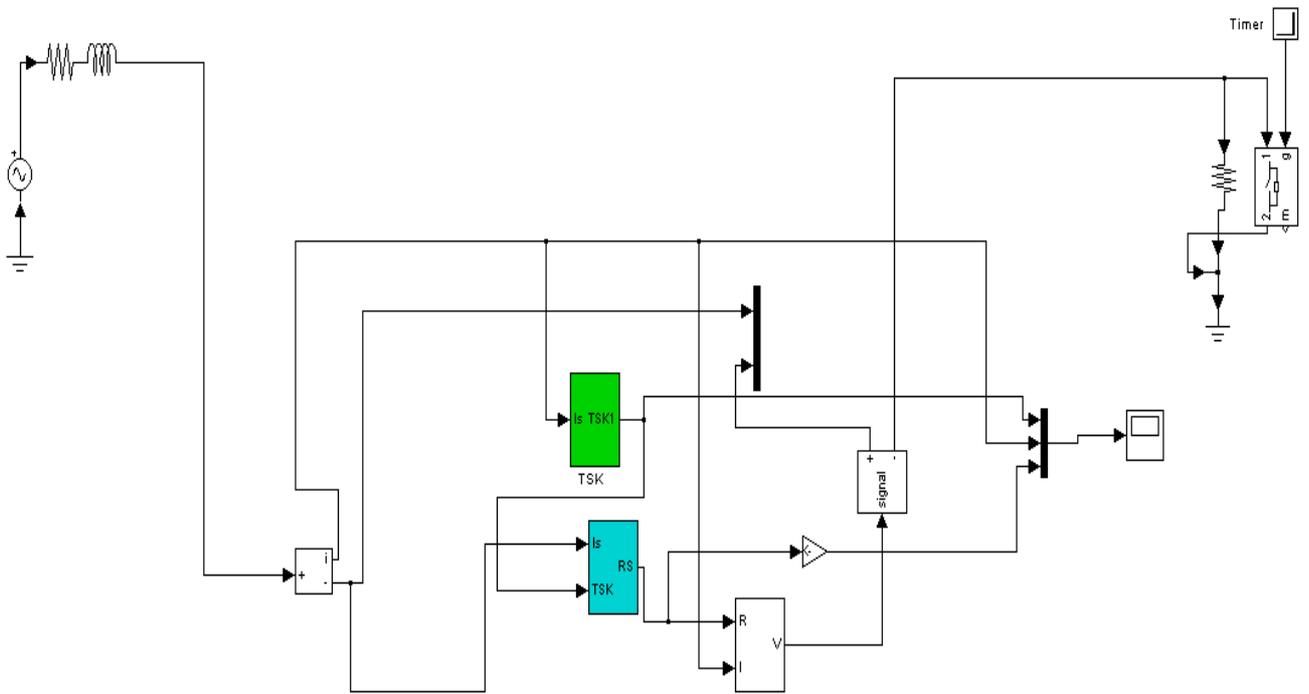


Figure V. 7. Circuit de simulation du SFCL monophasé

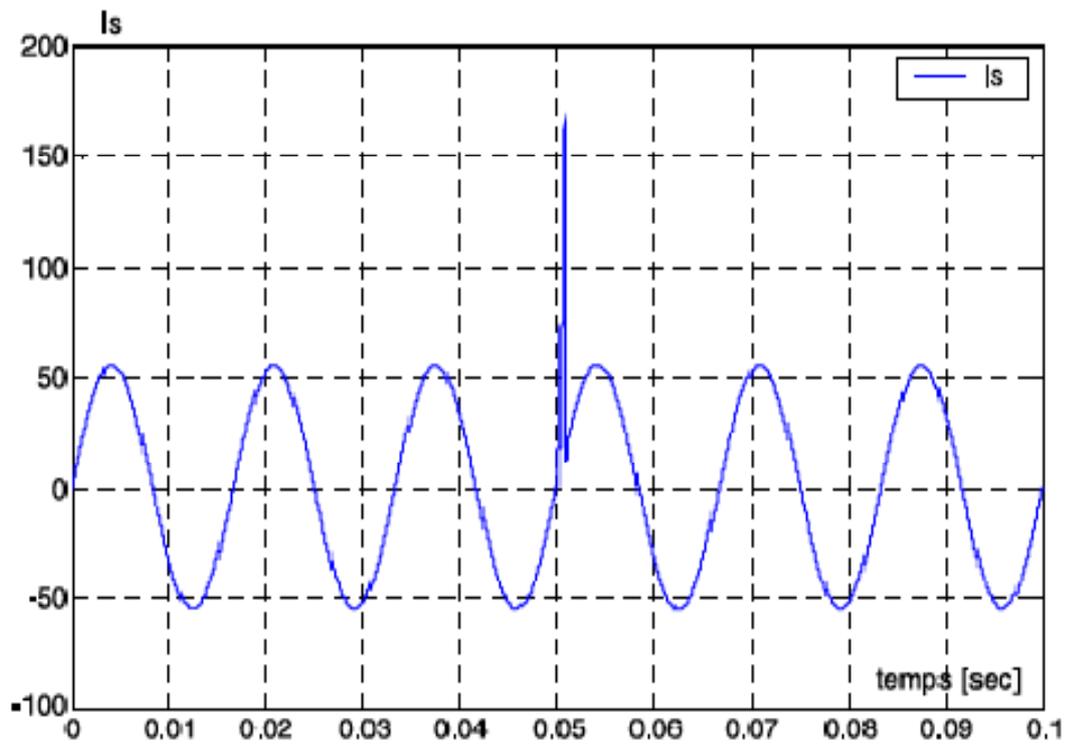


Figure V. 8. Allure du courant de défaut avec SFCL

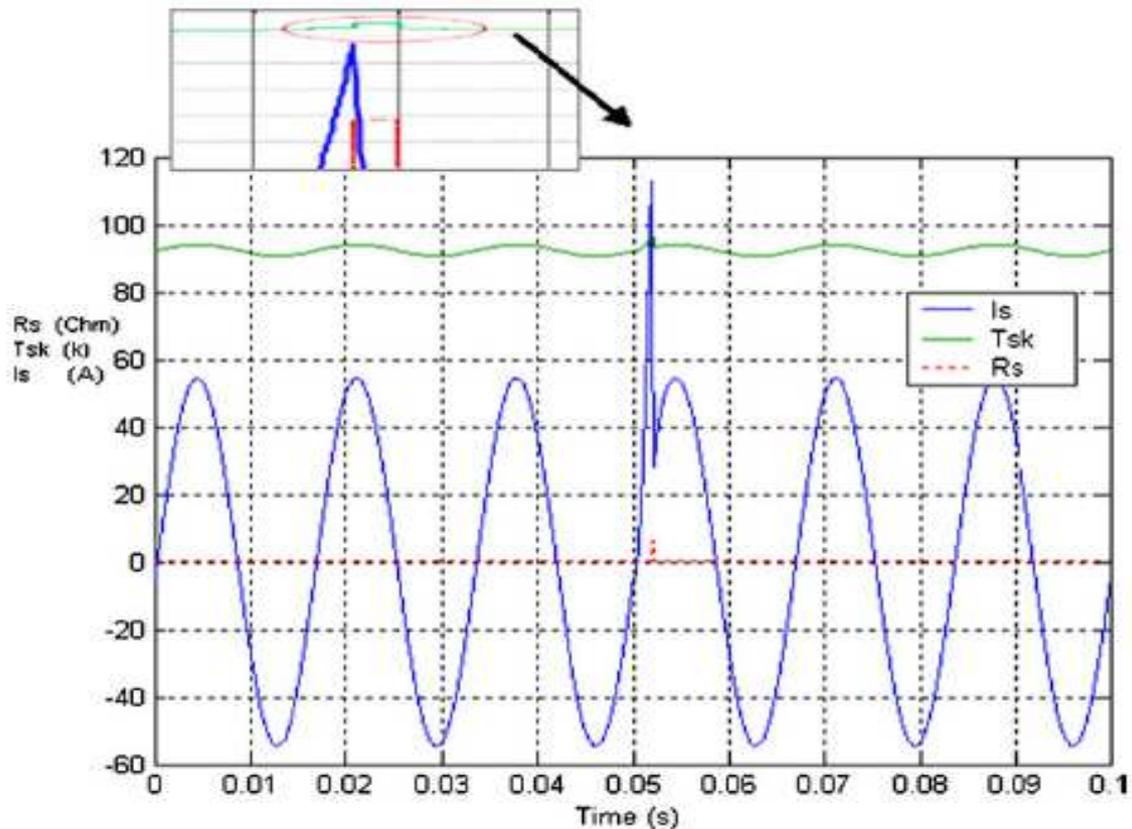


Figure V. 9. Représentation de l'état de transition du SFCL

La Figure-V.9 représente le courant qui traverse la charge, l'impédance de l'élément supraconducteur et la température du supraconducteur au moment de défaut. On voit clairement dans le zoom de la figure V.9 que la température du matériau supraconducteur (T_{sk}) en cas de défaut dépasse la valeur de la température critique T_c (95 K), la résistance du matériau supraconducteur augmente par conséquent et le courant de défaut est limité à la valeur de 166 A. Si on compare cette valeur à la valeur du courant de défaut sans limiteur qui est égale à environ de 900 A, on constate que le SFCL limite le courant de défaut à approximativement de 5.42 fois par rapport au courant du défaut sans SFCL. Cette valeur montre le grand intérêt du SFCL du point de vue fonctionnement du réseau, performance du réseau, réduction des temps d'arrêt, réduction du volume et du coût et surtout la stabilité du réseau. La stabilité du réseau électrique après intégration du SFCL à été testé récemment par notre équipe [67].

V.2.3. Intégration du SFCL dans un réseau triphasé

L'objectif principal de notre travail consiste à développer un modèle de limiteur de courant supraconducteur, facile à manipuler et qui reflète le fonctionnement réel du limiteur. Nous généralisons ensuite le modèle pour différents matériaux et différentes dimensions pour l'intégrer

finalement dans la bibliothèque MATLAB-simulink, puisque jusqu'à maintenant il n'y a pas un modèle prédéfini du SFCL dans MATLAB ou dans un autre logiciel, comme par exemple le modèle des FACTS.

Dans cette partie on se propose de valider le modèle sur un limiteur de courant supraconducteur triphasé, qui est basé sur le principe de fonctionnement du modèle électrique du SFCL, résistif. La figure V.10, représente un circuit triphasé d'une ligne en défaut, son circuit de simulation est montré dans la figure V.11.

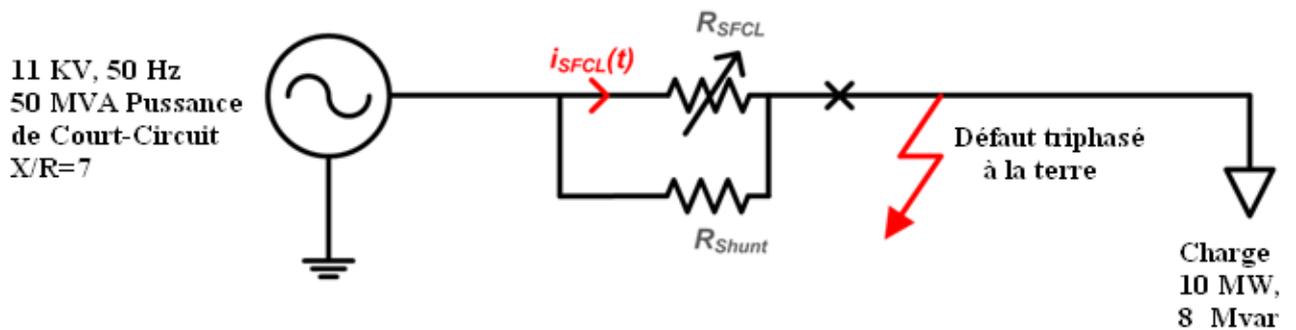


Figure V. 10. Circuit électrique du SFCL triphasé

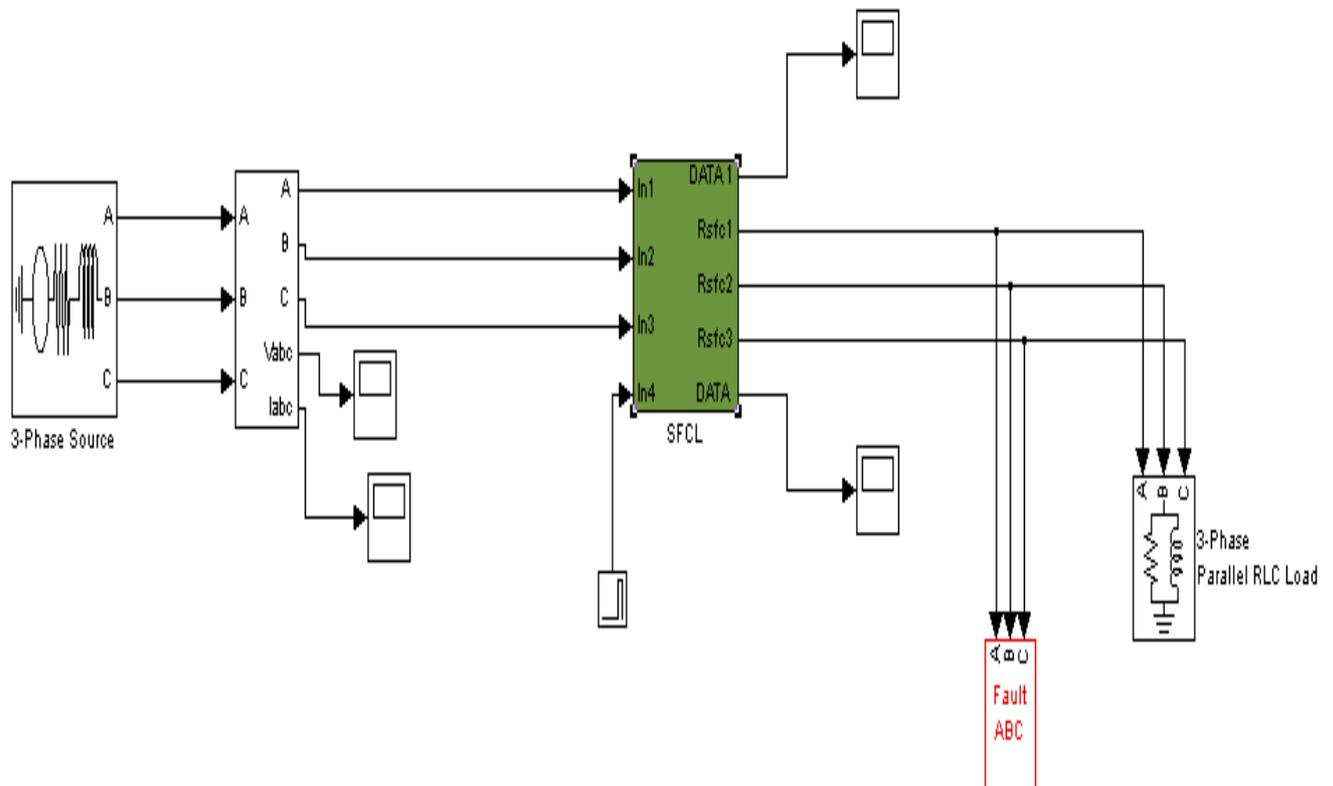


Figure V. 11. Circuit de simulation du SFCL triphasé

Le cahier de charge utilisé pour simuler le SFCL triphasé est basé sur les travaux de « Steven Blair », [68]. Les paramètres de simulation sont rassemblés dans le tableau V.2:

Tableau V.2. Paramètres de simulation du modèle d'SFCL triphasé

Paramètre	Valeur
E_C	0.0001 V/m
E_0	0.1 V/m
β	3
α_{-77K}	6
T_C	95 K
$\rho(T_C)$	$1e^{-6} \Omega m$
J_C_{-77K}	$1.5 e^7 A/m^2$

Pour simuler le limiteur de courant supraconducteur triphasé, nous avons inséré une résistance supraconductrice modélisée comme celle démontrée dans le cas du SFCL monophasé (figure V.6). Puisque les phases dans un système triphasé sont décalées par un angle déterminé φ , nous avons développé un circuit de commande, qui permet de décaler l'insertion de la résistance supraconductrice par le même angle pour ne pas créer un déséquilibre dans le réseau électrique.

