



HAL
open science

LIMITEUR SUPRACONDUCTEUR DE COURANT CONTINU

Yannick Cointe

► **To cite this version:**

Yannick Cointe. LIMITEUR SUPRACONDUCTEUR DE COURANT CONTINU. Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2007. Français. NNT : . tel-00300552

HAL Id: tel-00300552

<https://theses.hal.science/tel-00300552>

Submitted on 18 Jul 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Remerciements

Ce travail s'est déroulé dans le département des Matières Condensées et Basses Températures de l'Institut Néel et au Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble. Je remercie Henri Godfrin puis André Sulpice et Yves Brunet puis James Roudet de m'avoir accueilli au sein de leurs unités respectives.

Je remercie mon directeur de thèse Pascal Tixador et ma co-directrice Catherine Villard de m'avoir proposé un sujet intéressant et innovant. Leurs compétences, leur dynamisme et leur grande disponibilité ont été capitaux dans l'avancement de ce projet.

Mes remerciements vont aux membres du jury et plus particulièrement à Jean-Pascal Cambronne et Jean Lévêque pour me faire l'honneur d'être les rapporteurs de ce travail.

Je souhaite remercier le pôle Nanofab et plus particulièrement Thierry Crozes pour les gravures et les dépôts réalisés sur les échantillons supraconducteurs.

J'exprime mes sincères remerciements aux permanents de l'Institut Néel et du CRETA qui m'ont aidé et apporté de précieux conseils. Je remercie plus particulièrement mon père spirituel Alain Boulbès, Guy André et son co-équipier Gérard Barthélémy pour ses histoires parisiennes, mais également Marc Deleglise pour nos discussions entre montagnards.

Merci aux non-permanents de l'Institut Néel et du CRETA pour leur bonne humeur et leur amitié. Je remercie plus particulièrement mon compagnon de route Tristan Caroff pour ses cours de gymnastique, mais également Arnaud Badel, Kevin Berger, Stéphane Bermond et Nhat-Tung Nguyen pour nos parties de vers dans la menuiserie.

Je remercie mes parents et ma sœur Karine de m'avoir encouragé, de croire en moi et de m'avoir appris tant de choses. Je remercie également Céline ma petite Corse pour son soutien, pour l'amour qu'elle m'apporte et pour son irrésistible sourire de chipie.

Table des matières

Introduction	9
---------------------------	----------

Chapitre I La supraconductivité..... 11

I. A) Présentation générale de la supraconductivité.....	11
I. A. 1) Classification des supraconducteurs	11
I. A. 1. a) Supraconducteurs de type I et II	11
I. A. 1. b) Supraconducteurs LTS et HTS	12
I. A. 2) Historique de la supraconductivité	12
I. A. 2. a) Historique des LTS	12
I. A. 2. b) Historique des HTS	12
I. B) Comportement des supraconducteurs	13
I. B. 1) Grandeurs critiques	13
I. B. 2) Mobilité des vortex	13
I. B. 2. a) Flux flow	13
I. B. 2. b) Flux creep	14
I. B. 3) Loi en puissance $E(J)$	15
I. B. 4) Modèle de l'état critique	15
I. B. 5) Pertes AC	15
I. C) Principales applications des supraconducteurs	16
I. C. 1) Applications en physique fondamentale	16
I. C. 2) Applications en électrotechnique	17
I. C. 2. a) Machines tournantes	17
I. C. 2. b) Câbles de transport	17
I. C. 2. c) Stockage d'énergie	17
I. C. 2. d) Limitation de courant	17
Références du chapitre I.....	18

Chapitre II Les conducteurs déposés 19

II. A) Supraconducteur YBaCuO.....	19
II. A. 1) Structure cristallographique de l'YBaCuO	19
II. A. 2) Propriétés de l'YBaCuO	20
II. B) Architecture des conducteurs déposés	21
II. B. 1) Structure générale des coated conductors	21
II. B. 2) Caractéristiques du substrat	22
II. B. 3) Caractéristiques des couches tampons	22
II. B. 4) Caractéristiques de la couche supraconductrice	22
II. B. 5) Caractéristiques du shunt	23
II. C) Fabrication des conducteurs déposés	23
II. C. 1) Dépôt sur substrat texturé	23
II. C. 2) Dépôt sur substrat polycristallin	24
II. C. 2. a) Ion Beam Assisted Deposition	24
II. C. 2. b) Modified Bias Sputtering	24
II. C. 2. c) Inclined Substrate Deposition	24
Références du chapitre II.....	26

Chapitre III	La limitation de courant.....	27
III. A)	Limitation de courant dans les réseaux électriques.....	27
III. A. 1)	Intérêts des limiteurs de courant.....	27
III. A. 2)	Intégration dans les réseaux électriques.....	28
III. A. 2. a)	Protection des générateurs et des transformateurs.....	29
III. A. 2. b)	Maintient des interconnexions.....	29
III. A. 2. c)	Sélectivité de l'isolement des défauts.....	30
III. B)	Fonctionnement des limiteurs de courant.....	30
III. B. 1)	Principe général de la limitation de courant.....	30
III. B. 2)	Limiteurs de courant classiques.....	30
III. B. 2. a)	Réactance série.....	30
III. B. 2. b)	Limiteur commandé.....	31
III. B. 2. c)	Résistance variable.....	31
III. C)	Limiteurs supraconducteurs de courant.....	32
III. C. 1)	SCFCL résistif.....	32
III. C. 1. a)	Fonctionnement des SCFCL résistifs.....	32
III. C. 1. b)	Etat de l'art des SCFCL résistifs.....	34
III. C. 2)	SCFCL de type noyau magnétique écrané.....	36
III. C. 2. a)	Fonctionnement des SCFCL de type noyau magnétique écrané.....	36
III. C. 2. b)	Etat de l'art des SCFCL de type noyau magnétique écrané.....	37
III. C. 3)	SCFCL de type pont redresseur.....	38
III. C. 3. a)	Fonctionnement des SCFCL de type pont redresseur.....	38
III. C. 3. b)	Etat de l'art des SCFCL de type pont redresseur.....	39
III. C. 4)	SCFCL de type contrôleur du courant de défaut.....	40
III. C. 4. a)	Fonctionnement des SCFCL de type contrôleur du courant de défaut.....	40
III. C. 4. b)	Etat de l'art des SCFCL de type contrôleur du courant de défaut.....	41
III. C. 5)	SCFCL de type noyaux magnétiques saturés.....	41
III. C. 5. a)	Fonctionnement d'un SCFCL de type noyaux magnétiques saturés.....	41
III. C. 5. b)	Etat de l'art d'un SCFCL de type noyaux magnétiques saturés.....	42
III. D)	Comparaison des différents SCFCL.....	42
III. D. 1)	Classification des types de SCFCL.....	42
III. D. 2)	Vue d'ensemble des récents projets sur les SCFCL.....	43
Références du chapitre III.....		45

Chapitre IV Théorie du limiteur supraconducteur.....51

IV. A)	Hypothèses du modèle théorique.....	51
IV. A. 1)	Hypothèses du réseau électrique.....	51
IV. A. 2)	Hypothèses du limiteur.....	52
IV. A. 3)	Hypothèses du coated conductor.....	52
IV. A. 3. a)	Hypothèses du shunt.....	53
IV. A. 3. b)	Hypothèses du supraconducteur.....	54
IV. A. 3. c)	Hypothèses du substrat.....	59
IV. A. 4)	Hypothèses thermiques.....	60
IV. B)	Modèle théorique.....	61
IV. B. 1)	Equations de l'état supraconducteur.....	61
IV. B. 2)	Equations de la phase de transition.....	62
IV. B. 3)	Etat de limitation de courant.....	63
IV. B. 4)	Etat de récupération.....	64
IV. C)	Application du modèle sur un cas concret.....	65
IV. C. 1)	Présentation du cas étudié.....	65
IV. C. 2)	Résultat du calcul avec le modèle théorique.....	65
IV. C. 2. a)	Courant limité théorique.....	65
IV. C. 2. b)	Puissance et énergie dissipées théoriques.....	67
IV. C. 2. c)	Température théorique de l'échantillon.....	68

IV. D)	Etude de la propagation thermique par simulation.....	69
IV. D. 1)	Hypothèses de la simulation.....	69
IV. D. 1. a)	Géométrie du ruban.....	69
IV. D. 1. b)	Conditions aux limites.....	70
IV. D. 2)	Simulation d'un cas concret.....	70
IV. D. 3)	Etude comparative en phase de limitation.....	72
IV. D. 3. a)	Comparaison des substrats.....	72
IV. D. 3. b)	Simulation avec différents échanges thermiques.....	74
IV. D. 3. c)	Récupération avec différentes températures maximales.....	76
IV. E)	Conclusion sur la théorie du limiteur.....	76
	Références du chapitre IV.....	78
Chapitre V	Le montage expérimental.....	81
V. A)	Alimentation électrique.....	81
V. A. 1)	Présentation des signaux de court-circuit.....	81
V. A. 2)	Le banc de puissance.....	82
V. A. 2. a)	Fonctionnement de la partie paramétrage.....	83
V. A. 2. b)	Fonctionnement de la partie commande.....	84
V. A. 2. c)	Fonctionnement de la partie puissance.....	85
V. B)	Instrumentation cryogénique.....	86
V. B. 1)	Mesure de la température du bain d'azote liquide.....	88
V. B. 2)	Mesure du niveau d'azote liquide.....	89
V. B. 3)	Régulation de pression.....	90
V. C)	Acquisition de données.....	91
V. C. 1)	Mesure du courant.....	91
V. C. 2)	Oscilloscopes et mesures de tensions.....	92
V. D)	Mesures des pertes AC.....	93
V. E)	Conclusion.....	94
	Références du chapitre V.....	96
Chapitre VI	Les essais en limitation de courant.....	97
VI. A)	Spirale sur substrat en saphir.....	97
VI. A. 1)	Présentation de l'échantillon en spirale.....	97
VI. A. 2)	Caractérisation de l'échantillon en spirale.....	100
VI. A. 2. a)	Résistances de l'échantillon en spirale.....	100
VI. A. 2. b)	Résistance de la sonde de température.....	101
VI. A. 2. c)	Mesure du courant critique.....	102
VI. A. 2. d)	Mesure des pertes AC dans l'échantillon en spirale.....	103
VI. A. 3)	Essais en limitation de courant de la spirale.....	105
VI. A. 3. a)	Influence du champ électrique.....	106
VI. A. 3. b)	Influence de la vitesse de montée du court-circuit.....	106
VI. A. 3. c)	Elévation de température.....	108
VI. B)	Conducteur déposé avec thermomètre.....	110
VI. B. 1)	Présentation du conducteur déposé avec thermomètre.....	110
VI. B. 2)	Caractérisation du conducteur déposé avec sonde.....	112
VI. B. 2. a)	Résistance de l'échantillon.....	112
VI. B. 2. b)	Résistance de la sonde de température.....	113
VI. B. 3)	Essais en limitation de courant du conducteur déposé.....	113
VI. B. 3. a)	Influence de la température.....	113
VI. B. 3. b)	Mesure de la sonde de température.....	115

VI. C)	Conducteur déposé long de deux mètres	116
VI. C. 1)	Présentation de l'échantillon de deux mètres.....	116
VI. C. 1. a)	Introduction.....	116
VI. C. 1. b)	Support du conducteur déposé de deux mètres.....	117
VI. C. 2)	Caractérisation de l'échantillon de deux mètres	120
VI. C. 2. a)	Mesure de la résistance de l'échantillon de deux mètres	120
VI. C. 2. b)	Mesure du courant critique.....	120
VI. C. 3)	Essais en limitation de courant du conducteur de 2 m.....	122
VI. C. 3. a)	Paramétrage des essais	122
VI. C. 3. b)	Essai à 86 K sous 10 V pendant 10 ms	123
VI. C. 3. c)	Essais à 86 K sous 50V pendant 10 ms.....	124
VI. C. 3. d)	Essai à 86 K sous 100 V pendant 10 ms	125
VI. C. 3. e)	Evolution du courant de limitation.....	126
VI. C. 3. f)	Essai à 86 K sous 100 V pendant 150 ms.....	130
VI. C. 3. g)	Essai à 84K sous 10 V et 10 ms	133
VI. C. 3. h)	Etude comparative avec ce type de conducteur déposé.....	134
VI. D)	Conclusions.....	137
	Références du chapitre VI.....	139
	Conclusions et perspectives	141

Index des illustrations

Chapitre I La supraconductivité..... 11

Figure I.1 : Résistivité d'un supraconducteur en fonction de la température	11
Figure I.2 : Surfaces critiques des principaux supraconducteurs	13
Figure I.3 : Caractéristique E(J) d'un supraconducteur avec activation thermique.....	14

Chapitre II Les conducteurs déposés 19

Figure II.1 : Structure cristallographique de l'YBaCuO	20
Tableau II.1 : Caractéristiques générales de l'YBaCuO.....	20
Figure II.2 : Résistivité de l'YBaCuO en fonction de la température	21
Figure II.3 : Architecture générale d'un conducteur déposé	22
Figure II.4 : Procédé RABiTS	23

Chapitre III La limitation de courant..... 27

Figure III.1 : Evolution du courant de court-circuit avec et sans limiteur	28
Figure III.2 : Insertion des limiteurs de courant dans un réseau	29
Figure III.3 : Limitation de courant par transformateur court-circuité	31
Figure III.4 : Limitation de courant par thyristors contrôlant un circuit raisonnant	31
Figure III.5 : SCFCL résistif.....	32
Figure III.6 : SCFCL résistif assisté magnétiquement.....	33
Figure III.7 : Démonstrateur CURL 10	34
Figure III.8 : SCFCL de type noyau magnétique écranté	36
Figure III.9 : Schéma équivalent du SCFCL de type noyau magnétique écranté	37
Figure III.10 : SCFCL de type pont redresseur	38
Figure III.11 : SCFCL de type contrôleur du courant de défaut	40
Figure III.12 : SCFCL de type noyaux magnétiques saturés	41
Tableau III.1 : Comparaison des différents types de SCFCL	43
Tableau III.2 : Vue d'ensemble des récents projets sur les SCFCL	44

Chapitre IV Théorie du limiteur supraconducteur..... 51

Figure IV.1 : Schéma du réseau électrique théorique	51
Figure IV.2 : Schéma équivalent macroscopique du SCFCL	52
Figure IV.3 : Vue en coupe transversale d'un conducteur déposé	52
Figure IV.4 : Schéma électrique équivalent du limiteur	53
Figure IV.5 : Résistivité et chaleur spécifique de l'or en fonction de la température	53
Figure IV.6 : Champ électrique aux bornes d'un YBaCuO massif pendant un court-circuit	54
Figure IV.7 : Densité de courant critique de l'YBaCuO en fonction de la température.....	55
Figure IV.8 : Pertes AC en fonction de l'ondulation de courant	56

Figure IV.9 : Courbe E(J) d'un conducteur déposé autour de J_c	57
Figure IV.10 : Résistivité et chaleur spécifique de l'YBaCuO en fonction de la température	58
Figure IV.11 : Résistivité et chaleur spécifique de l'Inox en fonction de la température	59
Figure IV.12 : Coefficient de transfert thermique de l'azote liquide	60
Figure IV.13 : Schéma électrique équivalent du limiteur dans son état supraconducteur	62
Figure IV.14 : Schéma électrique équivalent du limiteur dans la phase de transition	62
Figure IV.15 : Schéma équivalent du SCFCL en limitation de courant	63
Tableau IV.1 : Paramètres géométriques de l'échantillon avec sonde de température	65
Figure IV.16 : Réponse en courant théorique de l'échantillon avec sonde de température	66
Figure IV.17 : Répartition théorique du courant dans l'échantillon	66
Figure IV.18 : Puissance et répartition de puissance théorique dans l'échantillon.....	67
Figure IV.19 : Energie théorique dissipée par l'échantillon	67
Figure IV.20 : Température moyenne théorique de l'échantillon.....	68
Figure IV.21 : Schéma de la simulation du ruban	69
Figure IV.22 : Conditions aux limites de la simulation	70
Figure IV.23 : Répartition de la température dans l'échantillon.....	70
Figure IV.24 : Répartition de la température en fonction de la demi-épaisseur du ruban	71
Figure IV.25 : Températures moyennes et du point chaud simulées	71
Figure IV.26 : Conductivités thermiques de l'inox et du saphir en fonction de la température	72
Figure IV.27 : Comparaison de la propagation thermique du saphir et de l'inox.....	73
Figure IV.28 : Températures maximales avec des substrats en saphir et inox.....	74
Figure IV.29 : Comparaison des montées en température adiabatique et théorique.....	74
Figure IV.30 : Refroidissement pour différents coefficients d'échange thermiques	75
Figure IV.31 : Temps de récupération à partir de plusieurs températures maximales.....	76

Chapitre V Le montage expérimental.....81

Figure V.1 : Tension d'alimentation des essais en limitation de courant	82
Figure V.2 : Le banc de puissance.....	83
Figure V.3 : Interface du logiciel Intuilink	84
Figure V.4 : Générateur de signaux 33220A	84
Figure V.5 : Amplificateur de puissance BOP 20-20	85
Figure V.6 : Configurations des dix BOP 20-20	86
Tableau V.1 : Principales caractéristiques du cryostat	86
Figure V.7 : L'instrumentation cryogénique	87
Figure V.8 : Vue en coupe du cryostat	87
Figure V.9 : Résistance d'une sonde PT100 en fonction de sa température.....	88
Figure V.10 : Mesure quatre fils.....	88
Figure V.11 : Mesure du niveau d'azote liquide	89
Figure V.12 : Température d'évaporation de l'azote en fonction de la pression.....	90
Figure V.13 : Sonde de courant PR430	91
Tableau V.2 : Caractéristiques de la sonde de courant	91
Figure V.14 : Oscilloscope Integra 20.....	92
Tableau V.3 : Caractéristiques de l'oscilloscope Integra 20.....	92
Figure V.15 : Montage expérimental avec inductance mutuelle	93

Chapitre VI Les essais en limitation de courant.....97

Figure VI.1 : Masque de la spirale avec constrictions	97
Tableau VI.1 : Caractéristiques géométriques de l'échantillon sur substrat en saphir.....	98
Figure VI.2 : Technique de dépôt par Lift-off.....	98
Figure VI.3 : Résistivité et résistance linéique théorique du cuivre déposé	99
Figure VI.4 : Echantillon en spirale avec sa sonde de température	99
Figure VI.5 : Echantillon en spirale monté sur son support.....	100
Figure VI.6 : Résistance de l'échantillon en spirale en fonction de sa température	100
Figure VI.7 : Résistance de la sonde en fonction de la température.....	101
Figure VI.8 : Mesure du courant critique de l'échantillon en spirale à 77 K.....	102
Figure VI.9 : Cartographie de la densité de courant critique en MA/cm ² à 77 K	103
Figure VI.10 : Mesure des pertes AC sur l'échantillon en spirale.....	104
Figure VI.11 : Pertes AC en fonction du courant maximal dans l'échantillon en spirale.....	104
Figure VI.12 : Essai de l'échantillon en spirale à 77 K sous 50 V	105
Figure VI.13 : Durée de la phase inhomogène en fonction de la tension de court-circuit	106
Figure VI.14 : Essai en limitation de courant avec une pente de 2 V/ms	107
Figure VI.15 : Retard de transition en fonction de la vitesse de montée en courant.....	107
Figure VI.16 : Montées en température de l'échantillon en spirale.....	109
Figure VI.17 : Température de la spirale en fonction de la sonde	110
Tableau VI.2 : Caractéristiques du conducteur déposé avec thermomètre	111
Figure VI.18 : Conducteur déposé sur son support	111
Figure VI.19 : Thermomètre au dos du conducteur déposé.....	111
Figure VI.20 : Résistance et courant critique du conducteur déposé avec sonde	112
Figure VI.21 : Résistance du thermomètre en fonction de sa température	113
Figure VI.22 : Essais du conducteur déposé à 77 K et 86 K	114
Figure VI.23 : Mesures et calcul des températures sur le conducteur déposé	115
Tableau VI.3 : Dimensions du conducteur déposé de 2 m	116
Figure VI.24 : Court-circuit sur les bords du ruban.....	117
Figure VI.25 : Optimisation de l'inductance en fonction du diamètre du mandrin	117
Figure VI.26 : Vue d'ensemble de l'échantillon sur son support	118
Figure VI.27 : Platine de connexion.....	118
Figure VI.28 : Amenées de courant en indium pressé.....	119
Figure VI.29 : Répartition de prises de potentiel.....	119
Figure VI.30 : Résistance de l'échantillon en fonction de sa température.....	120
Figure VI.31 : Résistances des amenées de courant	121
Figure VI.32 : Courant critique total de l'échantillon à 77 K.....	121
Figure VI.33 : Courant critique en fonction de la température.....	122
Figure VI.34 : Essai à 86 K sous 10 V pendant 10 ms	123
Figure VI.35 : Circulation du courant dans le substrat entre deux zones normales.....	123
Figure VI.36 : Essai à 86 K sous 50 V pendant 10 ms	124
Figure VI.37 : Essai à 86 K sous 100 V pendant 10 ms	125
Figure VI.38 : Courbes E(I) de l'essai à 86 K sous 100 V pendant 10 ms	125
Figure VI.39 : Courants crêtes en fonction de la tension de court-circuit	126
Figure VI.40 : Courant maximal en fonction de la tension de court-circuit	126
Figure VI.41 : Schéma équivalent du limiteur aux premiers instants de la limitation	127
Figure VI.42 : Courant de limitation en fonction de la tension de court-circuit.....	128
Figure VI.43 : Chronogramme d'une phase de limitation de courant.....	129
Figure VI.44 : Tension entre le shunt et le substrat	130

Figure VI.45 : Essai à 86 K sous 100 V pendant 150 ms	131
Figure VI.46 : Puissance linéique et énergie dissipées	131
Figure VI.47 : Températures par la résistance, moyenne et du hot spot.....	132
Figure VI.48 : Température analytique de l'essai à 86 K sous 100 V pendant 150 ms	132
Figure VI.49 : Essai destructif à 84 K	133
Figure VI.50 : Photo du ruban détérioré après l'essai à 84 K.....	133
Figure VI.51 : Température max et temps de récupération en fonction de l'énergie linéique.....	134
Figure VI.52 : Influence de l'épaisseur du substrat	135
Figure VI.53 : Influence de la résistivité du substrat	136

Introduction

La découverte en 1986 de la supraconductivité à haute température a fortement relancé l'intérêt des supraconducteurs. Toutefois, la plupart des applications de ces matériaux nécessitent une flexibilité et une résistance mécanique particulières, justifiant la récente mise en œuvre des conducteurs déposés. Ces derniers 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. 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 d'importants champs électriques dans leurs régimes de défauts.

Les courants de court-circuit des réseaux électriques n'ont cessé de croître pour répondre à l'augmentation de la consommation mais également fournir 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. De nouveaux schémas d'interconnexions, notamment par bus continu, sont en phase de développement. Les réseaux DC présentent de nombreux avantages par rapport aux réseaux alternatifs, mais ne bénéficient pas du passage par zéro de la tension pour couper les courants de défaut. 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 courant permettent de réduire les contraintes mécaniques et thermiques subies par le réseau avant l'isolement du défaut.

Dans le cadre de cette étude sur les limiteurs supraconducteurs de courant continu, ce mémoire de thèse s'articule autour de six chapitres.

Le premier chapitre est une introduction générale sur la supraconductivité. Nous présenterons ce phénomène physique, son historique et ses principales applications.

Le deuxième chapitre est une présentation des conducteurs déposés. Nous montrerons l'intérêt du supraconducteur YBaCuO, nous expliquerons ensuite l'architecture et les différents procédés de fabrication des conducteurs déposés.

Le troisième chapitre est une présentation de la limitation de courant. Nous parlerons de ces 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 est une étude théorique du limiteur supraconducteur. Elle permet d'appréhender les phénomènes physiques et les mécanismes régissant la limitation du courant. Nous déterminerons les équations qui décrivent les fonctionnements électrique et thermique du système étudié. Nous comparerons ensuite ce modèle à une étude menée avec un logiciel de simulation par éléments finis. Nous conclurons par des études comparatives sur plusieurs paramètres d'une phase de limitation de courant.

Le cinquième chapitre est une présentation du banc d'essais réalisé pour tester les échantillons de conducteurs déposés en limitation de courant. Nous décrirons son alimentation électrique, son instrumentation cryogénique et son acquisition de données.

Le dernier chapitre présente les essais et les résultats de trois échantillons représentatifs de l'ensemble des études menées dans le cadre de ce travail. Nous étudierons un échantillon dont le substrat est en saphir, puis un échantillon court de conducteur déposé équipé d'un thermomètre. Ensuite nous présenterons des essais à plus grande échelle sur un conducteur déposé long de deux mètres.

Les résultats de cette étude permettront de conclure sur les mécanismes régissant la limitation de courant dans les réseaux DC et plus particulièrement avec les conducteurs déposés, pour ensuite donner les perspectives de ce projet.

Chapitre I

La supraconductivité

L'objectif de ce chapitre est de définir brièvement la supraconductivité. Une introduction générale permettra dans un premier temps de découvrir ce phénomène, ensuite nous présenterons le comportement des supraconducteurs et enfin nous parlerons de leurs principales applications.

I. A) Présentation générale de la supraconductivité

La supraconductivité est un état de la matière dans lequel celle-ci présente une remarquable combinaison de propriétés électriques et magnétiques. La disparition totale de la résistivité en dessous d'une certaine température appelée température critique (T_c) est la caractéristique la plus connue de ces matériaux (Figure I.1). Une autre propriété est le diamagnétisme parfait sous certaines conditions de champ magnétique.

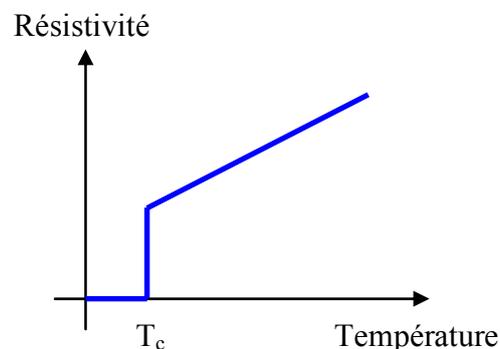


Figure I.1 : Résistivité d'un supraconducteur en fonction de la température

I. A. 1) Classification des supraconducteurs

I. A. 1. a) Supraconducteurs de type I et II

Les supraconducteurs dont le diamagnétisme est parfait en dessous d'un certain champ magnétique appelé champ critique (H_c) sont de type I. Il existe des supraconducteurs de type II, caractérisés par deux champs critiques (H_{c1} et H_{c2}), entre lesquels l'apparition de zones normales (résistives) est énergétiquement favorable. Les supraconducteurs se trouvent alors dans un état mixte dans lequel coexistent des zones supraconductrices et normales.

Chaque zone normale transporte un quantum de flux qui pénètre sous forme de tube parallèle au champ magnétique. Ces structures appelés vortex sont constitués d'un cœur (zone normale) autour duquel circulent des courants très importants. Le mouvement des vortex entraînant une dissipation d'énergie dans le supraconducteur, il est important de les ancrer en créant par exemple des défauts cristallographiques dans le matériau.

I. A. 1. b) Supraconducteurs LTS et HTS

Les supraconducteurs se distinguent également par leurs T_c . En dessous de 30 K ce sont les basses températures critiques (LTS pour Low Temperature Superconductors) alors qu'au delà ce sont les hautes températures critiques (HTS pour High Temperature Superconductors). Les HTS sont de type II.

I. A. 2) Historique de la supraconductivité

I. A. 2. a) Historique des LTS

C'est la liquéfaction de l'hélium à 4,2 K en 1908 par Kamerlingh Onnes qui lui permis en 1911 de découvrir l'état supraconducteur du mercure [Onn11]. Il fallut attendre 1954 pour découvrir la supraconductivité de type II dans un alliage de niobium et d'étain ($T_c = 18$ K). Les alliages à bases de niobium comme le Nb_3Ge ($T_c = 23$ K) découvert en 1973 furent longtemps les supraconducteurs ayant les plus hautes T_c . Il était communément admis que la limite des 30 K ne serait jamais dépassée.

I. A. 2. b) Historique des HTS

L'apparition en 1986 des céramiques supraconductrices à bases d'oxyde de cuivre telles que le $BaLaCuO$ ($T_c = 38$ K) [Bed86] et une année plus tard l' $YBaCuO$ ($T_c = 93$ K) [Wum87] a permis de franchir la barrière des 30 K, c'est la découverte des HTS. Ceci a fortement renforcé l'intérêt des supraconducteurs qui peuvent désormais dans certaines conditions être refroidis dans l'azote liquide (77 K), ce fluide étant beaucoup moins couteux et plus simple d'utilisation que l'hélium liquide. Ensuite de nouveaux HTS comme les composés à base de bismuth $BiSrCaCuO$ ($T_c = 110$ K) sont apparus, le record de température critique étant le $HgBaCaCuO$ ($T_c = 164$ K) en 1995. L'objet de ce mémoire porte essentiellement sur les HTS à bases d' $YBaCuO$.

I. B) Comportement des supraconducteurs

I. B. 1) Grandeurs critiques

L'état supraconducteur est limité par trois grandeurs définissant une surface critique au-delà de laquelle le matériau transite vers un état dissipatif caractérisé par l'apparition d'un champ électrique. La température critique (T_c) et le champ magnétique d'irréversibilité (H^*) sont des grandeurs intrinsèques au matériau, tandis que la densité de courant critique (J_c) dépend du procédé de fabrication (Figure I.2) [Tix95]. Au-delà de T_c le supraconducteur se trouve dans un état normal caractérisé par une résistivité ρ_n .

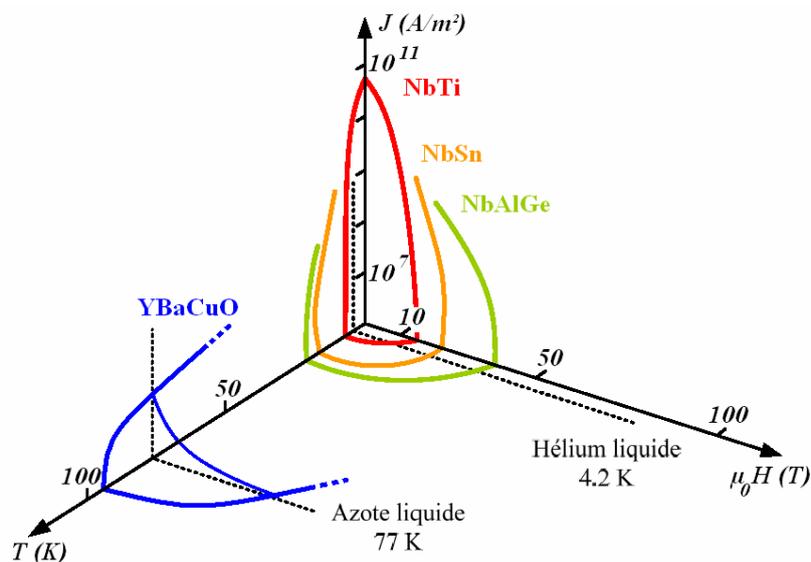


Figure I.2 : Surfaces critiques des principaux supraconducteurs

L'application des supraconducteurs à la limitation de courant fait essentiellement intervenir deux grandeurs critiques : la température T_c et la densité de courant J_c .

I. B. 2) Mobilité des vortex

Il est important de bien comprendre les lois 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.3).

I. B. 2. a) 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, 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 et une résistivité dite de flux flow notée ρ_{ff} égale en première approche à (I.1) :

$$\rho_{ff} = \frac{H}{H_{c2}} \times \rho_n \quad (I.1)$$

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

Dans le cadre de ce mémoire sur l'étude du matériau YBaCuO, il est à noter que le phénomène de flux flow n'est pas observable.

I. B. 2. 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 (TAAF) 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 [And62]. Ce mouvement engendre un champ électrique et une résistance dans le matériau appelée résistance de flux creep.

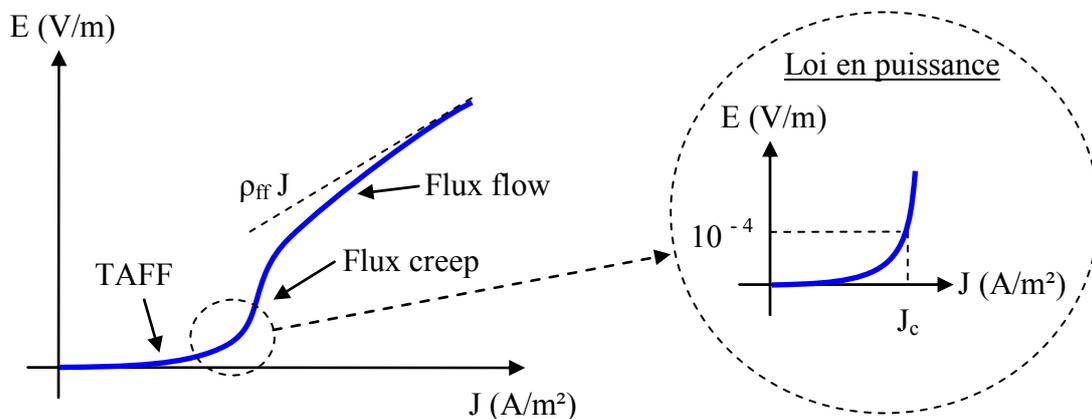


Figure I.3 : Caractéristique E(J) d'un supraconducteur avec activation thermique

I. B. 3) Loi en puissance E(J)

Le régime de flux creep peut être modélisé par une loi en puissance empirique E(J) (I.2) permettant de relier la densité de courant au champ électrique [Lar89] (Figure I.3).

$$E(J) = E_c \left(\frac{J}{J_c}\right)^n \quad (I.2)$$

Avec « E » et « J » étant respectivement le champ électrique et la densité de courant traversant le supraconducteur. « E_c » est le critère de supraconductivité défini arbitrairement à 1 μV/cm, il représente le seuil à partir duquel le matériau n'est plus considéré comme supraconducteur. « J_c » est la densité de courant critique, elle représente la densité de courant dans le matériau lorsque celui-ci développe un champ électrique égal à E_c. Enfin « n » est l'indice de transition résistive qui donne le degré de piégeage de l'échantillon. Cette loi représente bien le comportement électrique des matériaux pour des densités de courant proches de J_c (± 5 %), en dessous de cette zone la loi en puissance ne s'applique plus et la résistivité est considérée comme nulle (ρ < 10⁻²⁵ Ω.m). Dans le cadre de notre étude, cette loi est très utile pour la caractérisation des échantillons et l'élaboration des modèles analytiques.

I. B. 4) Modèle de l'état critique

Le modèle de l'état critique est basé sur l'hypothèse d'une répartition locale de la densité de courant binaire à l'intérieur du supraconducteur. Il décrit cette répartition comme étant nulle ou égale à ± J_c. Les équations de Maxwell traduisent ce phénomène par les formules (I.3).

$$\overrightarrow{rot} \vec{B} = \pm \mu_0 \vec{J}_c \quad \text{ou} \quad \overrightarrow{rot} \vec{B} = \vec{0} \quad (I.3)$$

Ce modèle est mathématiquement simple et permet de comprendre facilement la supraconductivité d'un point de vue macroscopique. Ainsi les supraconducteurs fonctionnent autour de J_c, ce qui justifie l'utilisation de la loi en puissance E(J) pour les modéliser. Ce modèle permet également d'obtenir l'expression analytique des pertes en courant alternatif (AC). Cependant la discontinuité qu'il induit le rend difficilement utilisable dans les modèles numériques.

I. B. 5) Pertes AC

En courant continu, la résistivité d'un supraconducteur peut être considérée comme nulle (ρ < 10⁻²⁵ Ωm). Cependant lorsque le supraconducteur est traversé par un courant

alternatif, celui-ci crée un champ magnétique variable engendrant des pertes appelées AC. En considérant une analyse macroscopique, toute induction magnétique variable fait apparaître un champ électrique (I.4).

$$\overrightarrow{rot E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (I.4)$$

Ce champ électrique combiné au courant de transport, crée des pertes dans le supraconducteur. Notre étude portant sur des conducteurs minces de section rectangulaire, les équations (I.5) de W.T. Norris [Nor70] permettent de calculer les pertes AC pour ce type de géométrie.

$$P = f \frac{I_c^2 \mu_0}{\pi} [(1-i)\ln(1-i) + (1+i)\ln(1+i) - i^2] \quad \text{avec} \quad i = \frac{I_{\max}}{I_c} \quad (I.5)$$

Avec « P » exprimé en W/m et « f » la fréquence du courant. Ces pertes restant faibles par rapport aux pertes joules créées dans un métal, elles doivent cependant être prises en compte pour le dimensionnement de la cryogénie.

I. C) Principales applications des supraconducteurs

La spectroscopie du solide et l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) sont actuellement les seules applications industrielles [Bru92]. 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. C. 1) Applications en 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. C. 2) Applications en électrotechnique

I. C. 2. a) Machines tournantes

L'utilisation des supraconducteurs dans les cryoalternateurs est à l'origine de nombreux prototypes [Daf97]. 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.

I. C. 2. b) Câbles de transport

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. C. 2. c) Stockage d'énergie

Le principal inconvénient de l'énergie électrique est qu'elle est difficilement stockable. Le Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) [Bel06] 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. C. 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.

Références du chapitre I

- [**And62**] P.W.Anderson, Theory of flux creep in hard superconductors, *Phys. Rev. Lett* 309, (1962)
- [**Bed86**] J.G.Bednorz, A.Müller, Possible high Tc superconductivity in the BaLaCuO system, *Phys. Cond. Matter* 64 189, (1986)
- [**Bel06**] B.Bellin, P.Tixador, Contribution à l'étude des bobinages supraconducteurs : le projet DGA du SMES HTS impulsif, *Thèse de l'INPG*, (2006)
- [**Bru92**] Y.Brunet, J.L.Sabrié, Machines cryoélectriques, *Traité génie électrique* Vol. D3111, (1992).
- [**Daf97**] H.Daffix, P.Tixador, Design of a fully superconductor synchronous motor, *Electric Machines and Power Systems* 25 227-245, (1997)
- [**Lar89**] A.I.Larkin, V.M.Vinokur, M.V.Feigelman, V.Bry of collective flux creep, *Phys. Rev. Lett.* 63 2303, (1989)
- [**Nor70**] W.T.Norris, Calculation of hysteresis losses in hard superconductors carrying ac : isolated conductors and edges of thin sheets, *J. PhysD., App. Phys.* Vol. 3 489, (1970)
- [**Onn11**] H.KOnnes, Further experiments with liquid helium, *Communication from the physical laboratory of the University of Leiden*, (1911)
- [**Tix95**] P.Tixador, Les Supraconducteurs, *Edition Hermès Paris*, 39, (1995)
- [**Wum87**] M.K.Wu and coll., Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase YBaCuO compound system at ambient pressure, *Phys. Rev. Lett.* 58 908, (1987)

Chapitre II

Les conducteurs déposés

L'objectif de ce chapitre est de présenter brièvement les conducteurs déposés (CC pour coated conductors). Dans un premier temps nous parlerons de l'intérêt du supraconducteur YBaCuO, nous présenterons ensuite l'architecture et les différents procédés de fabrication des coated conductors.

II. A) Supraconducteur YBaCuO

Le principal inconvénient des supraconducteurs bas T_c est le fonctionnement à basse température et la cryogénie à 4 K qu'ils impliquent. La découverte des HTS a relancé l'intérêt de ces matériaux car il devient possible d'utiliser un dispositif cryogénique à 77K, celui-ci étant plus simple d'utilisation. Dans ce contexte les céramiques supraconductrices constituent une bonne base pour le développement des applications supraconductrices.

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).

L'essentiel de cette étude concerne l'YBaCuO, il est également important de noter l'utilisation de nouveaux HTS comme le DyBaCuO qui possède une T_c légèrement plus élevée, qui est chimiquement plus stable et qui réagit moins à l'humidité.

II. A. 1) Structure cristallographique de l'YBaCuO

Comme tous les composés à base d'oxyde de cuivre, l'YBaCuO doit ses caractéristiques supraconductrices à la présence du plan 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).

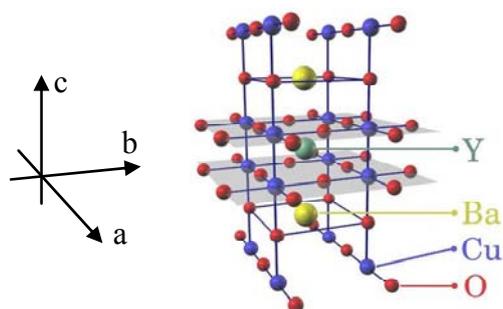


Figure II.1 : Structure cristallographique de l'YBaCuO

Les céramiques massives obtenues par frittage de poudre présentent des caractéristiques de connexions électriques entre grains adjacents très médiocres, ces joints de grains agissant directement sur la densité de courant critique. A l'inverse, les films minces d'YBaCuO ayant de bonnes qualités épitaxiales possèdent des J_c importants sous champ magnétique élevés, ceci grâce à l'alignement quasi parfait des joints de grain [Dim88] [Dim90]. L'oxyde métallique YBaCuO est très sensible à la stœchiométrie de l'oxygène, s'il est porté à une température supérieure à 400°C il perd de l'oxygène et donc ses propriétés supraconductrices.

II. A. 2) Propriétés de l'YBaCuO

Les caractéristiques générales de l'YBaCuO sont les suivantes (Tableau II.1).

	Densité (kg/m ³)	T _c (K)	H _{c1} à 77 K (mT)	H _{c2} à 77 K (T)	J _c à 77 K et 0 T (kA/mm ²)
YBaCuO	6380	Massifs : 93 Films : 89	25	150	10

Tableau II.1 : Caractéristiques générales de l'YBaCuO

Notre étude des limiteurs supraconducteurs de courant fait intervenir les propriétés de l'YBaCuO sur de grandes variations de température. La résistivité de l'YBaCuO en fonction de la température sont représentés ci-dessous (Figure II.2).

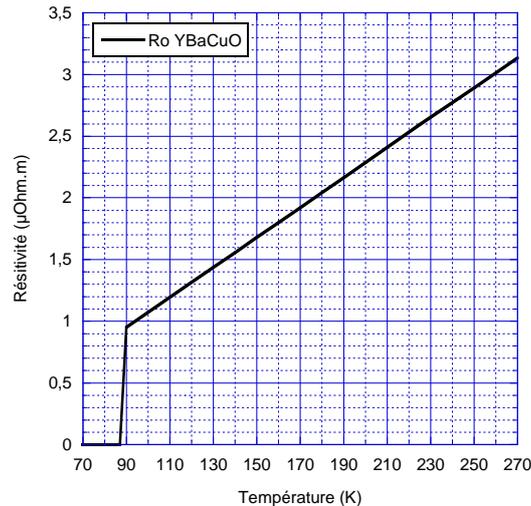


Figure II.2 : Résistivité de l'YBaCuO en fonction de la température

Il apparaît sur la courbe de résistivité de 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 pour le réseau. Cependant, dans son état normal, il devient une importante résistance permettant de limiter le courant.

II. B) Architecture des conducteurs déposés

II. B. 1) Structure générale des coated conductors

Les applications industrielles ont besoin de supraconducteurs souples, résistant aux efforts mécaniques et capables d'être bobinés. Contrairement au YBaCuO massifs, les CC sont constitués 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.3). Le dépôt d'YBaCuO, couche atomique par couche atomique, permet d'obtenir une très bonne structure cristallographique et donc une densité de courant critique très importante. 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 d'avoir un paramètre de maille proche de celui de l'YBaCuO pour ne pas induire de désorientation. Le dépôt ce fait selon l'axe c, perpendiculairement au substrat.

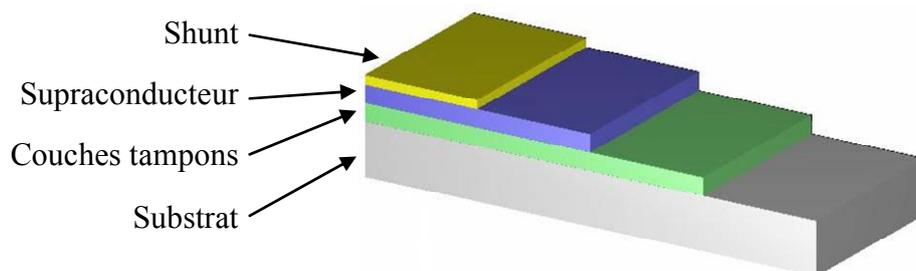


Figure II.3 : Architecture générale d'un conducteur déposé

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

II. B. 2) 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. B. 3) 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 de l'YBaCuO.

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 à l'YBaCuO 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. B. 4) Caractéristiques de la couche supraconductrice

Généralement d'une épaisseur de l'ordre de 1 μm , les caractéristiques de l'YBaCuO sont décrites dans le chapitre II. A).

II. B. 5) Caractéristiques du shunt

Les coated conductors sont recouverts 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 l'YBaCuO en cas de transition et facilite également l'injection du courant. Le shunt a une épaisseur moyenne de 200 nm, il est composé de métaux nobles comme l'Or ou l'Argent.

II. C) Fabrication des conducteurs déposés

La fabrication d'un coated conductor consiste à faire croître une couche d'YBaCuO sur un support à texture biaxiale afin de lui transférer cette texture et assurer de bonnes propriétés supraconductrices.

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. C. 1) 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.4) développée sur du Nickel [Kro97], 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 [Lis01] ont permis de réaliser de grandes longueurs possédant une bonne texturation.

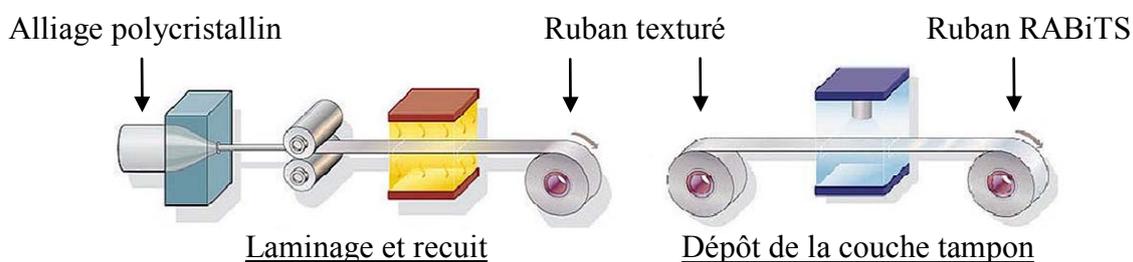


Figure II.4 : Procédé RABiTS

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

- CVD [Hir98] ou MOCVD [Sen01] (Metalorganic Chemical Vapor Deposition) qui utilise des précurseurs volatiles : le supraconducteur est déposé juste après la réaction chimique à la surface du substrat.
- Spray pyrolyse [Jer95] et Sol-Gel [Rut03], 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. C. 2) 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. C. 2. a) Ion Beam Assisted Deposition

IBAD est le premier procédé de fabrication des CC [Ike91]. Il permet l'orientation bi-axiale 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 cout élevé et le temps de fabrication relativement long (0,3 nm/s).

II. C. 2. b) Modified Bias Sputtering

MBS [Kom94] réalise une texture bi-axiale de la couche tampon dans une enceinte de dépôt par bombardement cathodique RF, sans source d'ions supplémentaire.

II. C. 2. c) Inclined Substrate Deposition

ISD [Lim02] 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 subi 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 (Magnetron Sputtering) ou l'évaporation thermique TE (Thermal Evaporation).

Références du chapitre II

- [Dim88]** D.Dimos,P.Chaudhari, J.Mannhart, F.K.Legoues, Orientation dependence of grain-boundary critical currents in YBCO bicrystals, *Rev. Lett.* **61** 219-222,(1988)
- [Dim90]** D.Dimos,P.Chaudhari, J.Mannhart, Superconducting transport properties in YBCO bicrystals, *Phys. Rev. B.* **41** 4038-4039,(1990)
- [Hir98]** I.Hirabayashi, K.Yamagiwa, Structural and superconducting properties of bi-axial aligned y123 films prepared by chemical solution deposition, *Physica C* **304**, (1998)
- [Ike91]** I.Ikeno, O.Kohno, Y.Iijima, N.Tanabe, Bi-axially aligned ybco thin film tapes, *Physica C* **185** 1959, (1991)
- [Jer95]** M.Jergel, Synthesis of high-tc superconducting films by deposition from aerosol, *Sup. Sc. And Technol.* **8** 67-68, (1995)
- [Kom94]** 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 modifies bias sputtering, *Physica C* **219** 333-339, (1994)
- [Kro97]** 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)
- [Lim02]** 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)
- [Lis01]** F.A.List, M.Paranthaman, E.D.Specht, J.D.Budai, Q.He, B.Saffian, D.F.Lee, E.Hatfield, P.M.Martin, C.E.Kladunde, J.Mathis, C.Park, D.P.Goyal, D.F.Lee, Recent progress in the fabrication of high-Jc tapes by epitaxial deposition of YBCO on RABiTS, *Physica C* **357** 903-913, (2001)
- [Rut03]** 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)
- [Sen01]** 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)

Chapitre III

La limitation de courant

L'objectif de ce chapitre est d'introduire la notion de limitation de courant dans les réseaux électriques. Dans un premier temps, nous parlerons des avantages apportés par ces systèmes puis nous présenterons leurs principes de fonctionnement. Dans un deuxième temps nous donnerons un état de l'art complet des limiteurs supraconducteurs puis nous conclurons par un résumé comparatif entre les différentes solutions techniques.

III. A) Limitation de courant dans les réseaux électriques

III. A. 1) Intérêts des limiteurs de courant

L'augmentation permanente des besoins en énergie électrique, tant en qualité qu'en quantité, entraîne une croissance de la puissance des équipements installés dans les réseaux et le développement de leurs interconnexions. Cette tendance implique une augmentation de la puissance de court-circuit qui rend plus difficile la coupure des courants de défaut.

Elle impose également une meilleure sélectivité ayant pour but d'isoler rapidement la branche en défaut tout en évitant la coupure des branches saines. D'une part, la sélectivité ampèremétrique repose sur des réglages de courants de déclenchement décroissants vers l'aval du réseau. D'autre part, la sélectivité chronométrique agit par ouverture après une temporisation (~300 ms/étage) qui est ajouté sur les différents niveaux du réseau, permettant ainsi d'attendre une éventuelle coupure du défaut en aval avant de couper une plus grande partie du réseau. Enfin, la sélectivité logique requiert un échange d'informations entre les différents organes de protection, la première protection détecte un défaut et envoie un ordre de blocage aux autres protections, les empêchant ainsi de déclencher. Généralement un mélange des trois types de sélectivité est utilisé afin d'avoir un système de protection sûr, efficace et fiable.

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 (Figure III.1), 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, ce sont les limiteurs de courant.

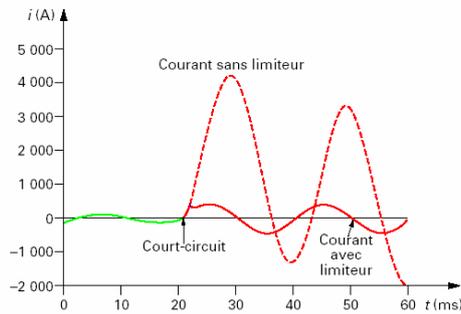


Figure III.1 : Evolution du courant de court-circuit avec et sans limiteur

Un réseau électrique possède généralement une impédance de ligne permettant un compromis entre une faible chute de tension en régime assigné et une impédance suffisante pour limiter le courant en régime de défaut. Les pertes que ce dimensionnement entraîne ont un coût élevé. Le limiteur supprime ce compromis et permet d'avoir un réseau dont l'impédance de ligne est faible (faibles chutes de tensions mais puissance de court-circuit élevée), mais dont le courant de défaut est maîtrisé par le limiteur.

Les limiteurs permettent par exemple de ne pas surdimensionner les disjoncteurs, ceux-ci étant particulièrement sollicités par les arcs électriques dus aux surtensions à l'ouverture des courants de défaut. La présence des disjoncteurs est néanmoins obligatoire afin d'éliminer entièrement le défaut et d'isoler les zones concernées. Ils devront rester rapides (50 ms) afin de limiter l'effet joule dans le limiteur pour éviter sa destruction. Cependant la taille des disjoncteurs requise pour ces opérations sera très inférieure à la taille théorique puisque seul le courant limité devra être coupé. Ainsi la diminution du coût et du volume des équipements des réseaux électriques est un avantage considérable pour les limiteurs de courant.

III. A. 2) Intégration dans les réseaux électriques

L'insertion d'un limiteur permet d'une part, d'assumer une augmentation des puissances transmissibles dans un réseau existant sans modifier ses composants ni sa structure, d'autre part de dimensionner différemment les réseaux futurs. Les limiteurs de courant se justifient en fonction du niveau de tension envisagé : pour les moyennes tensions de quelques kV les courants de défaut peuvent être très importants, tandis que pour les plus hautes tensions de quelques centaines de kV le coût élevé des disjoncteurs peut rendre attractif l'insertion d'un limiteur.

Les limiteurs doivent être calibrés pour ne fonctionner qu'en régime de défaut et pas sur les surcharges momentanées. La majorité des défauts étant fugitifs (90 % sur les lignes aériennes), la re fermeture automatique (cycle OFO) du disjoncteur est employée. Les systèmes classiques ne changeant pas d'état acceptent cette procédure. Ceci n'étant pas le cas pour les limiteurs supraconducteurs, il est important de tenir compte de cela dans notre étude.

Les limiteurs de courant peuvent être placés dans différentes parties d'un réseau, remplissant ainsi différentes fonctions [Bru97] [Noe07] (Figure III.2).

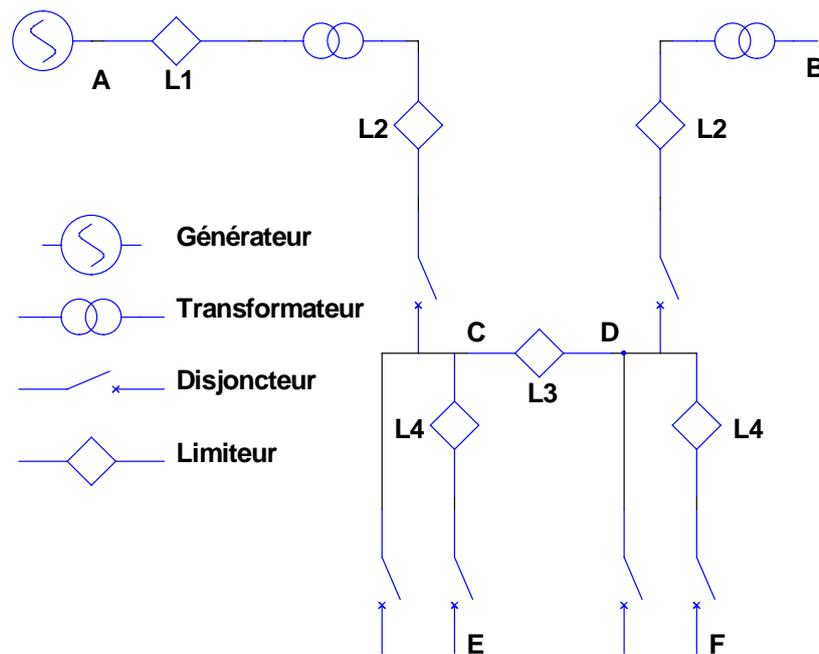


Figure III.2 : Insertion des limiteurs de courant dans un réseau

III. A. 2. a) Protection des générateurs et des transformateurs

En sortie de tranche ou de sous-station, protégeant ainsi le générateur et le transformateur qui peuvent être dimensionnés en fonction du courant de limitation et non plus en fonction du courant de court-circuit. Sur la Figure III.2, le limiteur L1 protège le générateur et améliore la stabilité.

III. A. 2. b) Maintien des interconnexions

Dans les sections d'entrée des sous-stations, pour des réseaux existants cela permet de maintenir l'interconnexion des sections en aval. Sur la Figure III.2, les limiteurs L2 permettent de maintenir la liaison entre C et D en cas de défaut sur B.

III. A. 2. c) Sélectivité de l'isolement des défauts

Dans une branche d'interconnexion, isolant la portion en défaut tout en assurant la continuité d'exploitation avec les autres sources, ceci permettant également d'améliorer les marges de stabilité. Par ailleurs le limiteur peut être utilisé comme régulateur sélectif permettant d'équilibrer la charge dans des branches en parallèle. Sur la Figure III.2, le limiteur L3 permet de déconnecter les deux sections A et B et d'éviter que A ou B ne débite sur un même court-circuit (l'interconnexion n'aggrave pas le courant de défaut). Les limiteurs L4 permettent de protéger sélectivement les départs E et F.

III. B) Fonctionnement des limiteurs de courant

III. B. 1) Principe général de la limitation 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, devant 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. B. 2) Limiteurs de courant classiques

Peu de solutions classiques permettent de limiter naturellement les courants de défaut. Le fusible est la solution la plus utilisée en basse et moyenne tension mais il présente les inconvénients majeurs de ne pas être réutilisable et de nécessiter l'intervention humaine pour la remise sous tension du système. Les autres solutions utilisent des systèmes permettant l'augmentation de leur impédance lors d'une montée de courant.

III. B. 2. a) Réactance série

L'insertion permanente de réactances en série dans les réseaux permet de limiter les courants de défauts mais introduisent des surtensions transitoires durant les séquences de refermeture des disjoncteurs. De plus, les chutes de tensions en régime nominal et l'encombrement n'étant pas négligeable, cette solution n'est pas applicable pour tous les réseaux.

III. B. 2. b) Limiteur commandé

Pour limiter ces inconvénients, il est préférable d'introduire ces composants au moment du défaut. Un des dispositifs de référence est le transformateur série court-circuité par des thyristors [Pal84] (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.

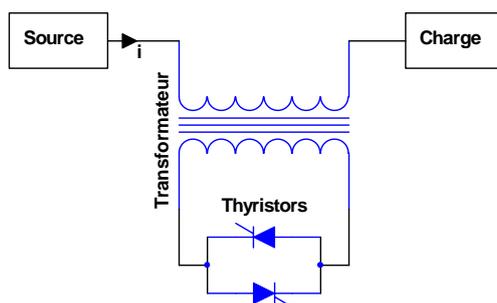


Figure III.3 : Limitation de courant par transformateur court-circuité

Il est également possible d'utiliser des dispositifs à résonance [Kar91] 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.

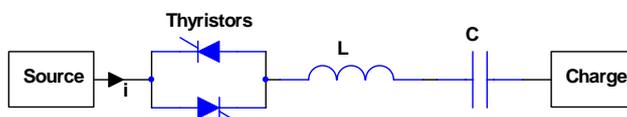


Figure III.4 : Limitation de courant par thyristors contrôlant un circuit raisonnant

Enfin, d'autres 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 semiconducteurs 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. B. 2. c) Résistance variable

Une solution efficace consiste à utiliser une résistance variable en série avec le réseau, cette variation provenant d'un changement de phase ou d'état du matériau. La contrainte responsable du changement est variée (thermique, mécanique, magnétique...), mais

est toujours liée au courant. Il apparaît cependant 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 [Ski97].

III. C) Limiteurs supraconducteurs de courant

Par leur résistivité nulle à l'état supraconducteur et leur forte résistivité à l'état normal, les HTS sont d'excellents candidats pour la limitation de courant. Le fonctionnement répétitif et autonome confère également des atouts non négligeables aux limiteurs supraconducteurs de courant (SCFCL pour Superconducting Fault Current Limiter) [Noe07]. Cependant comme tout système supraconducteur il nécessite un environnement cryogénique composé d'un cryostat et d'un fluide cryogénique ou d'un cryogénérateur.

III. C. 1) SCFCL résistif

III. C. 1. a) Fonctionnement des SCFCL résistifs

Un réseau peut être modélisé par une source de tension $U_{\text{réseau}}$ parcouru par un courant $I_{\text{réseau}}$. Il est composé d'une résistance de ligne $R_{\text{réseau}}$ et d'une inductance de ligne $L_{\text{réseau}}$, d'un disjoncteur et d'une charge. Dans le cadre de notre étude, nous intégrons un SCFCL résistif en série avec ce réseau (Figure III.5).

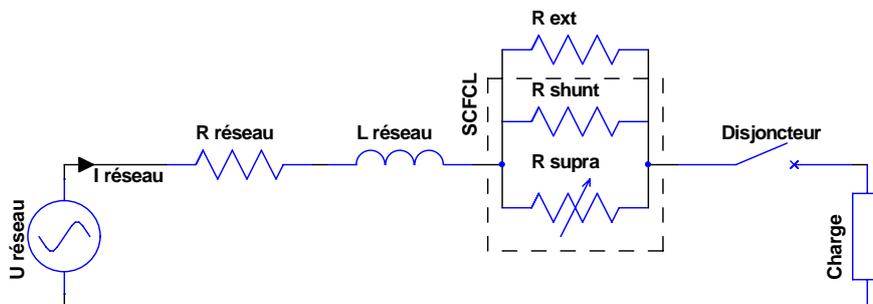


Figure III.5 : SCFCL résistif

La transition brutale d'un supraconducteur, couplée à son importante résistivité à l'état normal, permet d'introduire rapidement et naturellement une forte résistance en série avec le réseau, limitant ainsi le courant.

En régime assigné, la résistance du supraconducteur R_{supra} est négligeable et court-circuite celle du shunt nommée R_{shunt} . En régime de défaut, lorsque le courant $I_{\text{réseau}}$ traversant le SCFCL dépasse le courant critique du supraconducteur, sa résistance augmente brutalement. La résistance du shunt est nécessaire pour protéger le supraconducteur contre les points chauds destructifs dus à l'inhomogénéité des transitions. Cette résistance doit être en excellent contact électrique avec toute la longueur du supraconducteur. Une résistance externe R_{ext} peut également être ajoutée pour régler le courant limité et éviter les surtensions entraînées par les rapides transitions. Pour ne pas excéder la température maximale du supraconducteur, le court-circuit doit être interrompu par l'ouverture d'un disjoncteur en moins d'une centaine de millisecondes.

L'inhomogénéité est un problème important dans la limitation de courant par les supraconducteurs car elle engendre un point chaud pouvant être à l'origine de la destruction du matériau. Le SCFCL résistif avec transition assistée magnétiquement (Figure III.6) est composé d'un limiteur supraconducteur résistif couplé en parallèle avec une bobine résistive de champ magnétique nommée L_{trans} .

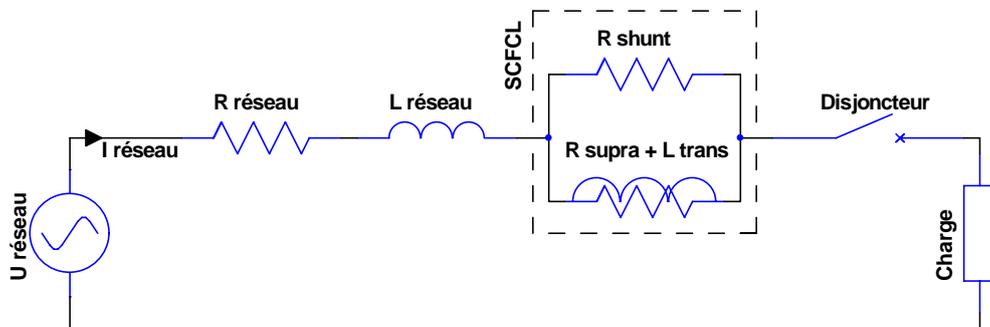


Figure III.6 : SCFCL résistif assisté magnétiquement

L'enroulement est bobiné de manière coaxiale autour du supraconducteur, ce dispositif utilise la dépendance du courant critique par rapport à une induction. Une limitation de courant s'amorce toujours au point le plus faible d'un supraconducteur, générant une résistance favorisant le passage du courant dans la bobine. L'induction créée par celle-ci abaisse le courant critique des parties supraconductrices, accélérant ainsi la transition et diminuant les contraintes appliquées au point chaud.

Ce type de SCFCL est simple, fiable et compact, cependant en raison du fort échauffement pendant la phase de limitation, il est nécessaire de respecter un temps de récupération avant d'utiliser de nouveau le SCFCL en régime assigné. Ce temps dépend essentiellement de la conception du système, il vaut quelques secondes pour les couches minces mais peut atteindre quelques minutes pour les matériaux massifs.

Notre étude porte sur le SCFCL résistif à base de couches minces d'YBaCuO, ce matériau ayant un champ critique assez élevé, le dispositif inductif permettant d'améliorer l'homogénéité est difficilement réalisable. Il est donc plus intéressant d'étudier le SCFCL purement résistif.

III. C. 1. b) Etat de l'art des SCFCL résistifs

La plupart des projets de ces dernières années sont de type SCFCL résistif, parmi eux les démonstrateurs à base de BSCCO-2212 sont les plus puissants. Nexans SuperConductors est jusqu'ici parvenu à développer le plus puissant HTS pour les limiteurs résistifs en utilisant des enroulements bifilaires de BSCCO-2212 [Els03].

Le démonstrateur triphasé CURL 10 (Figure III.7) de 10 kV / 10 MVA, a été construit en 2003 puis testé avec succès pendant une année sur le réseau de distribution RWE en Allemagne [Boc05] [Kre05].



Figure III.7 : Démonstrateur CURL 10

Cet essai en condition de fonctionnement réel fut une première mondiale, il a révélé la faisabilité technique de ce type de SCFCL pour les applications de moyenne tension. De plus, la comparaison entre les pertes AC avant et après l'essai n'a montré aucune dégradation matérielle. En raison des difficultés rencontrées pour des niveaux de tensions plus élevées, Nexans se concentre maintenant sur les SCFCL résistifs assistés magnétiquement. Ainsi en 2005 un projet allemand a lancé le développement du démonstrateur CULT 110 de 110 kV / 1,8 kA d'ici 2008 [Els05] [Noe06].

Aux Etats-Unis en 2003, le Département de l'Energie (DOE) a suivi le même concept et a développé un SCFCL résistif assisté magnétiquement de 138 kV à base de supraconducteurs BSCCO 2212 massifs. Malgré la réussite des essais [Yua05], ce concept particulier n'a pas été poursuivi et ce projet s'oriente aujourd'hui vers un SCFCL résistif à base de coated conductors d'YBaCuO [Xie07].

En 2001, ABB a testé avec réussite un démonstrateur de 8 kV / 800 A monophasé [Pau01] [Che02]. Ce démonstrateur compact a été réalisé à partir de 100 méandres de BSCCO-2212 massif. En 2002 dans le cadre du projet européen BYFAULT, 43 méandres d'YBaCuO massifs ont été montés en série pour établir un prototype résistif de SCFCL au CNRS de Grenoble [Por02]. Le courant assigné et la température de fonctionnement étaient respectivement fixés à 100 A et 90,5 K. Lors des essais, la tension aux bornes du prototype a pu atteindre 1 kV soit 106 V/m pendant 20 ms et le courant a été limité à 730 A soit 10 % de la valeur atteint sans limitation de courant. Malgré de gros travaux sur l'homogénéité de ce type de HTS, une fraction des méandres a été détruite. Cette solution est apparue peu industrialisable à cause du grand nombre de méandres à mettre en série.

Les dépôts d'YBCO sur substrat de saphir [Kin97] ont été étudiés dans plusieurs démonstrateurs de SCFCL résistifs. Le premier essai majeur sur un prototype réalisé avec ce type de matériau a été réalisé par Siemens en 2000. Un prototype de 100 kVA [Gro99] [Fis99] puis un dispositif de 1 MVA triphasé ont ensuite été réalisés et testés [Fis00] [Kra03]. En raison du coût relativement élevé du substrat de saphir, Siemens a décidé de stopper le développement de prototypes plus importants.

Au Japon, c'est autour du projet Super-ACE qu'eue lieu une grande partie de la R&D sur les SCFCL entre 2000 et 2004 [Ued03] [Yas05]. L'objectif principal était d'établir les bases technologiques pour la fabrication des SCFCL et des matériaux supraconducteurs. Deux SCFCL résistifs utilisant des HTS en couches minces ont été développés, le premier est adapté aux hautes tensions 6,6 kV / 100 A [Yas05] tandis que le second est adapté aux forts courants 200 V / 1 kA [Shi02]. Dans le cadre d'un projet national visant à accentuer le développement des coated conductors, il est prévu d'étudier les applications d'un SCFCL de 6,6 kV / 600 A jusqu'en 2007 [Iwa06].