Le circuit de commande est représenté dans la figure V.12. La figure V.13 représente une vue interne du bloc de simulation du circuit de commande d'un SFCL triphasé.

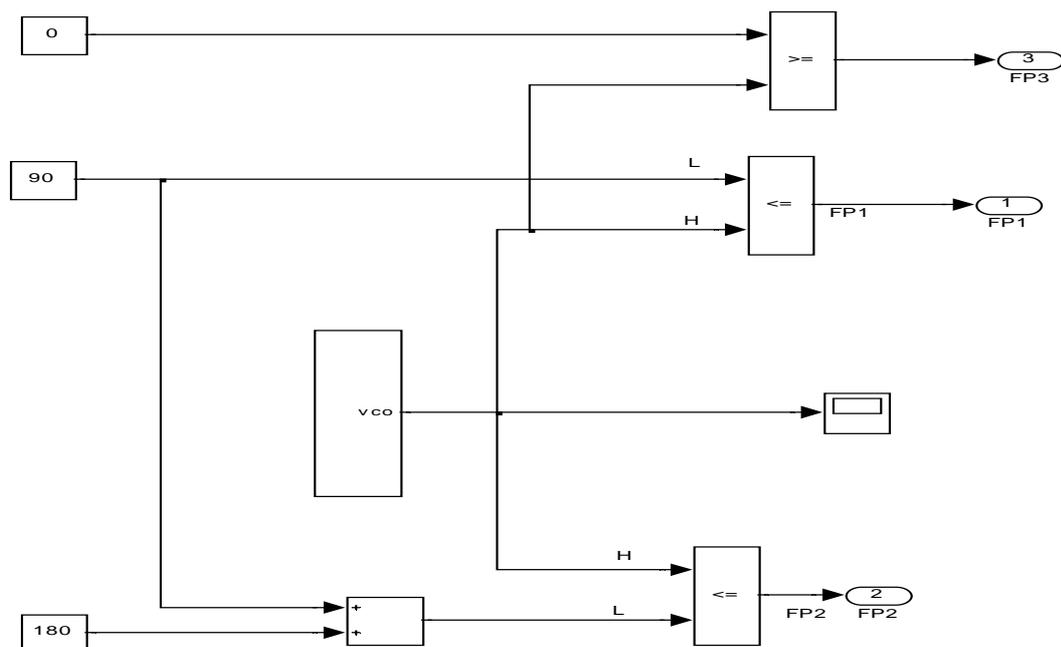


Figure V. 12. Circuit de commande des résistances supraconductrices dans un SFCL triphasé

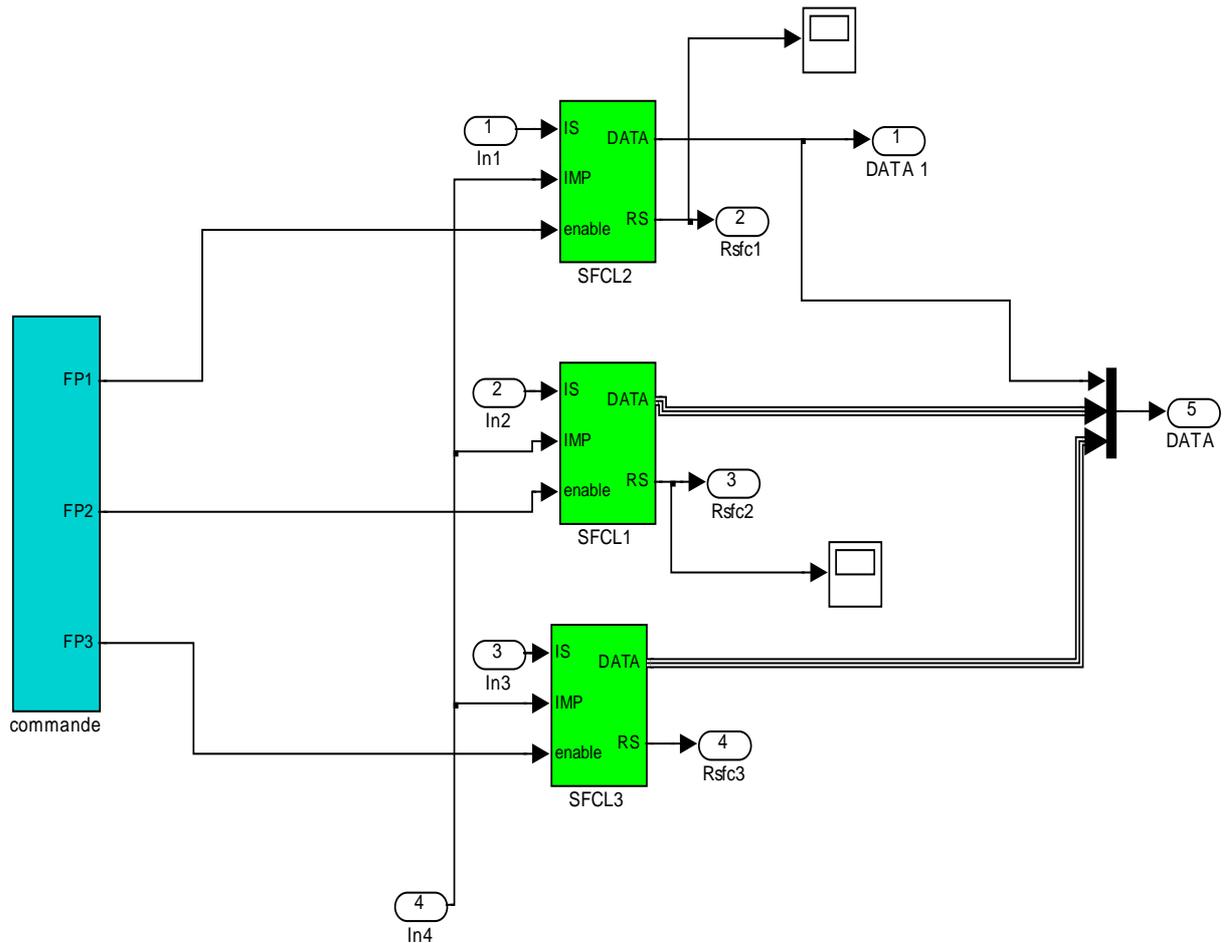


Figure V. 13. Vue interne du block de simulation d'un SFCL triphasé

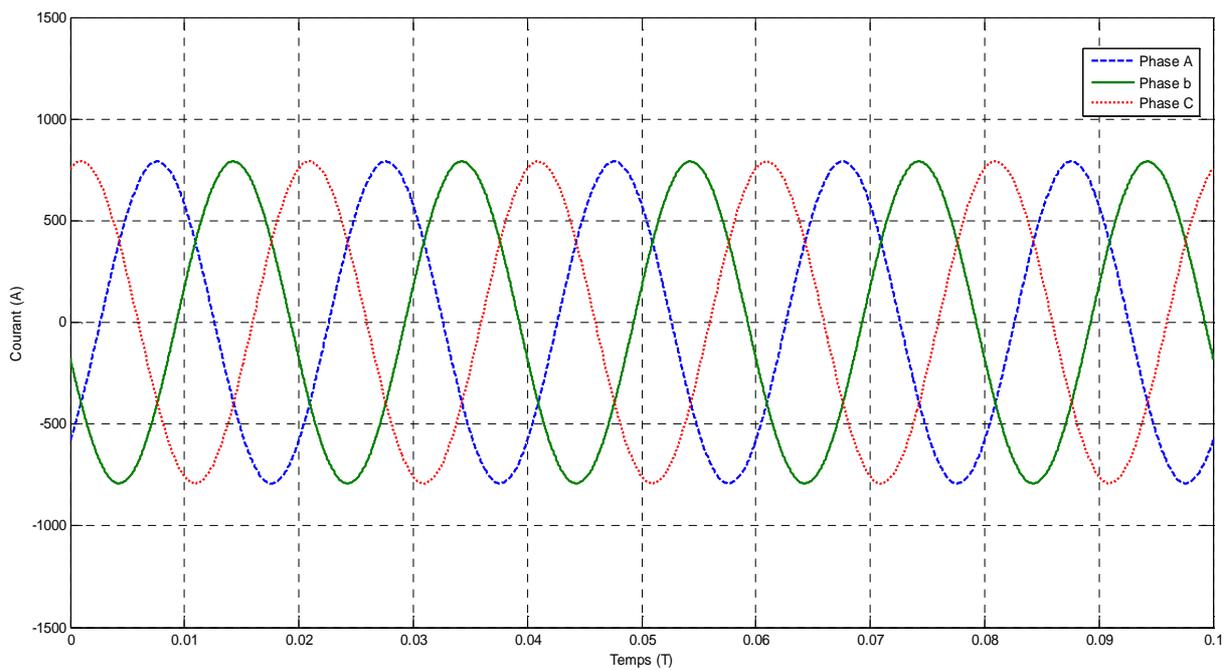


Figure V. 14. Allure du courant dans les trois phases sans SFCL

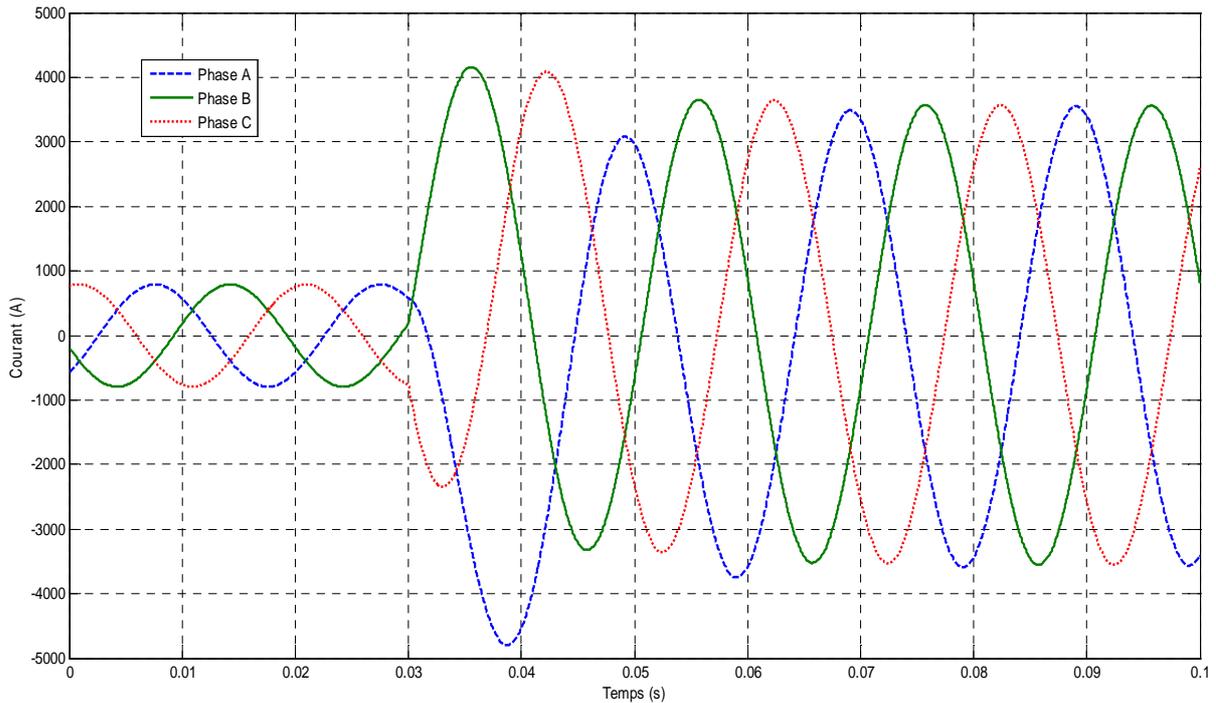


Figure V. 15. Allure du courant dans les trois phases avec SFCL

La figure V.14, représente l'allure du courant dans la ligne électrique pour les trois phases, sans défaut (mode de fonctionnement normale). On remarque que le courant pour les trois phases prend une valeur constante de 800 A.

Si on applique un défaut triphasé à l'aide du disjoncteur (figure V.11), on voit clairement que le limiteur de courant de défaut entre en service et limite ainsi le courant de défaut à la valeur de 4 KA ; Cette valeur représente approximativement 5 fois le courant nominal, qui est en faite la fourchette minimale de fonctionnement théorique du limiteur de courant supraconducteur.

V.3. Simulation du modèle thermique

V.3.1. Première proposition

V.3.1.1. Description du modèle de simulation

Le premier modèle thermique proposé du SFCL se compose d'un sandwich de trois couches minces principales, (Deux couches d'acier inoxydable et une couche de matériau supraconducteur Bi-2223). L'architecture simplifiée retenue pour un ruban de longueur 'L', est décrite dans la Figure V.16.

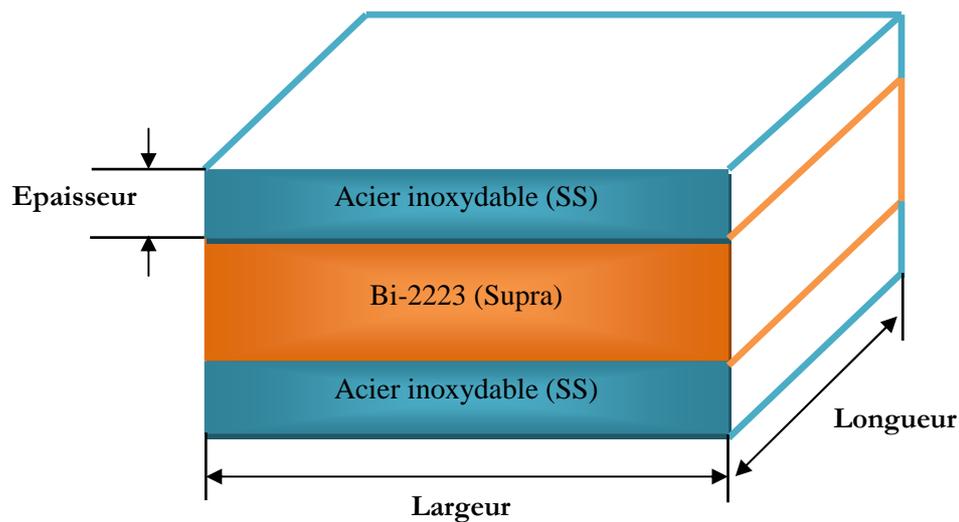


Figure V. 1 6. La conception du première modèle de simulation proposé

Le modèle proposé fonctionne sous une tension de 110kV, et un courant de 9kA. Les paramètres de simulations du SFCL proposé sont représentés sur les tableaux V.3, V.4, V.5.

Tableau V. 3. Paramètres géométriques du modèle thermique du SFCL

Paramètres	Expression (m)	Description
t_{ss}	$4 e^{-2}$	Epaisseur de la couche d'acier inoxydable
t_{Bi2223}	$2 e^{-3}$	Epaisseur de la couche supraconductrice
wth_{ss}	$2 e^{-3}$	Largeur de la couche d'acier inoxydable
wth_{Bi2223}	$2 e^{-3}$	Largeur de la couche supraconductrice
L	80	Longueur du SFCL
N_{ss}	20	Nombre des couches d'acier inoxydable
N_{Bi2223}	40	Nombre des couches du matériau Bi2223

Tableau V. 4. Paramètres électrique du modèle thermique du SFCL

Paramètres	Expression	Description
α	7.5	Exposant de la région Flux-creep
β	3	Exposant de la région Flux-flow
J_c	$2 e^7 \text{ A/m}^2$	Densité de courant critique
E_0	0.05 V/ m	Champ électrique initial

E_c	$1 e^{-4} \text{ V/ m}$	Champ électrique critique
ρ	$20 e^{-6} \Omega\text{m}$	Résistivité normale
I_n	$9000\sqrt{2} \text{ A}$	Courant nominale
R	9Ω	La résistance de la charge
L_1	0.0165 H	L'inductance initiale

Tableau V. 5. Paramètres thermique du modèle thermique du SFCL

Paramètres	Expression	Description
T_T	77 K	La température initiale du Bi2223
T_c	108 K	La température critique du Bi2223
k_{ss}	$8 \text{ kw}(\text{mk})^{-1}$	Conductivité thermique d'acier inoxydable
k_{Bi2223}	$1 \text{ kw}(\text{mk})^{-1}$	Conductivité thermique du Bi2223
c_{ss}	$2.34 e^6 \text{ kJ}(\text{kgk})^{-1}$	Capacité thermique spécifique d'acier inoxydable
c_{Bi2223}	$6.35 e^5 \text{ kJ}(\text{kgk})^{-1}$	Capacité thermique spécifique du Bi2223
I_n	$9000\sqrt{2} \text{ A}$	Courant nominale
R	9Ω	La résistance de la charge
L_1	0.0165 H	L'inductance initiale

V.3.1.2. Mode de fonctionnement normale (sans défaut)

En fonctionnement normal le limiteur de courant supraconducteur est invisible par rapport au réseau électrique, où il représente une résistance nulle, alors chaque cycle de courant ou de tension se répète.