En Corée c'est le projet Dream of Advanced Power systems by Applied Superconductivity technology (DAPAS) qui concerne le développement des SCFCL. Ce programme de 10 ans a commencé en 2001 et son objectif est de commercialiser des équipements supraconducteurs de puissance. Concernant les SCFCL, un développement en

plusieurs étapes est prévu, celui-ci devant aboutir sur un limiteur de 154 kV d'ici 2010. Dans un premier temps un prototype de SCFCL résistif de 6.6 kV / 200 A à base de couches minces d'YBCO a été construit et testé avec succès [Kim02] [Hyu05]. Actuellement, la deuxième étape a pour objectif la réalisation et les essais d'un SCFCL de 22.9 kV / 630 A à base de MCP BSCCO-2212 en 2007.

Les conducteurs déposés ou coated conductors sont des candidats intéressants pour la limitation de courant par SCFCL résistifs. Les progrès de la R&D autour de ce fil sont très prometteurs et les résultats des essais montrent le bon potentiel de ce matériau pour des applications de SCFCL [Ahn06] [Kud06] [Xie07]. En 2005, une association entre American Superconductors (AMSC) et Siemens a été formée pour étudier les caractéristiques fondamentales de ce fil pour la limitation de courant. Des premiers échantillons de petites tailles ont été réalisés et testés [Neu06]. Les premiers essais réussis sur les coated conductors d'YBCO ont été réalisés dans le projet européen Superpoli [Ver99]. Trois échantillons ayant chacun un courant critique de 2 kA ont été connectés en série puis testés en limitation de courant jusqu'à des courants crêtes de 50 kA [Uso03].

En 2005 dans le cadre du projet Superflex, plusieurs échantillons de coated conductors ont été testés au CNRS de Grenoble pour différentes températures de fonctionnement, permettant ainsi d'étudier l'évolution de l'homogénéité des transitions [Tix06], ces essais font l'objet de ce mémoire.

III. C. 2) SCFCL de type noyau magnétique écranté

III. C. 2. a) Fonctionnement des SCFCL de type noyau magnétique écranté

Ce type de limiteur est souvent appelé SCFCL inductif, il est composé d'un enroulement primaire conventionnel bobiné autour d'un noyau magnétique entre lesquels se trouve un cylindre supraconducteur (Figure III.8).

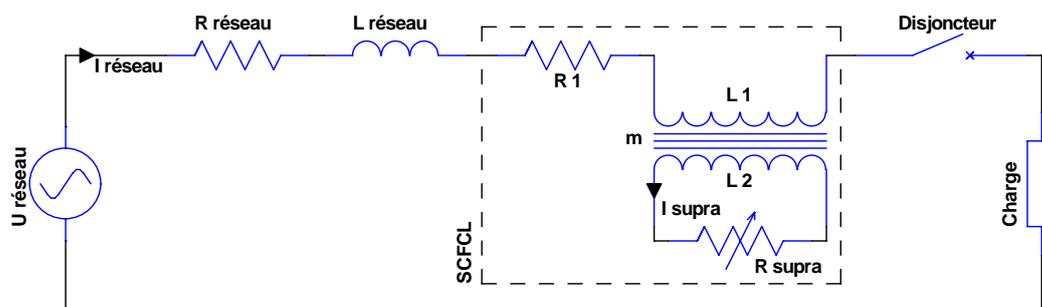


Figure III.8 : SCFCL de type noyau magnétique écranté

Son principe de fonctionnement est semblable à un transformateur avec un rapport de transformation « m » et un enroulement secondaire court-circuité (Figure III.9).

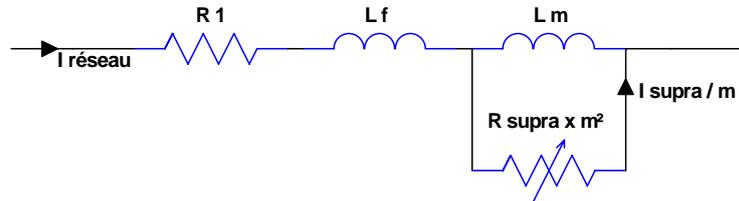


Figure III.9 : Schéma équivalent du SCFCL de type noyau magnétique écrané

En régime assigné, le courant induit dans le cylindre supraconducteur est inférieur à son courant critique et fonctionne comme un parfait écran magnétique pour l'enroulement primaire, ainsi le flux dans le noyau magnétique est négligeable. La faible impédance apparente du SCFCL équivaut à la résistance R_1 de l'enroulement primaire et à l'inductance de fuite L_f entre l'enroulement primaire et le cylindre supraconducteur.

En régime de défaut, le courant dans le supraconducteur excède sa valeur critique et le cylindre développe une résistance R_{supra} . Le flux pénètre alors le noyau magnétique, générant ainsi une impédance de limitation constituée par la mise en parallèle de l'inductance magnétisante L_m et de la résistance R_{supra} ramenée au primaire soit $R_{\text{supra}} \times m^2$. Ainsi la conception du dispositif détermine si l'impédance de court-circuit est principalement résistive ou inductive.

Ce type de SCFCL est avantageux car le supraconducteur n'est pas directement connecté au réseau et il n'y a pas d'amenées de courant à basse température. En régime de défaut le supraconducteur est soumis à une tension faible correspondant à la tension du réseau atténué par le rapport de transformation « m ». Les principaux inconvénients de ce type de SCFCL sont le volume et le poids qui sont semblables à un transformateur de même puissance. Il est également nécessaire de respecter un temps de récupération avant d'utiliser de nouveau le SCFCL.

III. C. 2. b) Etat de l'art des SCFCL de type noyau magnétique écrané

Dans les années 90 ce type de SCFCL fut l'objet de beaucoup de projets en R&D [Kan93] [Sok93] [Cav94] [Kaj95] [Pau95]. Deux principaux projets avec ce type de SCFCL ont permis de réaliser des démonstrateurs à grande échelle.

Un limiteur triphasé de 10.5 kV / 70 A a été développé par ABB en Suisse [Che97] [Pau97] [Pau98]. Ce limiteur utilise plusieurs cylindres de BSCCO-2212, il a été installé dans

une centrale hydro-électrique Suisse en novembre 1996 et a fonctionné avec succès pendant une année. Le matériau supraconducteur n'a montré aucune dégradation matérielle après l'essai. Cependant, l'application industrielle n'étant commercialement envisageable qu'avec la diminution du coût des matériaux et des cryogénérateurs, ABB a décidé de ne plus poursuivre ce type de SCFCL.

Au Japon, un SCFCL monophasé de 6.6 kV / 400 A a été fabriqué par le CRIEPI en 1997 [Ich95] [Kad97]. Le cylindre supraconducteur est une couche mince de BSCCO-2212 avec un substrat de MgO, les dimensions totales du SCFCL sont 1.3 m de large, 0,6 m de profondeur et 2m de hauteur.

Actuellement, il n'y a aucune activité au niveau mondial concernant le développement à plus grande échelle de ce type de SCFCL, ceci étant principalement dû à l'important volume qu'il implique.

III. C. 3) SCFCL de type pont redresseur

III. C. 3. a) Fonctionnement des SCFCL de type pont redresseur

Ce type de SCFCL (Figure III.10) 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} .

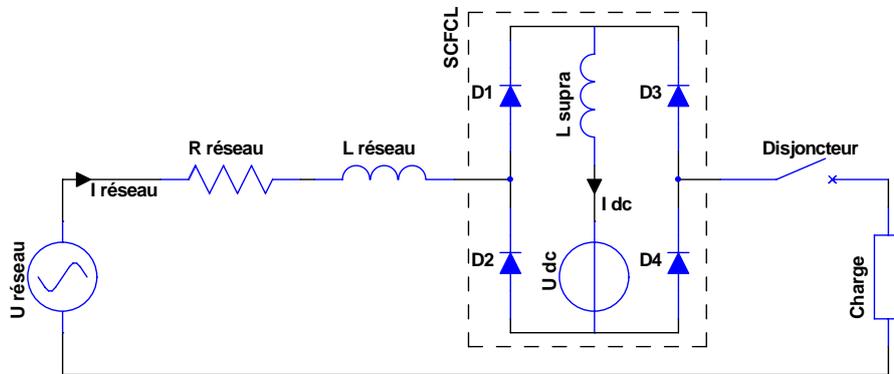


Figure III.10 : SCFCL de type pont redresseur

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 $I_{réseau}$ étant inférieur au courant I_{dc} , les diodes sont passantes et le courant $I_{réseau}$ ne traverse pas l'inductance L_{supra} . Dans ce cas l'impédance du SCFCL est faible et seule l'électronique de puissance génère des pertes. Si le courant $I_{réseau}$ 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 $I_{réseau}$ dans la bobine L_{supra} qui limite le courant par sa forte inductance.

En principe la bobine peut être non-supraconductrice, mais ceci augmente les pertes par effet Joule et implique également un enroulement plus grand. 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 disfonctionnement d'une diode court-circuitera la bobine, annulant ainsi le phénomène de limitation de courant.

III. C. 3. b) Etat de l'art des SCFCL de type pont redresseur

Ce type de SCFCL a été inventé par Boenig en 1983 [Boe83] [Boe84]. Depuis cette date les propriétés des semiconducteurs se sont beaucoup améliorées et plusieurs démonstrateurs ont été réalisés.

En 1993, un démonstrateur de 2,4 kV avec enroulements de BSCCO-2223 a été réalisé et testé avec succès dans le cadre du SPI (Superconductivity Partnership Initiative) du DOE [Leu97]. Suite à ces essais, un prototype de 15 kV / 1,2 kA à base de thyristors permettant le contrôle du courant de défaut a été construit, mais les essais en 1999 furent un échec. En effet, un défaut d'isolement de la haute tension dans une partie auxiliaire du système a rendu l'essai triphasé impossible [Leu00]. Davantage de R&D n'a pas été rapportée après la réparation et l'essai prolongé d'une phase [Way03].

Au Japon, un dispositif monophasé de 6,6 kV / 36 A sans alimentation DC a été réalisé et testé en 2000 [Yaz01]. Des essais prolongés incluant des fonctionnements sous courant assigné, courant de défaut et surtension ont été réalisés sans détérioration du système. De 2000 à 2004, des enroulements supraconducteurs DC de 66 kV / 750 A composés de six bobines de BSCCO-2223 ont été développés [Oot04] [Yaz04]. Bien qu'aucun limiteur de courant complet n'ait été réalisé, le projet a montré la possibilité d'adapter des enroulements supraconducteurs DC pour des tensions plus élevées [Koy04]. Actuellement il n'y a aucune activité majeure sur ce type de SCFCL au Japon.

Dans le cadre du programme Coréen DAPAS, la première phase concernait un démonstrateur monophasé de 1.2 kV / 80 A qui a été développé et testé avec succès en 2002 [Kan03]. Par la suite un démonstrateur de 6.6 kV / 200 A a été construit et testé jusqu'en 2004 [Ahn05] [Lee04], il était composé d'un transformateur triphasé, d'un pont redresseur triphasé à thyristors et d'un enroulement DC composé de HTS. La deuxième phase du DAPAS devait permettre de réaliser un prototype de 22.9 kV avec ce type de SCFCL, cependant c'est le

SCFCL de type résistif qui à été retenu pour la suite du programme. Le premier essai en fonctionnement réel avec ce type de SCFCL a commencé en 2005 en Chine [Sup05]. Un démonstrateur de 10.5 kV / 1.5 kA a été installé dans une sous-station située à Hunan [Hui06] [Wan06] et les essais en régime assigné ainsi que ceux en court-circuit furent une réussite. Actuellement, aucun autre plan de R&D sur ce type de SCFCL n'est en activité en Chine.

III. C. 4) SCFCL de type contrôleur du courant de défaut

III. C. 4. a) Fonctionnement des SCFCL de type contrôleur du courant de défaut

Un composant d'électronique de puissance comme le thyristor, peut par son ouverture aiguiller un courant dans une impédance de limitation. La possibilité d'ajuster le seuil de déclenchement de la commande fait de ce type de SCFCL un contrôleur de courant de court-circuit. Il est composé de deux thyristors T_1 et T_2 montés en opposition-série et court-circuités respectivement par les inductances supraconductrices L_1 et L_2 (Figure III.11).

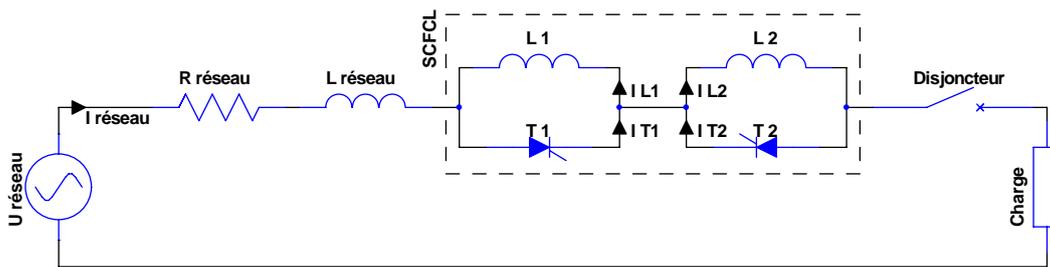


Figure III.11 : SCFCL de type contrôleur du courant de défaut

Pour amorcer le fonctionnement du système, il est nécessaire de connecter une charge au réseau puis de commander alternativement les thyristors T_1 et T_2 pour faire circuler un courant continu d'amplitude I_{dc} dans les bobines supraconductrices L_1 et L_2 . En régime assigné l'amplitude du courant $I_{réseau}$ étant inférieur à I_{dc} , les thyristors conduisent en permanence et l'impédance du SCFCL 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 leurs sont associées. Par conséquent les inductances supraconductrices L_1 et L_2 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 SCFCL avec pont redresseur mais exige une source de tension et de l'électronique de puissance en moins.

III. C. 4. b) Etat de l'art des SCFCL de type contrôleur du courant de défaut

Ce type de SCFCL a été inventé par Kuperman et Juengst en 2000 [Kup02]. Un prototype de laboratoire a été réalisé et testé, confirmant ainsi la possibilité d'utiliser ce type de circuit pour la limitation de courant. Une étude a été menée par un industriel et a démontré que le coût et la taille pour une application de moyenne tension est attrayant, un démonstrateur sera développé en 2007.

III. C. 5) SCFCL de type noyaux magnétiques saturés

III. C. 5. a) Fonctionnement d'un SCFCL de type noyaux magnétiques saturés

Pour limiter le courant de court-circuit, une impédance non-linéaire peut être obtenue en reliant les enroulements L_1 et L_2 de deux noyaux magnétiques saturés par des bobines supraconductrices L_{supra1} et L_{supra2} parcourues par des courants continus (Figure III.12).

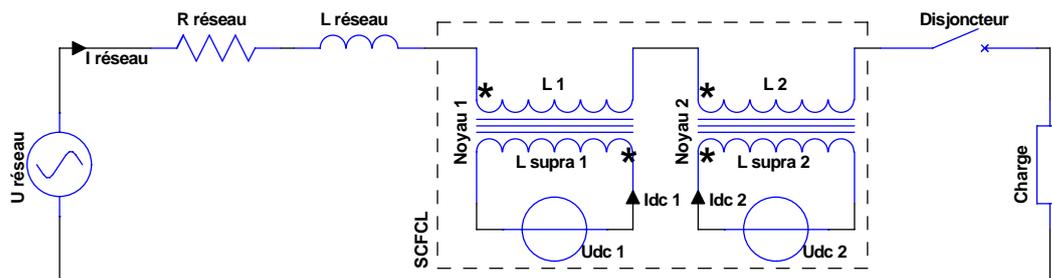


Figure III.12 : SCFCL de type noyaux magnétiques saturés

Les deux noyaux étant saturés, l'inductance apparente du SCFCL est faible et correspond à la somme des résistances et des réactances de L_1 et L_2 . En régime assigné, $I_{réseau}$ est assez bas pour maintenir les noyaux entièrement saturés, assurant ainsi la faible impédance du SCFCL. Dans le cas d'un défaut, l'augmentation de $I_{réseau}$ 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 SCFCL, 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. C. 5. b) Etat de l'art d'un SCFCL de type noyaux magnétiques saturés

Un démonstrateur de 3 kV / 550 A à base de LTS a été construit et testé en 1982 [Raj82], il mesurait 1.5 m x 2 m x 5 m et pesait plus de 7 tonnes. Le poids et le volume, ajoutés à l'important système de refroidissement imposé par les LTS, a rendu ce concept peu rentable pour les applications électriques de puissance.

De récentes études sur ce type de SCFCL [Dar04] concluent que la taille du noyau magnétique peut être réduite [Haw05] [Abb06], mais actuellement aucun détail sur les essais n'a été communiqué. Un prototype monophasé de 15 kV a été étudié [Sup05] ainsi qu'un modèle de laboratoire de 100 kVA qui a été construit et testé par Ricor en Israël [Roz07], ce concept étant basé sur l'invention de Friedman [Fri04].

Un prototype triphasé de 100 MVA / 35 kV est en voie de développement chez Innopower en Chine et devrait être testé en 2007 [Xin07]. Ce projet a permis de trouver des solutions aux problèmes de volume et de couplage entre les enroulements.

III. D) Comparaison des différents SCFCL

III. D. 1) Classification des types de SCFCL

Actuellement aucun SCFCL 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 SCFCL en régime défaillant
- Les faibles pertes AC et chutes de tension et régime assigné
- Le gain en volume et en poids

Le Tableau III.1 compare les caractéristiques des différents types de SCFCL

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 écranté	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

Tableau III.1 : Comparaison des différents types de SCFCL

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

III. D. 2) Vue d'ensemble des récents projets sur les SCFCL

Il est envisageable qu'un prototype de moyenne tension, pour des applications commerciales, soit fabriqué dans un avenir proche. Jusqu'ici, trois essais en condition de fonctionnement réel ont montré que de tels dispositifs sont techniquement réalisables pour ce niveau de tension [Pau97] [Boc05] [Hui06].

Le Tableau III.2 donne une vue d'ensemble des récents projets sur les SCFCL.

Constructeur	Pays / Année	Type	Caractéristiques	Supraconducteur
ABB	Suisse / 2001	Résistif	8 kV / 800 A	BSCCO 2212 massif
ACCEL Nexans	Allemagne / 2004	Résistif	6,9 kV / 600 A	BSCCO 2212 massif
Nexans	Allemagne / 2008	Résistif et inductif	63,5 kV / 1,8 kA	BSCCO 2212 massif
KEPRI	Corée / 2007	Résistif	13,2 kV / 630 A	BSCCO 2212 massif
General Atoms	USA / 2002	Pont redresseur	7,2 kV / 1,2 kA	BSCCO 2212 ruban
Yonsei University	Corée / 2004	Pont redresseur	3,8 kV / 200 A	BSCCO 2212 ruban
CAS	Chine / 2005	Pont redresseur	6 kV / 1,5 kA	BSCCO 2212 ruban
Innopower	Chine / 2007	Noyau magnétique sat.	20 kV / 1,6 kA	BSCCO 2212 ruban
BYFAULT	France / 2002	Résistif	1 kV / 100 A	YBCO massif
KEPRI	Corée / 2004	Résistif	3,8 kV / 200 A	YBCO film mince
CRIEPI	Japon / 2004	Résistif	1 kV / 40 A	YBCO film mince
Mitsubishi	Japon / 2004	Résistif	200 V / 1 kA	YBCO film mince
Alcatel	France / 2001	Résistif	100 V / 1,4 kA	YBCO coated cond.
IGC Superpower	USA / 2009	Résistif	80 kV / ? kA	YBCO coated cond
Rolls Royce	UK / ?	Résistif	6,6 kV / 400 A	MgB2

Tableau III.2 : Vue d'ensemble des récents projets sur les SCFCL

Pour plus d'informations sur les SCFCL et autres types de limiteurs de courant, il est possible de consulter ces documents : [Epr90] [Epr05] [Gie95] [Has04] [Noe07] [Sal95].

Enfin, il est important de noter que ces dernières années ont connues des progrès considérables dans le domaine des HTS avec les coated conductors et dans celui des SCFCL avec les limiteurs résistifs.

Références du chapitre III

- [**Abb06**] S.A.Abbott, D.A.Robinson, S.Perera, F.A.Darmann, C.J.Hawley, T.P.Beales, Simulation of HTS saturable core-type FCLs for MV distribution systems, *IEEE Trans. Power Deliv.* **21** 1013–8, (2006)
- [**Ahn05**] M.C.Ahn, H.Kang, D.K.Bae, D.K.Park, Y.S.Yoon, S.J.Lee, T.K.Ko, The short-circuit characteristics of a DC reactor type superconducting fault current limiter with fault detection and signal control of the power converter, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15** 2102–5, (2005)
- [**Ahn06**] M.C.Ahn, D.K.Bae, S.E.Yang, D.K.Park, T.K.Ko, C.Lee, B.Y.Seok, H.M.Chang, Manufacture and test of small-scale superconducting fault current limiter by using the bifilar winding of coated conductor, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **16** 646–9, (2006)
- [**Boc05**] J.Bock, F.Breuer, H.Walter, S.Elschner, M.Kleimaier, R.Kreutz, M.Noel, CURL10 : 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)
- [**Boe83**] H.J.Boenig, D.A.Paice, Fault current limiter using a superconducting coil, *IEEE Trans. Magn.* **19** 1051–3, (1983)
- [**Boe84**] H.J.Boenig, Solid-state circuit breaker with current limiting characteristic using a superconducting coil, *United States Patent Specification* 4,490,769, (1984)
- [**Bru97**] Y.Brunet, P.Tixador, Limiteurs supraconducteurs, *Techniques de l'Ingénieur* D 3 662 :1-18, (1997)
- [**Cav94**] J.R.Cave, D.W.A.Will, Y.Brisette, C.Richer, V.A.Arestanu, Test results for laboratory scale inductive high-T_c superconducting fault current limiter, *IEEE Trans. Magn.* **30** 1895, (1994)
- [**Che97**] M.Chen, T.Baumann, P.Unternährer, W.Paul, Fabrication and characterisation of superconducting rings for fault current limiter application, *Physica C* **282–287** 2639–40, (1997)
- [**Che02**] M.Chen, W.Paul, M.Lakner, L.Donzel, M.Hoidis, P.Unternaechrer, R.Weder, M.Mendik, 6,4 MVA resistive fault current limiter based on Bi-2212 superconductor, *Physica C* **372-375** 1657-63, (2002)
- [**Dar04**] F.A.Darmann, T.P.Beales, Superconducting fault current limiter, *US Patent Specification* 2004/038817 A1, (2004)

- [Els03] 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)
- [Els05] S.Elschner, F.Breuer, H.Walter, J.Bock, Magnetic field assisted quench propagation as a new concept for resistive current limiting devices, *Proc. EUCAS Conf. Vienna*, (2005)
- [Epr90] EPRI, *Study of fault current limiting techniques*, EL-6903 Project 2877-1, (1990)
- [Epr05] EPRI, *Survey of Fault Current Limiter (FCL) Technologies*, Palo Alto, 1010760, (2005)
- [Fis99] S.Fischer, D.Povh, H.Schmitt, Superconducting fault current limiters getting a grip to short circuit currents, *CIGRE 15th Int. Conf. & Exhibition on Electricity Distribution France*, (1999)
- [Fis00] S.Fischer, H.Schmitt, R.Volkmar, Y.Brisette, System requirements and test of superconducting fault current limiters, *CIGRE*, Paper 13-207, (2000)
- [Fri04] A.Friedman, M.Zarudi, N.Shaked, S.Wolfus, M.Sinvani, Y.Yeshurun, Fault current limiters with the cores saturated by superconducting coils, *German Patent Specification* 2004068670, (2004)
- [Gie95] R.F.Giese, Fault current limiters - a second look Argonne National Laboratory, IEA implementing agreement for a co-operative programme for assessing the impacts of high-temperature superconductivity on the electric power sector, (1995)
- [Gro99] B.Gromoll, Resistive fault current limiters with YBCO films 100 kVA functional model, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **9** 656-9, (1999)
- [Has04] W.Hassenzahl, D.W.Hazelton, B.K.Johnson, P.Komarek, M.Noë, C.T.Reis, Electric power applications of superconductivity, *Proc. IEEE* **92** 1655-73, (2004)
- [Haw05] C.J.Hawley, F.Darmann, T.P.Beales, Performance of a 1 MVA high temperature superconductors-enabled saturable magnetic core-type fault current limiter, *Supercond. Sci. Technol.* **18** 255-9, (2005)
- [Hui06] D.Hui, Development and test of 10.5 kV/1.5 kA HTS fault current limiter, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **16** 687-90, (2006)
- [Hyu05] O.B.Hyun, H.R.Kim, J.Sim, Y.H.Yung, K.B.Park, J.S.Kang, B.W.Lee, I.S.Oh, 6.6 kV resistive superconducting fault current limiter based on YBCO films, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15** 2027-30, (2005)
- [Ich95] M.Ichikawa, M.Okazaki, A magnetic shielding type superconducting fault current limiter using a Bi2212 thick film cylinder, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **5** 1067-70, (1995)

- [Iwa06] M.Iwakuma, Y.Hase, T.Sato, A.Tomioka, A.Iijima, T.Saitoh, T.Izumi, Y.Yamada, Y.Shiohara, Power application of YBCO superconducting tapes in Japan, *Transformers and motors Presentation at CCA Ludwigsburg*, (2006)
- [Kad97] H.Kado, M.Ichikawa, Performance of a high-Tc superconducting fault current limiter-design of a 6.6 kV magnetic shielding type superconducting fault current limiter, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **7** 993–6, (1997)
- [Kaj95] K.Kajikawa, K.Kaiho, N.Tamada, T.Onishi, Magnetic-shield type superconducting fault current limiter with high-Tc superconductors, *Electr. Eng. Japan* **115** 1026–31, (1995)
- [Kan93] H.Kanbach, E.Bochenek, M.Trautmann, R.Fischer, H.Voigt, Non-linear power impedance by means of melt-processed YBCO-components, *Proc. EUCAS ISBN 3-88355-197-X*, (1993)
- [Kan03] H.Kang, M.C.Ahn, Y.K.Kim, D.K.Bae, Y.S.Yoon, T.K.Ko, J.H.Kim, J.Joo, Design fabrication and testing of superconducting DC reactor for 1.2 kV/80 A inductive fault current limiter, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **13** 2008–11, (2003)
- [Kar91] G.C.Karady, Concept of a combined short-circuit limiter and series compensator, *IEEE Trans. Pow. Del.* **6-3** 1031, (1991)
- [Kim02] H.R.Kim, H.S.Choi, H.R.Lim, I.S.Kim, O.B.Hyun, Resistance of superconducting fault current limiters based on YBa₂Cu₃O₇ thin films after quench completion, *Physica C* **372–376** 1606–9, (2002)
- [Kin97] H.Kinder, P.Berberich, W.Prusseit, S.Reider-Zecha, R.Semerad, B.Utz, YbaCuO film deposition on very large areas up to 20x20 cm², *Physica C* **282-287** 107-10, (1997)
- [Koy04] H.Koyama, M.Hanai, M.Sakai, S.Nomura, T.Ohkuma, N.Hobara, Y.Takahashi, K.Inoue, Dielectric characteristics of 66 kV/750 A high-Tc superconducting fault current limiter coil, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **14** 1181–4, (2004)
- [Kra03] H-P.Kraemer, W.Schmitt, B.Utz, H-W.Neumueller, Switching behavior of YBCO thin film conductors in resistive fault current limiters, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **13** 2044-7, (2003)
- [Kre05] R.Kreutz, J.Bock, F.Breuer, K-P.Juengst, M.Kleimaier, H-U.Klein, D.Krischel, M.Noel; R.Steingass, K-H.Weck, System technology and test of CURL10, a 10 kV, 10 MVA resistive high Tc superconducting fault current limiter, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15** 1961-4, (2005)
- [Kud06] A.Kudymow, M.Noel, C.Schacherer, H.Kinder, W.Prusseit, Investigation of YBCO coated conductor wire for application in resistive superconducting fault current limiters, *ASC Seattle*, (2006)
- [Kup02] 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)

- [Lee04] S.Lee, H.Kang, D.K.Bae, M.C.Ahn, T.Mun, K.Park, Y.Lee, T.K.Ko, Development of 6.6 kV-200 A DC reactor type superconducting fault current limiter, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **14** 867–70, (2004)
- [Leu97] E.M.Leung, High temperature superconducting fault current limiter development, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **7** 985, (1997)
- [Leu00] E.Leung, Design & development of a 15 kV, 20 kA HTS fault current limiter, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **10** 832–5, (2000)
- [Neu06] H.W.Neumüller, Hochtemperatur-Supraleitung für die Energietechnik—weltweiter Stand und Einsatzmöglichkeiten 2nd ETG *Workshop Supraleitertechnologien und deren Anwendung in der Elektroenergie-technik*, Hannover, (2006)
- [Noe06] M.Noë, Conceptual design of a 110 kV resistive superconducting fault current limiter using MCP-BSCCO 2212 bulk material, *ASC Seattle*, (2006)
- [Noe07] M.Noë, M.Steurer, High-temperature superconductor fault current limiters : concepts, application and development status, *Supercond. Sci. Technol.* **20** R15-R29 (2007)
- [Oot04] Y.Ootani, T.Yazawa, T.Kurita, S.Nomura, T.Ohkuma, N.Hobara, Y.Takahashi, K.Inoue, Cryostat for 66 kV/750 A high-T_c superconducting fault current limiter magnet, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **14** 855–8, (2004)
- [Pal84] S.Palanichamy, P.Chinnasamy, Semiconductor fault current limiters, *IEEE Proc.* **131-3** 94 (1984)
- [Pau95] W.Paul, T.Baumann, T.Thymes, Tests of a 100 kW high T_c superconducting fault current limiter, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **5** 1059–62, (1995)
- [Pau97] W.Paul, M.Lakner, J.Rhyner, P.Unternährer, T.Baumann, M.Chen, L.Widenhorn, A.Guérig, Test of 1.2 MVA high-T_c superconducting fault current limiter, *Inst. Phys. Conf. Ser.* **158** 1173–8, (1997)
- [Pau98] W.Paul, M.Chen, Superconducting control for surge currents, *IEEE Spectr.* **35** 49–54, (1998)
- [Pau01] W.Paul, M.Chen, M.Lackner, J.Rhyner, D.Braun, W.Lanz, Fault current limiter based on high temperature superconductors : different concepts, test results, simulations, applications, *Physica C* **354** 27-33 (2001)
- [Por02] L.Porcar, D.Buzon, E.Floch, P.Tixador, D.Isfort, D.Bourgault, X.Chaud, R.Tournier, Current limitation with bulk YBaCuO meanders, *Physica. C* **372-376** 1639-1642, (2002)
- [Raj82] B.P.Raju, Fault current limiting reactor with superconducting dc bias winding, *CIGRE Paper* 23-03, (1982)

- [Roz07] V.Rozenshtein, A.Friedman, Y.Wolfus, F.Kopansky, E.Perel, Y.Yeshurun, Z.Bar-Haim, Z.Ron, E.Harel, N.Pundak, Saturated cores FCL - a new approach, *ASC2006* (Seattle), *IEEE Trans. Appl. Supercond.* at press, (2007)
- [Sal95] L.Salasoo, A.F.Imece, R.W.Delmerico, R.D.Wyatt, Comparison of superconducting fault limiter concepts in electric utility applications, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **5** 1079–82, (1995)
- [Shi02] K.Shimohata, S.Yokoyama, T.Inaguchi, S.Nakamura, Y.Ozawa, Design of a large current-type fault current limiter with YBCO films, *Physica C* **372–376** 1643–8, (2002)
- [Ski97] J.Skinthoj, Repetitive current limiter based on polymer PTC resistor, *IEEE. Trans. Pow. Del.* 951, (1997)
- [Sok93] V.Sokolovsky, V.Meerovich, G.Grader, G.Shter, Experimental investigation of current limiting device model based on high T_c superconductors, *Physica C* **209** 277–80, (1993)
- [Sup05] Superconductor Week, *Chinese Academy of Sciences demonstrate HTS fault current limiter Superconductor Week* **19** 24, (2005)
- [Tix06] P.Tixador, C.Villard, Y.Cointe, DC superconducting fault current limiter, *Supercond. Sci. Technol.* **19** S118–S125, (2006)
- [Ued03] K.Ueda, K.Yasuda, K.Inoue, A.Kikuchi, K.Iwadate, R&D of HTS power cable and fault current limiter in Super-ACE project, *Physica C* **392–396** 1171–9, (2003)
- [Uso03] A.Usoskin, H.C.Freyhardt, A.Issaev, J.Knoke, J.Dzick, M.Collet, P.Kirchesch, J.Lehtonen, SUPERPOLI fault-current limiters based on YBCO coated stainless steel tapes, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **13** 1972–5, (2003)
- [Ver99] T.Verhaege, P.F.Herrmann, J.Bock, L.Cowey, G.Mouleart, H.C.Freyhardt, A.Usoskin, J.Paasi, M.Collet, European project on a self-limiting superconducting power link, *Inst. Phys. Conf. Ser.* **167** 943–8, (1999)
- [Wan06] Z.K.Wang, J.Y.Zhang, D.Zhang, H.D.Li, Y.Guan, Q.Bao, L.Z.Lin, L.Y.Xiao, Design and test of high-T_c superconducting coils for a three-phase 10.5 kV/1.5 kA fault current limiter, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **16** 658–61, (2006)
- [Way03] J.A.Waynert, H.J.Boenig, C.H.Mielke, J.O.Willis, B.L.Burley, Restoration and testing of an HTS fault current controller, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **13** 1984–7, (2003)
- [Xie07] Y.Xie, K.Tekletsadik, D.Hazelton, V.Selvamanickam, 2nd generation high-temperature superconducting wires for fault current limiter applications, *ASC Seattle*, (2007)
- [Xin07] Y.Xin, Development of HTS fault current limiters, *ASC2006* (Seattle); *IEEE Trans. Appl. Supercond.* at press, (2007)
- [Yas05] K.Yasuda, Research & development of superconducting fault current limiter in Japan, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15** 1978–81, (2005)

[Yaz01] T.Yazawa, E.Yoneda, J.Matsuzaki, M.Shimada, T.Kuriyama, S.Nomura, T.Ohkuma, Y.Sato, Y.Takahashi, Design and test results of 6.6 kV high-Tc superconducting fault current limiter, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **11** 2511–4, (2001)

[Yaz04] T.Yazawa, Y.Ootani, M.Sakai, T.Kuriyama, S.Nomura, T.Ohkuma, N.Hobara, Y.Takahashi, K.Inoue, Development of 66 kV/750 A high-Tc superconducting fault current limiter magnet, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **14** 786–90, (2004)

[Yua05] X.Yuan, K.Tekletsadik, L.Kovalsky, J.Bock, F.Breuer, S.Elschner, Proof-of-concept prototype test results of a superconducting fault current limiter for transmission-level applications, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15** 1982-5, (2005)

Chapitre IV

Théorie du limiteur supraconducteur

L'étude théorique du limiteur supraconducteur a pour but d'appréhender les phénomènes physiques et les mécanismes régissant la limitation de courant. Dans un premier temps il est nécessaire de fixer les hypothèses, pour écrire dans un deuxième temps les équations qui décrivent le fonctionnement électrique et thermique des SCFCL. Il est ensuite important de comparer le modèle à une étude menée avec un logiciel de simulation par éléments finis. Enfin, des études comparatives sur plusieurs paramètres d'une limitation de courant permettront de conclure l'étude théorique des limiteurs.

IV. A) Hypothèses du modèle théorique

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 SCFCL étudié est de type résistif à base de conducteurs déposés d'YBaCuO, ces derniers ayant un avenir prometteur en particulier dans le domaine des câbles supraconducteurs.

IV. A. 1) Hypothèses du réseau électrique

Le réseau est modélisé par un SCFCL, une charge et une source de tension continue parfaite U_{res} délivrant un courant I_{res} (Figure IV.1). Afin de considérer le cas le plus défavorable pour le limiteur de courant, les résistances et inductances de ligne n'ont pas été prises en compte. Le court-circuit est considéré comme parfait et se situe entre le SCFCL et la charge, aux bornes de celle-ci.

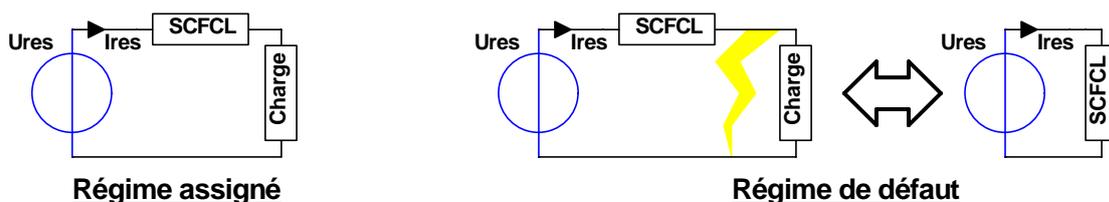


Figure IV.1 : Schéma du réseau électrique théorique

Le court-circuit peut donc être considéré comme étant une application de la tension U_{res} aux bornes du SCFCL. La source imposant uniquement la tension, seul le SCFCL limite l'amplitude du courant.

IV. A. 2) Hypothèses du limiteur

Afin de simplifier l'approche théorique, le limiteur est considéré comme étant purement résistif et de résistance variable R_{rub} (Figure IV.2). Le bobinage de grandes longueurs de ruban supraconducteur entraîne néanmoins de faibles inductances propres négligées ici. L'injection du courant dans le conducteur déposé nécessite la réalisation d'amenées de courant. Celles-ci étant faiblement résistives, nous n'en tiendrons pas compte dans le cadre de cette étude.

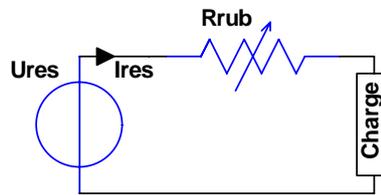


Figure IV.2 : Schéma équivalent macroscopique du SCFCL

Le refroidissement est assuré par un bain d'azote liquide à température variable comprise entre 77 K et 86 K. Nous ne traiterons pas la partie théorique de la cryogénie qui ne présente pas d'intérêt suffisant pour cette étude. Le cryostat et son instrumentation seront présentés dans le chapitre suivant.

IV. A. 3) Hypothèses du coated conductor

Le HTS constituant le limiteur étudié est de type conducteur déposé d'YBaCuO, il se compose de trois couches principales (shunt, supraconducteur, substrat) et de plusieurs couches tampons. Ces dernières sont de mauvais conducteurs électriques et thermiques et n'ont pas de rôle majeur dans le fonctionnement du SCFCL. L'architecture simplifiée retenue pour un ruban de longueur L_{rub} est décrite dans la Figure IV.3.

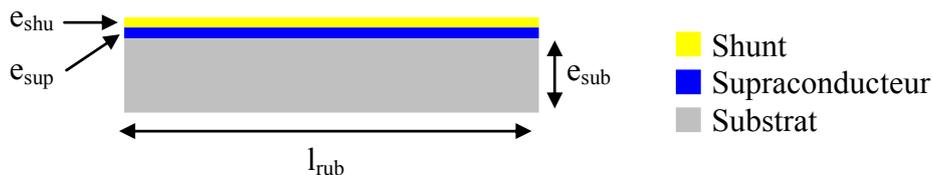


Figure IV.3 : Vue en coupe transversale d'un conducteur déposé

Les procédés de fabrication des conducteurs déposés conduisent généralement à un court-circuit entre les différentes couches du ruban. En effet, le dépôt du 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.4.

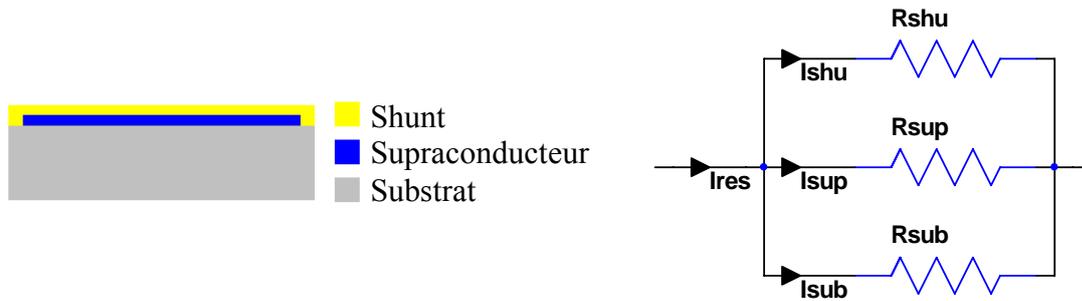


Figure IV.4 : Schéma électrique équivalent du limiteur

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.

IV. A. 3. a) Hypothèses du shunt

Le shunt est un dépôt homogène d'or sur toute la longueur du ruban, sa résistance de contact avec le supraconducteur est considérée comme nulle. Sa résistivité électrique et sa chaleur spécifique en fonction de la gamme de température de fonctionnement du SCFCL sont décrites dans la Figure IV.5.

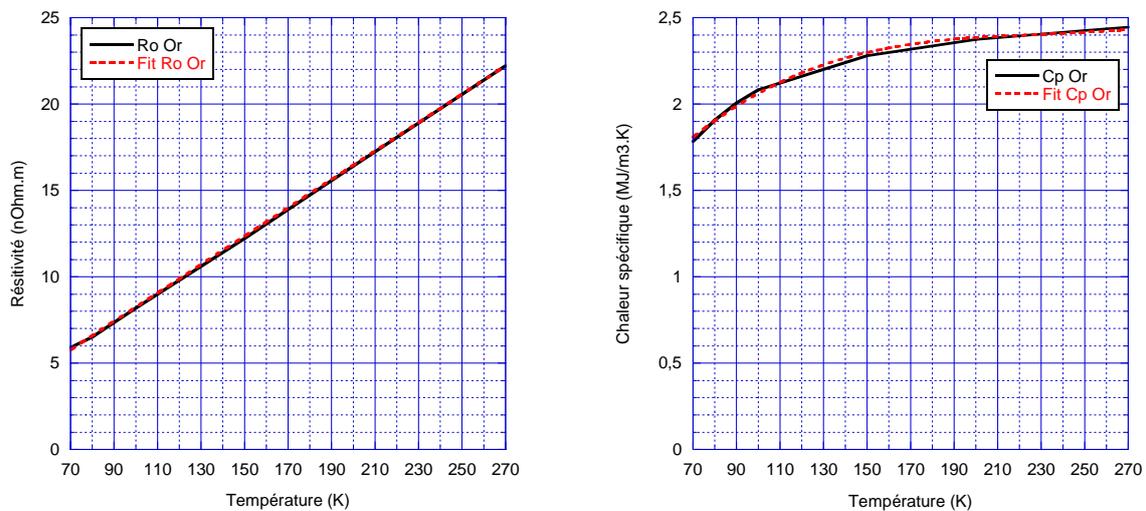


Figure IV.5 : Résistivité et chaleur spécifique de l'or en fonction de la température

Le modèle théorique tient compte de l'évolution thermique du ruban, pour la gamme de température allant de 70 K à 270 K. Les ajustements des caractéristiques de l'or nécessaire à l'élaboration du modèle sont les suivants (IV.1).

$$\begin{aligned} \rho_{shu} &= 2,002 \times 10^{-11} + 8,221 \times 10^{-11} T_{rub} \\ Cp_{shu} &= 7,605 \times 10^5 + 2,039 \times 10^4 \times T_{rub} - 8,629 \times 10^1 \times T_{rub}^2 + 1,248 \times 10^{-1} \times T_{rub}^3 \end{aligned} \quad (IV.1)$$

Avec : T_{rub} la température du ruban en K
 ρ_{shu} la résistivité du shunt en $\Omega.m$
 Cp_{shu} la chaleur spécifique du shunt en $J/m^3.K$

IV. A. 3. b) Hypothèses du supraconducteur

L'YBaCuO est l'élément central du limiteur supraconducteur, ses propriétés dépendent essentiellement de sa température et de la densité du courant qui le traverse. Afin de simplifier la physique du supraconducteur, nous ne considérons dans le cadre de cette étude que les trois principaux états du HTS : état supraconducteur, régime dissipatif et état normal (Figure IV.6).

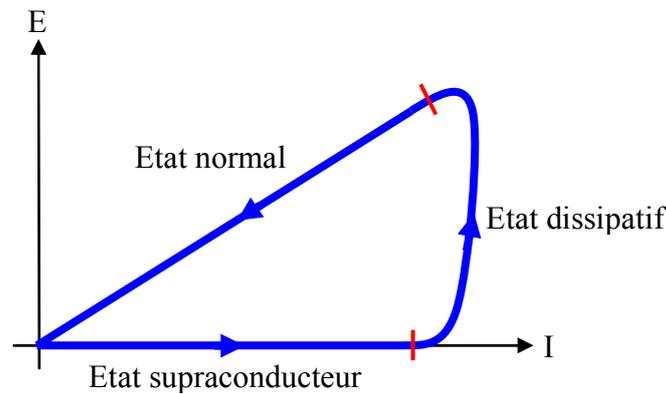


Figure IV.6 : Champ électrique aux bornes d'un YBaCuO massif pendant un court-circuit

- YBaCuO dans son état supraconducteur ($T_{rub} < T_{critique}$)

Dans l'état supraconducteur, la température de fonctionnement du SCFCL est inférieure à la température critique du HTS. La densité de courant doit être inférieure à la densité de courant critique qui dépend de la température de fonctionnement.

La Figure IV.7 est une courbe expérimentale déduite de mesures effectuées sur plusieurs échantillons. Le comportement est linéaire avec une température critique de 89 K.

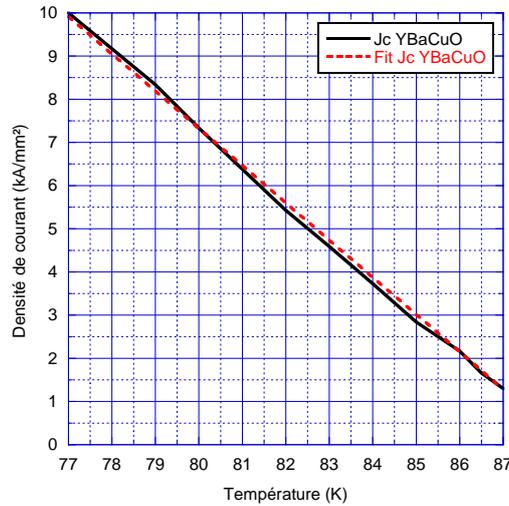


Figure IV.7 : Densité de courant critique de l'YBaCuO en fonction de la température

Il est donc possible de faire varier la densité de courant critique du supraconducteur en agissant sur sa température [Han04], l'ajustement de cette caractéristique pour la gamme de température allant de 77 K à 87 K est donné par l'équation (IV.2). Dans le cadre de notre étude, cette propriété peut être utilisée pour régler le calibre du limiteur.

$$J_c = 7,631 \times 10^{10} - 8,623 \times 10^8 \times T_{rub} \quad \text{avec} \quad T_{rub} < T_c \quad (IV.2)$$

Avec : T_{rub} la température du ruban en K

J_c la densité de courant critique du supraconducteur en A/m²

En régime assigné et sous courant continu constant, le conducteur déposé est considéré comme parfait et n'engendre pas de perte. Le dimensionnement du courant I_{res} (IV.3) fait intervenir la densité de courant critique et la section du supraconducteur.

$$I_{res} = K_{res} \times I_c \quad \text{avec} \quad I_c = J_c \times S_{sup} \quad (IV.3)$$

Avec : I_{res} le courant assigné du réseau en A

I_c le courant critique du HTS en A

J_c la densité de courant critique du supraconducteur en A/m²

S_{sup} la section du HTS en m²

K_{res} est le coefficient définissant la marge de fonctionnement du supraconducteur par rapport à son courant critique, ceci afin d'éviter les transitions non désirées. Cette marge de sécurité autorise une surintensité sur le réseau, comme lors d'un

démarrage moteur ou d'un enclenchement de transformateur pouvant entraîner un transitoire de 10 à 15 fois le courant assigné pendant quelques dixièmes de secondes.

La tension continue provient souvent d'un réseau triphasé redressé, le SCFCL est donc soumis à une induction magnétique variable créée par l'ondulation du courant à 300 Hz, entraînant des pertes dans le supraconducteur. Ce sont des pertes AC qui peuvent être calculées en considérant uniquement l'amplitude de l'ondulation du courant, avec les équations de W.T.Norris (IV.4) [Nor70].

$$P = f \frac{I_c^2 \mu_0}{\pi} [(1-i)\ln(1-i) + (1+i)\ln(1+i) - i^2] \quad \text{avec} \quad i = \frac{\Delta I}{I_c} \quad (IV.4)$$

- Avec :
- P la puissance linéique dissipée en W/m
 - f la fréquence de l'ondulation du courant en Hz
 - I_c le courant critique du HTS en A
 - ΔI l'amplitude de l'ondulation du courant dans le supraconducteur en A

Dans le cadre de cette étude, considérons un échantillon long de 2 m ayant un courant critique de 83 A, placé en aval d'un pont redresseur triphasé à diodes. Le conducteur déposé est alors traversé par un courant continu dont l'ondulation peut atteindre 50% du courant maximal selon le type de la charge. L'évolution des pertes AC dans cet échantillon en fonction de l'ondulation de courant est donnée par la Figure IV.8.

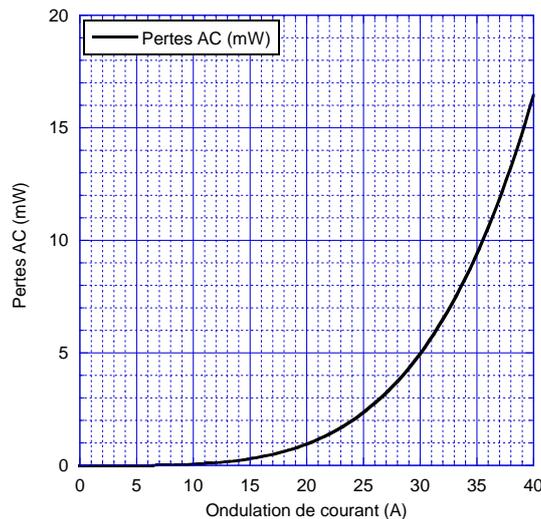


Figure IV.8 : Pertes AC en fonction de l'ondulation de courant

L'évolution des pertes AC est fortement dépendante de l'ondulation du courant, il est donc important d'utiliser le SCFCL dans les réseaux DC dont le courant est suffisamment

lissé. Notons cependant que les pertes AC restent inférieures de trois ordres de grandeurs par rapport aux pertes résistives d'un conducteur classique, montrant une fois de plus l'intérêt des supraconducteurs.

- YBaCuO en régime dissipatif ($T_{rub} \sim T_{critique}$)

En régime de défaut, le court-circuit provoque une rapide et forte croissance du courant I_{res} . Les valeurs de ce courant proche de I_c entraînent le passage du supraconducteur dans son état dissipatif dont l'évolution suit la loi en puissance $E(J)$ (IV.5).

$$E_{sup} = E_c \times \left[\frac{J_{sup}}{J_c(T_{rub})} \right]^n \quad (IV.5)$$

Avec : E_{sup} le champ électrique aux bornes du HTS en V/m

E_c le critère de supraconductivité en V/m

J_{sup} la densité de courant traversant le supraconducteur en A/m²

J_c la densité de courant critique du HTS en A/m²

T_{rub} la température du ruban en K

n est le coefficient dépendant du type de supraconducteur, de la température et de l'induction magnétique, dans notre cas il est égal à 15

La Figure IV.9 est une mesure du champ électrique en fonction de la densité de courant effectuée sur un échantillon semblable à celui de l'étude théorique.

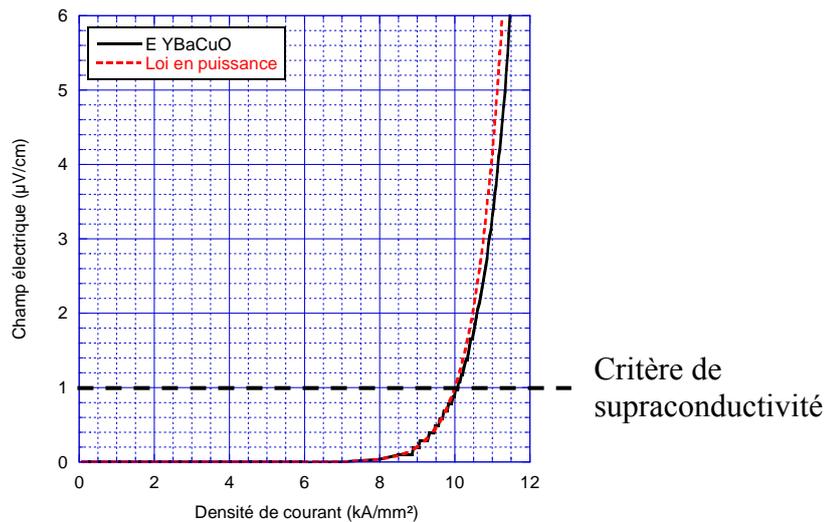


Figure IV.9 : Courbe $E(J)$ d'un conducteur déposé autour de J_c

Sur la Figure IV.9 la courbe mesurée suit le comportement de la loi en puissance (IV.5). Dans le cadre d'une mesure de courant critique effectué en laboratoire, le courant maximal appliqué au supraconducteur n'est que faiblement supérieur à son courant critique pour $1 \mu\text{V}/\text{cm}$. Dans ce cas les pertes Joule sont suffisamment faibles pour pouvoir être évacuées et l'élévation de température reste négligeable. Dans le cas d'un défaut sur un réseau électrique, l'énorme courant qui traverse le supraconducteur engendre d'importantes pertes Joule difficiles à évacuer efficacement. L'échauffement très rapide du ruban est comparable à un emballement thermique conduisant le matériau supraconducteur vers son état normal [Zei04].

- YBaCuO dans son état normal ($T_{\text{rub}} > T_{\text{critique}}$)

Dans cet état, le HTS est considéré comme un matériau conducteur normal ayant une résistivité (IV.6) et une chaleur spécifique dépendant de la température.

$$E_{\text{sup}} = \rho_{\text{sup}}(T_{\text{rub}}) \times J_{\text{sup}} \quad (IV.6)$$

- Avec :
- E_{sup} le champ électrique aux bornes du HTS en V/m
 - ρ_{sup} la résistivité du supraconducteur à l'état normal en $\Omega \cdot \text{m}$
 - T_{rub} la température du ruban en K
 - J_{sup} la densité de courant dans le supraconducteur en A/m^2

La résistivité et la chaleur spécifique de l'YBaCuO dans son état normal, en fonction de la température, sont décrites par la Figure IV.10.

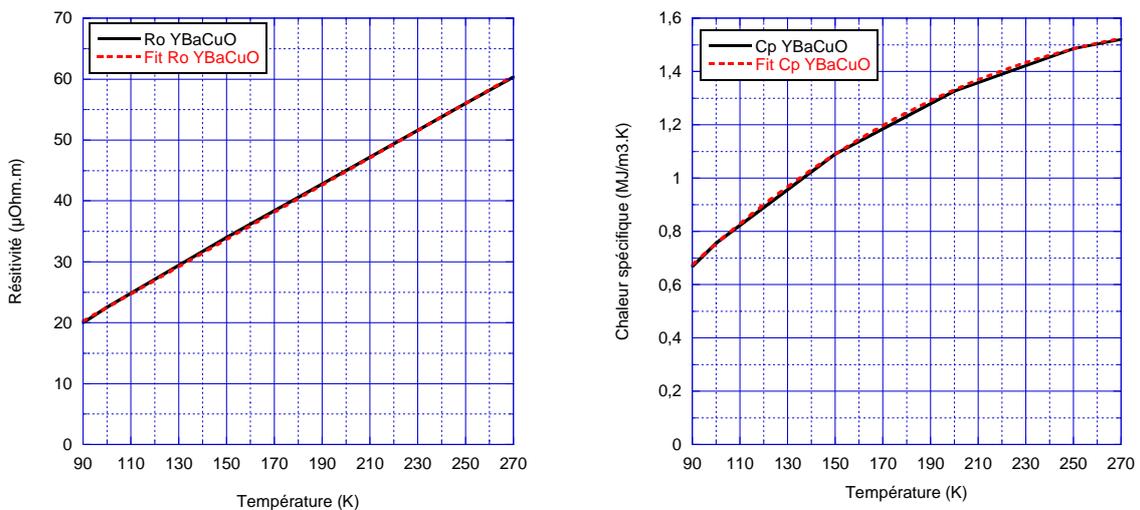


Figure IV.10 : Résistivité et chaleur spécifique de l'YBaCuO en fonction de la température

Le modèle théorique tient compte de l'évolution thermique du HTS dans son état normal, pour la gamme de température allant de 90 K à 270 K, les ajustements des caractéristiques de l'YBaCuO nécessaire à l'élaboration du modèle sont les suivants (IV.7).

$$\begin{aligned} \rho_{\text{sup}} &= 1,531 \times 10^{-7} + 2,235 \times 10^{-7} T_{\text{rub}} \quad \text{avec} \quad T_{\text{rub}} > T_c \\ Cp_{\text{sup}} &= -2,381 \times 10^5 + 1,221 \times 10^4 \times T_{\text{rub}} - 2,402 \times 10^1 \times T_{\text{rub}}^2 + 1,101 \times 10^{-2} \times T_{\text{rub}}^3 \end{aligned} \quad (IV.7)$$

Avec : T_{rub} la température du ruban en K
 ρ_{sup} la résistivité du supraconducteur en $\Omega.m$
 Cp_{sup} la chaleur spécifique du supraconducteur en $J/m^3.K$

IV. A. 3. c) Hypothèses du substrat

Le substrat est l'élément du ruban qui assure la solidité mécanique, il doit cependant être suffisamment flexible pour pouvoir être bobiné. Dans le cas de la technique IBAD le substrat est en acier inoxydable C276, un alliage de Cuivre et de Nickel intéressant pour sa grande résistance à la corrosion. La résistivité et la chaleur spécifique de l'inox sont décrites dans la Figure IV.11.

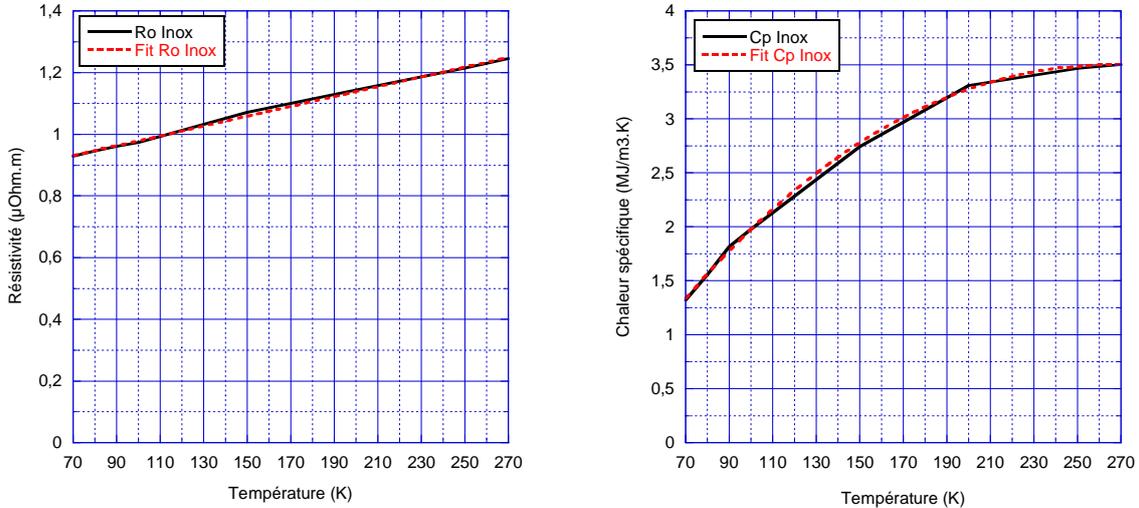


Figure IV.11 : Résistivité et chaleur spécifique de l'Inox en fonction de la température

Le modèle théorique tient compte de l'évolution thermique du substrat pour la gamme de température allant de 70 K à 270 K. Les ajustements des caractéristiques de l'inox nécessaires à l'élaboration du modèle sont les suivants (IV.8).

$$\begin{aligned} \rho_{\text{sub}} &= 8,195 \times 10^{-7} + 1,593 \times 10^{-9} T_{\text{rub}} \\ Cp_{\text{sub}} &= -6,538 \times 10^5 + 3,362 \times 10^4 \times T_{\text{rub}} - 7,663 \times 10^1 \times T_{\text{rub}}^2 + 3,368 \times 10^{-2} \times T_{\text{rub}}^3 \end{aligned} \quad (IV.8)$$

Avec : T_{rub} la température du ruban en K
 ρ_{sub} la résistivité du substrat en $\Omega.m$
 Cp_{sub} la chaleur spécifique du substrat en $J/m^3.K$

IV. A. 4) Hypothèses thermiques

Le SCFCL résistif, de part son principe de fonctionnement, subit de fortes montées en température. Cette étude ne tient pas compte de la diffusion thermique, ainsi la répartition de la température est considérée comme homogène dans le ruban. L'échauffement tenant compte des échanges thermiques avec l'azote liquide se calcule ainsi (IV.9).

$$P_{rub} - P_{ech} = Cp_{rub} \times V_{rub} \times \frac{dT_{rub}}{dt} \quad \text{avec} \quad P_{ech} = h_{azote} \times (T_{rub} - T_{azote}) \times S_{ech} \quad (IV.9)$$

Avec : P_{rub} la puissance dissipée par le ruban en W
 P_{ech} la puissance échangée avec l'azote en W
 Cp_{rub} est la chaleur spécifique du ruban en $J/m^3.K$
 V_{rub} est le volume du ruban en m^3
 T_{rub} la température du ruban en K
 T_{azote} la température du bain d'azote liquide en K
 S_{ech} la surface d'échange en m^2
 h_{azote} est le coefficient de transfert thermique de l'azote liquide en

$W/m^2.K$, son comportement en fonction de la température est le suivant Figure IV.12 [Iwa05].

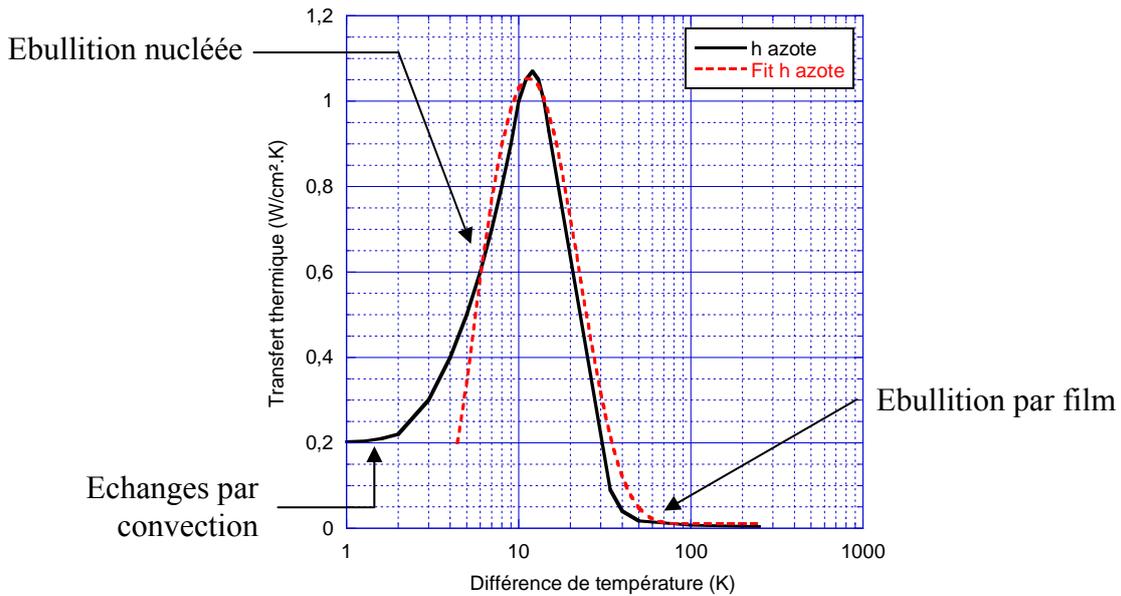


Figure IV.12 : Coefficient de transfert thermique de l'azote liquide

La Figure IV.12 fait apparaître trois types d'échanges thermiques. D'une part, la convection qui intervient pour de faibles différences de température ($\Delta T < 2$ K) avec l'azote, dans cette zone le coefficient d'échange thermique est considéré constant. D'autre part, pour des ΔT compris entre 2 K et 12 K, les transferts thermiques augmentent fortement par la création de bulles d'azote gazeux générant des mouvements à l'intérieur du bain d'azote. Enfin, au delà d'un ΔT de 12 K les échanges thermiques chutent par la création d'un film d'azote gazeux agissant comme un isolant thermique. Les échanges avec l'azote liquide restent cependant difficiles à définir précisément, car ils dépendent également de la température du bain, de la pression et de l'orientation de la surface d'échange.

La modélisation des échanges thermiques avec l'azote liquide est assez complexe à réaliser par une simple équation. Cependant, un SCFCL est un dispositif qui s'échauffe fortement et la différence de température entre l'échantillon et l'azote liquide atteint rapidement une dizaine de Kelvin. Dans le cadre de notre étude il est donc possible de considérer le coefficient de transfert thermique constant jusqu'au ΔT de 4 K puis d'utiliser un ajustement composé de deux exponentielles décroissantes permettant de représenter les échanges thermiques avec l'azote liquide pour des ΔT compris entre 4 K et 250 K (IV.10).

$$h_{azote} = [2,127 \times 10^5 \times (e^{-\frac{\Delta T}{8}} - e^{-\frac{\Delta T}{7}})] + 100 \quad (IV.10)$$

Avec : h_{azote} le coefficient de transfert thermique de l'azote liquide en $W/m^2.K$
 ΔT la différence de température entre le ruban et l'azote liquide en K.

IV. B) Modèle théorique

L'étude suivante fait intervenir les connaissances théoriques de chaque matériau composant le conducteur déposé, les hypothèses sont citées dans le paragraphe IV. A). Ce modèle théorique permet de calculer les grandeurs électriques et thermiques d'une phase de limitation de courant afin de pouvoir dimensionner les échantillons et paramétrer le banc d'essais [Gro97] [Ste06] [Wel99].

IV. B. 1) Equations de l'état supraconducteur

C'est l'état dans lequel le matériau supraconducteur se trouve lorsque le SCFCL fonctionne en régime assigné. Dans ce cas, la température du ruban T_{rub} ne doit pas excéder la température critique T_c du supraconducteur et la densité de courant dans le HTS doit être inférieure à sa densité de courant critique $J_c(T_{rub})$.

Dans ce cas, seul le HTS est parcouru par le courant car son absence de résistance court-circuite le shunt et le substrat (Figure IV.13).

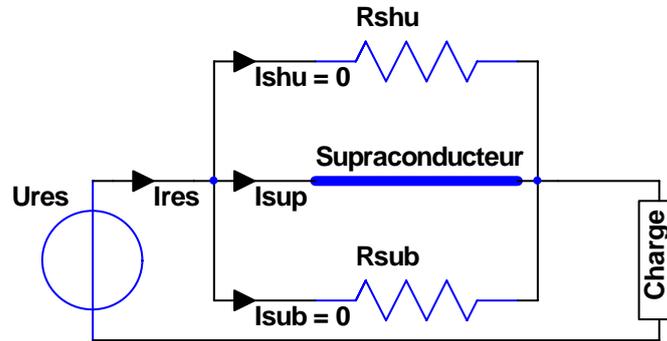


Figure IV.13 : Schéma électrique équivalent du limiteur dans son état supraconducteur

Dans sa phase supraconductrice, le limiteur est dimensionné pour supporter le courant assigné du réseau mais également les surintensités transitoires définies par le coefficient K_{res} (IV.3).

IV. B. 2) Equations de la phase de transition

Lorsqu'il y a apparition d'un défaut sur le réseau, le courant croit rapidement et dépasse la valeur du courant critique du HTS qui se met à transiter. Un champ électrique apparaît à ses bornes et des courants commencent à circuler dans le shunt et le substrat. Le schéma équivalent du ruban est donc la mise en parallèle des trois couches du conducteur déposé (Figure IV.14).