Le courant en mode de fonctionnement normale est présenté à la figure V.17.

On peut voir que le courant pendant le fonctionnement normale est purement sinusoïdal, avec une valeur nominale de $9000 \sqrt{2} \text{ A}$.

Cependant la figure V.18 présente l'allure de la température en fonction du temps pendant le fonctionnement normal, On peut voir que la température reste constante à 77 K puisque le supraconducteur est refroidi à l'azote liquide. En raison de la température constante du supraconducteur, le SFCL reste dans l'état supraconducteur ou l'état d'une résistance nulle.

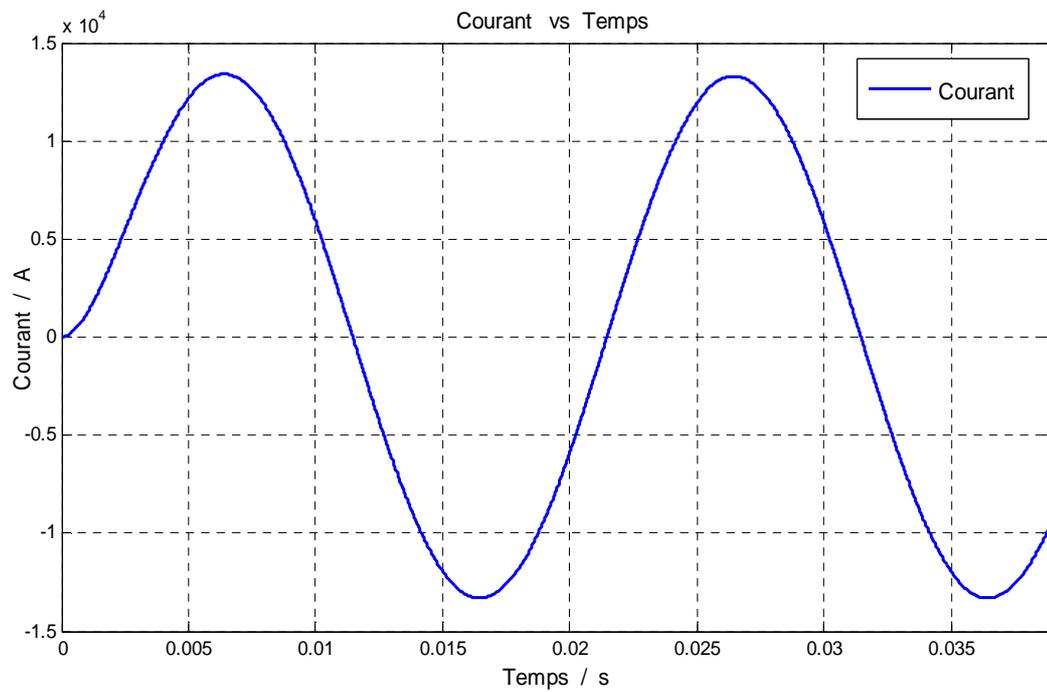


Figure V. 1 7. Allure de courant en fonction du temps pendant l'opération normale (sans défaut)

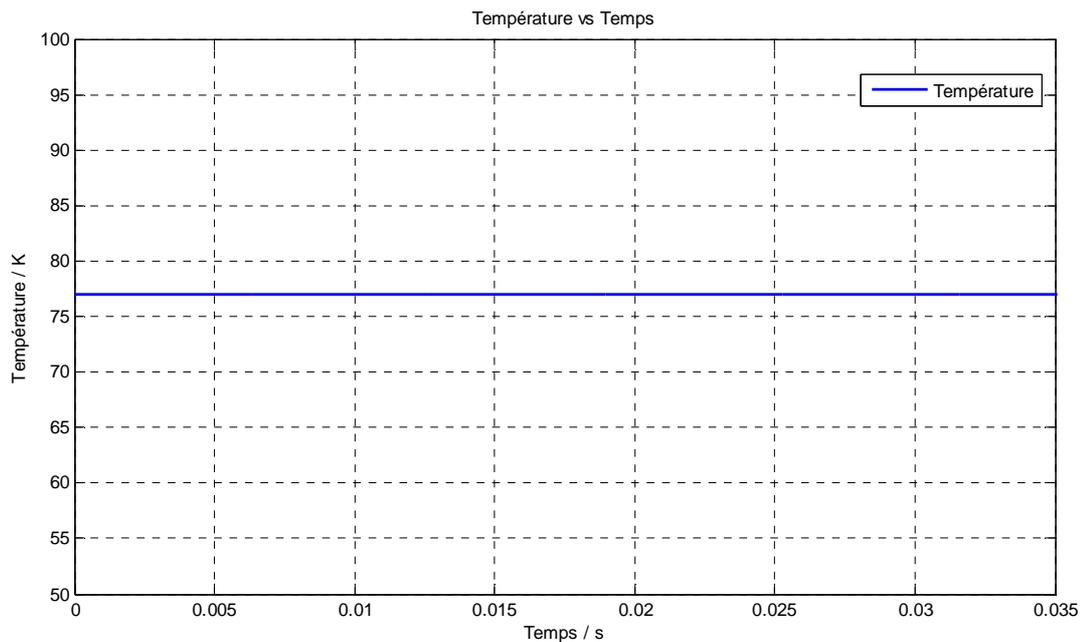


Figure V. 1 8. Allure de la température en fonction du temps pendant l'opération normale (sans défaut)

V.3.1.3. Mode de fonctionnement en défaut (court-circuit)

Afin de voir le comportement du SFCL pendant le défaut, l'interrupteur S est fermé après deux cycles (0.04esc). La figure V.19 montre le circuit électrique pendant le défaut.

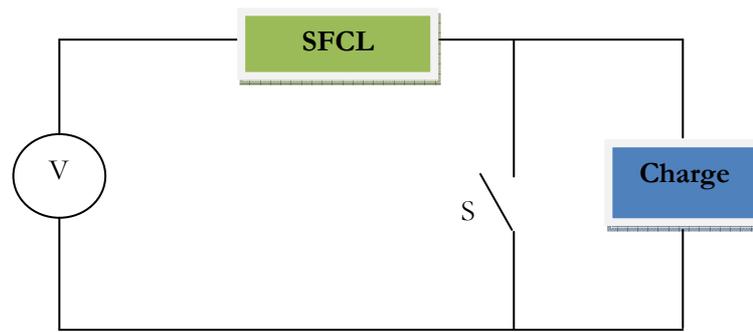


Figure V.19. Circuit électrique dans le mode de fonctionnement en défaut

Si on court circuit la charge en fermant l'interrupteur S, tout le courant de défaut pénètre dans la charge ; le limiteur de courant supraconducteur entre en service, par l'insertion d'une résistance en série dans le réseau. La figure V.20 présente la forme d'onde du courant pendant le défaut.

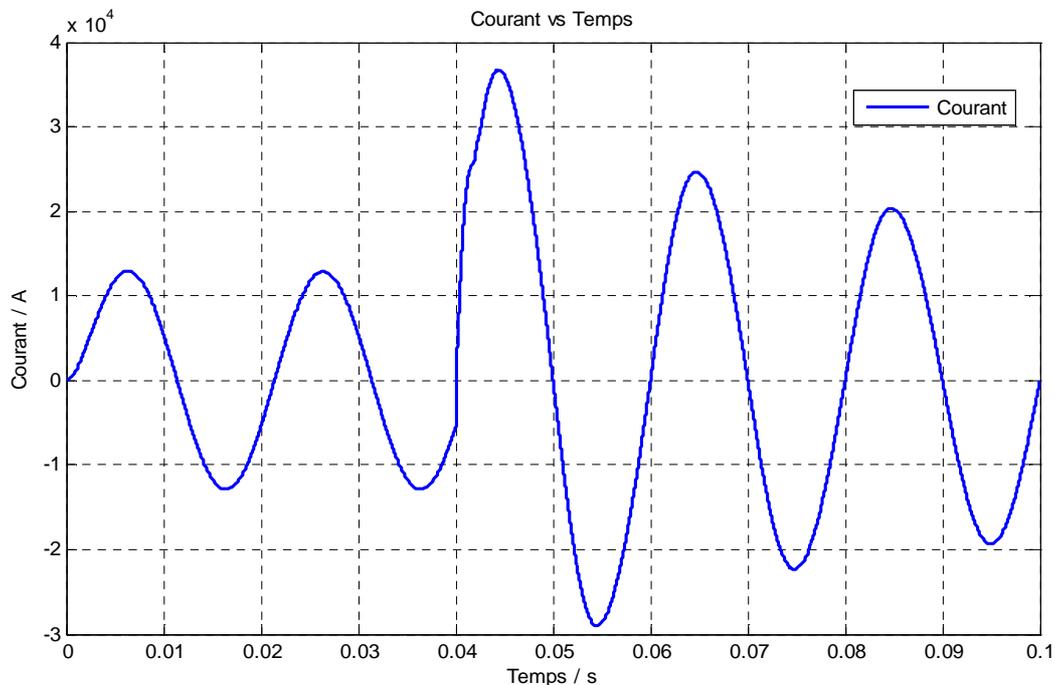


Figure V.20. Allure du courant en fonction du temps pendant le défaut

De la figure V.20 on peut voir que le courant monte jusqu'à 35KA, quand l'interrupteur S est fermé à 0.04 secondes, ce qui est presque 2.75 fois le courant nominale, puis revient à l'état initial après l'élimination du défaut. On peut voir que le SFCL prend une fraction de seconde pour limiter le courant de défaut.

Il est connu que dans un réseau électrique haut tension, le courant de court-circuit peut atteindre 30 fois la valeur du courant assigné. On montre bien que le SFCL limite le courant de défaut aux environs de 2.75 fois le courant nominal. Cette valeur dépend du dimensionnement et du matériau utilisé.

On donne dans la figure V.21 l'évolution de la résistance du SFCL en fonction du temps, avant et après défaut.

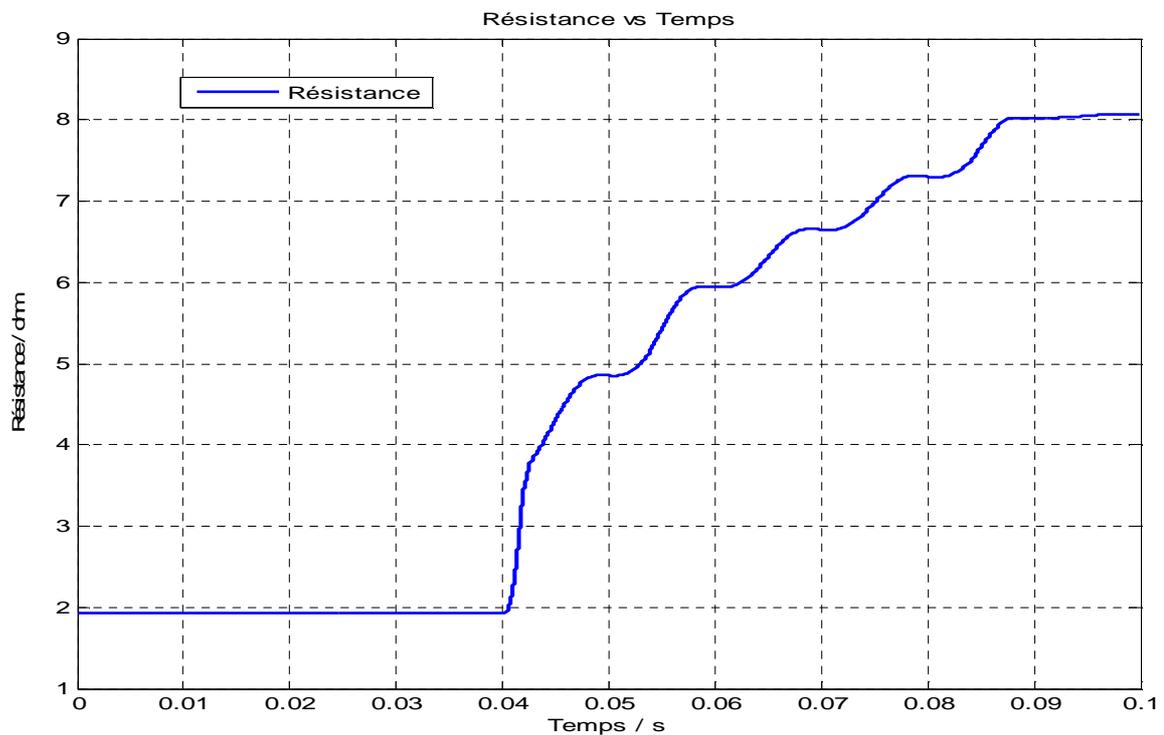


Figure V.21. Variation de la résistance en fonction du temps avant et après le défaut

Réellement il n'est pas facile de pouvoir connaître la valeur exacte de la résistance supraconductrice pendant le régime de limitation, cependant on montre dans la figure V.21 l'évolution rapide de cette dernière pendant le défaut. Cette augmentation limite le courant de défaut. A mesure que la résistance augmente, le SFCL transite de l'état supraconducteur, (ou l'état d'une résistance nulle), au régime de fonctionnement normal caractérisé par une grande résistance pendant le défaut. Quand la température dépasse la température critique du supraconducteur, ($T_c=108$ K), le SFCL transite à une valeur de la résistance, qui augmente proportionnellement avec la valeur du courant de défaut. Ainsi la transition induit une augmentation considérable de la chaleur du SFCL, qui peut endommager le matériau supraconducteur. Le rôle de l'acier inoxydable consiste à dissiper cette chaleur et protéger ainsi le matériau supraconducteur.

Dans notre travail nous avons choisi d'étudier trois zones pour le calcul de la température du sandwich (figure V.22) :

Zone1 : proche du substrat, (zone représente l'interface entre le substrat et le supraconducteur).

Zone2 : représente le milieu du matériau supraconducteur

Zone3 : proche du shunt (zone d'interface entre le matériau supraconducteur et le shunt)

La localisation de ces couches nous permet de suivre effectivement le transfert de chaleur entre les trois couches et par conséquent leurs rôles au cours du fonctionnement du SFCL.

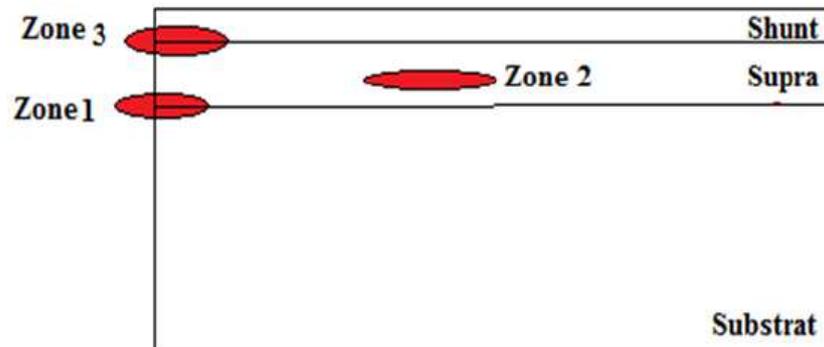


Figure V.22. Schéma des zones simulées pour le calcul de la température

La figure V.23 montre l'évolution de la température dans la couche supraconductrice et les deux couches d'acier inoxydable.