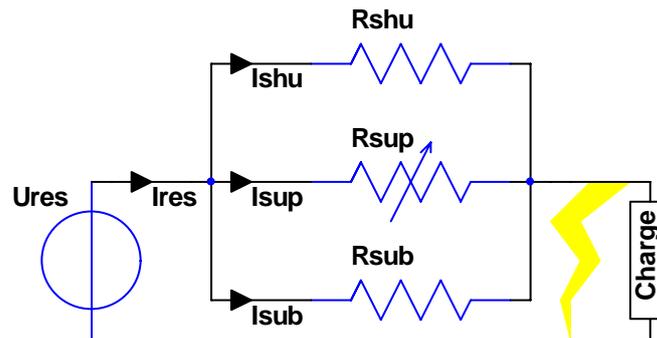


Figure IV.14 : Schéma électrique équivalent du limiteur dans la phase de transition

Le supraconducteur se trouve alors dans le coude de transition, son comportement est caractérisé par la loi en puissance $E(J)$ (IV.11).

$$R_{sup} = \frac{U_{res}}{I_{sup}} \quad \text{avec} \quad U_{res} = E_{sup} \times L_{rub} \quad \text{et} \quad E_{sup} = E_c \times \left[\frac{I_{sup}}{I_c(T_{rub})} \right]^n \quad (IV.11)$$

Le shunt et le substrat ont un comportement résistif, leurs résistances se calculent à partir de leurs résistivités et de leurs sections (IV.12).

$$R_{shu} = \rho_{shu}(T_{rub}) \times \frac{L_{rub}}{l_{rub} \times e_{shu}} \quad R_{sub} = \rho_{sub}(T_{rub}) \times \frac{L_{rub}}{l_{rub} \times e_{sub}} \quad (IV.12)$$

Ainsi la résistance équivalente du ruban dans la phase de transition s'exprime par la mise en parallèle des trois éléments qui le compose (IV.13).

$$\frac{1}{R_{rub}} = \frac{1}{R_{shu}} + \frac{1}{R_{sup}} + \frac{1}{R_{sub}} \quad (IV.13)$$

Cet état dissipatif étant cumulé à l'important courant généré par le court-circuit, la température du ruban augmente rapidement et dépasse T_c . Ceci entraîne un emballement thermique au sein du ruban et un passage complet du HTS dans son état normal.

IV. B. 3) Etat de limitation de courant

Un SCFCL résistif en état de limitation peut être considéré comme une résistance mise en série dans le réseau (Figure IV.15).

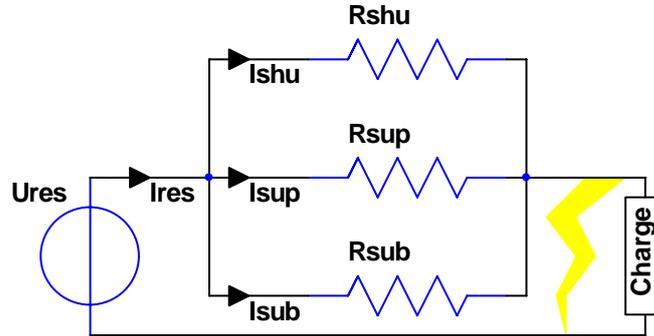


Figure IV.15 : Schéma équivalent du SCFCL en limitation de courant

La résistance équivalente du limiteur se calcule à partir des résistivités et des sections des différents composants du conducteur : R_{shu} , R_{sub} (IV.12) et R_{sup} (IV.14).

$$R_{sup} = \rho_{sup}(T_{rub}) \times \frac{L_{rub}}{l_{rub} \times e_{sup}} \quad (IV.14)$$

Ainsi la résistance équivalente du ruban dans la phase de limitation de courant s'exprime par la mise en parallèle des trois éléments qui le compose.

Dans cette phase d'échauffement le ruban dissipe la puissance du court-circuit (IV.15).

$$R_{rub} = \frac{L_{rub}}{l_{rub}} \times \frac{1}{\left(\frac{e_{shu}}{\rho_{shu}(T_{rub})} + \frac{e_{sup}}{\rho_{sup}(T_{rub})} + \frac{e_{sub}}{\rho_{sub}(T_{rub})} \right)} \quad \text{et} \quad P_{rub} = \frac{U_{res}^2}{R_{rub}} \quad (IV.15)$$

L'élévation de température en régime adiabatique se calcule en considérant l'équation thermique (IV.16).

$$P_{rub} = L_{rub} \times l_{rub} \times \left[\sum_i e_i \times Cp_i(T_{rub}) \right] \times \frac{dT_{rub}}{dt} \quad \text{avec } i : \text{shunt, supraconducteur ou substrat} \quad (IV.16)$$

Cependant, si l'on considère des échanges avec le fluide cryogénique via les deux faces du ruban, la puissance échangée s'exprime selon l'équation (IV.17).

$$P_{ech} = h_{azote} \times 2 \times L_{rub} \times l_{rub} \times (T_{rub} - T_{azote}) \quad (IV.17)$$

L'équation thermique résultant d'un échauffement homogène et d'une dissipation thermique avec échange par conduction est la suivante (IV.18).

$$P_{rub} = L_{rub} \times l_{rub} \times \left[\sum_i e_i \times Cp_i(T_{rub}) \right] \times \frac{dT_{rub}}{dt} + h_{azote} \times 2 \times L_{rub} \times l_{rub} \times (T_{rub} - T_{azote}) \quad (IV.18)$$

Le régime de limitation de courant est maintenu jusqu'à l'ouverture de l'organe de coupure. Ce dernier n'a plus qu'un courant limité à couper mais il doit cependant être assez rapide pour limiter l'échauffement du SCFCL. Les organes de coupures usuels ont un temps de réponse compris entre 50 ms et 80 ms.

IV. B. 4) Etat de récupération

Durant la phase de récupération, le ruban évacue l'énergie emmagasinée pendant la phase de limitation de courant. Le temps nécessaire pour récupérer la température initiale de fonctionnement se calcule ainsi (IV.19).

$$0 = L_{rub} \times l_{rub} \times \left[\sum_i e_i \times Cp_i(T_{rub}) \right] \times \frac{dT_{rub}}{dt} + h_{azote} \times 2 \times L_{rub} \times l_{rub} \times (T_{rub} - T_{azote}) \quad (IV.19)$$

Au-delà de ce temps de récupération, le limiteur retrouve son état supraconducteur et peut reprendre son fonctionnement assigné sur le réseau. Il est important de noter qu'une phase de récupération peut également avoir lieu en présence d'un faible courant traversant le HTS [Vil05].

IV. C) Application du modèle sur un cas concret

IV. C. 1) Présentation du cas étudié

Le cas étudié est un échantillon court de conducteur déposé ($T_c=90$ K) au dos duquel a été déposée une sonde permettant de mesurer la température, ces mesures feront l'objet d'un paragraphe du chapitre suivant.

Le Tableau IV.1 rassemble les paramètres géométriques de l'échantillon.

Longueur	Largeur	Epaisseur du shunt	Epaisseur du supra.	Epaisseur du substrat
3,5 cm	4 mm	500 nm	2,7 μm	90 μm

Tableau IV.1 : Paramètres géométriques de l'échantillon avec sonde de température

L'échantillon est soumis à un champ électrique constant de 75 V/m soit 2,6 V pendant 20 ms. Le bain d'azote liquide est pressurisé à 2,4 Bar. La température initiale de l'échantillon est 86 K pour un courant critique de 23 A.

IV. C. 2) Résultat du calcul avec le modèle théorique

Les équations décrites dans les paragraphes IV. A) et IV. B) sont ensuite entrées dans le logiciel MATHCAD [Mat07] qui est un outil mathématique puissant. La résolution des équations différentielles par la méthode du Runge-Kutta repose sur le principe de l'itération. La résolution numérique permet ainsi de calculer le courant, la puissance et la température du ruban en fonction du temps.

IV. C. 2. a) Courant limité théorique

Le premier résultat important est le courant limité par l'échantillon, ce modèle ne tenant pas compte des résistances et inductances parasites, le courant devrait atteindre une valeur infinie en absence de limiteur.

La Figure IV.16 montre la réponse en courant du SCFCL suite à une alimentation sous tension constante.

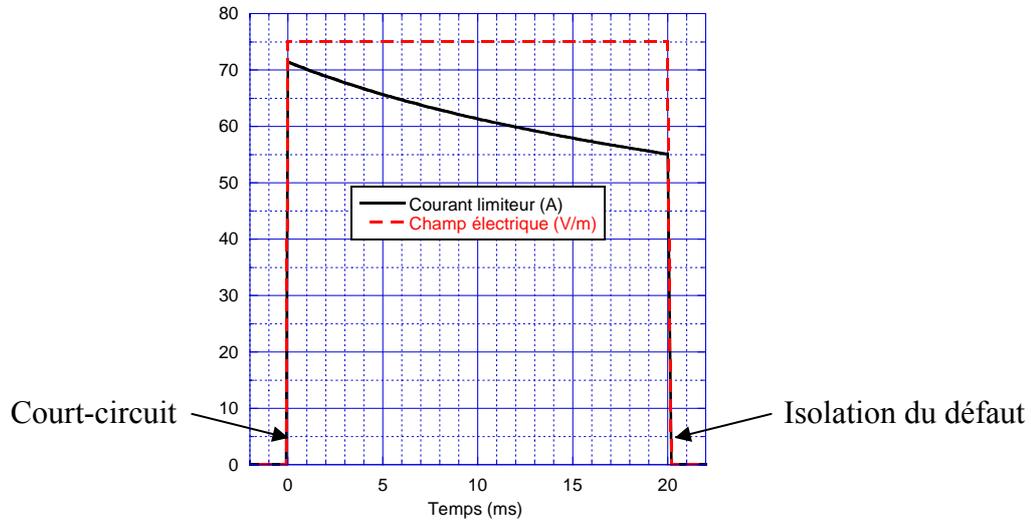


Figure IV.16 : Réponse en courant théorique de l'échantillon avec sonde de température

Il apparaît une décroissance du courant dû à la montée en température du matériau faisant ainsi croître la résistance totale de l'échantillon. Il est également intéressant d'observer la répartition des courants dans l'échantillon afin de mieux comprendre le rôle de chaque matériau (Figure IV.17).

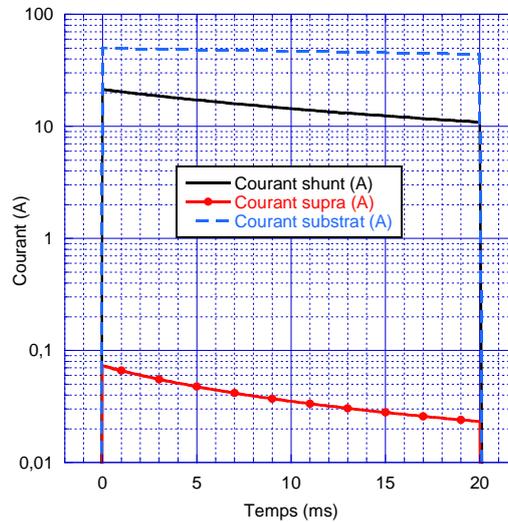


Figure IV.17 : Répartition théorique du courant dans l'échantillon

Il apparaît un écart important entre le courant circulant dans le supraconducteur et ceux circulant dans le shunt et le substrat. Ceci s'explique par une différence de plusieurs ordres de grandeurs des résistivités. Ainsi, le supraconducteur qui est le seul élément conducteur en régime assigné, semble peu prendre part à la phase de limitation de courant. Enfin, il faut noter que le substrat joue un rôle important car il conduit deux fois plus de

courant que le shunt. Il semble donc nécessaire d'augmenter la résistance du substrat afin d'obtenir des courants limités de faibles valeurs. Il est important de noter que le modèle de la partie supraconductrice est faux aux premiers instants de la limitation de courant. En effet, la loi en puissance $E(J)$ étant uniquement valable pour des densités de courant proches de $J_{critique}$, le modèle ne permet pas d'observer le courant du HTS, dans sa phase dissipative, pour des valeurs plus importantes de densité de courant. Le modèle théorique reste néanmoins valable car ce phénomène représente moins de 5 % de la durée d'une phase de limitation et ce sont généralement les inductances de lignes du réseau qui limitent la montée du courant aux premiers instants. Au-delà, l'YBaCuO est considéré dans son état normal, le modèle reste donc suffisamment correct.

IV. C. 2. b) Puissance et énergie dissipées théoriques

Le modèle permet ensuite d'obtenir la puissance et sa répartition (Figure IV.18), ainsi que l'énergie dissipée (Figure IV.19) durant la simulation du court-circuit.

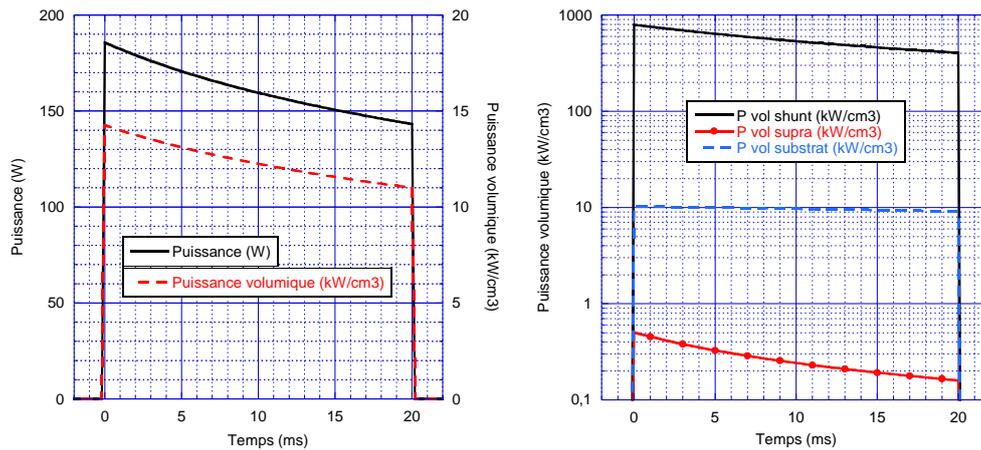


Figure IV.18 : Puissance et répartition de puissance théorique dans l'échantillon

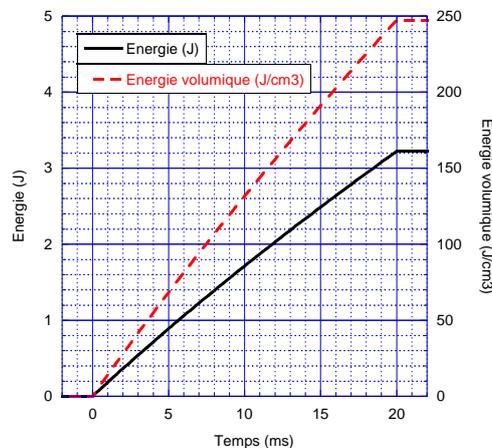


Figure IV.19 : Energie théorique dissipée par l'échantillon

Il apparaît d'importants écarts de répartition de puissance dissipée, ceci est essentiellement dû à une géométrie particulière, avec des épaisseurs très différentes entre le shunt et le substrat. De plus, une importante énergie volumique dissipée permet d'anticiper sur la nécessité d'étudier précisément la répartition de température et le refroidissement de l'échantillon.

IV. C. 2. c) Température théorique de l'échantillon

Enfin, le modèle permet de calculer la température moyenne de l'échantillon en fonction du temps (Figure IV.20).

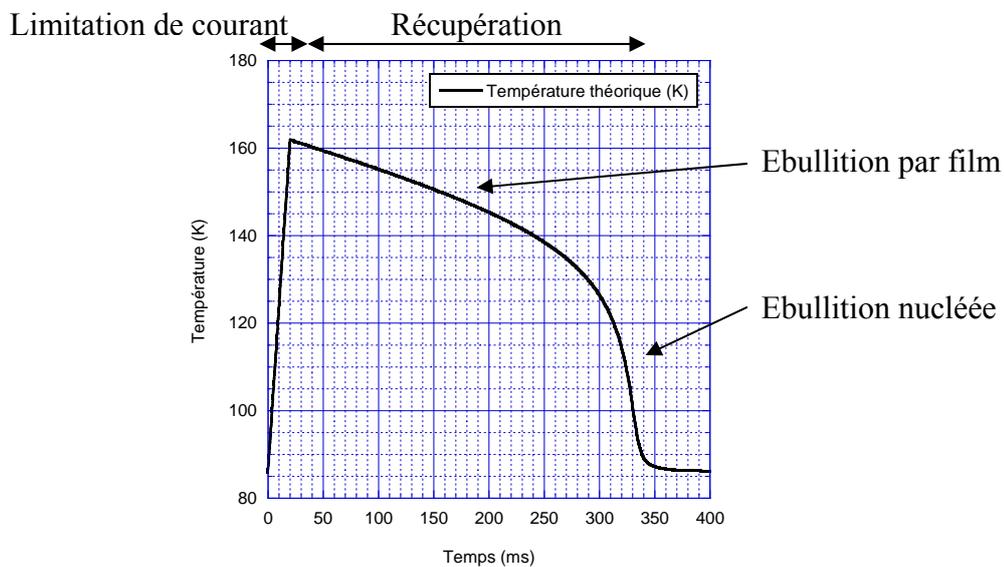


Figure IV.20 : Température moyenne théorique de l'échantillon

Lors de la phase de limitation de courant la température croit rapidement jusqu'à atteindre 163 K, ensuite le limiteur est isolé du défaut et il se refroidit pendant 330 ms jusqu'à atteindre la température du bain d'azote liquide pressurisé (86 K). Il apparaît deux dynamiques dans le refroidissement qui sont dues au coefficient d'échange thermique avec l'azote liquide. En effet, dans un premier temps l'ébullition par film rend peu efficace les échanges avec l'azote liquide, la température diminue lentement. Puis dans un deuxième temps, lorsque la température du SCFCL et celle du bain sont à quelques dizaines de Kelvin d'écart, les échanges ont lieu sous forme d'ébullition nucléée, rendant ainsi plus efficace le refroidissement.

IV. D) Etude de la propagation thermique par simulation

Le modèle théorique décrit dans le paragraphe IV. B) est une approche macroscopique permettant un dimensionnement rapide, il est cependant important de s'intéresser à la répartition et à la propagation de la température au sein de l'échantillon [Els06] [Tix00]. Dans le cadre de cette étude, nous avons réalisé des simulations avec le logiciel de résolution par éléments finis FLUX2D®, de la société CEDRAT [Ced07] [Dur07] [Gri03]. Dans le cadre de cette étude les matériaux sont considérés comme homogènes, la transition est modélisée par une puissance dissipée dans le shunt et le substrat. Les propriétés des matériaux utilisés dans les simulations sont citées dans le paragraphe IV. A).

IV. D. 1) Hypothèses de la simulation

IV. D. 1. a) Géométrie du ruban

Dans cette simulation en thermique transitoire, la géométrie particulière des couches du conducteur déposé est un problème délicat. En effet, l'importante disproportion entre la largeur et l'épaisseur dans un rapport supérieur à 10^3 rend le maillage et la convergence des algorithmes de calcul difficile. Une solution consiste à modifier la géométrie de l'échantillon pour réduire le rapport entre sa largeur et son épaisseur, puis à modifier les paramètres du logiciel proportionnellement à cette modification géométrique [Vel06]. Afin de simplifier la résolution tout en conservant des paramètres proches de la réalité, le conducteur déposé étant un ruban mince de moins de $100\ \mu\text{m}$ d'épaisseur, les échanges avec l'azote liquide sur les faces latérales ne sont pas pris en compte. L'étude se fera selon une coupe transversale du ruban, en ne considérant qu'une portion de la section (Figure IV.21).

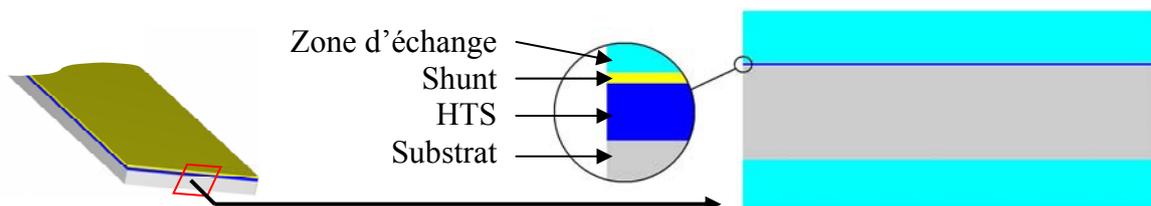


Figure IV.21 : Schéma de la simulation du ruban

IV. D. 1. b) Conditions aux limites

Des conditions aux limites sont imposées sur le périmètre de l'échantillon, elles tiennent compte des simplifications géométriques et des hypothèses (Figure IV.22).

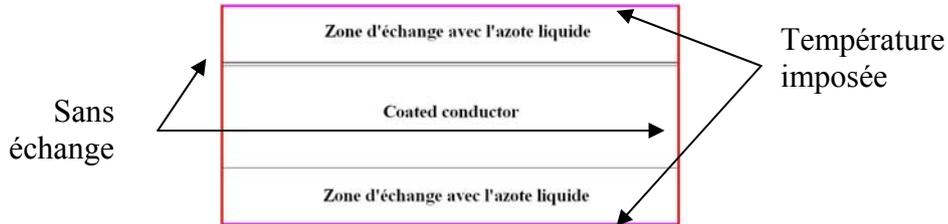


Figure IV.22 : Conditions aux limites de la simulation

Les faces latérales ne conditionnent pas d'échange thermique car le système étudié ne représente qu'une partie de la section du ruban et nous avons considéré qu'il n'y avait pas d'effet de bord.

La zone d'échange thermique est symbolisée par un matériau fictif dont le coefficient de conductivité thermique est déduit du coefficient de transfert thermique de l'azote liquide, en tenant compte de l'épaisseur arbitraire de cette zone. La température aux extrémités de la zone d'échange avec l'azote liquide est fixée par la température du bain d'azote qui est considérée comme constante.

Les puissances dissipées ainsi que leurs répartitions sont déduites du modèle théorique et paramétrées dans le shunt, le HTS et le substrat.

IV. D. 2) Simulation d'un cas concret

Les hypothèses du cas concret sont identiques au paragraphe IV. C. 1), ceci afin de comparer les deux méthodes. La Figure IV.23 montre la répartition de température en fin de limitation de courant (20 ms).

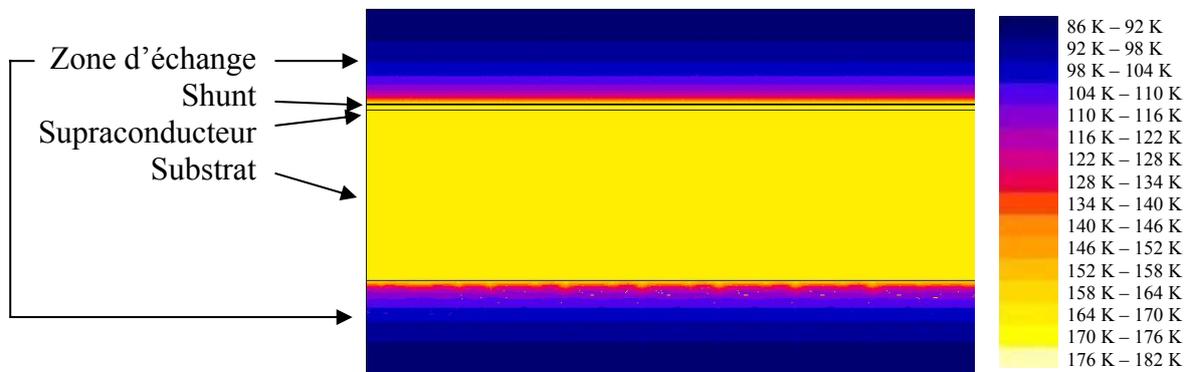


Figure IV.23 : Répartition de la température dans l'échantillon

La Figure IV.24 représente la répartition de la température en fonction de l'épaisseur du ruban pour le pas de temps final (20 ms).

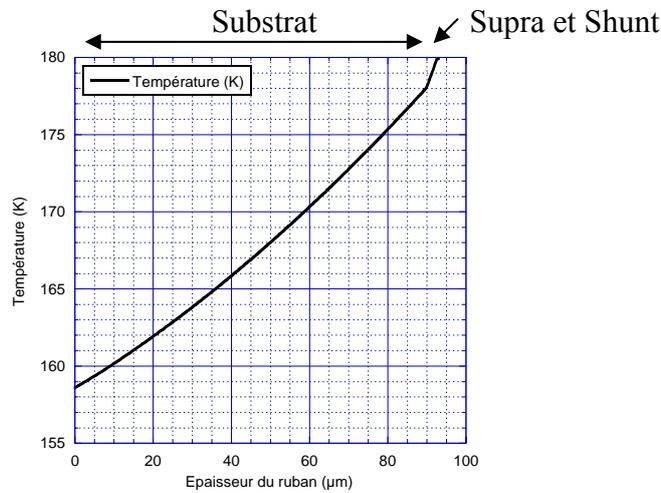


Figure IV.24 : Répartition de la température en fonction de la demi-épaisseur du ruban

Il apparaît une répartition thermique assez homogène, avec une différence de température de 21 K aux bornes du ruban, soit 12 % de la température moyenne. Ceci est en accord avec le modèle théorique qui prend comme hypothèse l'homogénéité de la température dans le ruban. Ainsi, cette bonne homogénéité permet de conclure à de faibles contraintes par dilatation thermique différentielle sur le ruban. La différence de pente se situant à 90 μm est due au changement de matériau (Substrat → Supra et Shunt). Il apparaît ainsi, comme prévu par la courbe de répartition des puissances volumiques (Figure IV.18), que l'échauffement du shunt est plus important que celui du reste du ruban.

La Figure IV.25 montre l'évolution temporelle de la température moyenne simulée dans le volume du ruban et celle simulée du point le plus chaud. Cette figure compare également ces températures à celle théorique calculée dans le paragraphe IV. C. 2. c).

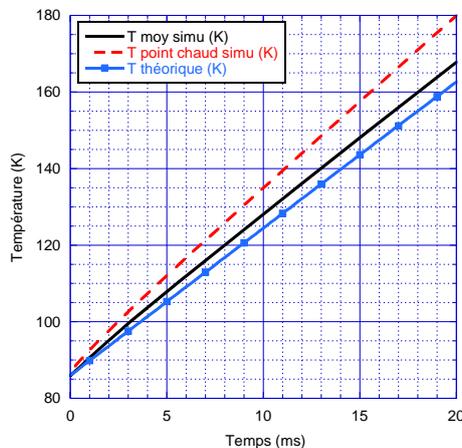


Figure IV.25 : Températures moyennes et du point chaud simulées

La simulation sous FLUX2D® fait apparaître un écart de 7 % entre la température moyenne et la température maximale de l'échantillon. Cette dernière se situant au niveau du shunt, là où la puissance volumique dissipée est la plus élevée.

La température moyenne théorique est seulement 3 % en dessous de la température moyenne simulée, ce qui s'explique aisément par la différence des méthodes de calculs. En effet dans le cas du modèle théorique, la puissance est dissipée par la totalité du volume de l'échantillon, ne tenant ainsi pas compte de la diffusion de température dans le ruban. Le modèle théorique reste cependant suffisamment précis pour notre étude.

IV. D. 3) Etude comparative en phase de limitation

IV. D. 3. a) Comparaison des substrats

Afin d'étudier et de comparer la propagation thermique dans différents matériaux, nous avons utilisé le coefficient de propagation thermique de l'acier inoxydable C276 et celui du saphir. En effet, le saphir est utilisé comme substrat pour son bon accord de maille avec la couche supraconductrice permettant une épitaxie de celle-ci, mais également grâce à son excellente conductivité thermique à basse température. Cependant, ce matériau reste peu utilisé pour des applications de SCFCL à cause de son coût et de sa rigidité. Les conductivités thermiques de l'inox et du saphir sont décrites dans la Figure IV.26.

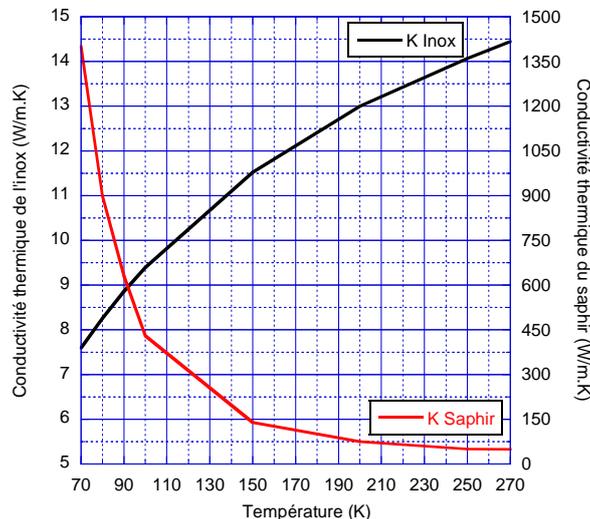


Figure IV.26 : Conductivités thermiques de l'inox et du saphir en fonction de la température

Il apparaît un écart très important de plusieurs ordres de grandeurs entre les conductivités de l'inox et du saphir autour de 77 K. Une simulation avec des géométries et des puissances dissipées semblables a été réalisée avec un substrat en saphir et en inox. Le but

de cette étude étant de comparer la diffusion de température au sein de ces deux matériaux, par simplification les échanges avec l'azote ne sont pas pris en compte.

Dans le cas d'un échantillon en saphir aucun courant ne circule dans le substrat, celui-ci étant un isolant électrique. Ainsi, afin d'appliquer les mêmes règles aux deux types d'échantillons, seule la composante du courant circulant dans le shunt est prise en compte. Les échantillons en saphir sont généralement des disques sur lesquels sont gravées les pistes supraconductrices. Celles-ci n'occupant pas toute la surface du substrat, il faut donc tenir compte de la diffusion transversale. Ainsi dans le cadre de cette simulation, le shunt et le HTS n'occupent que la moitié de la surface du substrat. (Figure IV.27 et Figure IV.28).

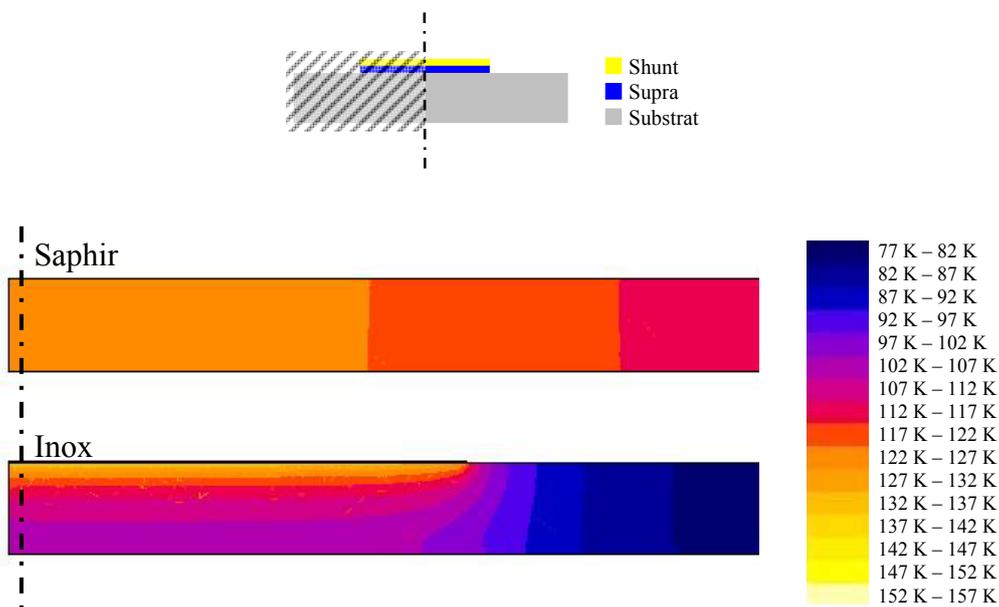


Figure IV.27 : Comparaison de la propagation thermique du saphir et de l'inox

Il apparaît sur la Figure IV.27 une bonne homogénéité dans le cas du substrat en saphir, en opposition à l'importante différence de température entre les deux faces de l'échantillon inox.

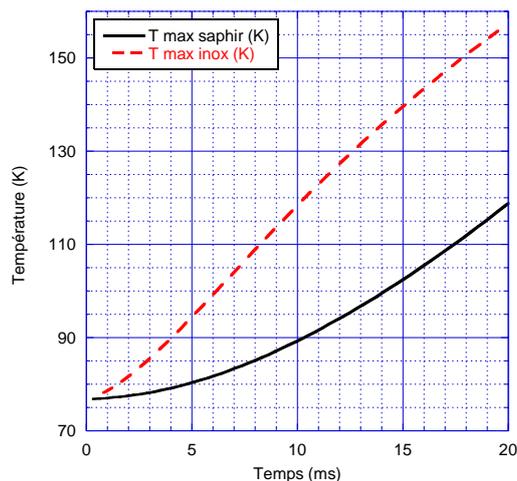


Figure IV.28 : Températures maximales avec des substrats en saphir et inox

Cette différence d'homogénéité induit une température locale maximale de l'échantillon en inox 1.3 fois plus élevée que celle du saphir. Ces résultats sont cohérents avec le rapport des coefficients de conductivités thermiques de ces deux matériaux. Cette différence fait apparaître la difficulté de l'inox à propager la chaleur, favorisant ainsi les phénomènes de points chauds lors des transits [Pru06].

IV. D. 3. b) Simulation avec différents échanges thermiques

- Echauffement du SCFCL

Les phénomènes thermiques ayant un rôle important dans la phase de limitation de courant, il est nécessaire d'étudier les échanges avec l'azote liquide. Deux simulations ont été réalisées, la première en adiabatique et la seconde avec le coefficient d'échange théorique de l'azote liquide, ceci afin de quantifier les échanges thermiques (Figure IV.29).

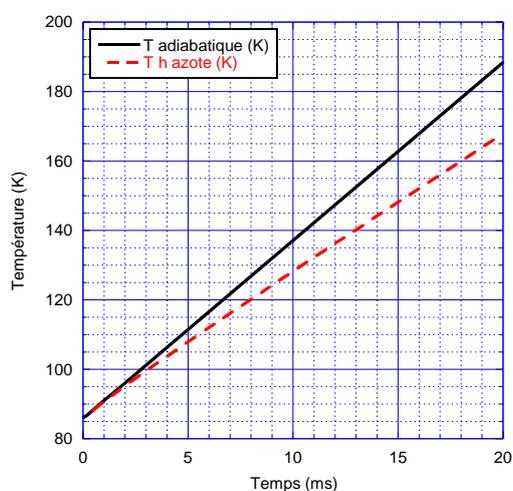


Figure IV.29 : Comparaison des montées en température adiabatique et théorique

Il apparaît une différence de montée en température de 12 % entre la simulation adiabatique et celle avec le coefficient d'échange théorique de l'azote. Ceci permet de conclure que l'azote liquide intervient peu efficacement dans la phase de limitation de courant. En effet, l'importante énergie à dissiper fait très rapidement croître la température de l'échantillon dont l'écart avec l'azote liquide dépasse les 12 K. Or, au-delà de ce gradient de température, les échanges thermiques se font mal, la chaleur est donc difficilement évacuée pendant le court-circuit.

- Refroidissement et récupération du SCFCL

La deuxième partie de cette étude comparative consiste à étudier le refroidissement d'un échantillon porté à 162 K durant sa phase de récupération (Figure IV.30), pour différents coefficients d'échanges thermiques (h_{azote} , $2 \times h_{\text{azote}}$ et $10 \times h_{\text{azote}}$). Cette étude quantitative permet de mieux appréhender les temps de récupérations nécessaires à la reprise du régime assigné.

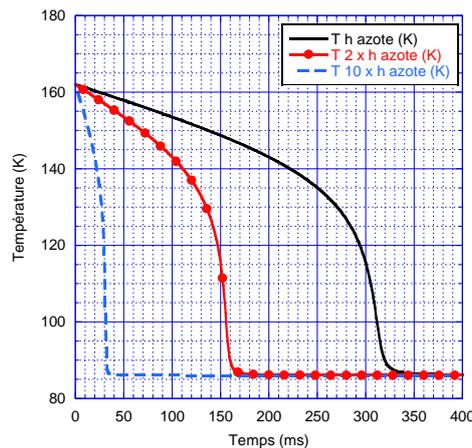


Figure IV.30 : Refroidissement pour différents coefficients d'échange thermiques

Un temps de 330 ms est nécessaire pour récupérer l'état supraconducteur avec les valeurs du coefficient de transfert thermique réel décrit dans la Figure IV.12, tandis que seulement 170 ms sont suffisantes avec un coefficient doublé. En effet, il est possible d'améliorer ce coefficient en modifiant par exemple l'orientation du ruban pour améliorer l'évacuation des bulles d'azote gazeux. Contrairement à la phase d'échauffement, les échanges thermiques avec l'azote liquide ont un rôle important dans la phase de récupération [Buz03]. En effet, avec un coefficient d'échange thermique doublé, il est possible de diviser par deux le temps d'attente avant la reprise du régime assigné.

IV. D. 3. c) Récupération avec différentes températures maximales

Afin de comparer les temps de récupération nécessaires associés aux différentes températures maximales atteintes en fin de court-circuit, une simulation avec plusieurs températures (100 K, 150 K, 200 K et 250K) a été réalisée (Figure IV.31).

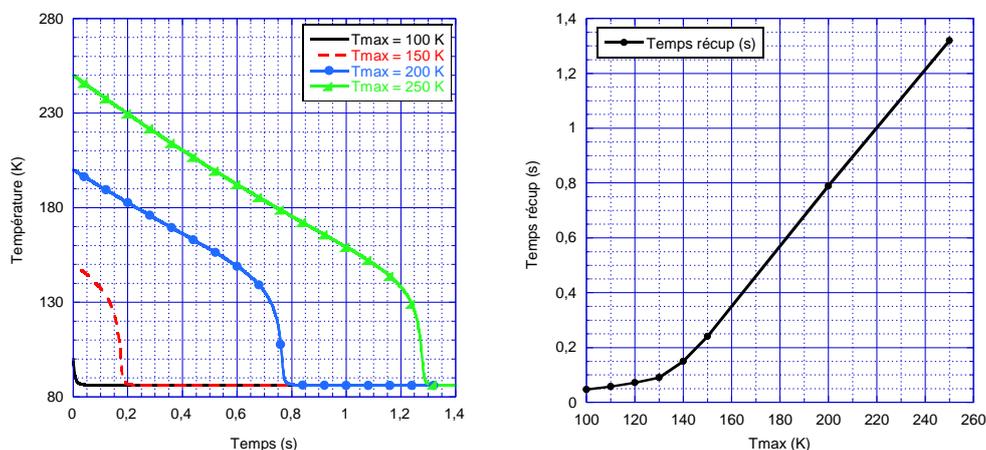


Figure IV.31 : Temps de récupération à partir de plusieurs températures maximales

Ainsi pour une température maximale de 250 K atteinte en fin de court-circuit, le temps de récupération est supérieur à la seconde, mais reste assez court face à l'importante chaleur stockée. La courbe du temps de récupération en fonction de la température maximale possède un comportement linéaire à partir de 140 K. Ceci provient des caractéristiques du coefficient d'échange thermique avec l'azote liquide. En effet, la durée du régime d'ébullition nucléée reste constante car elle opère toujours à partir de la même différence de température entre l'échantillon et l'azote liquide. Par ailleurs, la durée du régime d'ébullition par film augmente linéairement avec la température maximale atteinte en fin de court-circuit. Ainsi, lorsque la durée du régime d'ébullition par film devient prédominante par rapport à la durée du régime d'ébullition nucléée, le comportement du temps de récupération en fonction de la température maximale devient linéaire.

IV. E) Conclusion sur la théorie du limiteur

La limitation du courant par les matériaux supraconducteurs nécessite une bonne connaissance des phénomènes physiques régissant la phase de limitation. Pour pouvoir tester des échantillons HTS, il est nécessaire de posséder un modèle permettant d'obtenir un résultat théorique complet. Dans cette optique, nous avons développé un modèle tenant compte des paramètres géométriques, électriques et physiques des matériaux constituant les conducteurs déposés et nous nous sommes également intéressés aux échanges thermiques avec l'azote

liquide. Ce modèle permet par exemple d'anticiper les réponses en courant et les montées en température d'un échantillon face à un essai donné. Ce modèle macroscopique ne permet cependant pas de calculer les phénomènes de propagation thermique, de point chaud ou toute autre inhomogénéité du matériau. Nous avons donc utilisé les simulations par éléments finis en thermique transitoire pour compléter ces résultats théoriques.

La comparaison entre les résultats théoriques et ceux issus des simulations sont assez proche et permettent de valider le modèle. L'étude thermique comparative entre les substrats de saphir et d'inox soulève le problème de la propagation thermique et de la formation de points chauds. En effet, l'inox des conducteurs déposés ayant un coefficient de conduction thermique beaucoup plus faible que le saphir, la chaleur se propagera plus difficilement, favorisant ainsi la création de points chauds le long du ruban. Les échanges thermiques avec l'azote liquide, durant la phase de limitation de courant, jouent un rôle peu important face à la forte montée en température provoquée par la puissance dissipée. De plus, au-delà d'un écart de température de 12 K entre la surface d'échange et l'azote liquide, il se crée une couche d'azote gazeux agissant comme une barrière isolante. Enfin, il est évidemment important d'accroître les surfaces d'échange avec l'azote liquide, afin de favoriser la dissipation thermique et diminuer le temps de récupération nécessaire à la reprise du régime assigné.

Références du chapitre IV

[Buz03] D.Buzon, L.Porcar, P.Tixador, D.Isfort, X.Chaud, R.Tournier, Effects of thermal exchanges on the YBCO transition and the superconductivity recovery, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **13** 2076-2079 (2003)

[Ced07] www.cedrat.com

[Dur07] J.Duron, F.Grilli, L.Antognazza, M.Decroux, B.Dutoit, O.Fischer, Finite-element modelling of YBCO fault current limiter with temperature dependent parameters, *Superconductor Science and Technology*, **20** 338-344, (2007)

[Els06] S.Elschner, F.Breuer, H.Walter, J.Bock, Magnetic Field Assisted Quench Propagation as a New Concept for Resistive Current Limiting Devices, *Journal of Physics* **43** 917-920, (2006)

[Gri03] F.Grilli, M.Costa Bouzo, Y.Yang, C.Beduz, B.Dutoit, Finite element method analysis of the coupling effect between superconducting filaments of different aspect ratio, *Superconductor Science and Technology*, **16** 1228-1234, (2003).

[Gro97] B.Gromoll, G.Ries, W.Schmidt, H.P.Kramer, P.Kummeth, H.W.Neumuller, S.Fischer, Resistive current limiters with YBCO films, *IEEE Trans. App. Supercond.* **7** 828-831, (1997)

[Han04] J.Hanisch, V.S.Sarma, B.Zeimetz, F.Schindler, J.Eickemeyer, L.Schultz, B.Holzapfel, Simulation of the critical current density and its dependence on geometrical factors in RABiTS based coated conductors, *Superconductor Science and Technology*, **17** 1003-1008, (2004)

[Iwa05] Y.Iwasa, J.Jankowski, H.Seung-yong, L.Haigun, J.Bascunan, J.Reeves, A.Knoll, X.Yi-Yuan, V.Selvamanickam, Stability and quench protection of coated YBCO "Composite" tape, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **15** 1683-1686, (2005)

[Mat07] www.mathcad.com

[Nor70] W.T.Norris, Calculation of hysteresis losses in hard superconductors carrying ac : isolated conductors and edges of thin sheets, *J. PhysD. App. Phys.* **3** 489, (1970)

[Pru06] W.Prusseit, H.Kinder, J.Handke, M.Noë, A.Kudymow, W.Goldacker, Switching and quench propagation in coated conductors for fault current limiters, *Physica C* **445** 665-668, (2006)

[Ste06] M.Stemmler, B.R.Oswald, F.Breuer, S.Elschner, M.Noë, Simulation model for a novel superconducting fault current limiter, *Journal of Physics* **43** 954-957, (2006)

[Tix00] P.Tixador, X.Obradors, R.Tournier, T.Puig, D.Bourgault, X.Granados, J.Duval, E.Mendoza, X.Chaud, E.Varesi, E.Beaugnon, D.Isfort, Quench in bulk HTS materials application to the fault current limiter, *Superconductor Science and Technology*, **13** 493-497, (2000)

[Vel06] A.V.Velichko, T.A. Coombs, High aspect ratio problem in simulation of FCL based on superconducting tapes, *Electrical Engineering Division*, The University of Cambridge, (2006)

[Vil05] C.Villard, C.Peroz, B.Guinand, P.Tixador, Limitation of DC currents by YBaCuO - Au superconducting films, *IEEE Trans. App. Supercond.* **15** 11-16, (2005)

[Wel99] R.A.Weller, Computer Modelling of Superconducting Film Type Fault Current Limiters, *IEEE Trans. App. Supercond.* **9** 1377-1380, (1999)

[Zei04] B.Zeimetz, K.Tadinada, D.E.Eves, T.A.Coombs, J.E.Evetts, A.M.Campbel, Thermal instability and current voltage scaling in superconducting fault current limiters, *Superconductor Science and Technology*, **17** 657-662, (2004)

Chapitre V

Le montage expérimental

Un banc d'essais spécialisé a été réalisé pour tester les échantillons de conducteurs déposés en limitation de courant selon différents paramètres électriques et physiques. Le montage expérimental comprend une alimentation électrique, une instrumentation cryogénique et une acquisition de données. Ces trois fonctions font l'objet de ce chapitre. Nous étudierons également l'utilisation de ce banc d'essais pour la mesure des pertes AC, celles-ci nécessitant un montage particulier.

V. A) Alimentation électrique

C'est la partie du montage expérimental qui alimente électriquement le limiteur dans son fonctionnement assigné mais également dans son régime de défaut. Elle doit être paramétrable et capable de fournir la puissance du court-circuit. L'étude portant sur les SCFCL en réseau DC, les essais en limitation de courant se font sous tension continue.

V. A. 1) Présentation des signaux de court-circuit

Afin de soumettre le SCFCL aux conditions d'un court-circuit réel, les essais se font par application d'une tension aux bornes du limiteur durant un temps donné. Ainsi, l'alimentation de puissance fixe la tension de court-circuit tandis que le limiteur impose le courant. Il est donc important d'utiliser une source de tension ayant un faible temps de réponse en courant afin de ne pas fausser les mesures.

Pendant le court-circuit un créneau de tension est imposé, mais il est possible d'appliquer un trapèze pour observer le comportement du limiteur pour différentes vitesses de montées en tension.

Le court-circuit peut également être précédé d'une phase de fonctionnement en régime assigné puis suivi d'une phase de récupération et de reprise du fonctionnement (Figure V.1). L'alimentation devra également permettre de générer des signaux alternatifs à fréquence variable permettant de mesurer les pertes AC dans le HTS.

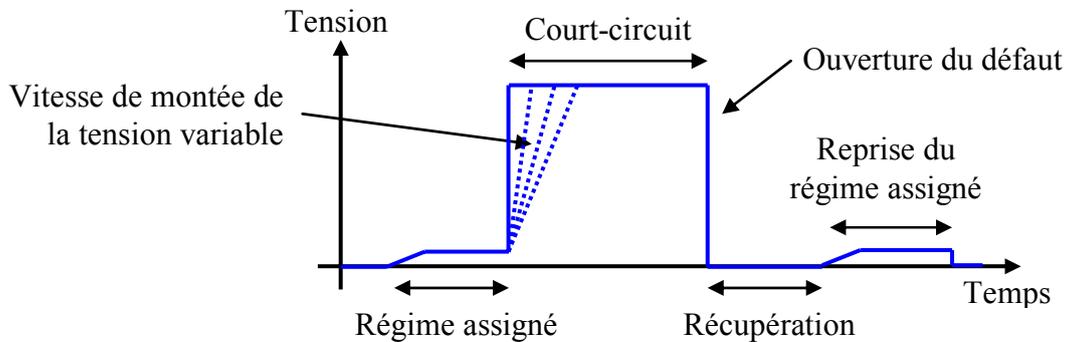


Figure V.1 : Tension d'alimentation des essais en limitation de courant

La Figure V.1 fait apparaître la tension de sortie de l'alimentation électrique. Le fonctionnement assigné est atteint grâce à une rampe limitant la variation de la tension aux bornes de l'échantillon. Le court-circuit est réalisé en appliquant une importante tension aux bornes du limiteur pour une durée comprise entre 1 ms et 150 ms. L'ouverture du défaut est matérialisée par la mise à zéro de la tension aux bornes du limiteur. Le temps de récupération avant la reprise du régime assigné est compris entre 100 ms et plusieurs secondes.

En régime assigné et dans un réseau électrique parfait, le champ électrique aux bornes d'un supraconducteur est nul, il n'est donc pas possible de l'alimenter en tension sans provoquer sa transition. Cependant, dans le cas d'un réseau électrique réel comme le banc d'essais, les résistances du montage sont très importantes par rapport à celle du supraconducteur et provoquent des chutes de tension (V.1).

$$U_{\text{assignée}} = R_{\text{montage}} \times I \quad \text{avec} \quad I < I_{\text{critique}} \quad (V.1)$$

En tenant compte de ces résistances, il est possible d'alimenter le montage en tension, car le champ électrique aux bornes du SCFCL devient négligeable.

V. A. 2) Le banc de puissance

Le banc de puissance constitue l'alimentation électrique du montage expérimental, il est composé de trois parties. La partie paramétrage permet de fixer les paramètres du court-circuit et de les transmettre à la partie commande qui les convertit en signaux analogiques.

Ces signaux sont ensuite adaptés par la partie puissance afin d'alimenter l'échantillon. Le banc de puissance ainsi que les différentes parties sont représentés dans la Figure V.2.

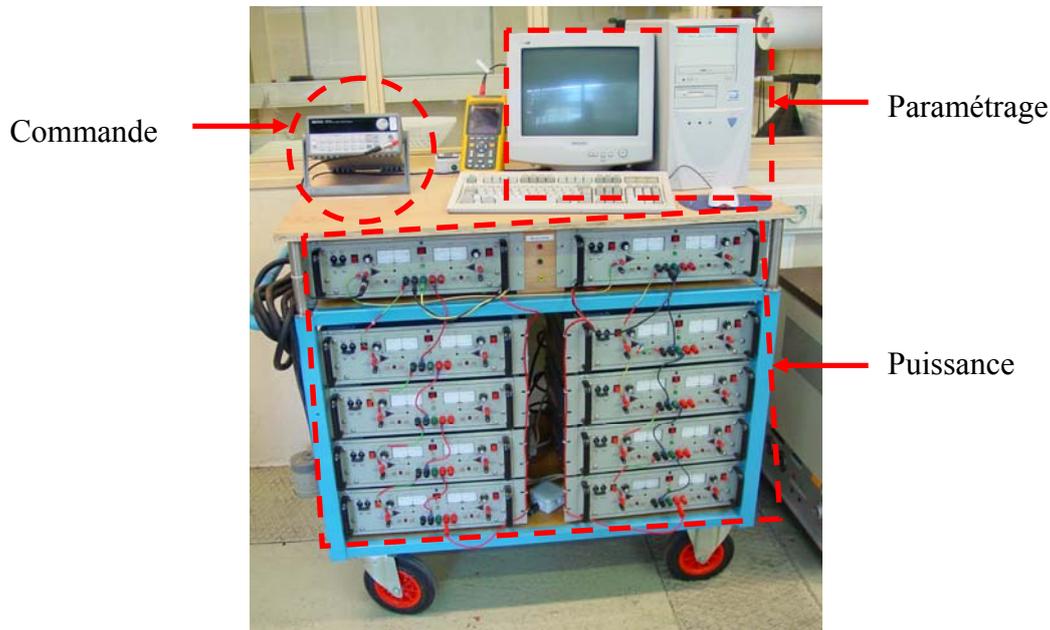


Figure V.2 : Le banc de puissance

Afin d'utiliser le banc de puissance pour d'autres applications telles que les mesures de courant critique ou les mesures de pertes AC, il est important de rendre l'ensemble mobile. Le banc de puissance a donc été assemblé sur un chariot roulant, la masse totale de l'installation étant de 250 kg.

V. A. 2. a) Fonctionnement de la partie paramétrage

Lors d'un essai en limitation de courant, la diversité des paramètres mais également les différentes formes de signaux (Figure V.1), rendent difficile l'utilisation de l'électronique analogique traditionnelle. Il est donc intéressant d'utiliser un ordinateur qui, au travers d'une interface logicielle, permet de reproduire simplement les signaux désirés. Dans notre cas, nous utilisons le logiciel Intuilink de la société Agilent [Agi07], celui-ci permettant de créer simplement et rapidement des formes d'ondes arbitraires.

En effet, les signaux sont tracés à l'aide de formes prédéfinies en indiquant leurs amplitudes et leurs durées (Figure V.3).

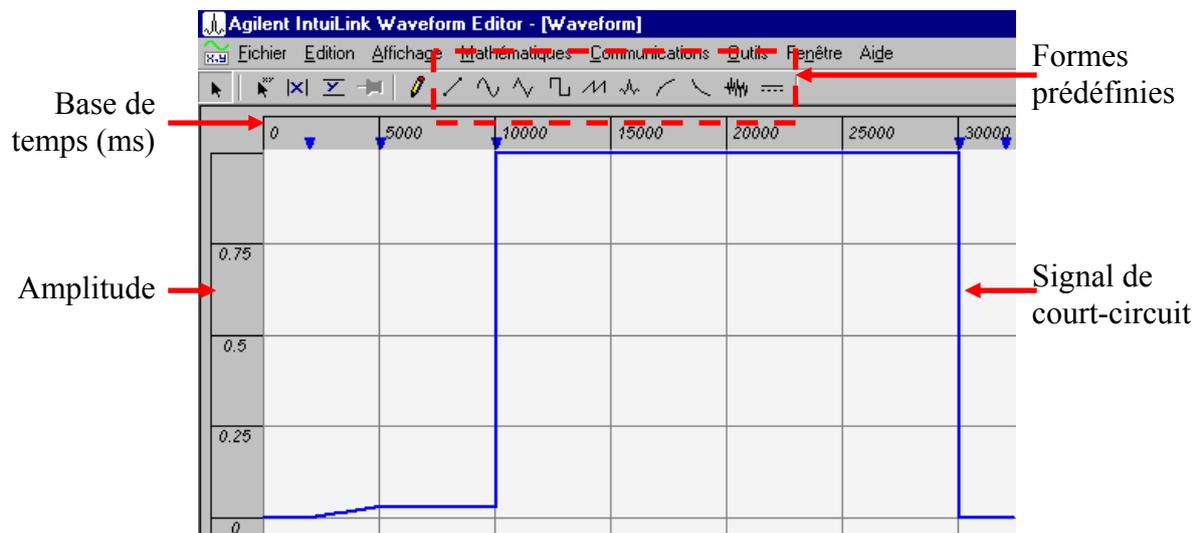


Figure V.3 : Interface du logiciel Intuilink

Après avoir tracé le signal de court-circuit, celui-ci est envoyé puis stocké dans la partie commande via une liaison USB. Le logiciel Intuilink n'intervient donc pas en temps réel lors des essais en limitation de courant, ceci afin d'éviter d'éventuelles erreurs de manipulations informatiques.

V. A. 2. b) Fonctionnement de la partie commande

La commande doit piloter la partie puissance suivant le signal de court-circuit défini avec Intuilink. Pour cela, elle doit stocker puis convertir un signal numérique codé en un signal analogique. La solution technique choisie est celle d'un générateur de signaux Agilent de type 33220A (Figure V.4). Cet appareil utilise des techniques numériques de synthèse pour créer des signaux stables à faible distorsion, afin d'apporter des mesures précises. Le 33220A possède une résolution de 14 bits pour des signaux pouvant compter jusqu'à 64 kpoints, ce qui est intéressant pour stocker des formes d'ondes pouvant atteindre plusieurs secondes.

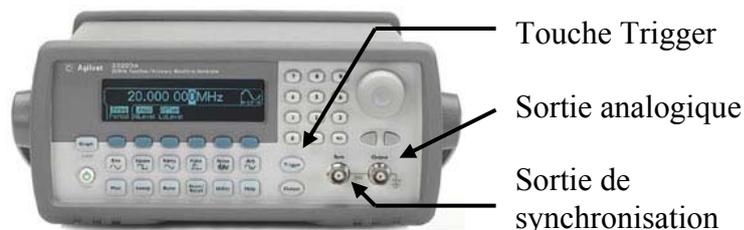


Figure V.4 : Générateur de signaux 33220A

Contrairement à son fonctionnement classique consistant à répéter périodiquement un signal, le 33220A fonctionne ici en mono-coup. En effet, en appuyant sur la touche Trigger, un seul signal de court-circuit est envoyé à la partie puissance par un câble blindé de type BNC. Il est également important de noter que la sortie de synchronisation délivre un signal logique TTL utilisé pour commander les oscilloscopes de la partie acquisition de données.

V. A. 2. c) Fonctionnement de la partie puissance

La partie puissance a pour but de reproduire le signal en provenance du générateur de signaux, en y appliquant un gain en tension ou en courant. La solution technique choisie est celle des amplificateurs de puissance KEPCO [Kep07] de type BOP 20-20 pour Bipolar Operational Power supply 20 V-20 A (Figure V.5).



Figure V.5 : Amplificateur de puissance BOP 20-20

La sortie du générateur de signaux et l'entrée de commande des BOP ne nécessitent aucune adaptation. En effet, elles sont toutes les deux comprises entre ± 10 V et l'impédance d'entrée des BOP est suffisamment importante pour la sortie 50Ω du 33220A. Les BOP sont des amplificateurs opérationnels de puissance à grande dynamique. Ils peuvent être utilisés pour fournir une tension dynamique avec une bande passante de 10 kHz, ce qui est idéal pour les essais en court-circuit. Par leurs conceptions, les BOP n'ont pas de condensateur de stockage d'énergie sur leurs sorties, ceci afin d'obtenir de faibles temps de réponse. Cependant, pour un fonctionnement optimum à grande dynamique, la charge doit être principalement résistive, ce qui est le cas des limiteurs résistifs de courant. Enfin, plusieurs BOP peuvent être câblés, en série et/ou parallèle, afin d'obtenir les niveaux de tension et de courant désirés.

Dans le cadre de cette étude nous utilisons dix BOP 20-20 soit 4 kVA, ceci nous permet donc d'obtenir l'ensemble des configurations décrites dans la Figure V.6.

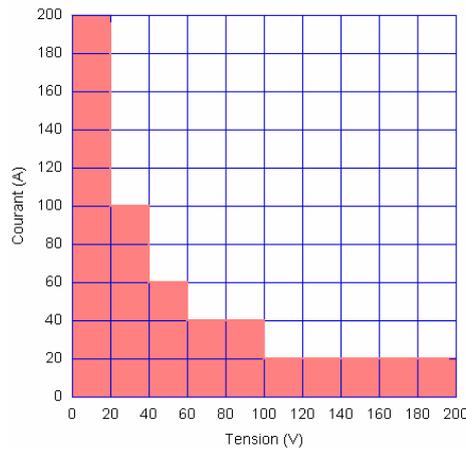


Figure V.6 : Configurations des dix BOP 20-20

Ces différentes configurations dépendent de l'échantillon testé. Un échantillon court de quelques centimètres ne nécessite pas de tension importante pour atteindre un champ électrique de plusieurs centaines de V/m. Dans ce cas il est possible d'utiliser des courants plus importants, en testant par exemple des échantillons plus larges ou en fonctionnant à la température de l'azote liquide (77 K). Un échantillon long de plusieurs mètres nécessite quant à lui la tension maximale du banc et impose donc un fonctionnement sous courant plus faible. Dans ce cas il est possible de réduire le courant critique du HTS en testant l'échantillon à plus haute température (86 K).

V. B) Instrumentation cryogénique

La cryogénie est omniprésente dans le domaine de la supraconductivité. En effet, il faut confiner l'échantillon dans un cryostat, celui-ci possédant une enceinte à basse température quasi-adiabatique. Dans le cadre de cette étude, les échantillons testés sont des HTS et ne nécessitent donc pas de cryogénie lourde à 4 K. Nous utilisons un cryostat à azote liquide pressurisé dans la gamme 1 - 2,5 Bar, correspondant à une plage de température de 77 - 86 K (Figure V.12). Les principales caractéristiques du cryostat sont données dans le Tableau V.1.

Matériau	Hauteur totale	Hauteur utile	Ø total	Ø utile	Pression max
Acier inoxydable	615 mm	420 mm	245 mm	200 mm	6 Bar

Tableau V.1 : Principales caractéristiques du cryostat

Le cryostat est l'élément principal de l'instrumentation cryogénique, il nécessite une instrumentation de mesure et de régulation qui est représentée sur la Figure V.7.

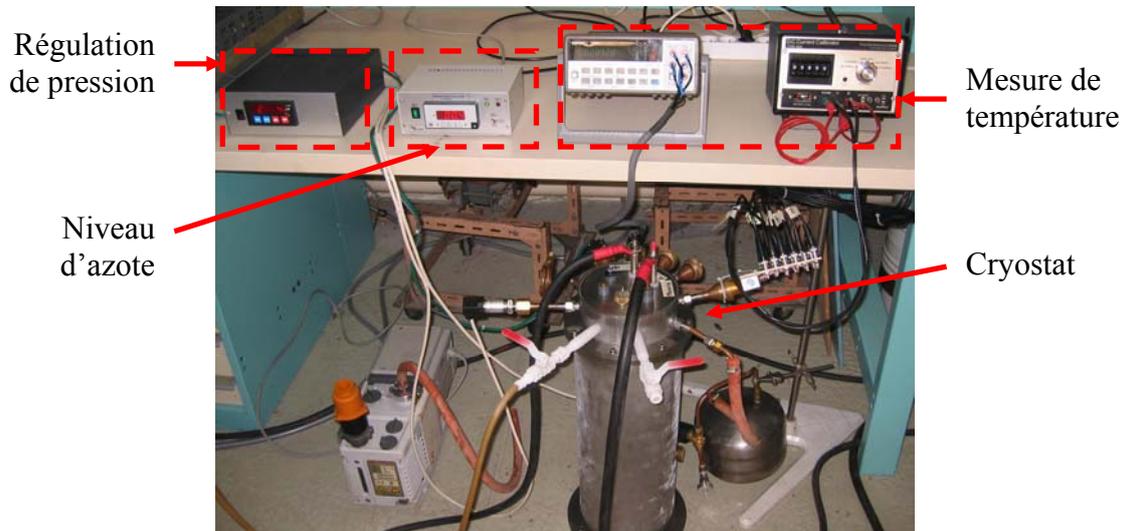


Figure V.7 : L'instrumentation cryogénique

L'instrumentation cryogénique est composée d'un cryostat, d'une mesure du niveau et de la température du bain d'azote liquide et d'une régulation en pression. La Figure V.8 est une vue en coupe du cryostat.

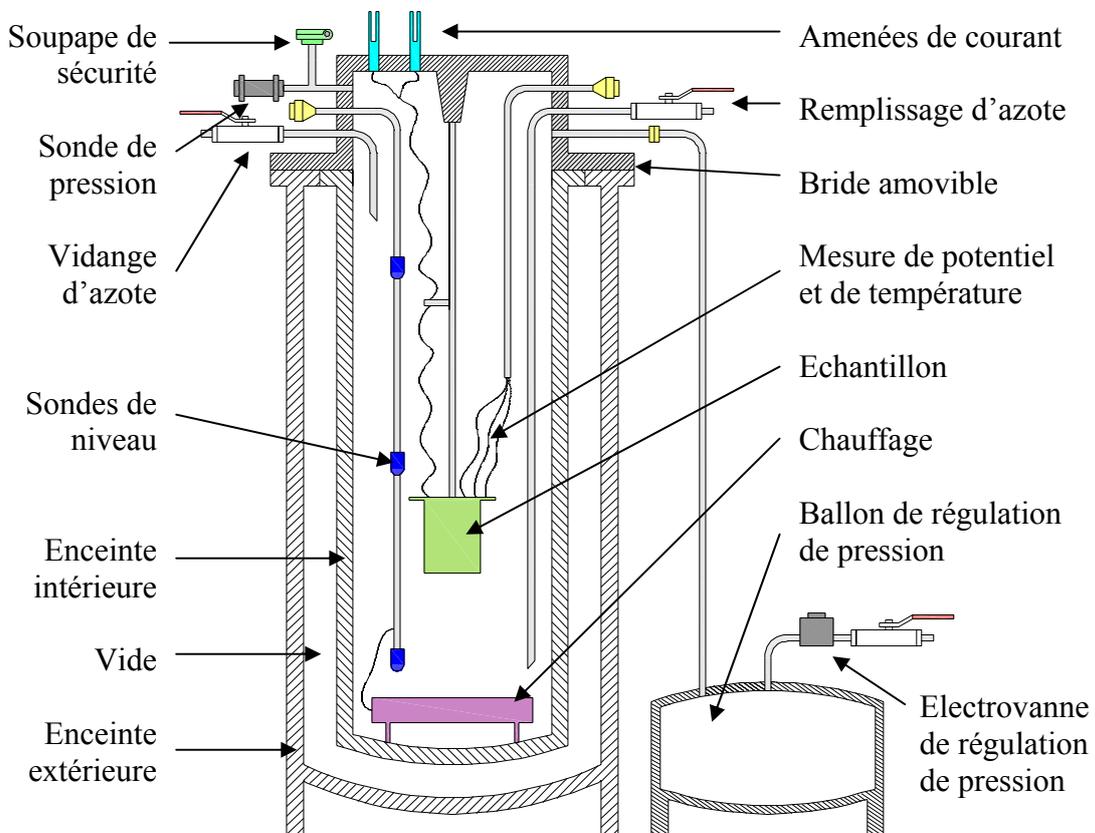


Figure V.8 : Vue en coupe du cryostat

Les échantillons testés sont suspendus à la bride amovible, celle-ci permettant une ouverture du cryostat. L'alimentation du SCFCL est assurée par deux amenées de courant, une connexion à douze broches est destinée à la mesure des potentiels le long des échantillons.

V. B. 1) Mesure de la température du bain d'azote liquide

La température, comprise entre 77 K et 86 K, est mesurée par une sonde platine de type PT 100. Ces sondes ont une résistance d'environ 100Ω à 273 K et une précision de $\pm 0,3$ K. Elles possèdent une caractéristique $R(T)$ linéaire dans une zone de température comprise entre 30 K et 400 K (Figure V.9).

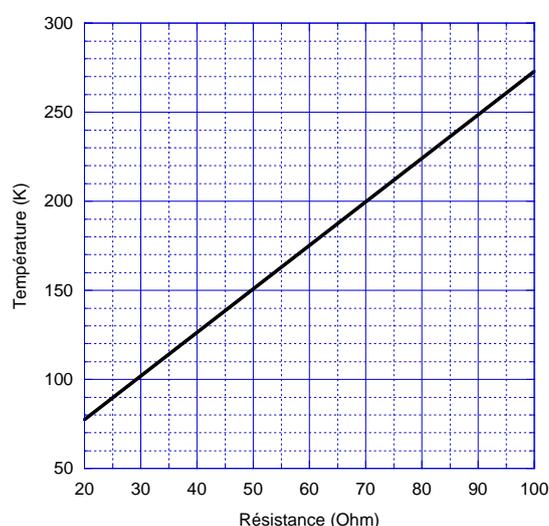


Figure V.9 : Résistance d'une sonde PT100 en fonction de sa température

La température est déduite de la résistance de la sonde, il faut donc s'affranchir des résistances parasites des fils de mesure. La méthode voltampéremétrique consiste à alimenter la sonde par un courant pour ensuite mesurer la tension à ses bornes et en déduire sa résistance par la loi d'Ohm. Pour cela, nous utilisons une mesure quatre fils (Figure V.10).

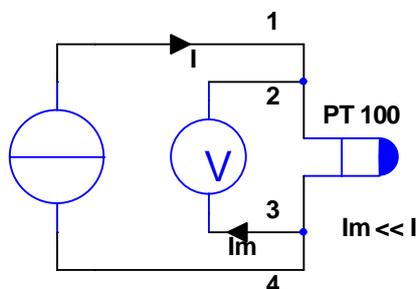


Figure V.10 : Mesure quatre fils

La mesure quatre fils permet d'amener le courant par des fils différents de ceux utilisés pour mesurer la tension. La résistance des fils 1 et 4 n'a aucune influence sur la mesure, car le courant ($I = 1 \text{ mA}$) est identique en tout point de la boucle. La mesure de tension par les fils 2 et 3, nécessite un appareil à haute impédance d'entrée ne faisant circuler qu'un très faible courant ($I_m \approx 0$), sans chute de tension notable. La résistance peut alors être déduite avec précision. Les forces thermoélectriques génèrent dans notre cas des niveaux de tensions suffisamment faibles (μV) pour ne pas perturber les mesures.

V. B. 2) Mesure du niveau d'azote liquide

Il est important de surveiller en permanence le niveau d'azote liquide. En effet, l'échantillon doit être entièrement immergé pour être dans son état supraconducteur et assurer une bonne dissipation de chaleur lors des essais limitation de courant. Trois sondes platine PT 100 sont disposées à des niveaux différents dans le cryostat (Figure V.8) [Ant06]. La méthode retenue est la comparaison des températures des sondes entre elles. La résistance de la sonde située au fond du cryostat sert de référence, elle mesure la température de l'azote liquide. Cette résistance est ensuite comparée à celles des deux autres sondes pour déterminer l'état de l'azote à leurs niveaux (Figure V.11).