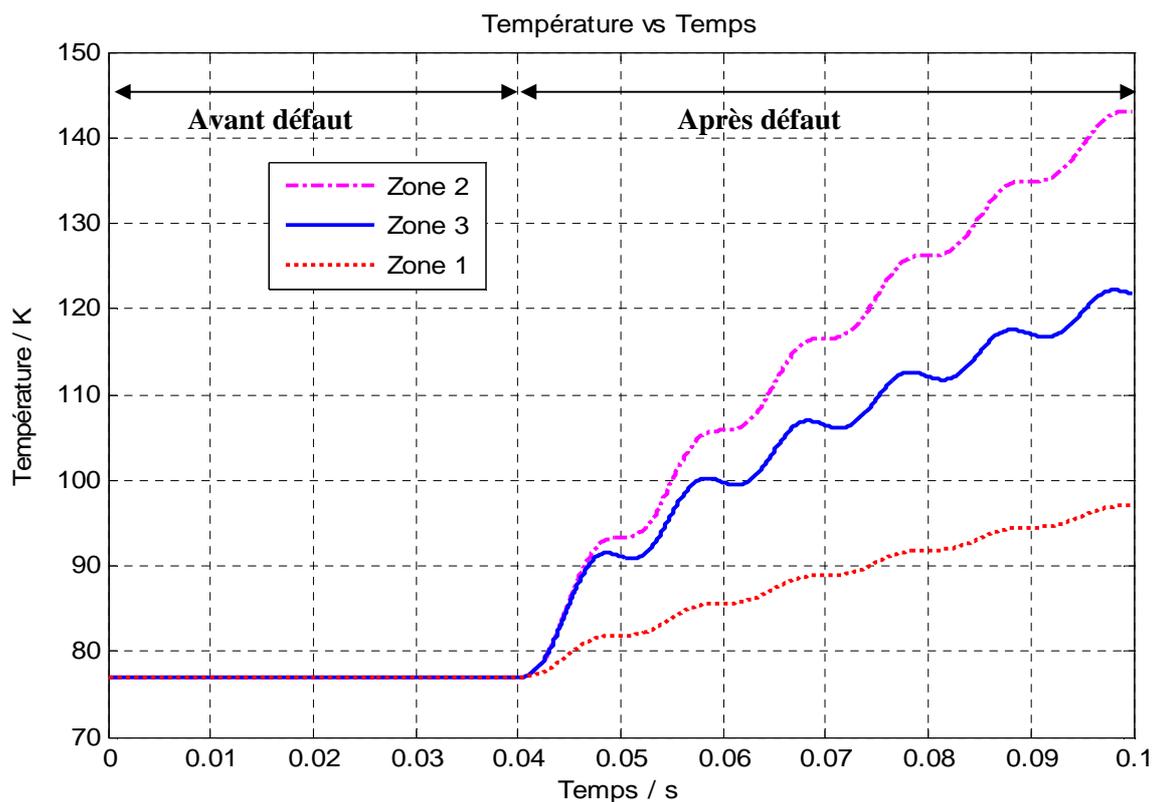


Figure V.23. Variation de la température en fonction du temps avant et après le défaut

Il ya une relation directe entre la rapidité de la transition et l'augmentation de la température du matériau supraconducteur. Si le courant de défaut est très élevé la température du supraconducteur

augmente rapidement. La température du supraconducteur dépasse alors la température critique. Le SFCL fonctionne ainsi dans un état de grande résistance. En raison de l'échauffement rapide de l'élément supraconducteur, il commute très rapidement à l'état normal ou l'état de haute résistance. Cependant l'échauffement se traduit par un temps de transition plus long par rapport à l'échauffement rapide du supraconducteur.

On peut voir de la figure V.23 que la température du matériau supraconducteur (zone2) est plus élevée, puisque pendant le défaut la majorité du courant de défaut traverse le supraconducteur. Il en résulte l'augmentation de la température de l'élément supraconducteur qui peut avoir comme conséquence la formation des point chaud, endommagent ainsi le supraconducteur.

La chaleur produite dans le supraconducteur pendant le défaut doit être absorbée par les couches d'acier inoxydable autour d'elle (zone2 et zone3), qui protègent ainsi le supraconducteur. Le comportement du SFCL est déterminé en grande partie par sa longueur et le type de matériau employé. Si on réduit la longueur du matériau supraconducteur, on minimise le coût de fabrication du SFCL, en contre partie il y aura un grand champ électrique à répartir sur le supraconducteur ayant pour résultat l'augmentation de la température du supraconducteur. Les résultats montrent qu'en quelques centaines de microsecondes le SFCL transite dans la zone normale. Le tableau V.6 présente quelques résultats obtenus pour différentes longueurs du matériau supraconducteur.

Tableau V. 6. Le courant de défaut et la température correspondant à différentes longueurs du supraconducteur à $k=0.8$, l'épaisseur = 0.002m et la capacité thermique = $6.35 \times 10^5 \text{ kJ(kgk)}^{-1}$

Longueur (m)	Courant de défaut (A)	Courant de défaut après 1 cycle (A)	Courant de défaut après 2 cycle (A)	Température (k)
70	40571	25890	22019	151
80	36690	24700	20350	137
100	30680	22720	19130	121
120	26290	21040	17700	110

La figure V.24 représente le courant de défaut relatif à différentes longueurs du limiteur de courant supraconducteur. Les résultats montrent qu'avec une plus petite longueur du supraconducteur un champ électrique fort est développé et également un grand écoulement de courant de défaut. On peut voir que le pic de courant de défaut augmente inversement avec l'augmentation de la longueur du SFCL.

Dans la figure V.25 on voit clairement que la température à l'intérieur des trois couches d'SFCL augmente aussi inversement avec la longueur du SFCL. Ainsi il est recommandé de tenir compte

de ces résultats pour le dimensionnement du limiteur de courant supraconducteur. La fabrication d'un limiteur de courant long, diminue le pic du courant de défaut mais elle influence la rapidité d'échauffement du SFCL, en conséquence la rapidité de transition de l'état supraconducteur à l'état normale.

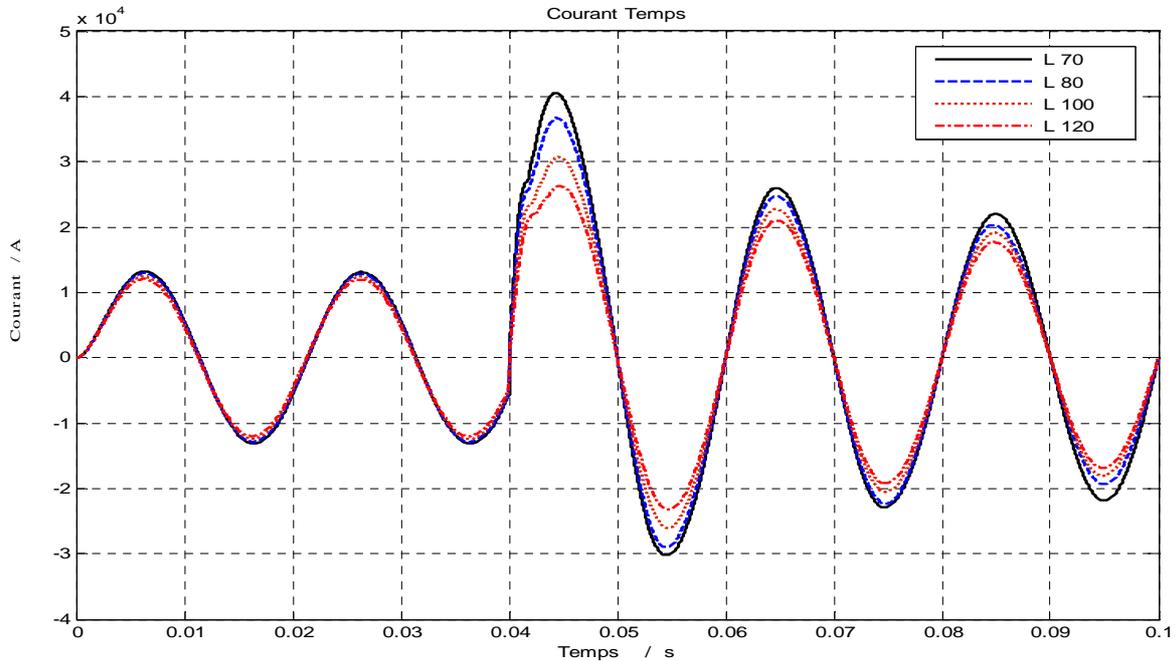


Figure V.24. Le courant de défaut correspond à différentes longueurs du SFCL à une épaisseur de 0.002m ($k=0.8$)

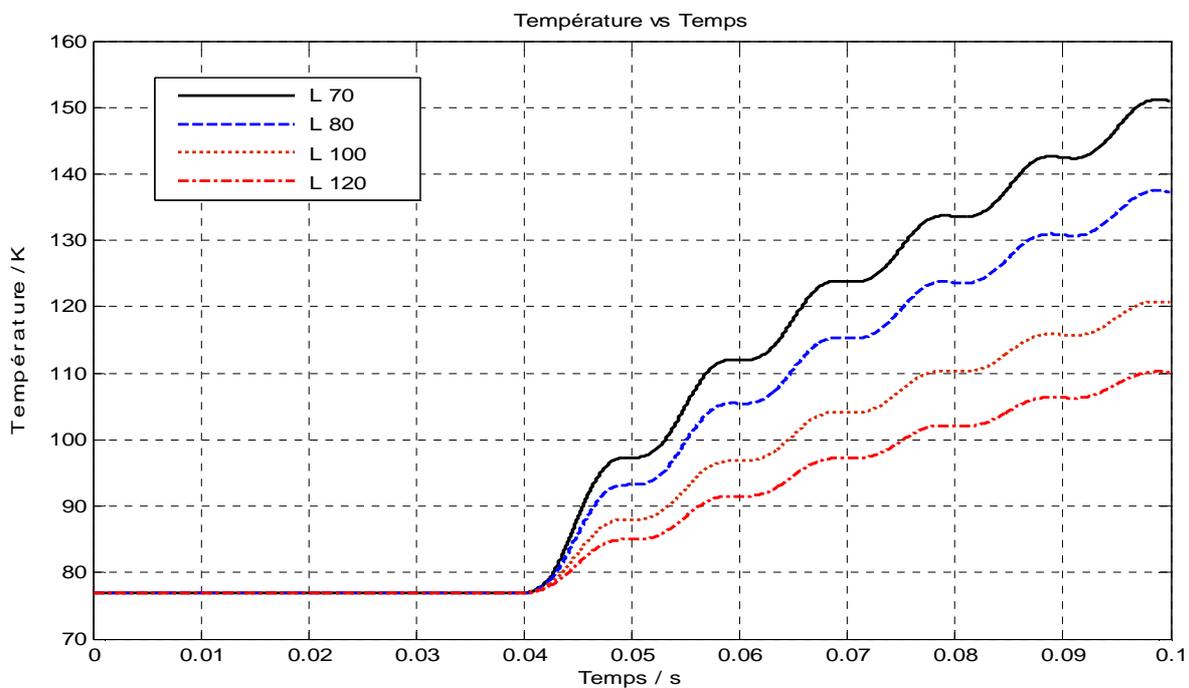


Figure V.25. La température en fonction de différentes longueurs du SFCL à une épaisseur de 0.002m ($k=0.8$)

Maintenant nous varions l'épaisseur de la couche supraconductrice de 0.002m à 0.009m, et nous visualisons son effet sur le fonctionnement du SFCL.

Tableau V.7. Le courant de défaut et la température correspondant à différentes longueur du supraconducteur à $k=0.8$, l'épaisseur = 0.009m et la capacité thermique = $6.35 \times 10^5 \text{ kJ(kgk)}^{-1}$

Longueur (m)	Courant de défaut (A)	Courant de défaut après 1 cycle (A)	Courant de défaut après 2 cycle (A)	Température (k)
70	40588	25340	21900	157
80	36711	24150	19370	142
100	30706	22190	18480	124
120	26301	20700	17160	112

Si nous comparons le tableau V.6 avec le tableau V.7, on peut voir que si on augmente l'épaisseur et on garde la même longueur du matériau supraconducteur, la température devient plus grande et la chaleur produite pendant le défaut est absorbée beaucoup plus rapidement si l'épaisseur du matériau supraconducteur est réduite.

La figure V.26 représente les formes d'ondes du courant correspondant à différentes longueurs quand l'épaisseur de la couche supraconductrice est 0.009m.

On voit que le courant de défaut dans la figure V.26 est un peu plus grand par rapport à la figure V.25 (dans le cas où l'épaisseur de la couche supraconductrice est 0.002m).

La relation entre la valeur de la densité du courant de défaut et la géométrie du matériau supraconducteur est vérifiée par l'équation (IV.16); On peut constater que si on augmente la section du matériau supraconducteur (donc l'épaisseur ou la largeur), la résistance supraconductrice va diminuer; Alors la densité du courant qui traverse le matériau supraconducteur augmente proportionnellement.

La figure V.27 représente la variation de la température dans le matériau supraconducteur correspondant aux différentes longueurs du SFCL; dans le cas où l'épaisseur du matériau supraconducteur est augmenté à 0.009m.

On peut voir que si on augmente l'épaisseur du supraconducteur, la température augmente également. On peut observer également qu'à mesure que la longueur du SFCL augmenté le courant de défaut est réduite à une valeur proche de sa valeur nominale.

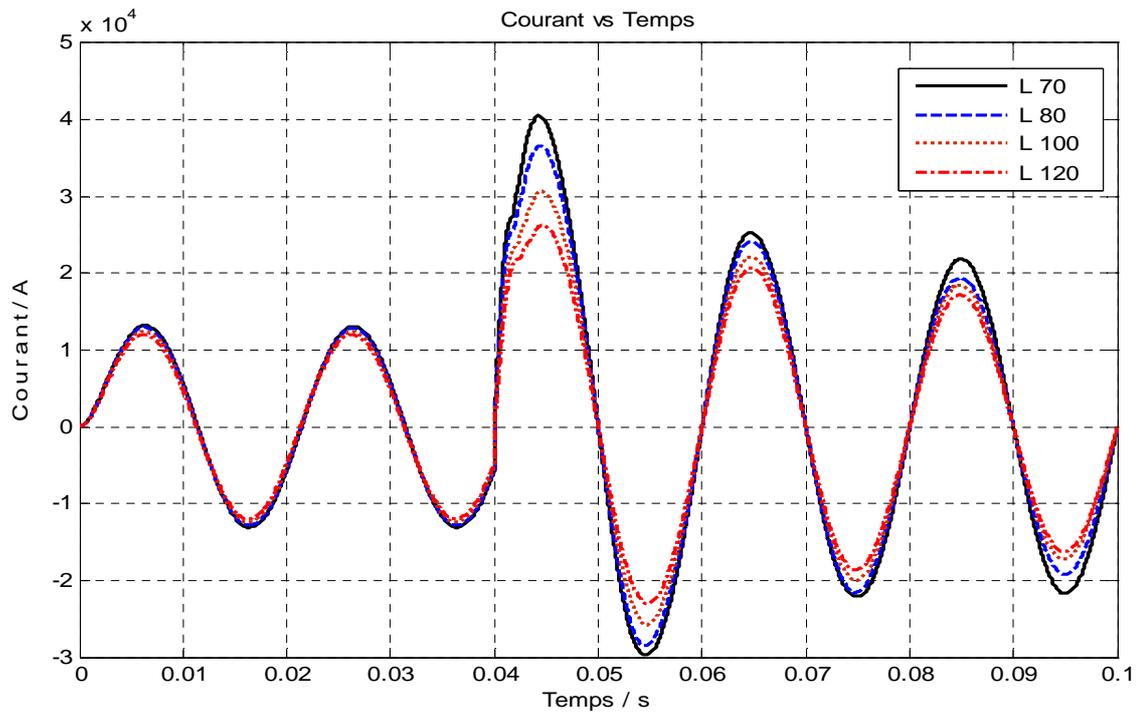


Figure V.26. Le courant de défaut correspond à différentes longueurs du SFCL à une épaisseur de 0.009m ($k=0.8$)