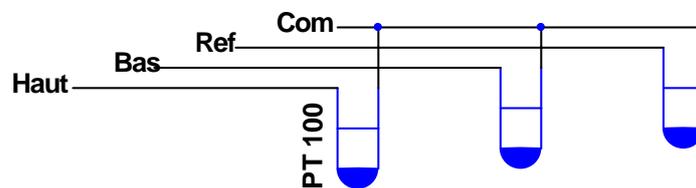


Figure V.11 : Mesure du niveau d'azote liquide

La sonde de niveau bas est située au dessus de l'échantillon et symbolise le niveau minimum pour les essais en limitation de courant. La sonde de niveau haut signifie que le cryostat est plein.

V. B. 3) Régulation de pression

Une régulation de pression est nécessaire pour les essais à une température supérieure à 77 K. En effet, la température d'évaporation de l'azote dépend de sa pression selon la courbe décrite dans la Figure V.12.

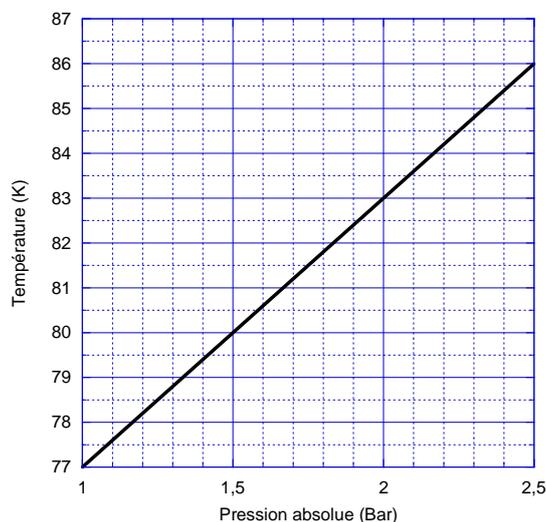


Figure V.12 : Température d'évaporation de l'azote en fonction de la pression

Une sonde de pression STS de type ATM 232.09 (6 Bar) est installée sur le cryostat. En fonction de la température de l'essai, l'utilisateur détermine la valeur de la pression à réguler. En dessous de celle-ci, le système monte en pression par l'évaporation de l'azote due aux pertes calorifiques vers l'extérieur. Un système de chauffage (Figure V.8) permet d'accélérer cette évaporation, car il est nécessaire de dissiper 150 kJ pour élever la température du volume d'azote liquide du cryostat de 10 K. Ce système permet également de créer des mouvements de convection dans le bain d'azote liquide pour homogénéiser sa température. Lorsque la pression dépasse le seuil fixé, une électrovanne s'ouvre puis se referme après une chute de pression de 10 mBar. La sortie de l'électrovanne est reliée à une vanne manuelle permettant de régler le débit (Figure V.8). Cependant lorsque le cryostat est plein, il contient un faible volume de gaz qu'il est difficile de réguler en pression. Nous utilisons donc un ballon destiné à augmenter ce volume pour stabiliser la régulation. Une soupape de sécurité tarée à 4 Bar a été installée pour protéger le cryostat contre les erreurs de manipulation. Elle protège également contre les surpressions causées par l'évaporation brutale de l'azote, lors de l'échauffement d'un échantillon testé.

V. C) Acquisition de données

Une chaîne de mesure est utilisée pour observer et étudier les grandeurs électriques et thermiques lors des essais en limitation de courant. Elle doit posséder des calibres, des résolutions et des bandes passantes adaptés aux essais. Cette chaîne d'acquisition est composée de mesures de courants et de tensions visualisées sur de oscilloscopes, puis transmises par liaison série RS-232 à un ordinateur afin d'être étudiées.

V. C. 1) Mesure du courant

Deux solutions peuvent être envisagées pour mesurer le courant. La première consiste à utiliser un shunt, cette solution est simple mais ne permet pas d'isoler l'appareil de mesure de la partie puissance. La deuxième solution consiste à utiliser une sonde de courant permettant d'allier précision des mesures et sécurité de l'appareillage. Le matériel retenu est une sonde LEM de type PR430 (Figure V.13).



Figure V.13 : Sonde de courant PR430

La sonde de courant PR430 est basée sur une technologie à effet Hall permettant la mesure des courants continus et alternatifs. Ses principales caractéristiques sont décrites dans le Tableau V.2.

Calibre	Gain	Précision	Bande passante
40 A	10 mV/A	± 50mA	Continu → 20 kHz
400 A	1 mV/A	± 100mA	

Tableau V.2 : Caractéristiques de la sonde de courant

Les calibres en courant permettent de couvrir l'ensemble des configurations du banc de puissance, avec une précision suffisante pour nos essais. Cette sonde permet d'observer le régime assigné en courant continu mais également le régime transitoire du défaut. En effet, sa

bande passante est supérieure à celle des alimentations de puissance (10 kHz) et permet d'observer l'ensemble du signal de limitation de courant du SCFCL.

V. C. 2) Oscilloscopes et mesures de tensions

Pour étudier l'homogénéité des transitions dans l'échantillon, il faut connaître la répartition de son champ électrique, nous mesurons ainsi le potentiel en différents points du ruban. Deux oscilloscopes NICOLET de type Integra 20 sont utilisés (Figure V.14). Afin d'observer précisément la phase de court-circuit, leurs triggers sont pilotés par le générateur de signaux de la partie commande.

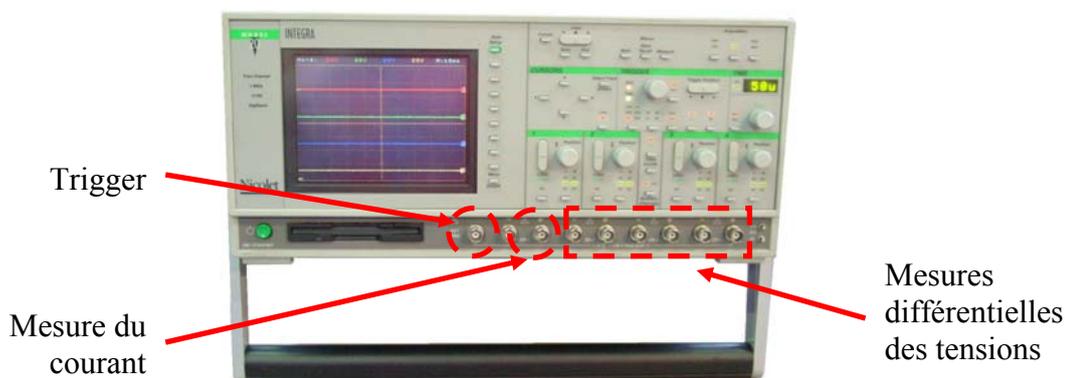


Figure V.14 : Oscilloscope Integra 20

La tension maximale d'entrée d'un oscilloscope (340 V) est supérieure à la tension maximale du banc de puissance (200 V), il n'est donc pas nécessaire d'utiliser des sondes pour abaisser les tensions. L'oscilloscope possède 4 voies différentielles, ce qui est intéressant pour les essais du limiteur qui nécessite des mesures de tension entre différents points du ruban. Les caractéristiques de l'oscilloscope sont données par le Tableau V.3

Général	Tension mode commun	Bande passante	Résolution	Fréquence échantillonnage	Capacité mémoire
4 voies différentielles	2 V	500 kHz	12 Bits	20 Méch/s	10 kpoints

Tableau V.3 : Caractéristiques de l'oscilloscope Integra 20

La bande passante de l'oscilloscope est supérieure à celle des alimentations de puissance et de la sonde de courant, ceci permet d'observer l'intégralité du signal. La résolution, la fréquence d'échantillonnage et la capacité mémoire sont suffisantes pour notre application.

V. D) Mesures des pertes AC

Une autre application du montage expérimental est la mesure des pertes AC. Les alimentations de puissance délivrent un courant sinusoïdal, les pertes AC sont calculées à partir de ce courant et de la tension développée aux bornes de l'échantillon (V.2).

$$P_{AC} = U_{eff} \times I_{eff} \times \cos \varphi \quad (V.2)$$

Avec :

- P_{AC} les pertes AC dans le HTS en W
- U_{eff} la tension efficace aux bornes du HTS en V
- I_{eff} le courant efficace traversant le HTS en A
- $\cos \varphi$ le facteur de puissance, avec φ le déphasage entre I et U

Les pertes AC étant très faibles, la tension aux bornes des échantillons caractérisés est de l'ordre de quelques μV . Il est donc nécessaire de soigner le câblage en évitant les doubles masses, en utilisant des câbles blindés et en éloignant les sources rayonnantes afin de diminuer le bruit. La résistance du HTS étant quasiment nulle, le signal en sortie de l'échantillon est fortement inductif. Par conséquent, le déphasage φ entre le courant et la tension est proche de 90° . Ainsi une faible imprécision sur la mesure de l'angle entraîne une forte erreur sur le calcul des pertes. Dans le cadre de cette étude, ce problème de déphasage est corrigé par l'utilisation d'une inductance mutuelle (Figure V.15) [Bel99].

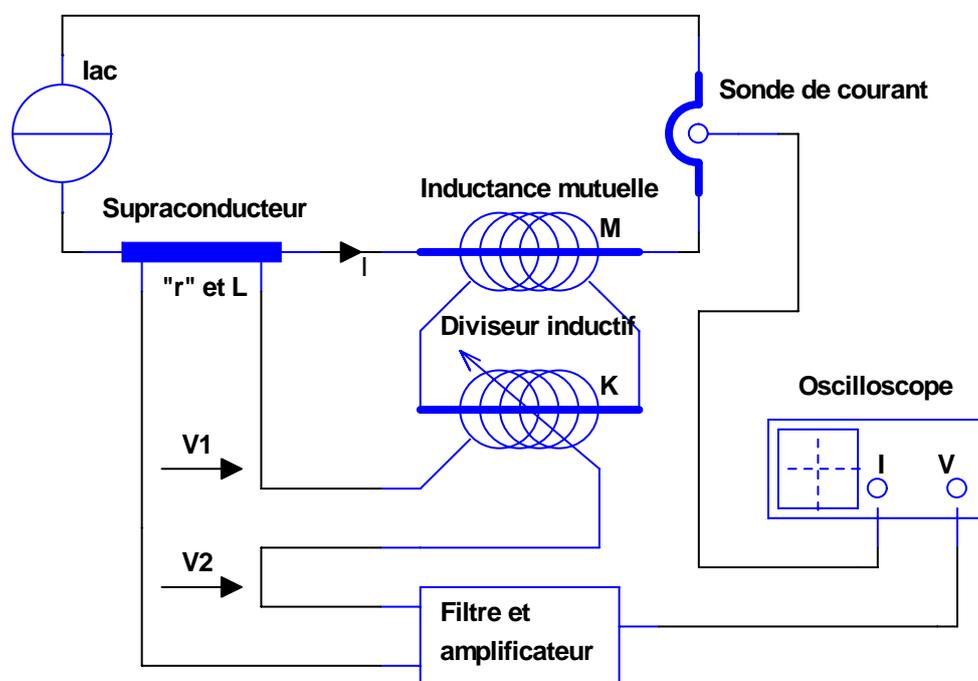


Figure V.15 : Montage expérimental avec inductance mutuelle

La tension V_1 aux bornes du supraconducteur peut s'exprimer ainsi (V.3):

$$V_1 = r i + L \frac{di}{dt} \quad (V.3)$$

Avec : V_1 la tension aux bornes du HTS en V
 i le courant traversant le HTS en A
 « r » symbolise la résistance correspondante aux pertes AC
 L l'inductance de l'échantillon en H

En retranchant à la tension V_1 le signal d'une inductance mutuelle réglable, nous obtenons la tension V_2 (V.4):

$$V_2 = r i + L \frac{di}{dt} - KM \frac{di}{dt} \quad (V.4)$$

Avec : V_2 la tension compensée en V
 M la mutuelle inductance en H
 K le coefficient du pont diviseur inductif

Il est donc possible d'annuler le terme inductif en ajustant le coefficient K du pont diviseur inductif, pour ne conserver que le terme dissipatif. Ceci permet donc de s'affranchir de la mesure imprécise du déphasage. La tension compensée est ensuite filtrée afin d'en supprimer le bruit, puis amplifiée pour obtenir des niveaux de tensions exploitables. Le courant et la tension compensée sont ensuite envoyés sur un oscilloscope puis traités numériquement par intégration du produit $V_2 \times i$ (V.5).

$$P_{AC} = \frac{1}{T} \int_0^T V_2 \times i \times dt \quad (V.5)$$

Avec : T la période du signal en s

Cette méthode offre d'excellents résultats mais nécessite un réglage fin et permanent du pont diviseur inductif. Les wattmètres sont généralement mal adaptés à la mesure des pertes AC. En effet, leur calibre en tension trop élevé par rapport aux faibles signaux du HTS et l'imprécision sur le calcul du déphasage conduisent à des mesures peu précises.

V. E) Conclusion

Le banc d'essais réalisé permet la génération de signaux de puissances complexes et entièrement paramétrables. En effet, des formes d'ondes aléatoires dessinées puis paramétrées sur logiciel sont produites pour une puissance maximale de 4 kVA. Ceci permet d'une part de

reproduire le court-circuit d'un réseau, mais également son régime assigné et la phase de récupération du limiteur. La génération de ces signaux fait intervenir des amplificateurs de puissance très rapides, permettant une excellente précision du paramétrage des essais et une parfaite reproductivité. Le montage expérimental est également composé d'une instrumentation cryogénique autonome. Celle-ci permet un fonctionnement à température constante dans un cryostat régulé en pression. Enfin, une chaîne d'acquisition de données performante permet d'observer les différentes étapes d'une limitation de courant grâce à une résolution et une bande passante adaptées. Le montage expérimental est conçu pour notre étude des SCFCL mais est également adapté, de part ces performances, à la mesure du courant critique ou des pertes AC.

Références du chapitre V

[Agi07] www.agilent.com

[Ant06] A.Antonevici, C.Villard, Propriétés de transport sous contrainte mécanique du ruban supraconducteur, *Thèse de l'Université Joseph Fourier*, (2006)

[Bel99] O.Belmont, P.Tixador, Limitation de courant à base d'oxydes supraconducteurs et réalisation d'un appareil 100 A – 1 kV, *Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble*, (1999)

[Kep07] www.kepcopower.com

Chapitre VI

Les essais en limitation de courant

Ce chapitre s'articule autour de trois échantillons représentatifs de l'ensemble des essais menés durant cette étude. Nous étudierons dans un premier temps un échantillon dont le substrat est en saphir, puis un échantillon court de conducteur déposé équipé d'un thermomètre. Enfin nous conclurons par des essais à plus grande échelle et une étude comparative sur un conducteur déposé long de deux mètres.

VI. A) Spirale sur substrat en saphir

VI. A. 1) Présentation de l'échantillon en spirale

L'échantillon provient de la société THEVA, c'est un disque en saphir (Al_2O_3) de 51 mm de diamètre. Il est recouvert d'une couche d'YBaCuO puis d'un shunt en or. Une piste conductrice en forme de spirale a ensuite été gravée sur l'échantillon. Elle est composée de constrictions permettant de réduire localement la valeur du courant critique (Figure VI.1).

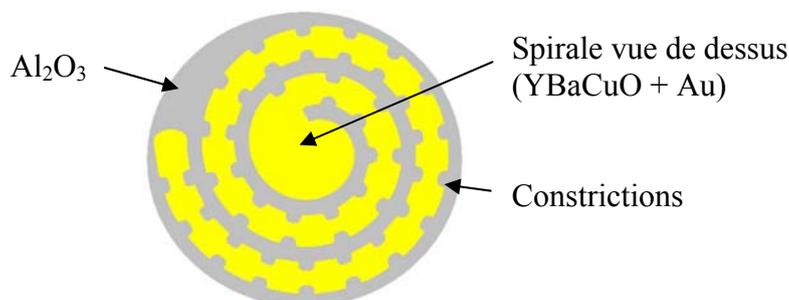


Figure VI.1 : Masque de la spirale avec constrictions

Les études d'une équipe de Genève [Ant07] [Dec03] [Dur07] [Dur05] ont montré que la présence de constrictions le long d'un supraconducteur permettait d'augmenter les vitesses de transition et donc d'améliorer l'homogénéité et les performances en limitation de courant.

Les caractéristiques géométriques de l'échantillon sont données dans le Tableau VI.1.

	Al ₂ O ₃	YBaCuO	Au
Longueur	Ø 51 mm	152 mm	
Largeur		5,1 mm (constrictions : 2,3 mm)	
Epaisseur	500 µm	300 nm	150 nm

Tableau VI.1 : Caractéristiques géométriques de l'échantillon sur substrat en saphir

Afin de mesurer la température au plus près de l'échantillon durant les essais en limitation de courant, un thermomètre adapté a été réalisé. Cette mesure nécessite un bon contact thermique avec l'échantillon ainsi qu'un faible temps de réponse de la sonde. La solution technique retenue est celle du dépôt d'une fine piste de cuivre dont la résistance varie en fonction de la température. Ce dépôt est réalisé par Lift-off (Figure VI.2) à l'intérieur de la spirale de l'échantillon.

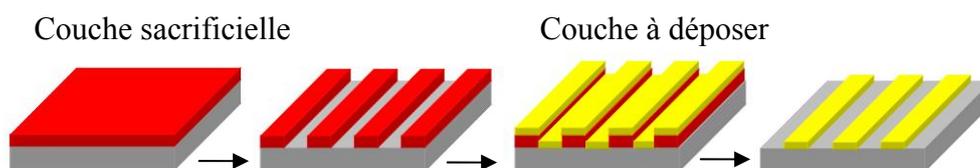


Figure VI.2 : Technique de dépôt par Lift-off

La technique du Lift-off consiste à déposer une couche sacrificielle de résine sur un substrat, pour ensuite la lithographier à l'aide d'un masque par une méthode UV ou électronique. La couche à déposer, dans notre cas du cuivre, est ensuite déposée sur la totalité de la couche. Cette dernière est ensuite retirée dans un solvant.

La sonde sera alimentée sous 1 mA, or une mesure suffisamment précise nécessite un signal de quelques mV. Il est donc nécessaire de réaliser une résistance d'une dizaine d'ohms, pour obtenir une bonne précision en température.

L'épaisseur et la largeur minimale de la sonde étant fixées par le procédé de réalisation, sa résistance linéique est déduite de la résistivité du cuivre déposé (Figure VI.3).

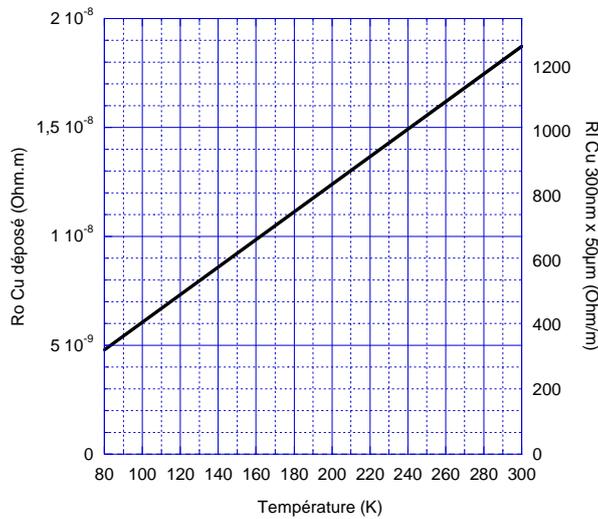


Figure VI.3 : Résistivité et résistance linéique théorique du cuivre déposé

La Figure VI.3 permet de conclure qu'un dépôt de cuivre de dix centimètres de long dont l'épaisseur vaut 300 nm et la largeur 50 μ m, permettra d'obtenir une résistance comprise entre 32 Ω à 77 K et 125 Ω à 300 K. Ces valeurs étant suffisantes pour nos mesures, un masque a été réalisé avec ces dimensions.

L'échantillon est équipé de deux amenées de courant (A et B) collées à l'indium, qui est un métal mou et bon conducteur électrique. Quatre prises de potentiel (1 à 4) réparties le long de l'échantillon et collées à la laque d'argent sont ensuite réalisées. La répartition de ces points de mesures est donnée par la Figure VI.4.

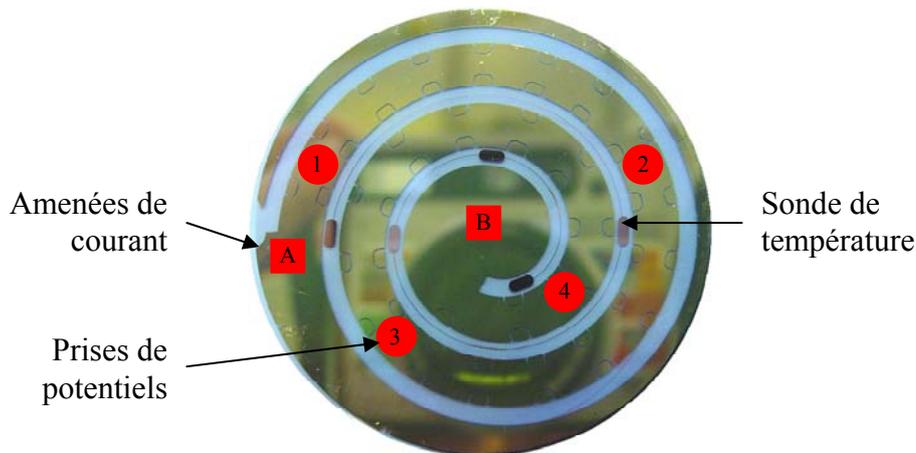


Figure VI.4 : Echantillon en spirale avec sa sonde de température

L'ensemble étant fragile, l'échantillon est monté sur un support en fibre de verre pour faciliter ses manipulations (Figure VI.5).

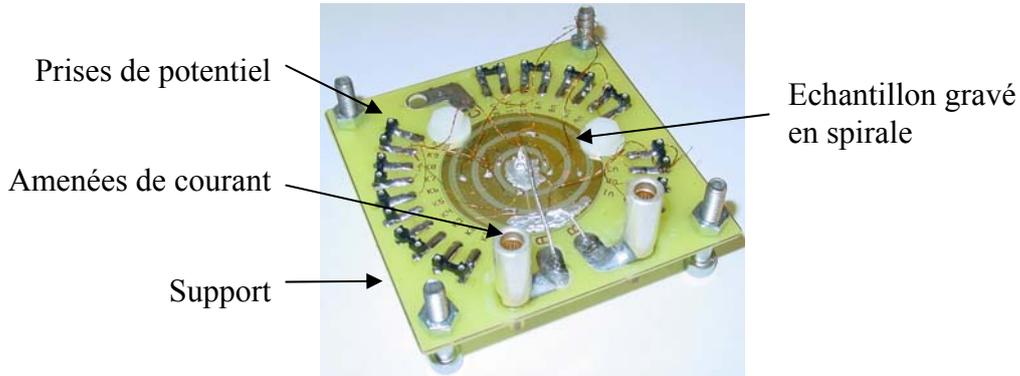


Figure VI.5 : Echantillon en spirale monté sur son support

Ce support permet une manipulation sûre de l'échantillon, mais sert également d'interface avec les connexions extérieures. Il permet, de part ses pistes en cuivre étamé, de réaliser des masses thermiques empêchant le réchauffement de l'échantillon par ses amenées de courant.

VI. A. 2) Caractérisation de l'échantillon en spirale

VI. A. 2. a) Résistances de l'échantillon en spirale

La première mesure permettant de caractériser l'échantillon est celle de sa résistance en fonction de la température. Elle est réalisée en faisant circuler un faible courant entre les points A et B, pour ensuite mesurer la tension 1-4 aux bornes de l'échantillon en faisant varier sa température (Figure VI.6).

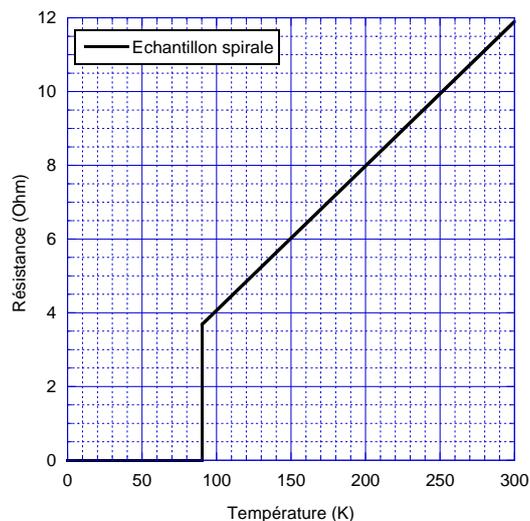


Figure VI.6 : Résistance de l'échantillon en spirale en fonction de sa température

La mesure est en accord avec les caractéristiques physiques du HTS et du shunt. Elle est cependant inférieure de 9 %, ceci se justifie par l'approximation à une section moyenne des parties avec et sans constriction. Notons que la résistance de l'échantillon est importante, ce qui est intéressant pour la limitation de courant.

Nous mesurons ensuite les résistances de contact des amenées de courant. Lorsque l'échantillon est dans son état supraconducteur, il est alimenté sous un courant de quelques ampères mais inférieur à I_c . Les résistances des amenées de courant sont ensuite déduites de la mesure des tensions entre les points A-1 et 4-B. Ces résistances ne sont pas négligeables et sont de l'ordre de $50 \mu\Omega$. Ceci s'explique par leur mode de réalisation, en effet les amenées de courant ne sont pas maintenues mécaniquement, mais uniquement écrasées pour obtenir un collage puis recouvertes de laque d'argent.

VI. A. 2. b) Résistance de la sonde de température

La résistance de la sonde a été mesurée pour connaître sa caractéristique réelle en fonction de la température (Figure VI.7)

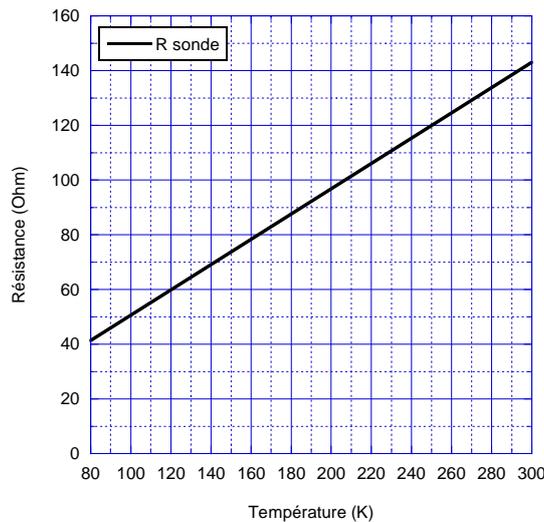


Figure VI.7 : Résistance de la sonde en fonction de la température

Ces résultats sont supérieurs de 12 % par rapport à la théorie. Ceci s'explique par une imprécision sur la résistivité du cuivre en couche mince par rapport au matériau massif, celle-ci étant dépendante de son épaisseur. La sonde est alimentée sous 1 mA et dissipe une puissance négligeable de $400 \mu\text{W}$ à 77 K, n'entraînant pas d'échauffement notable. La sonde a une caractéristique moyenne de $2,2 \text{ K}/\Omega$, en supposant une tension exploitable à partir de 1 mV, la précision de la mesure sera de l'ordre de deux Kelvin, ce qui est suffisant pour nos mesures.

VI. A. 2. c) Mesure du courant critique

La mesure du courant critique s'effectue en régime sinusoïdal permanent. La tension aux bornes de l'échantillon est mesurée tandis que celui-ci est soumis à un courant dont l'amplitude est proche de I_c . La Figure VI.8 représente la mesure du courant critique de l'échantillon à 77 K.

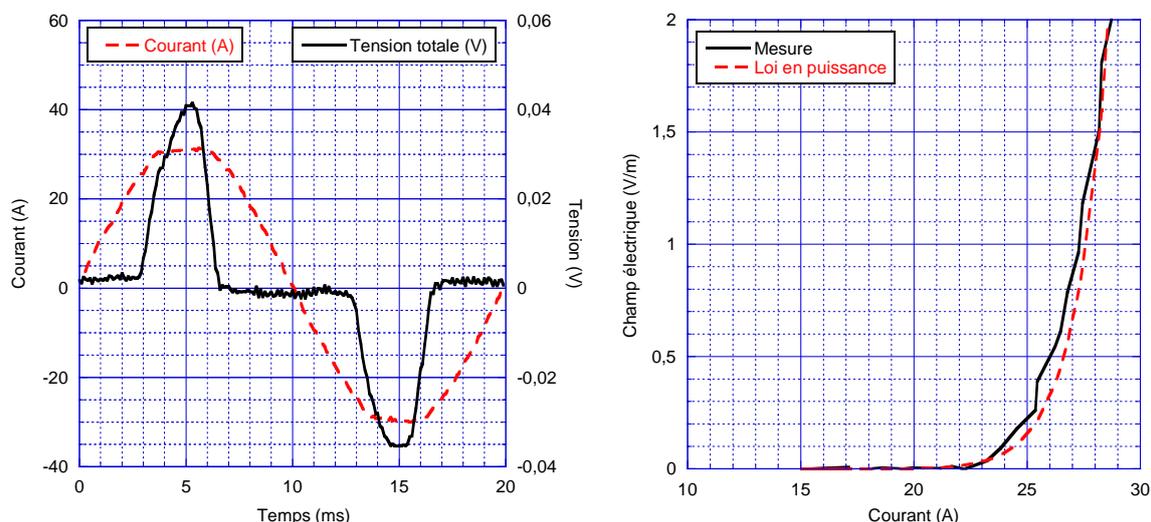


Figure VI.8 : Mesure du courant critique de l'échantillon en spirale à 77 K

Nous observons sur ce relevé un régime stable, sans échauffement notable du supraconducteur. Le seuil de supraconductivité est fixé à $1 \mu\text{V}/\text{cm}$, il nous est impossible de le visualiser avec précision car celui-ci se trouve dans le bruit de la mesure. Nous pouvons cependant faire une estimation de la valeur du courant critique en utilisant la loi en puissance $E(I)$, donnant le résultat suivant : $E = E_c \times (I / 17)^{19}$. Le courant critique calculé est de 17 A et le coefficient $n=19$ est assez proche de la valeur couramment utilisé ($n=15$). Cet écart peu s'expliquer par l'impossibilité d'étudier le champ électrique autour du seuil de supraconductivité.

La tension mesurée à ses bornes est donnée dans la Figure VI.10.

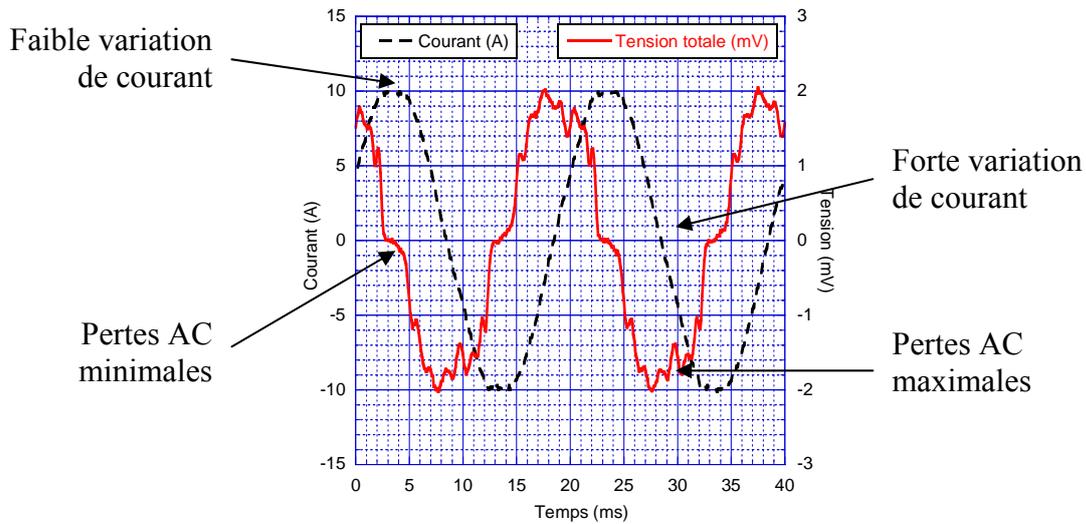


Figure VI.10 : Mesure des pertes AC sur l'échantillon en spirale

Les pertes AC apparaissent lorsqu'il y a variation du courant. Elles sont nulles pour les valeurs maximales du courant et ont leurs maximums aux plus forts di/dt . A partir de plusieurs mesures avec différentes amplitudes de courant, nous pouvons en déduire l'évolution des pertes AC dans le supraconducteur (Figure VI.11). Celles-ci peuvent être comparées à la formule de W.T.Norris, car le cas étudié est proche de celui d'un HTS en champ propre, la spirale étant constituée de seulement 2 spires suffisamment espacées.

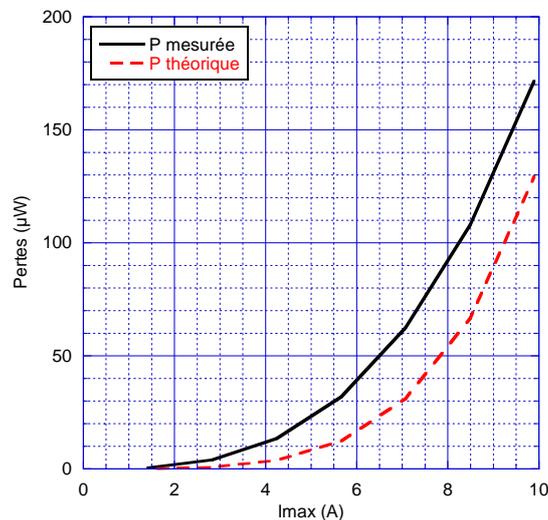


Figure VI.11 : Pertes AC en fonction du courant maximal dans l'échantillon en spirale

L'écart de 23 % entre la théorie et la mesure est assez important, mais représente bien les difficultés rencontrées, car les faibles signaux donnent des mesures imprécises. Ces résultats permettent d'obtenir l'ordre de grandeur des pertes AC et notons qu'à transport de courant équivalent un câble en cuivre génère mille fois plus de pertes. Les pertes AC restent

donc négligeables face aux pertes résistives d'un conducteur classique mais doivent être prises en compte pour le dimensionnement de la cryogénie.