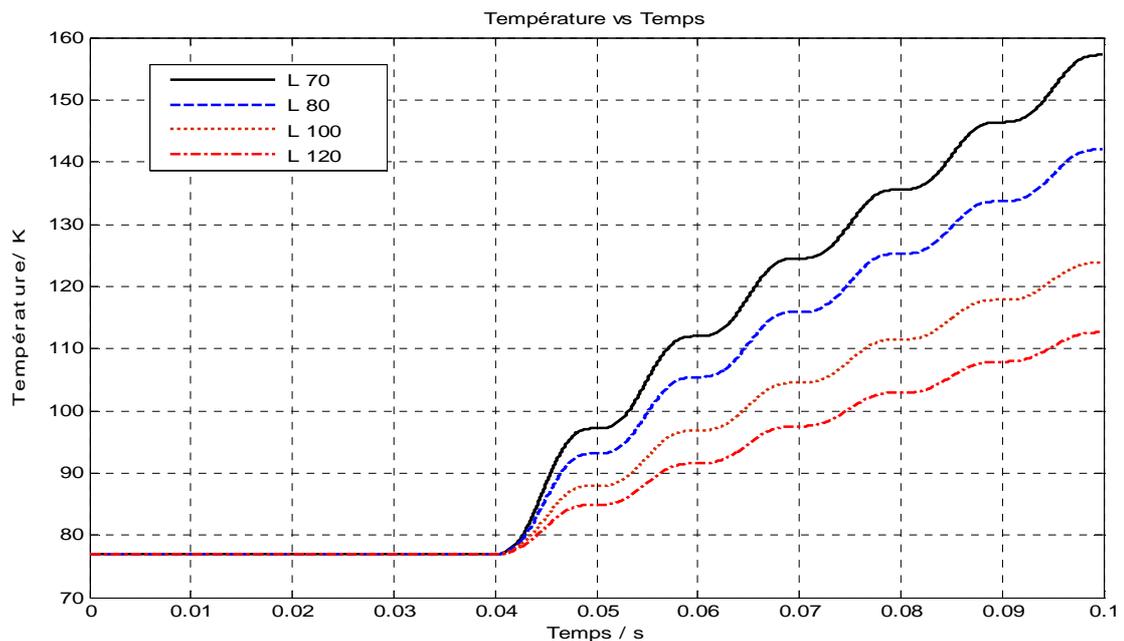


Figure V.27. La température en fonction de différentes longueurs du SFCL à une épaisseur de 0.009m ($k=0.8$)

Comme on a déjà expliqué la longueur trop courte du supraconducteur n'est pas appropriée car il ya risque de détruire le matériau supraconducteur en raison de la grande quantité de chaleur produite pendant le défaut. Si on utilise un supraconducteur très long, la quantité de champ électrique à laquelle il est exposé est très petite et le champ varie proportionnellement avec la tension et inversement avec la longueur du conducteur. Il en résultat que la densité de courant ne dépasse pas

la valeur du courant critique (figure V.28). Ainsi un conducteur long augmente la température et par conséquent les pertes, qui nécessite un système de refroidissement plus coûteux. L'autre inconvénient dans l'utilisation d'un matériau supraconducteur long est que le temps de récupérations de son état supraconducteur après une transition ou défaut, devient plus long.

Si un supraconducteur de longueur intermédiaire est utilisé le champ électrique pendant le défaut est élève mais encore moins que le champ électrique imposé à un conducteur d'une longueur très courte. La densité de courant reste à l'intérieur de la région de transition ; La puissance absorbée sera plus grande dans ce cas. Dans le cas d'un conducteur long, ainsi la température du conducteur augmente jusqu'à dépasser la valeur critique, et le limiteur transite à l'état normale.

Comme on a déjà expliqué, pour garder une tolérance pendant le fonctionnement normal, la densité de courant J ne devrait pas dépasser $k\%$ de J_c . Dans les résultats précédents, nous avons fixé la valeur de k à 0.8 ; Maintenant nous varions la valeur de k à 0.7 ou 70% de J_c .

Le tableau V.8 présente les résultats des simulations quand $k=0.7$ et l'épaisseur est de 0.002m.

Tableau V. 8. Le courant de défaut et la température correspondant à différentes longueur du supraconducteur à $k= 0.7$, l'épaisseur = 0.002m et la capacité thermique= $6.35 \text{ e}^5 \text{ kJ(kgk)}^{-1}$

Longueur (m)	Courant de défaut (A)	Courant de défaut après 1 cycle (A)	Courant de défaut après 2 cycle (A)	Température (k)
70	46350	29610	25140	151
80	41920	28170	23140	137
100	35060	25880	21800	120
120	30020	23980	20160	110

On voit que pendant que nous diminuons la tolérance (k), le courant de défaut augmente a une valeur plus grande que le courant de défaut produit quand la valeur de k était 0.8 pour la même longueur.

On peut remarque d'après les courbes de la figure V.29 que la température reste la même pour les deux différentes valeurs de k . Le courant de défaut après les premiers et deuxièmes cycles est plus grand quand nous diminuons la valeur de k de 80% à 70%.

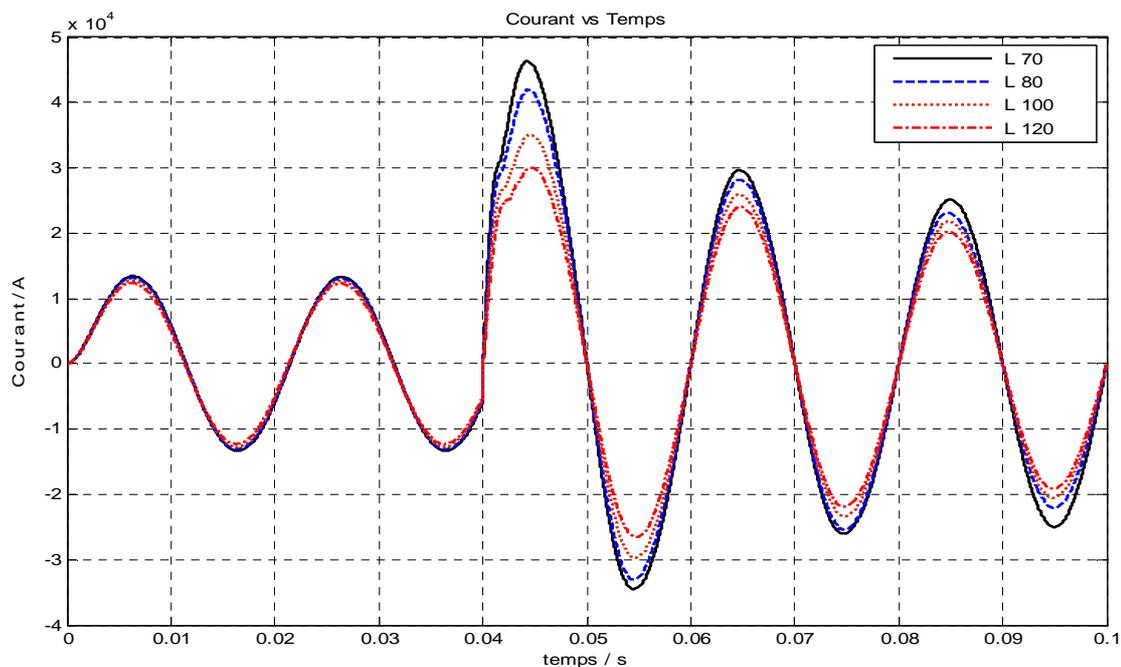


Figure V.28. Le courant de défaut correspond à différentes longueurs du SFCL à une épaisseur de 0.002m ($k=0.7$)

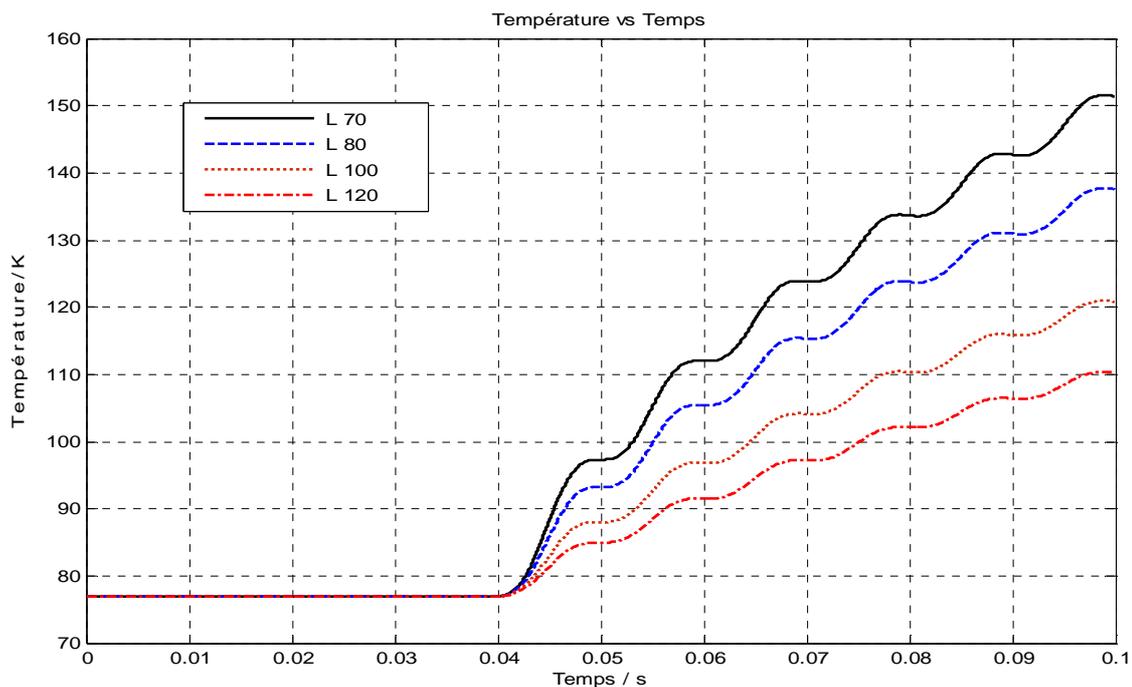


Figure V.29. La température en fonction de différentes longueurs du SFCL à une épaisseur de 0.002 m ($k=0.7$)

Le tableau V.9 présente les résultats de simulations quand la valeur de $k=0.7$ et l'épaisseur de la couche supraconductrice est 0.009m

Tableau V.9. Le courant de défaut et la température correspondant à différentes longueur du supraconducteur à $k=0.7$, l'épaisseur = 0.009m et la capacité thermique= $6.35 e^5 \text{ kJ(kgk)}^{-1}$

Longueur (m)	Courant de défaut (A)	Courant de défaut après 1 cycle (A)	Courant de défaut après 2 cycle (A)	Température (k)
70	46380	28920	25010	157
80	41950	27620	22100	142
100	35081	25330	21120	123
120	30055	23650	19630	112

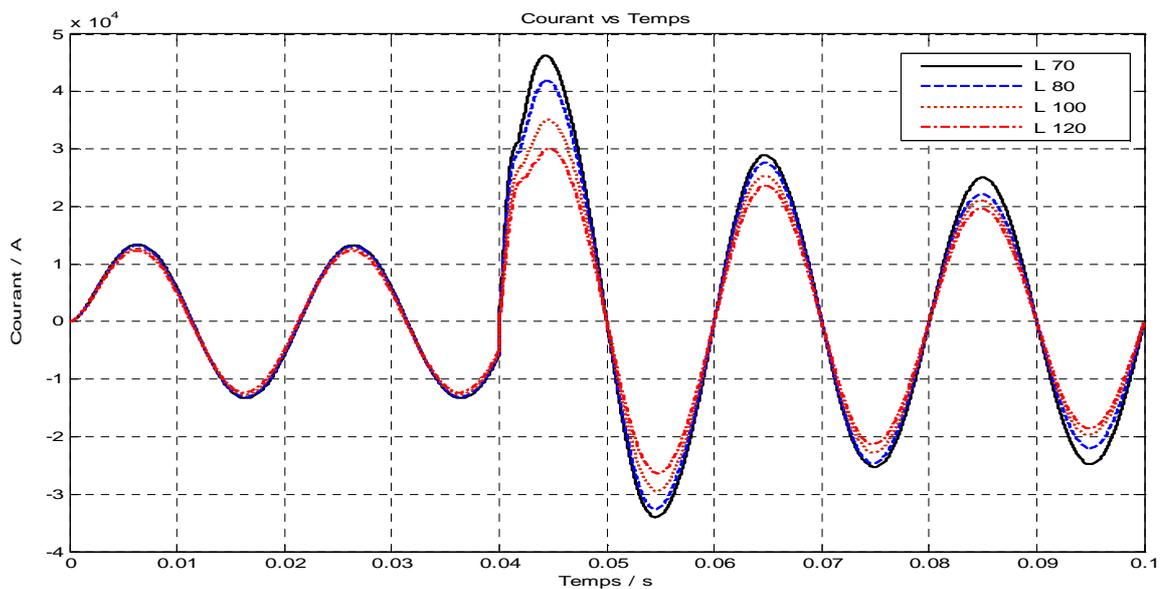


Figure V.30. Le courant de défaut correspond aux différentes longueurs du SFCL à une épaisseur de 0.009m ($k=0.7$)

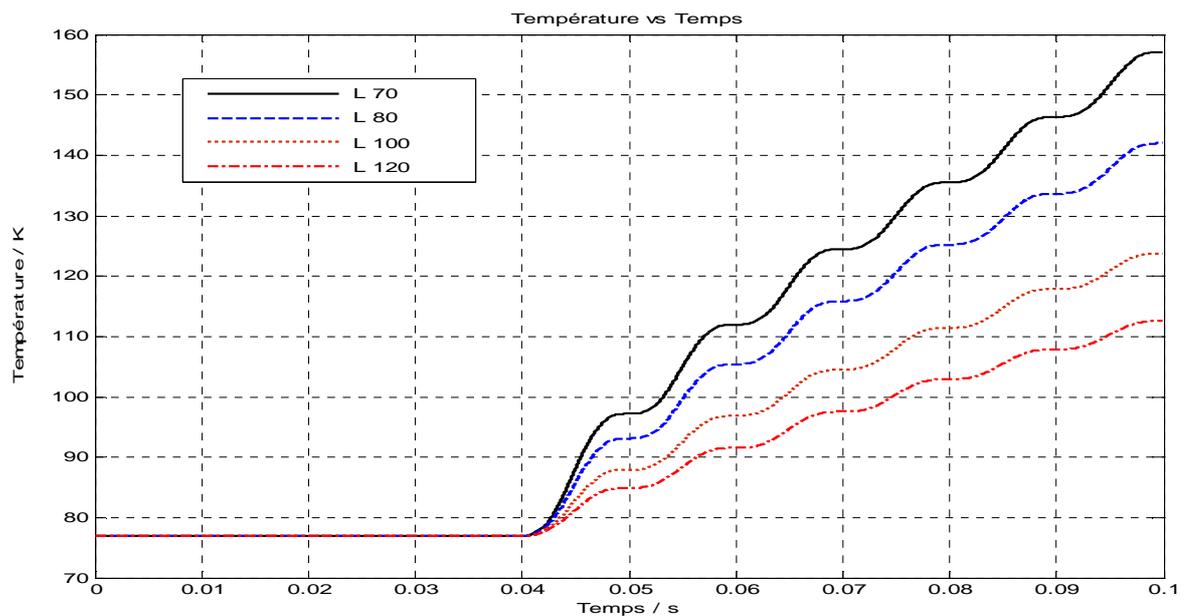


Figure V.31. La température en fonction de différentes longueurs du SFCL à une épaisseur de 0.009 m ($k=0.7$)

Si on compare les résultats des simulations dans le tableau V.8 et le tableau V.9, on peut voir que les valeurs des courants de défaut sont légèrement plus grand quand l'épaisseur du supraconducteur augmente jusqu'à 0.009m. De même il y a une augmentation de la température du supraconducteur. Les résultats sont montrés dans les figures V. 30 et V.31.

Le tableau V.10 présente les résultats de simulations quand la valeur de $k=0.9$ et l'épaisseur de la couche supraconductrice est 0.002m

Tableau V.10. Le courant de défaut et la température correspondant à différentes longueur du supraconducteur à $k=0.9$, l'épaisseur = 0.002m et la capacité thermique $=6.35 \text{ e}^5 \text{ kJ(kgk)}^{-1}$

Longueur (m)	Courant de défaut (A)	Courant de défaut après 1 cycle (A)	Courant de défaut après 2 cycle (A)	Température (k)
70	36073	23110	19570	151
80	32620	21980	18160	137
100	27290	20230	17030	120
120	23340	18730	15770	110

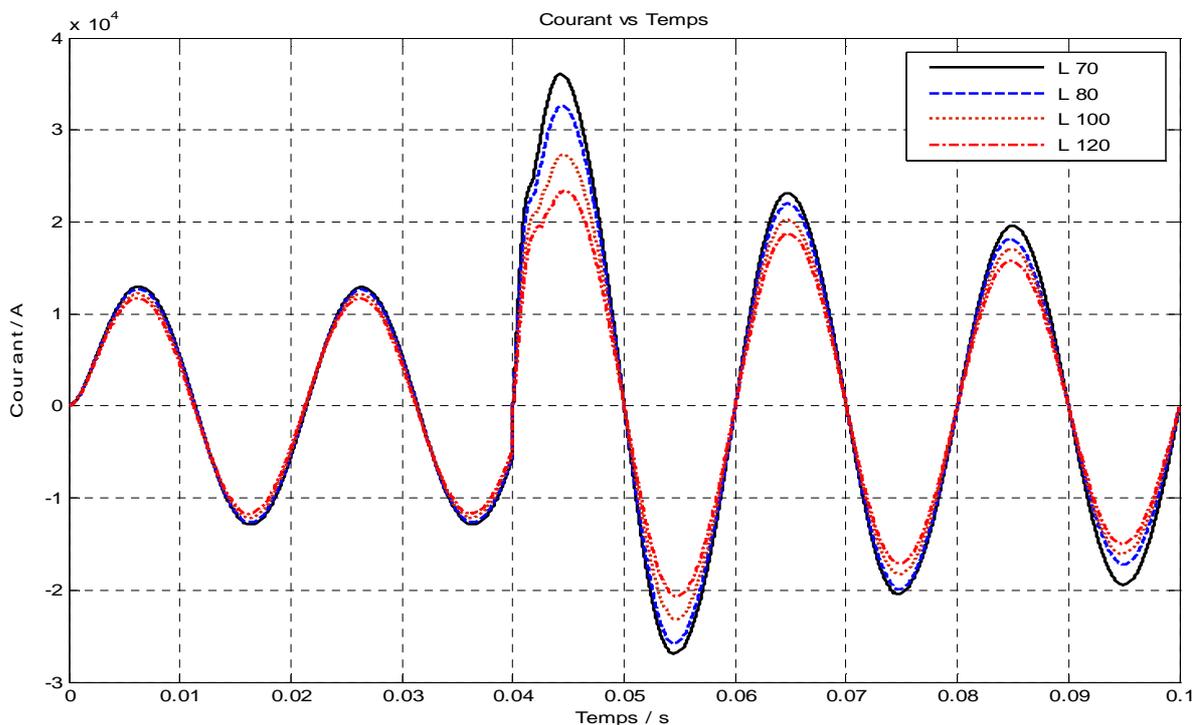


Figure V.32. Le courant de défaut correspond à différentes longueurs du SFCL à une épaisseur de 0.002m ($k=0.9$)

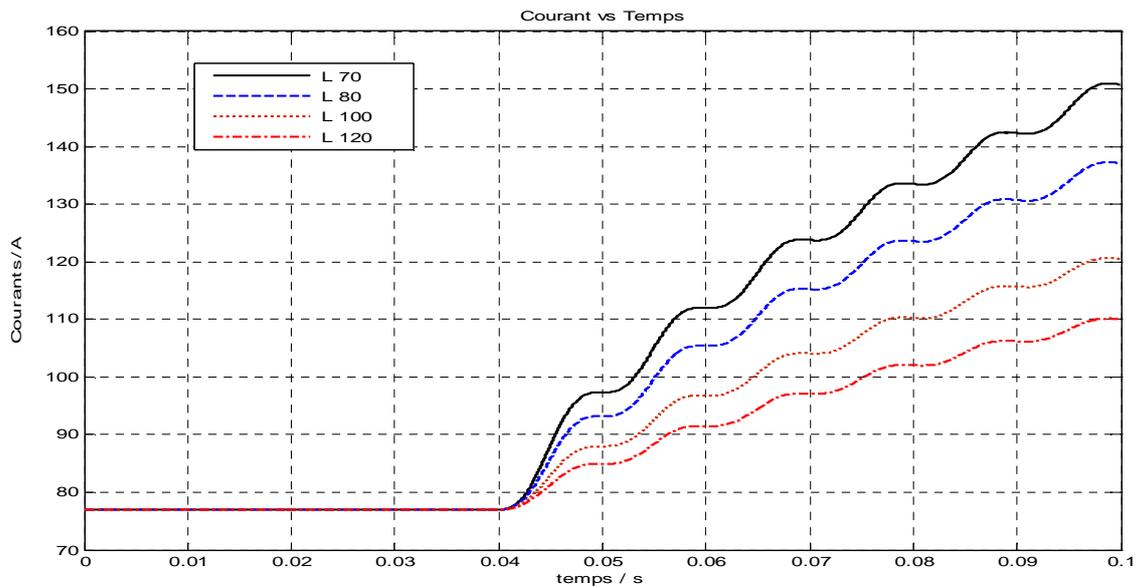


Figure V.33. La température en fonction de différentes longueurs du SFCL à une épaisseur de 0.002 m ($k=0.9$)

Les figures V.32 et V.33 présentent respectivement le courant de défaut et la température correspondant à différentes longueurs du supraconducteur pour une épaisseur de 0.002m et $k=0.9$.

On voit que le courant de défaut est limité à une valeur plus basse par rapport à $k=0.8$ et $k=0.7$. La température dans la couche supraconductrice reste presque constante pour les différentes longueurs du supraconducteur par rapport à $k=0.8$ et $k=0.7$.

V.3.2. Deuxième proposition

Le deuxième modèle thermique proposé du SFCL se compose de trois couches principales, déposées sous forme de couche mince :

- Un substrat : Nous avons remplacés l'Acier inoxydable par le matériau (Hastelloy_C276) ;
- Le HTS : Composé par le matériau supraconducteur (Bi-2223) ;
- La troisième couche shunt : Le matériau utilisé pour cette couche est l'argent (Ag) ;

L'architecture simplifiée de ce modèle est décrite dans la Figure V.34.

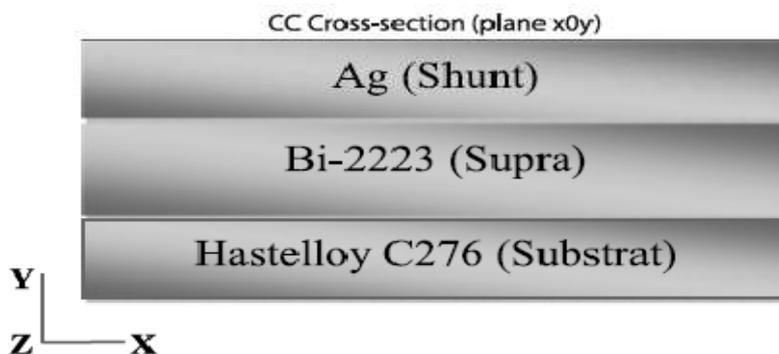


Figure V.34. La conception du deuxième modèle de simulation proposé

Le modèle proposé fonctionne avec une tension de 110kV, et un courant de 9kA. Les paramètres de simulations du SFCL proposé sont représentés dans les tableaux suivants :

Tableau V. 11. Paramètres géométriques du deuxième modèle d'SFCL thermique

Paramètres	Valeur (m)	Description
t_{Ag}	$4 e^{-2}$	Epaisseur de la couche shunt (Ag)
t_{Bi2223}	$2 e^{-3}$	Epaisseur de la couche supraconductrice
t_{Hast}	$4 e^{-2}$	Epaisseur de la couche substrat (Hastelloy)
wth_{tape}	$2 e^{-3}$	La largeur des couches du SFCL
L	80	Longueur du SFCL
N_{Ag}	20	Nombre de couches d'argent (Ag)
N_{Hast}	20	Nombre de couches de Hastelloy
N_{Bi2223}	40	Nombre de couches du matériau Bi2223

Tableau V. 12. Paramètres électrique du deuxième modèle d'SFCL thermique

Paramètres	Valeur	Description
α	7.5	Exposant de la région Flux-creep
β	3	Exposant de la région Flux-flow
J_C	$2 e^7 \text{ A/m}^2$	Densité de courant critique
E₀	0.05 V/ m	Champ électrique initial
E_C	$1 e^{-4} \text{ V/ m}$	Champ électrique critique
ρ	$20 e^{-6} \Omega\text{m}$	Résistivité normale
I_n	$9000 \sqrt{2} \text{ A}$	Courant nominal
R	9Ω	La résistance de la charge
L₁	0.0165 H	L'inductance initiale

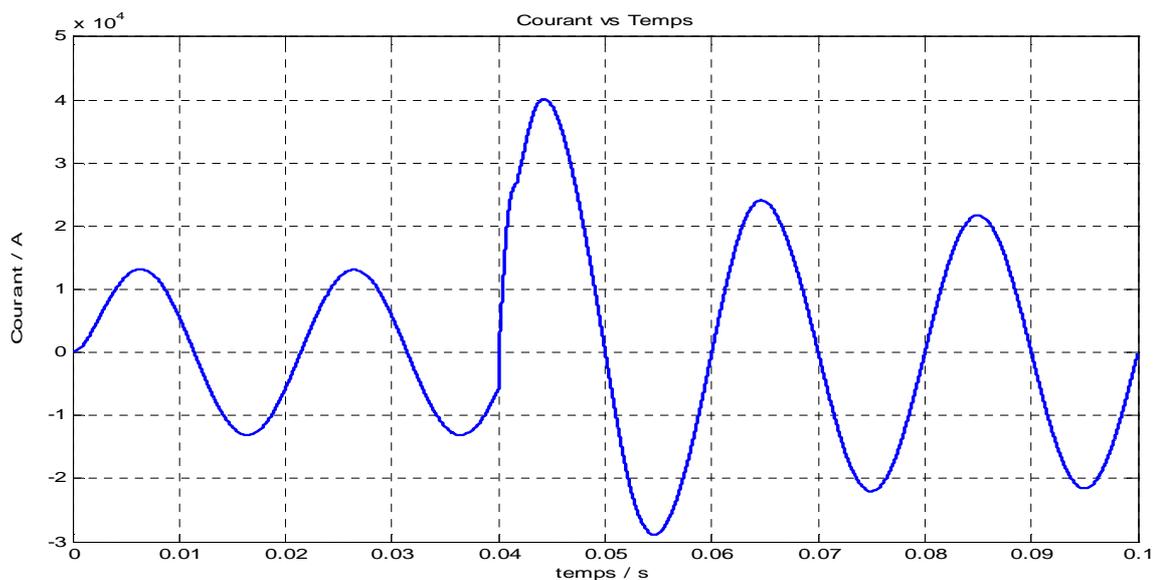
Tableau V. 13. Paramètres thermique du deuxième modèle d'SFCL thermique

Paramètres	Valeur	Description
TT	77 K	La température initiale du Bi2223
T _c	108 K	La température critique du Bi2223
k_Ag	0.429 kw(mk) ⁻¹	Conductivité thermique d'argent (Ag)
k_Hast	0.007 kw(mk) ⁻¹	Conductivité thermique de Hastelloy_C276
k_Bi2223	1 kw(mk) ⁻¹	Conductivité thermique du Bi2223
c_Ag	235 e ³ kJ(kgk) ⁻¹	Capacité thermique spécifique d'argent (Ag)
c_Hast	425 e ³ kJ(kgk) ⁻¹	Capacité thermique spécifique Hastelloy_C276
c_Bi2223	6.35 e ⁵ kJ(kgk) ⁻¹	Capacité thermique spécifique du Bi2223

Nous étudions par la suite le comportement du deuxième modèle thermique qu'on a proposé. Les résultats de simulations de ce modèle sont comparés avec le premier modèle, cela nous permet d'étudier l'évolution dans la crête du courant de défaut et l'effet du choix de type de matériau qui compose le shunt et le substrat, dans la stabilité du limiteur de courant supraconducteur.

V.3.2.1. Pic du courant de défaut

Pour voir le comportement du SFCL pendant le défaut, on court circuit la charge par la fermeture de l'interrupteur S, le limiteur de courant supraconducteur entre en service. La figure V.35 présente la forme d'onde du courant pendant le défaut.

**Figure V.35.** Allure de courant en fonction du temps pendant le défaut dans le deuxième modèle thermique

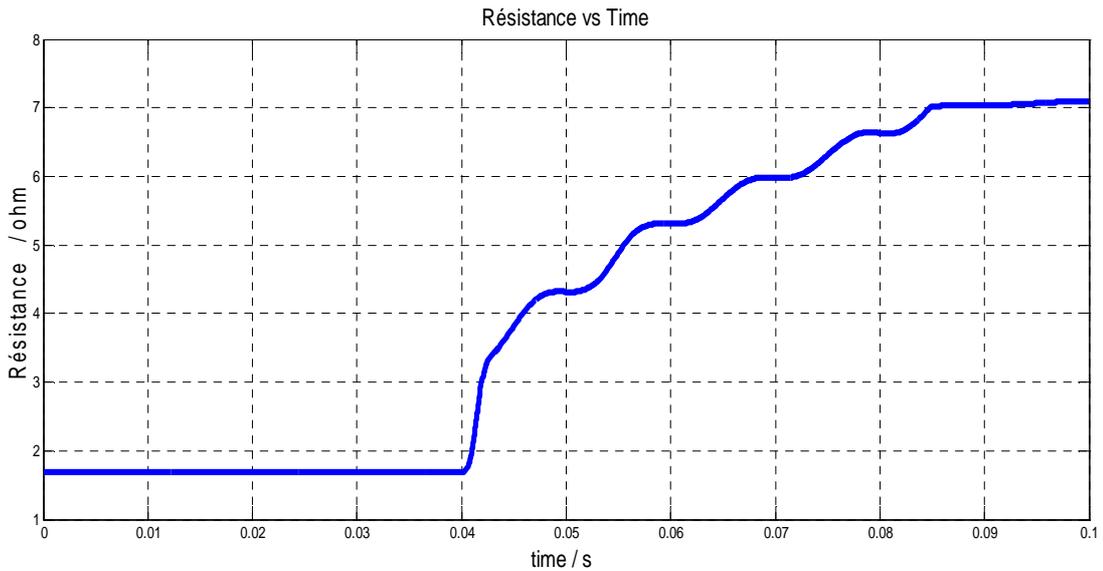


Figure V.36. Variation de la résistance en fonction du temps avant et après le défaut dans le deuxième modèle thermique

Si on compare les résultats des simulations dans la figure V.24 et la figure V. 35, pour la longueur du SFCL égale à 70m ; on peut voir que la valeur du courant de défaut diminué légèrement dans le deuxième modèle thermique d'SFCL. De même si on compare la figure V.21 et la figure V. 36 on remarque que la résistance diminue aussi dans le cas du deuxième modèle thermique proposé.

V.3.2.2. Impact du shunt et du substrat

L'étude de la partie thermique dans un limiteur de courant supraconducteur nécessite la connaissance de la conductivité thermique 'K' et de la capacité thermique 'C' des matériaux qui constituent ce limiteur. Bien que ces paramètres soient variables avec la température, leur ordre de grandeur reste le même sur une plage de température comprise entre 77 et 150 K [69].

La conductivité thermique et la capacité thermique de quelques matériaux sont données dans les tableaux V.14 et V.15, respectivement [70]. [71]. [72].

Tableau V. 14. Conductivité thermique de quelques matériaux à la température $T = 77K$

Matériau	Conductivité thermique $kw(mk)^{-1}$
Bi2223	1
Or	0.363
Argent	0.429
L'acier inoxydable	8
Hastelloy	0.007

Tableau V. 15. Capacité thermique de quelques matériaux à la température $T = 77K$

Matériau	Capacité thermique $\text{kJ}(\text{kgk})^{-1}$
Bi2223	6.35 e^5
Or	2 e^6
Argent	235 e^3
L'acier inoxydable	2.34 e^6
Hastelloy	425 e^3

Le type de matériau qui constitue la couche shunt et la couche substrat à une grande influence dans l'échange thermique à l'intérieur du limiteur de courant supraconducteur. Dans le deuxième modèle thermique nous avons remplacé l'acier inoxydable dans la couche shunt par l'argent (Ag), et la couche substrat par le Hastelloy_C276.

La figure V.37, présente les résultats des simulations de la température dans les trois zones, pour le deuxième modèle thermique proposé.

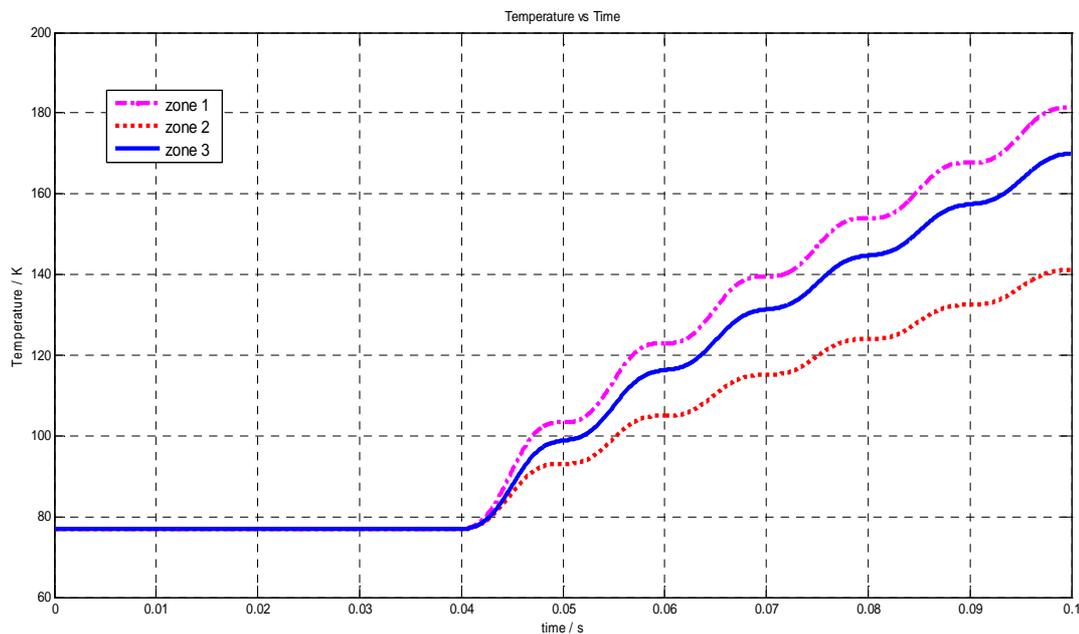


Figure V. 37. Variation de la température en fonction du temps avant et après le défaut pour le deuxième modèle de simulation thermique

Dans la figure V.37, on peut remarquer que la température dans la zone-1 et la zone-3, est supérieure par rapport à la zone-2 (ou la couche supraconductrice).

Si on compare les résultats de simulation de la figure V.23 et la figure V. 37, on peut voir que la

valeur de la température dans la couche supraconductrice pour le deuxième modèle est inférieure à celle du premier modèle, et que la température dans la couche supraconductrice ou (zone-2), pour le deuxième modèle est inférieure à la température dans le premier modèle. Alors on peut constater que dans le deuxième modèle, les deux couches shunt et substrat dissipent mieux la chaleur produite lors du défaut, est protégent ainsi le limiteur de courant supraconducteur.

Pour mieux voir l'effet et l'importance du shunt dans le limiteur de courant de défaut supraconducteur, nous avons supprimé carrément la couche shunt (Ag), et visualisant le comportement du SFCL. La figure V.38, présente la température dans la zone-3, avec et sans la couche shunt.

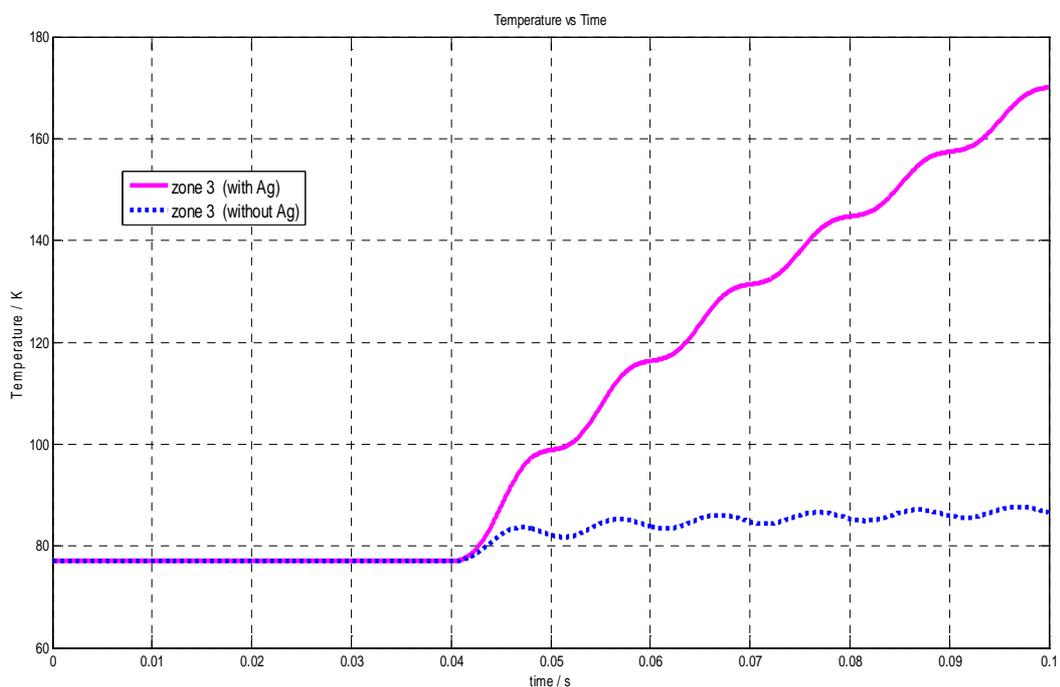


Figure V. 38. Variation de la température en fonction du temps dans la Zone-3, avec et sans le shunt (Ag)

Dans la figure V.38, on peut remarquer qu'il y a une grande différence entre la température, avec et sans la couche shunt. L'effet de la bande shuntée consiste à ajouter une résistance parallèle qui augmente la résistance globale du limiteur supraconducteur, par conséquent le courant peut circuler facilement et avec moins d'atténuation. Cela conduit effectivement à une diminution des pertes dans le film HTS et produit moins de pertes Joule dans le limiteur de défaut supraconducteur. On peut remarquer que, pour une configuration non shuntée, tout le courant passe dans l'HTS qui présente une résistivité élevée à l'état normal, induisant un effet direct sur l'augmentation de la température. Cependant, avec une bande shunt, une partie de la chaleur est dissipée dans l'argent. Nous analysons par la suite le cas lorsque l'argent est substitué par l'Hastelloy.

V.3.2. 3. Effet du matériau shunt

Les matériaux constituant les couches du limiteur supraconducteur ont une influence importante sur l'échange thermique entre le fluide cryogénique et l'SFCL, comme représenté la Figure V.39, qui compare deux matériaux dans la couche shunt, le Hastelloy et l'Ag.

Nous observons que la température dans la couche d'argent est supérieure à la celle dans la couche Hastelloy ; cela confirme que la couche d'argent absorbe plus de chaleur et donc protège mieux le matériau supraconducteur, puisque la conductivité thermique de l'argent est supérieure à celle d' Hastelloy (tableau V.14).

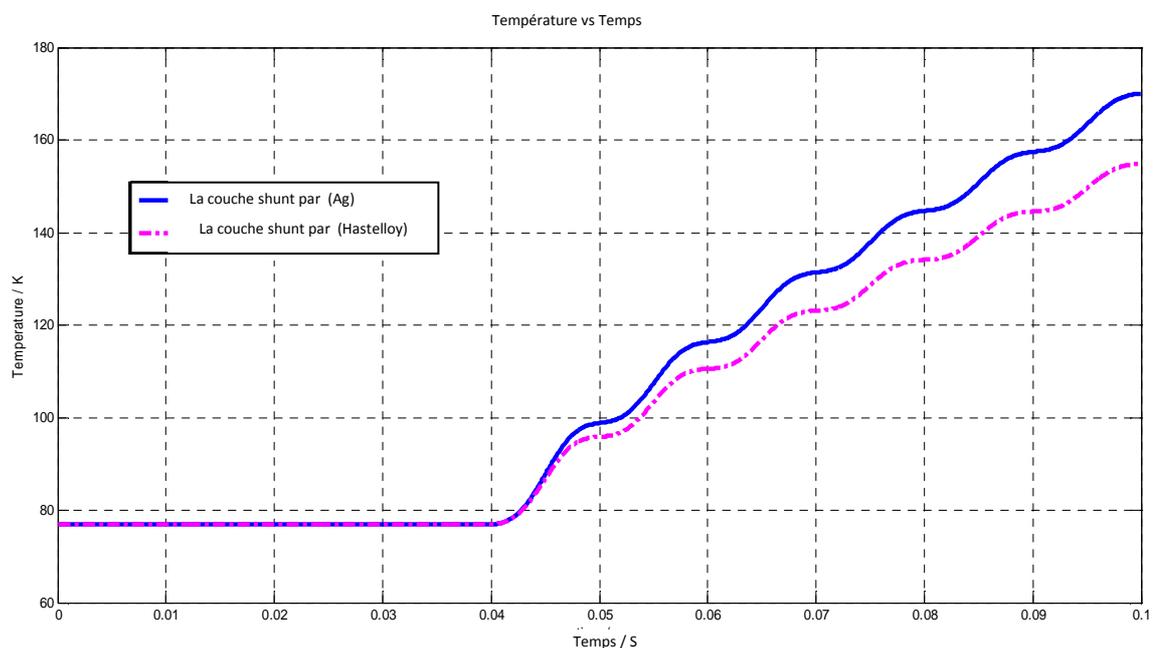


Figure V. 39. Comparaison de la variation de la température en fonction du temps, entre deux matériaux le (Ag) et (Hastelloy), dans la construction de couche shunt

V.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les résultats de simulations des deux modèles qu'on a proposés du limiteur de courant de défaut supraconducteur, que nous avons appelé modèle électrique et modèle thermique.

Dans le modèle électrique, les résultats de simulation ont montré l'efficacité et la simplicité de ce modèle pour la simulation du fonctionnement de limiteur de courant de défaut dans le réseau électrique ; Le modèle électrique est très utile pour la compréhension du phénomène de transition dans un limiteur supraconducteur, il est très facile à manipuler dans un réseau électrique.

Pour rendre ce modèle plus professionnelle nous avons développé une interface graphique dans le

logiciel MATLAB, qui simplifie l'intégration et la modification des données du limiteur de courant supraconducteur. On se basant sur le modèle électrique monophasé nous avons développé un modèle triphasé ; les résultats de simulation ont prouvé le bon fonctionnement et l'efficacité de ce dernier modèle.

Dans le deuxième modèle, qu'on a appelé modèle thermique, nous avons utilisé la deuxième génération des matériaux supraconducteur ou les couches minces, pour développer un modèle basé sur ces derniers. Le fonctionnement du modèle thermique est basé sur le calcul du champ électrique et la résistance supraconductrice à chaque point du limiteur en utilisant la méthode numérique de Runge-Kutta. Dans le modèle thermique nous avons proposé deux configurations ; La première avec une couche supraconductrice en matériau Bi2223, et les couches shunt et substrat avec l'acier inoxydable ; Dans cette configuration nous nous sommes focalisé sur le dimensionnement du limiteur de courant supraconducteur et leur effet sur les échanges thermique dans les différents couches.

La longueur dépend du niveau du courant de défaut à interrompre, d'après les résultats obtenus nous recommandons un supraconducteur de longueur intermédiaire. Le refroidisseur à l'azote liquide est recommandé comme bon et simple système cryogénique.

Dans la deuxième configuration du limiteur thermique, nous avons remplacé la couche shunt par l'argent et la couche substrat par le matériau hastelloy, nous avons constaté l'efficacité de ces deux matériaux dans la dissipation de la chaleur produite pendant le défaut. L'étude comparative entre les deux configurations du limiteur thermique a montré l'efficacité de la deuxième configuration proposée du point de vue quantité de chaleur dissipée et valeur du courant de défaut limitée.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Les besoins en énergie électrique augmentent tant en quantité qu'en qualité. Cela entraîne une croissance de la puissance des équipements installés dans les réseaux et le développement de l'interconnexion. Cette tendance implique une augmentation notable de la puissance de court-circuit qui rend plus difficile la maîtrise des procédés de coupure des courants en cas de défaut. Les valeurs très élevées des courants de court-circuit (ceux-ci peuvent atteindre 20 à 30 fois le courant nominal soit plus de 100 kA dans certains postes THT), qui apparaissent moins d'un quart de période ($\gg 5$ ms) après le défaut, entraînent des contraintes mécaniques intenses sur les matériels (générateurs, transformateurs, jeux de barre...) et peuvent, si les capacités des appareils de coupure sont dépassées, conduire à une mise hors service de portions importantes de réseau.

La coupure des courants de défaut dans les réseaux est un problème mal résolu, freinant ainsi l'essor de ces réseaux. L'introduction de limiteur de courant supraconducteur capable de limiter les courants de défaut à 3 ou 4 fois le courant nominal, ouvre une nouvelle voie innovante pour la limitation de courant. L'absence de courant en dessus d'une certaine valeur, bien inférieure au courant présumé de court-circuit, permet de réduire les contraintes électriques et thermiques mais également la taille et le coût des dispositifs de protection. En régime assigné, les pertes dans l'élément supraconducteur sont pratiquement nulles, un système de réfrigération de faible puissance, peu encombrant et de coût modéré est donc suffisant. Ceci est important car la cryogénie reste un véritable verrou pour le développement industriel des applications supraconductrices.

Dans cette thèse, nous avons étudié la modélisation du limiteur de courant supraconducteur. La création d'un modèle de simulation qui décrit le comportement du limiteur de courant supraconducteur est une clé essentielle pour le développement de cette applications dans le domaine industriel, ceci afin d'optimiser les performances du dispositif et permettre d'améliorer la qualité du produit en vue de son exploitation commerciale.

Dans la première partie de ce travail, nous avons développés un modèle qu'on a nommé modèle électrique, il est basé sur le calcul de champ électrique par la loi de puissance $E(j)$, et la résistance supraconductrice équivalente, avant et après le défaut, et on a exposé l'idée de modéliser l'échange de la température réelle dans le matériau supraconducteur par la variation de tension aux bornes d'un condensateur. Pour simplifier l'interprétation des résultats de simulation, nous avons intégré le SFCL dans un réseau monophasé ; Les résultats de simulation ont montré l'efficacité de ce modèle pour la limitation du courant de défaut à 3 ou 5 fois le courant nominale, qui présente une marge de

sécurité très importante par rapport au courant de court-circuit sans SFCL, qui peut atteindre des valeurs extrêmement élevées, de 20 à 30 fois le courant nominale. Par la suite nous avons développé un modèle électrique triphasé, qui se base sur le principe de fonctionnement du SFCL monophasé, nous avons donné un exemple d'intégration de ce dernier dans un réseau électrique triphasé. Les résultats de simulation ont prouvé le bon fonctionnement de ce modèle pour la limitation du courant de défaut dans des marges acceptables et la stabilité du réseau électrique avant et après l'intégration de ce limiteur triphasé.

La seconde partie présente, l'étude et le développement d'un modèle qui traitera les phénomènes thermique au sein d'un limiteur de courant supraconducteur ; Dans cette optique, les supraconducteurs de deuxième génération appelés conducteurs déposés semblent être les meilleurs candidats pour la limitation de courant. L'application des conducteurs en couches minces aux limiteurs de courant est très importante pour la bonne connaissance des phénomènes physiques régissant leurs fonctionnements. Nous avons développé un modèle thermique tenant compte des paramètres géométriques et physiques de ces matériaux. Ce modèle permet notamment de simuler les réponses en courant et les montées en température d'un échantillon.

Dans cet aspect nous avons proposé deux configurations, la première est composée de trois couches minces, deux couches d'acier inoxydable et une couche de matériau supraconducteur Bi2223 ; Dans cette première configuration nous avons étudiés l'influence de la géométrie du limiteur de courant supraconducteur et surtout la longueur et l'épaisseur de la couche supraconductrice, dans la variation de la crête du courant de défaut et les échanges thermique à l'intérieur des couches qui composent le limiteur. D'après les résultats obtenues nous avons observé que le facteur 'k' a une grande importance dans le réglage de la crête du courant de défaut par rapport à la géométrie du limiteur. Les résultats obtenues nous ont permis de recommander un dimensionnement du limiteur de courant intermédiaire ni trop long ni trop court.

La deuxième configuration qu'on a proposée est constituée d'un substrat métallique en matériau Hastelloy_C276, sur lequel est déposé un supraconducteur Bi2223, puis un shunt protecteur d'Argent. Par cette configuration nous avons prouvé l'impacte de type de matériau qui compose la couche shunt et le substrat ; Les résultats de simulation ont prouvé que l'argent et le Hastelloy, dissipent plus de chaleur produit lors de défaut et protègent mieux le matériau supraconducteur.

Enfin, dans cette thèse nous avons modélisé, par l'application de ces nouvelles méthodes, le comportement électrique et thermique d'un limiteur de courant supraconducteur. Les résultats obtenus permettent d'obtenir une bonne approximation du comportement du système réel. De cette manière, les résultats numériques obtenus offrent la possibilité d'analyser l'influence des

paramètres géométriques ou physiques sans avoir recours à la réalisation de prototypes ou à une phase expérimentale.

De nombreuses perspectives s'ouvrent alors sur le thème de la limitation du courant de défaut par les matériaux supraconducteurs. La principale voie pour des futures contributions à explorer consiste à raffiner encore la précision des résultats obtenus par l'amélioration du modèle thermique utilisé, et plus particulièrement la manière de prendre en compte l'échange de chaleur entre le dispositif et le bain cryogénique. Cet échange, de type convectif avec changement de phase, est dépendant de nombreux paramètres, et il conviendrait alors de suggérer une formulation plus adaptée que celle proposée dans cette thèse.

Il est également possible de continuer ce travail vers une meilleure formulation en tenant compte des points suivants :

- La comparaison des résultats obtenus par les modèles développés avec des résultats expérimentaux;
- Développement d'un modèle anisotrope qui prend en compte la variation de la densité du courant en fonction du champ magnétique $J_c(B)$,
- Développement d'un modèle dans lequel la densité de courant, J_c n'est pas distribuée uniformément dans la largeur du ruban supraconducteur.
- Analyser l'échange thermique à la limite des frontières entre les différentes couches de limiteur supraconducteur, et entre le SFCL et le milieu cryogénique.
- L'étude du phénomène de limitation par la méthode des éléments finis

Références Bibliographiques

- [1] H.K Onnes, "Further experiments with liquid helium", Communication from the Physical Laboratory of the University of Leiden, (1911)
- [2] W. Meissner and R. Ochsenfeld, "Kurse original mitteilungen", Naturwiss 21, (1933) p.787
- [3] J. Bardeen, I. N. Cooper and J. R. Schrieffer, "*Theory of superconductivity*", Phys. Rev. **108** (1957) 329
- [4] J. G. Bednorz and K. A. Müller, "Possible high Tc superconductivity in the BaLaCuO system", Phys. B. Cond. Matter **64** (1986) 189
- [5] N.E. Phillips. "Low-Temperature Heat Capacities of Gallium, Cadmium, and Copper", *PhysRev.*, **134** (1964) A385-A391. DOI: 10.1103/PhysRev.134.A385
- [6] Y. Brunet. "Les supraconducteurs". Techniques de l'ingénieur, traité Génie électrique, D2700, 1989
- [7] <http://www.Superconductors.fr> : Le site de la supraconductivité et des supraconducteurs : historique, principes, applications.
- [8] J. Baixeras, "Les Supraconducteurs", Editions Eyrolles et CNRS Ed., Paris, 1998.
- [9] C. Kittel, "physique de l'état solide", pp. 357-360, Ed. Dunod, Paris, (1983).
- [10] J.G. Bednorz and K. A. Müller, "Possible high Te superconductivity in the BaLaCuO system", z. Phys. B. Cond. Matter 64, (1986), 189
- [11] M. K. Wu and coll., "Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase YBaCuO compound system at ambient pressure", Phys. Rev. Letter 58, (1987), 908
- [12] M. Brousseau, " Physique du solide", Ed. Masson, Paris (1992) p. 320.
- [13] 3rd SYMPOSIUM IBM LAB ZURICH. "Cours de superconductivity ". Suisse 1998
- [14] W.MILLION N.LEMOINE J.EDOUARD, "Les matériaux supraconducteurs", Rapport d'epistemologie (Juillet 2002).
- [15] P.W.Anderson, "Theory of flux creep in hard superconductors", *Phys. Rev. Lett* 309,(1962).
- [16] P.Tixador, " Les supraconducteurs", Edition Hermès, Paris 1995, ISBN 2-86601-5053
- [17] C. P. Bean. "Magnetization of hard superconductors". Physical Review Letters, 8 :250, 1962.
- [18] C.P. Bean. " Magnetization of high-field superconductors", Reviews of modern physics, 31:39, January 1964
- [19] J. K. Sykulski, R.L. Stoll and A. E. Mahdi, "Modelling HTc Superconductors for AC Power Loss Estimation ", IEEE Transactions on magnetics. vol. 33, No. 2, March 1997.
- [20] I. Klutsch, G. Meunier, P. Labie, C. Guerin, P. Tixador, " Modélisation des supraconducteurs enaxisymétrique", Conférence Matériau Génie Electrique (MGE) 2-3 avril 2003 Grenoble
- [21] N. Takeda, M.Uesaka and K.Miya, "Computation and experiments on the static and dynamic characteristics of high Tc superconducting levitation", Cryogenics 1994, vol. 34, Number 9.
- [22] Y.Brunet, J.L.Sabrié, "Machines cryoélectriques", *Traité génie électrique* Vol. D3111,(1992).
- [23] H.Daffix, P.Tixador, "Design of a fully superconductor synchronous motor", Electric Machines and Power Systems **25** 227-245, (1997)
- [24] B.Bellin, P.Tixador, "Contribution à l'étude des bobinages supraconducteurs" : le projet DAG du SMES HTS impulsif. Tèse de L'INPG,(2006).

- [25] D.Dimos, P. Chaudhari, J. Mannhart, F.K. Legoues, "Orientation dependence of grain boundary critical currents in YBCO", bicrystals, *Rev. Lett.* 61 291-222, (1988).
- [26] D.Dimos, P. Chaudhari, J. Mannhart, "Superconducting transport properties in YBCO bicrystals", *Phys. Rev. B.* 41 4038-4039, (1990).
- [27] T. Alesage and K. Keefer, "Liquidus relations in YBaCuO Oxides". *J. of Mater. Res.*, 3, (1988), 1279
- [28] Yannick COINTE, " LIMITEUR SUPRACONDUCTEUR DE COURANT CONTINU", Thèse Doctorat, INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE, 13 décembre 2007
- [29] H. M. Maeda and coll., *1. App. Phys.* 27, (1987), 209
- [30] J. M. Tarascon and coll., *Phys. Rev. B* 38 (1988) 8885
- [31] P. Strobel and coll., *Physica C*, 201, (1992) 27
- [32] M. Ausloss and coll. "Specific heat of BiPbSrCaCuO by a new ac differential method", *Physica C* 235-240(1994) 1767
- [33] D.K.Kroeger, M.Christen, M.Paranthaman, E.D.Specht, J.DBudai, Q.He, B.Saffian, F.A.List, D.F.Lee, E.Hatfield, P.M.Martin, C.E.Klabunde, J.Mathis D.P.Goyal, D.M.Norton, "Conductors with controlled grain boundary : an approach to the next generation, high temperature superconducting wire", *Journal Material Research* 12 2924, (1997).
- [34] M.Li, B.L.Fisher, R.E.Koritala, R.A.Erck, S.E.Dorris, U.Balachandran, B.Ma, "Inclined substrate deposition of bi-axially textured template for coated conductors", *Physica C* 378 950-954, (2002).
- [35] I.Hirabayashi, K.Yamagiwa, Structural and superconducting properties of bi-axial aligned y123 films prepared by chemical solution deposition, *Physica C* 304, (1998)
- [36] J.P.Senateur, A.Abrutis, M.Krellmann, D.Selbmann, J.Eikemeier, O.Stadel, G.Wahl, C.Jimenez, F.Weiss, Ybco deposition by mocvd on metallic substrates, *IEEE Trans. On Applied Supercond.* 11 2905, (2001)
- [37] M.Jergel, Synthesis of high-*t_c* superconducting films by deposition from aerosol, *Sup. Sc. And Technol.* 8 67-68, (1995)
- [38] N.A.Rutter, D.Shi, M.Paranthaman, S.Sathyamurthy, P.M.Martin, D.M.Kroeger, Y.Xu, A.Goyal, Fabrication of high critical current density ybco films using a fluorine free sol-gel approach, *J. Mat. Res.* 18 667-681, (2003)
- [39] I.Ikeno, O.Kohno, Y.Iijima, N.Tanabe, Bi-axially aligned ybco thin film tapes, *Physica C* 185 1959, (1991)
- [40] K.Komari, R.Chatterjee, H.Maeda, M.Fukutomi, S.Aoki, Laser deposition of ybco thin films on a metallic substrate with bi-axially textured ysz buffer layers prepared by modified bias sputtering, *Physica C* 219 333-339, (1994)
- [41] M.Li, B.L.Fisher, R.E.Koritala, R.A.Erck, S.E.Dorris, U.Balachandran, B.Ma, Inclined substrate deposition of bi-axially textured template for coated conductors, *Physica C* 378 950-954, (2002).
- [42] Olivier BELMONT, "Limitation de courant à base d'oxydes supraconducteurs et réalisation d'un appareil 100 A- 1 KV ", Thèse Doctorat, INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE, 12 Mai 1999.
- [43] S.Palanichamy, P.Chinnasamy, "Semiconductor fault current limiters", *IEEE Proc.* 131-3 94 (1984).
- [44] G.C.Karady, "Concept of a combined short-circuit limiter and series compensator", *IEEE Trans. Pow. Del.* 6-3 1031, (1991).
- [45] Y.Brunet, P.Tixador, "Limiteurs supraconducteurs", *Techniques de l'Ingénieur* D 3 662, 1-18, (1997)
- [46] J.Skinthoj, "Repetitive current limiter based on polymer PTC resistor", *IEEE. Trans. Pow. Del.* 951, (1997)

- [47] M.Noë, M.Steurer, "High-temperature superconductor fault current limiters concepts, application and development status", *Supercond. Sci. Technol.* **20** R15-R29 (2007).
- [48] S.Elschner, F.Breuer, M.Noë, T.Rettelbach, H.Walter, J.Bock, "Manufacturing and testing of MCP 2212 bifilar coils for a 10 MVA fault current limiter", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **13** 1980-3, (2003)
- [49] J.Bock, F.Breuer, H.Walter, S.Elschner, M.Kleimaier, R.Kreutz, M.Noë, "Development and field test of a 10 kV / 10 MVA resistive current limiter based on bulk MCP BSCCO 2212", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15** 1955-60, (2005)
- [50] R.Kreutz, J.Bock, F.Breuer, K-P.Juengst, M.Kleimaier, H-U.Klein, D.Krischel, M.Noë; R.Steingass, K-H.Weck, System technology and test of CURL10, a 10 kV, 10 MVA resistive high T_c superconducting fault current limiter, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15** 1961-4, (2005)
- [51] P.TIXADOR, "SC current limiters-some comparisons and influential parameters", *IEEE Trans Appl SC*, 4-4, 190 (1994).
- [52] J. Leveque, "Limiteur supraconducteur de courant structure hybride originale", Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble (1993)
- [53] K.Kajikawa, K.Kaiho, N.Tamada, T.Onishi, "Magnetic-shield type superconducting fault current limiter with high-T_c superconductors", *Electr. Eng. Japan* **115** 1026-31, (1995)
- [54] H.J.Boenig, D.A.Paice, "Fault current limiter using a superconducting coil", *IEEE, Trans. Magn.* **19** 1051-3, (1983)
- [55] H.J.Boenig, "Solid-state circuit breaker with current limiting characteristic using a superconducting coil", United States Patent Specification 4,490,769, (1984)
- [56] G.Kuperman, K.P.Juengst, "Current limiter with electric valves for limiting the short-circuit current in an electric power circuit", *US Patent Specification* 2002003687, (2002)
- [57] M.Noë, M.Steurer, "High-temperature superconductor fault current limiters, concepts, application and development status", *Supercond. Sci. Technol.* **20** R15-R29 (2007)
- [58] Noudem, J.G., et al. "Study of the superconducting transition at high pulsed current of bulk Bi-2223 sintered and textured by hot forging". *Physica C* **339-344**, 01281 (1997)
- [59] Duron, J., Grilli, F., Dutoit, B. "Modelling the $E(J)$ relation of high-T_c superconductors in an arbitrary current range". *Physica C* **401**, 231-235 (2007).
- [60] Nemdili, S., Belkhiat, S., "Modeling and simulation of resistive superconducting fault-current limiters". *J. Supercond. Nov. Magn.* **25**(7), 2351-2356 (2012). doi:10.1007/s10948-012-1685-z.
- [61] Pham V.D, Colletm, "Limitation du courant par transition supraconductrice ", CIGRE 90.
- [62] J.Travis, H.Lui, "EMTDC Simulation of a Novel Fault Current Limiter with Superconducting Characteristics ", Center for Advanced Power Systems 11/2004.
- [63] L. Vergnières, "Synthèse de films supraconducteurs par pyrolyse d'aérosol de nitrates : Dépôt d'YBCO sur monocristaux et rubans métalliques ", thèse INPG (2005)
- [64] Nemdili, S., Belkhiat, S., "Electrothermal Modeling of Coated Conductor for a Resistive Superconducting Fault-Current Limiter". *J. Supercond. Nov. Magn.* **25**(11), 2547-2828 (2012). doi:10.1007/s10948-012-1895-4.
- [65] Dong Keun Park, Seong Eun Yang, Young Jae Kim, Ki Sung Chang, Tae Kuk Ko, "Experimental and numerical analysis of high resistive coated conductor for conceptual design of fault current limiter," Elsevier Ltd, Cryogenics, vol. 49, pp. 249-253, doi:10.1016/j.cryogenics.2008.09.006, 2009
- [66] A. Berizzi, M. Delfanti, P. Marannino, M.S. Pasquadibisceglie, and A. Silvestri. "Enhanced security-constrained OPF with FACTS devices". *IEEE Transactions on Power Systems*, 20 :1597-1605, 2005.

-
- [67] S. Messalti, S. Belkhiat, "Comparative Study of Resistive and Inductive Superconducting Fault Current Limiters SFCL for Power System Transient Stability Improvement". *J. Supercond. Nov. Magn.* 1557-1939 (February 2013). DOI :10.1007/s10948-013-2114-7
- [68] S. Blair, C. Booth, G. Burt, and C. Bright, "Analysis of Energy Dissipation in Resistive Superconducting Fault-Current Limiters for Optimal Power System Performance". *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, VOL, 21, NO 4, August 2011. DOI : 10.1109/TASC.2011.2129518
- [69] S. Y. Seol and J. R. Hull, "Transient analysis and burnout of high temperature superconducting current leads," ; *Cryogenics* 33 (1993) 966.
- [70] A.K. Dhama, M.K. Chattopadhyay, T. K. Dey, "Thermal conductivity of 2223BSCCO superconductor polyethylene Glycol composites between 20 and 300 K," *Journal of Superconductivity*, June 2000, Volume 13, Issue 3, pp 417-422. DOI: 10.1023/A:1007755125840.
- [71] Abu-Eishah, "Correlations for the thermal conductivity of metals as a function of temperature". *International Journal of Thermophysics*, 2001.
- [72] P. C, "Temperature dependence of critical currents in superconducting Bi-2212/Ag wires. *Physica C Superconductivity and its Applications*," 1995.