VI. A. 3) Essais en limitation de courant de la spirale

Les échantillons sont testés à 77 K selon deux paramètres : l'amplitude de la tension de court-circuit et sa vitesse de rampe. Les températures et les tensions sont mesurées sur trois portions de l'échantillon (1-2, 2-3, et 3-4). Ces mesures ont pour but d'observer les champs électriques, les courants et les températures, afin d'étudier l'homogénéité des transitions en fonction du paramétrage des essais [Kat07].

Le premier essai consiste à alimenter l'échantillon en régime assigné sous 8 A, pendant 10 ms, pour ensuite appliquer un créneau de tension de 50 V, soit 330 V/m aux bornes de l'échantillon, simulant le court-circuit pendant 20 ms. Nous pouvons ainsi observer la répartition des champs électriques ainsi que le courant limité par le SCFCL (Figure VI.12).

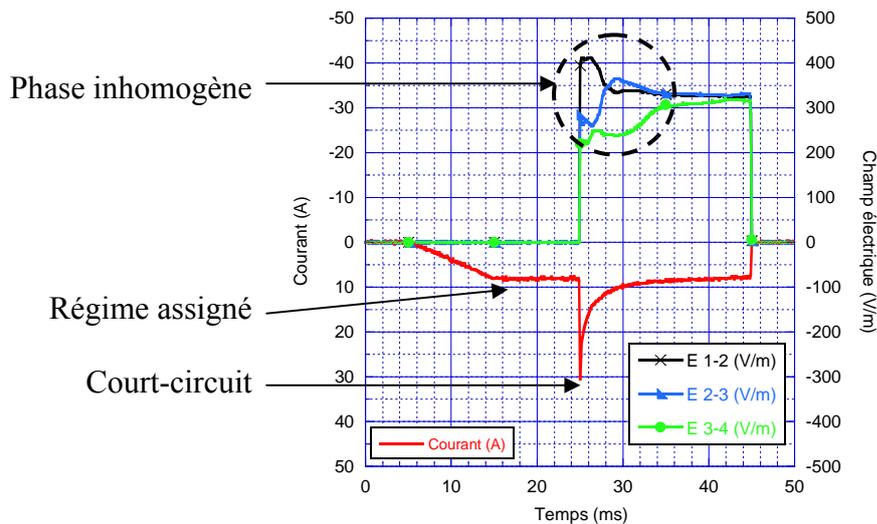


Figure VI.12 : Essai de l'échantillon en spirale à 77 K sous 50 V

Sur le relevé précédent, le courant a été inversé pour améliorer la lisibilité des courbes. Nous pouvons noter que la rampe permet d'alimenter progressivement l'échantillon, sans provoquer de transition involontaire du HTS. Le court-circuit, déclenché à $t = 25$ ms, fait rapidement croître le courant qui atteint en moins de 100 μ s sa valeur maximale de 31 A. Le courant diminue ensuite fortement jusqu'à 10 A pendant 5 ms, puis se stabilise jusqu'à la fin du court-circuit. Les champs électriques évoluent de manière inhomogène pendant 10 ms, puis se stabilisent autour du champ électrique moyen de 330 V/m. La portion 1-2 est la première à avoir transité : ceci peut s'expliquer par la proximité d'une amenée de courant dont l'échauffement contribue à la transition du supraconducteur.

Il apparaît donc une phase pendant laquelle la transition du supraconducteur, représentée par les champs électriques le long de la spirale, est inhomogène. L'étude de l'homogénéité des transitions est particulièrement importante dans la compréhension des phénomènes intervenant dans la limitation du courant [Ich07] [Nog07]. En effet, plus la transition est homogène, plus la limitation est efficace. Une transition inhomogène signifie que l'échantillon transite localement et que seule la portion concernée participe à la limitation de courant. Les énergies volumiques dissipées dans cette portion sont plus importantes et provoquent des échauffements locaux appelés « hot spots », pouvant détruire le ruban.

VI. A. 3. a) Influence du champ électrique

Etudions l'influence du champ électrique appliqué aux bornes de l'échantillon sur l'homogénéité des transitions. En reproduisant l'essai de la Figure VI.12 pour différents niveaux de tensions, voici les durées des phases d'inhomogénéités en fonction de la tension appliquée au ruban (Figure VI.13).

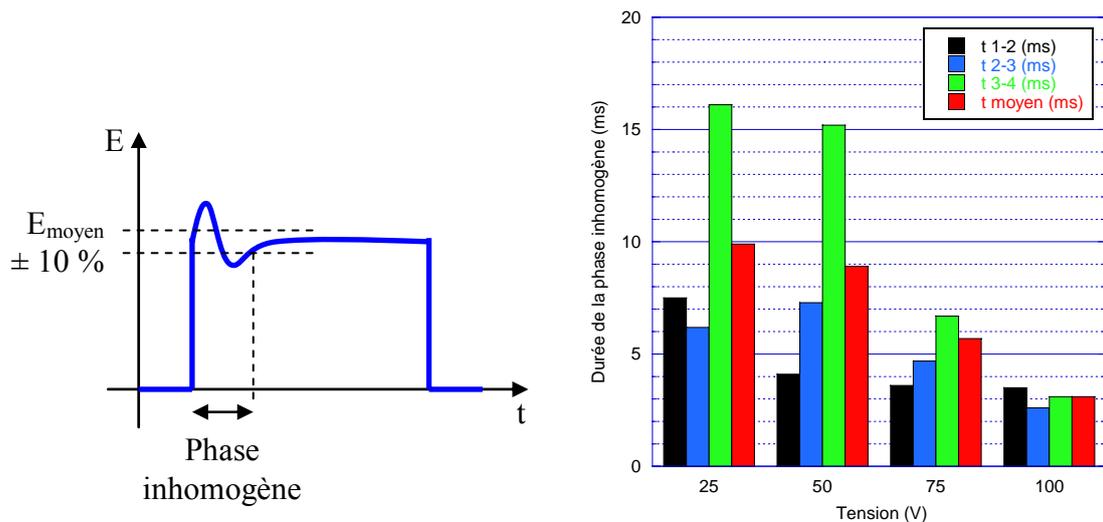


Figure VI.13 : Durée de la phase inhomogène en fonction de la tension de court-circuit

Il apparaît sur le graphique précédent une diminution notable de la durée des phases inhomogènes lorsque la tension augmente. Une tension plus importante permet ainsi de diminuer la durée de l'inhomogénéité, ceci peut s'expliquer par une dissipation thermique plus importante qui augmente la vitesse de propagation des transitions.

VI. A. 3. b) Influence de la vitesse de montée du court-circuit

Cette étude consiste à faire varier la pente du créneau de tension, afin d'observer son influence sur l'homogénéité des transitions.

Voici le résultat de l'essai sous 50 V, pour une pente de 2 V/ms (Figure VI.14).

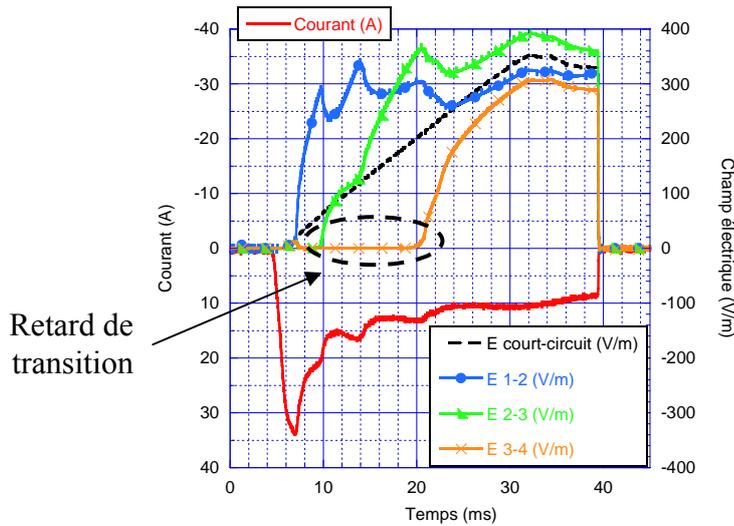


Figure VI.14 : Essai en limitation de courant avec une pente de 2 V/ms

Notons une importante diminution de la vitesse de montée du courant, qui est passée de 310 A/ms pour l'essai avec un créneau de tension (Figure VI.12) à 8 A/ms pour l'essai avec une rampe de tension de 2 V/ms. Il apparaît sur la Figure VI.14 une importante inhomogénéité dans laquelle les portions de l'échantillon n'ont pas participé à la limitation de courant aux mêmes instants. Ainsi il a d'importants retards entre la transition de la portion 1-2 et celles des autres parties du limiteur. Une série d'essais a été réalisée pour des pentes comprises entre 100 V/ms et 2 V/ms. Son but est de mesurer les temps écoulés entre la première transition symbolisé par la partie 1-2 et celles des autres portions de l'échantillon (Figure VI.15).

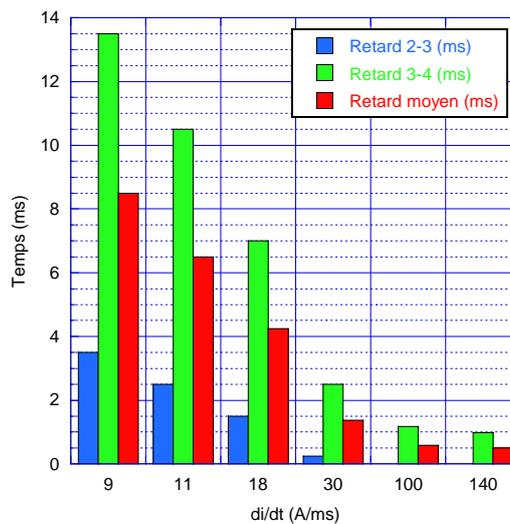


Figure VI.15 : Retard de transition en fonction de la vitesse de montée en courant

Il apparaît une grande disparité pour les faibles valeurs de di/dt , la partie 3-4 accuse un retard par rapport à la partie 1-2 de 13,5 ms. Une explication possible est que la lente montée en courant provoque la transition de la partie dont le I_c est le plus faible (Figure VI.9). Le courant du réseau est alors limité et décroît. Ainsi les portions supraconductrices de l'échantillon ne peuvent plus transiter par dépassement du courant critique, mais par échauffement due à la propagation de chaleur de la portion qui a transitée initialement.

En conclusion nous pouvons dire que l'inhomogénéité observée lors de la transition n'est pas un phénomène uniquement intrinsèque au matériau, mais est également liée aux caractéristiques du court-circuit. Il apparaît donc que l'augmentation du di/dt améliore la limitation de courant [Tix05]. En d'autres termes, plus la tension de court-circuit est importante et rapide, plus la limitation de courant sera efficace, dans la limite d'un échauffement raisonnable. Ceci est un point positif pour les SCFCL résistifs.

VI. A. 3. c) Elévation de température

Il est d'une part possible de calculer la température moyenne de l'échantillon grâce à sa résistance (Figure VI.6) [Ara07] [Kim05]. Cette méthode est simple mais nécessite une transition homogène pour être fiable. D'autre part, considérons la méthode décrite dans le chapitre IV, qui consiste à utiliser l'énergie dissipée et les propriétés physiques de l'échantillon (IV.16).

$$P = L \times l \times \left[\sum_i e_i \times Cp_i(T) \right] \times \frac{dT}{dt} \text{ avec } i : \text{shunt, supraconducteur ou substrat} \quad (VI.1)$$

Il est possible de déterminer la température moyenne de l'échantillon (VI.2).

$$U_{cc} \times I = L \times l \times \left[\sum_i e_i \times Cp_i(T) \right] \times \frac{dT}{dt} \quad (VI.2)$$

Avec : U_{cc} la tension aux bornes de l'échantillon en V

I le courant de limitation en A

Il est également possible de déterminer la température du hot spot (VI.3).

$$R_l \times I^2 = l \times \left[\sum_i e_i \times Cp_i(T) \right] \times \frac{dT}{dt} \text{ avec } R_l \text{ la résistance linéique de l'échantillon} \quad (VI.3)$$

Les montées en température pour l'essai à 77 K sous 50 V décrit dans la Figure VI.12, sont donnés dans la Figure VI.16.

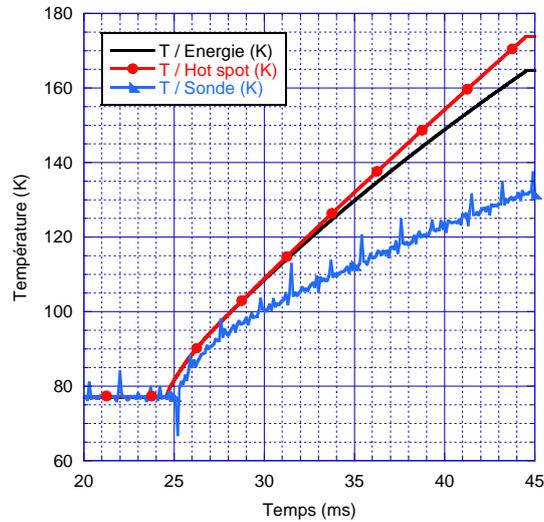


Figure VI.16 : Montées en température de l'échantillon en spirale

Il y a un écart de 6 % entre la température du hot spot et la température moyenne. Ceci s'explique par la phase inhomogène présente aux premiers instants de la limitation de courant. La mesure de température par la résistance du limiteur n'est pas valable dans ce cas, car la phase inhomogène donne une valeur faussée de la résistance de l'échantillon. La température de la sonde en cuivre est 25 K en dessous des températures calculées. Ceci s'explique par sa position dans la spirale (Figure VI.4). Le thermomètre n'étant pas en contact direct avec la spirale pour des problèmes d'isolation électrique, il subsiste un écart de température entre eux. Une simulation avec le logiciel FLUX2D® nous permet de déduire la température de la spirale en fonction de celle du thermomètre.

Cette modélisation par éléments finis tiens compte des dimensions de l'échantillon, des propriétés physiques de ses matériaux et de la position de la sonde par rapport à la spirale (Figure VI.17).

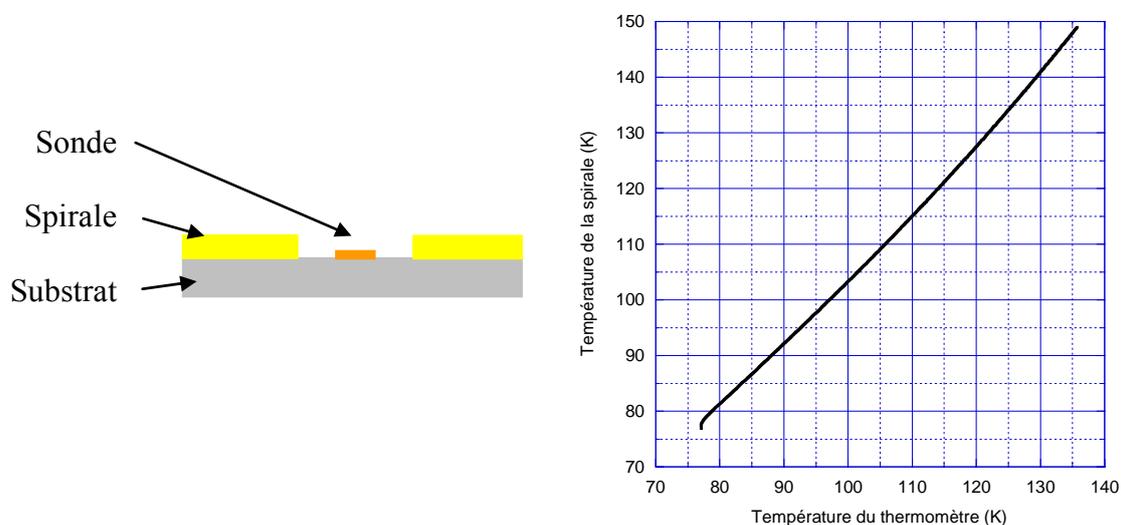


Figure VI.17 : Température de la spirale en fonction de la sonde

La température mesurée en fin de court-circuit sur le thermomètre est de 135 K, la simulation nous permet d'estimer la température de la spirale à 148 K, se situant à seulement 9 % en dessous des calculs. Le thermomètre donne donc un ordre de grandeur très correct de la valeur de température et cette méthode permet ainsi une mesure suffisamment précise pour nos essais. Ces résultats permettent également de conclure que la résistance thermique de contact, entre la sonde et l'échantillon, est suffisamment faible pour être négligée. Le principe de la sonde de température en cuivre déposé est donc validé, l'étape suivante consiste à déposer un thermomètre de ce type sur un conducteur déposé.

VI. B) Conducteur déposé avec thermomètre

VI. B. 1) Présentation du conducteur déposé avec thermomètre

L'échantillon de la société THEVA est un conducteur déposé de DyBaCuO recouvert d'un shunt en argent. C'est un échantillon court mesurant 3,5 cm de long, son courant critique est de 70 A à 77 K.

Le Tableau VI.2 résume les principales caractéristiques du ruban.

	Substrat	Supraconducteur	Shunt
Matériau	Inox C276	DyBaCuO	Ag
Longueur	35 mm		
Largeur	4 mm		
Epaisseur	90 μm	2,7 μm	500 nm

Tableau VI.2 : Caractéristiques du conducteur déposé avec thermomètre

L'échantillon est ensuite monté sur un support en fibre de verre (Figure VI.18).

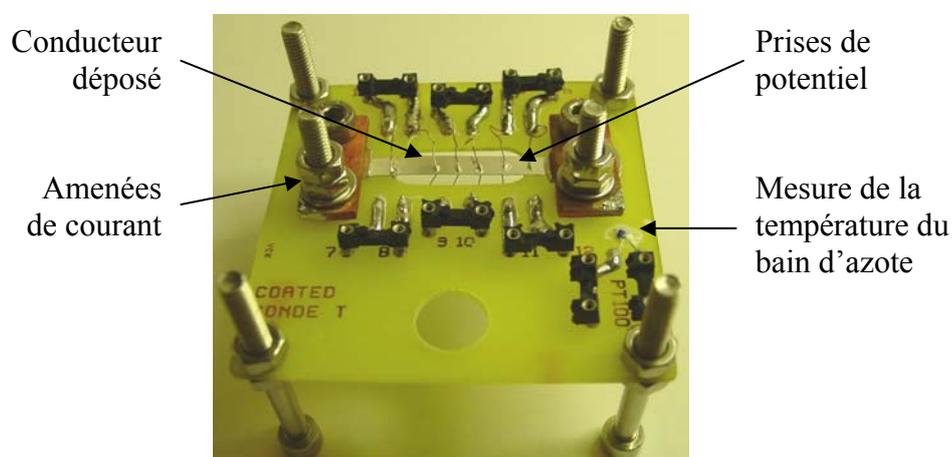


Figure VI.18 : Conducteur déposé sur son support

L'échantillon est équipé de deux amenées de courant A et B et de six prises de potentiel (1 à 6) permettant d'observer l'homogénéité des transitions.

Après le dépôt d'une fine couche de parylène permettant d'isoler électriquement le substrat, un thermomètre en cuivre a été déposé au dos de cet échantillon (Figure VI.19), selon le même principe que le thermomètre de l'échantillon en spirale.

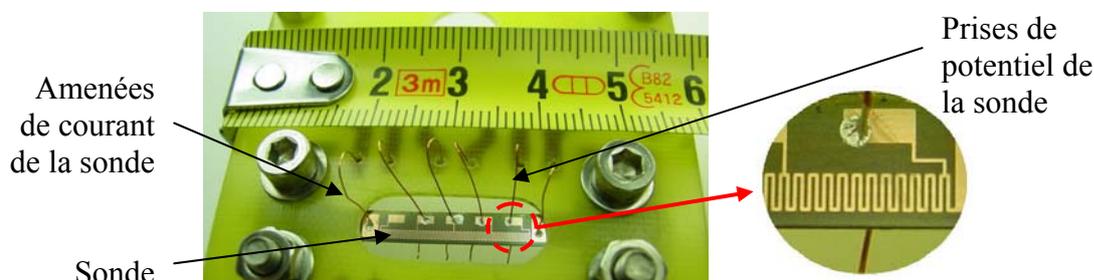


Figure VI.19 : Thermomètre au dos du conducteur déposé

Les amenées de courant et les prises de potentiel de la sonde de température sont collées à la laque d'argent.

VI. B. 2) Caractérisation du conducteur déposé avec sonde

VI. B. 2. a) Résistance de l'échantillon

La mesure de résistance de l'échantillon est nécessaire pour paramétrer les essais en court-circuit mais également déduire la température du ruban. Son courant critique est déduit de la variation en température du J_c typique de ce type d'échantillon (Chapitre IV : I.A) et de la valeur de I_c donnée par la documentation du fournisseur (Figure VI.20).

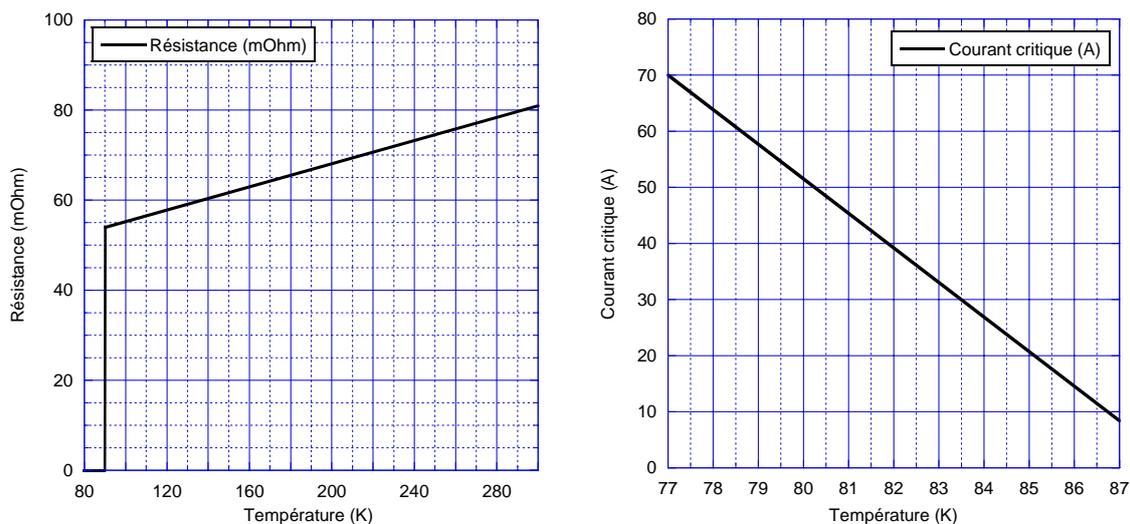


Figure VI.20 : Résistance et courant critique du conducteur déposé avec sonde

Notons que la résistance est plus faible que celle de l'échantillon en spirale, ceci est dû au substrat qui dans ce cas est conducteur électrique. Il faut en tenir compte dans le paramétrage des essais pour ne pas obtenir un courant de limitation trop important.

VI. B. 2. b) Résistance de la sonde de température

La longueur totale de la sonde est 101 mm, sa résistance en fonction de la température est donnée par la Figure VI.21.

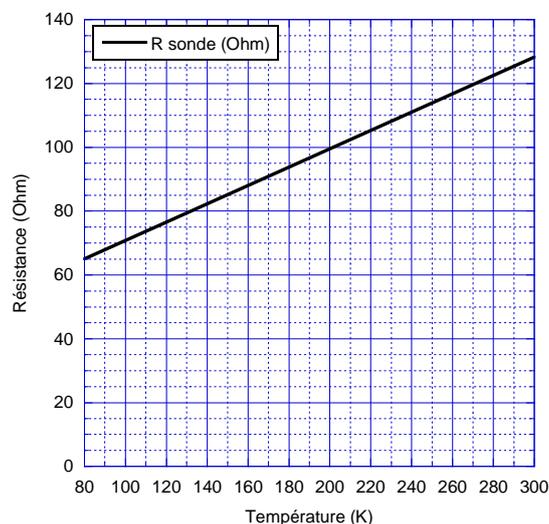


Figure VI.21 : Résistance du thermomètre en fonction de sa température

Cette sonde est comparable à celle de l'échantillon en spirale, les propriétés des mesures sont donc semblables. Il faut cependant tenir compte de la couche de parylène, qui malgré sa faible épaisseur, pourrait introduire des résistances thermiques non négligeables.

VI. B. 3) Essais en limitation de courant du conducteur déposé

Ces essais ont pour but d'observer l'influence de la température de fonctionnement sur une phase de limitation de courant, mais également de valider le principe de mesure de température par sonde déposée sur ce type de conducteur.

VI. B. 3. a) Influence de la température

De précédentes études ont démontré l'importance de l'homogénéité dans la limitation de courant, il est donc nécessaire de travailler à son amélioration. La méthode utilisée dans notre cas est le fonctionnement à température plus élevée, proche de la température critique.

Les essais suivants ont été réalisés pour des températures comprises entre 77 K et 86 K, avec une tension de court-circuit de 2,5 V, soit un champ électrique de 71 V/m aux bornes du ruban.

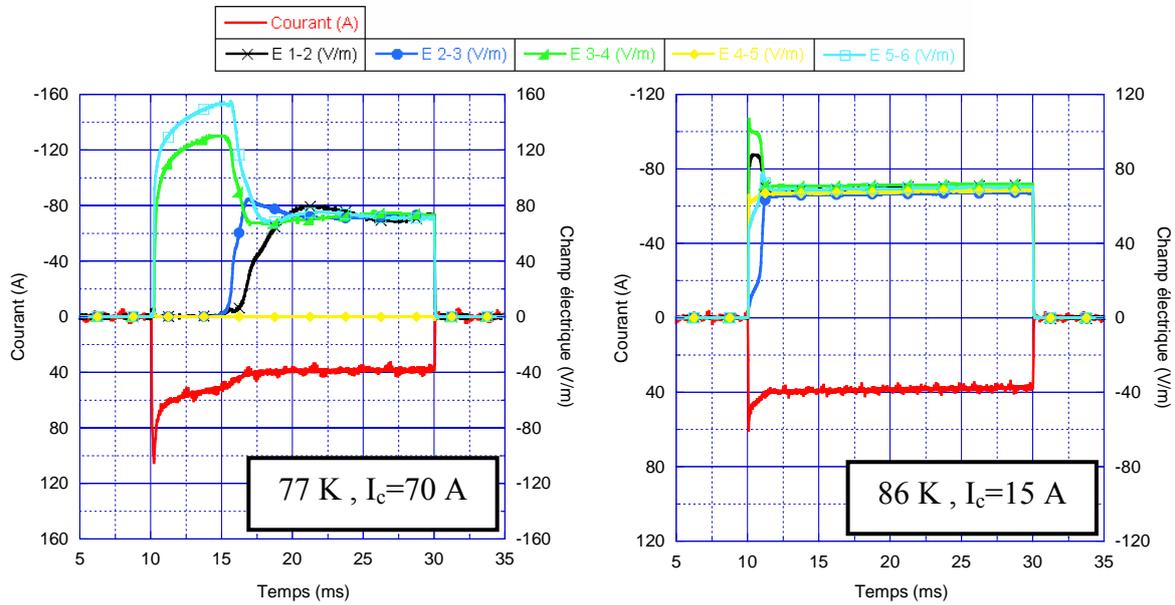


Figure VI.22 : Essais du conducteur déposé à 77 K et 86 K

L'essai à 77 K fait apparaître une transition très inhomogène. En effet, les portions 3-4 et 5-6 ont rapidement participé à la limitation du courant tandis que les parties 1-2 et 2-3 ont transité 5 ms après le court-circuit. Enfin, la portion 4-5 n'a pas transité. Il apparaît également que les parties 1-2 et 2-3 ont transité alors que le courant était inférieur à leur courant critique (70 A). Ceci s'explique par la propagation thermique de la portion 3-4 vers ses zones voisines. Observons enfin un champ électrique maximal égal à deux fois le champ moyen, ce qui permet de conclure à la forte sollicitation de la portion 5-6.

Il apparaît nettement sur l'essai à 86 K une meilleure homogénéité de la transition. Ceci s'exprime par une diminution de 90 % des retards des portions 1-2 et 2-3, mais également la transition de la partie 4-5 qui n'avait pas participé à la limitation de l'essai à 77 K. Notons également une diminution de 30 % du champ électrique maximal. Constatons enfin une diminution de 45 % du courant crête, dont la valeur est déterminée par la résistance de l'échantillon mais également son courant critique.

Nous voyons apparaître dans ces essais l'influence de la propagation thermique qui est moins bonne dans l'incox que dans le saphir, favorisant ainsi l'inhomogénéité des transitions et la création de hot spots. Ces résultats sont intéressants car ils montrent que l'homogénéité des transitions s'améliore lorsque la température de fonctionnement augmente.

Néanmoins, trop augmenter cette température diminue fortement la densité de courant critique du HTS et rend son comportement proche de celui d'un matériau résistif. Il est donc nécessaire de trouver un bon compromis entre les performances en transport de courant d'un supraconducteur et l'écart entre sa température de fonctionnement et sa T_c .

VI. B. 3. b) Mesure de la sonde de température

Pour éviter la destruction du ruban provoquée par des problèmes d'homogénéité, nous réalisons les mesures de température à 86 K sous 2,5 V. Afin d'observer la répartition des puissances dissipées dans certaines portions, nous mesurons la température au dos du ruban, en face des parties 3-4, 4-5 et 5-6 (Figure VI.23).

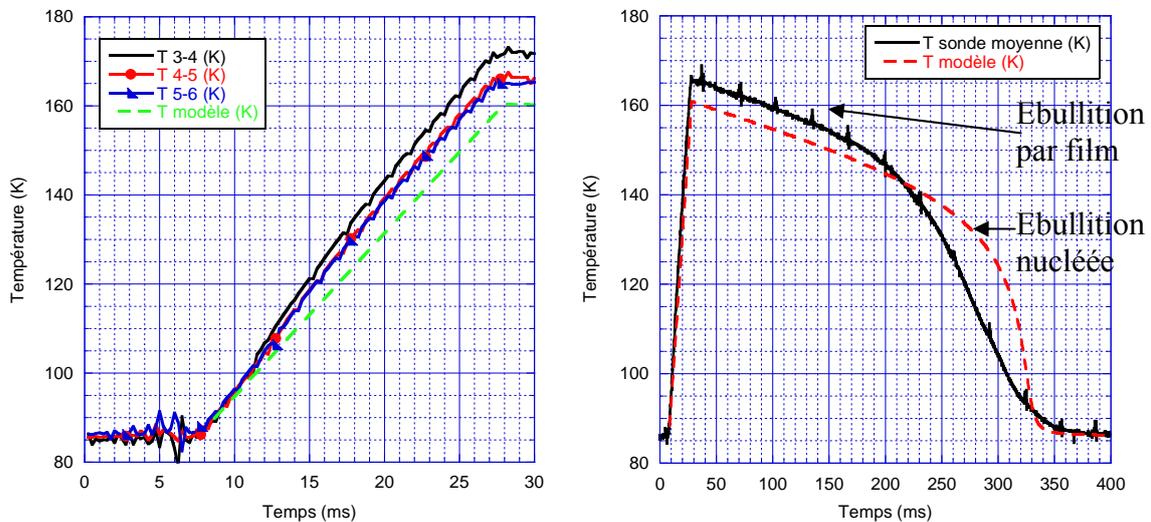


Figure VI.23 : Mesures et calcul des températures sur le conducteur déposé

Observons premièrement que les températures mesurées sont assez homogènes, ce qui s'explique par la petite taille de l'échantillon. La portion 3-4 s'est échauffée de 8 K au dessus des autres, ce qui est en accord avec la Figure VI.22. Il apparaît une bonne corrélation, avec un écart de 7 %, entre la température moyenne et la température calculée à partir du modèle analytique décrit dans le chapitre IV. Ceci peut se justifier par la difficulté d'estimer avec précision la surface d'échange avec l'azote liquide, en effet le support en fibre de verre perturbe ces échanges, notamment aux niveaux des amenées de courant. Constatons également que les dynamiques des modes d'échanges mesurées sont proches de la théorie. Le temps de récupération de 350 ms est assez court et permet d'envisager une rapide reprise du fonctionnement assigné [Ahn07] [Vil05]. Le régime d'ébullition par film dure 200 ms et permet de calculer une puissance moyenne échangée avec le bain d'azote de $1,1 \text{ W/cm}^2$, tandis que le régime d'ébullition nucléée montre une puissance moyenne échangée de

4,5 W/cm². Conformément aux caractéristiques des échanges thermiques avec l'azote liquide décrites dans le chapitre IV I.A), la puissance échangée est bien plus importante dans le régime d'ébullition nucléée, il est donc intéressant de fonctionner en dessous d'une température maximale de 150 K.

Il faut cependant noter que le thermomètre déposé est fragile. En effet la couche de parylène peut se craquer lors de la mise en place des fils de connexion, provoquant un court-circuit entre la sonde et l'échantillon et rendant ainsi les mesures impossibles. Ceci peut également arriver lors de la mise en froid de l'échantillon, quand les contractions thermiques différentielles deviennent trop importantes. En conclusion, malgré les difficultés rencontrées et les précautions à prendre, ces résultats valident le principe de mesure par sonde de cuivre déposée et sont en bonne corrélation avec le modèle analytique.

VI. C) Conducteur déposé long de deux mètres

Les études précédentes ont été réalisées sur des échantillons courts, dans le but d'étudier l'homogénéité et la montée en température. Les résultats obtenus sont encourageants et permettent d'envisager des essais à plus grande échelle. Intéressons nous maintenant à l'étude complète d'un échantillon de conducteur déposé long de deux mètres.

VI. C. 1) Présentation de l'échantillon de deux mètres

VI. C. 1. a) Introduction

L'échantillon testé est un conducteur déposé de la société EHTS (European High Temperature Superconductors). C'est un ruban en acier inoxydable recouvert d'un supraconducteur d'YBaCuO puis d'un shunt en or. Ses dimensions sont données dans le Tableau VI.3.

Longueur	2 m
Largeur	4 mm (3,6 mm pour l'YBaCuO)
Epaisseur du substrat	100 µm
Epaisseur du supraconducteur	1,9 µm
Epaisseur du shunt	250 nm

Tableau VI.3 : Dimensions du conducteur déposé de 2 m

Notons que l'YBaCuO ne recouvre pas toute la largeur de substrat, ainsi le shunt et le substrat sont court-circuités par les bords du ruban (Figure VI.24).



Figure VI.24 : Court-circuit sur les bords du ruban

VI. C. 1. b) Support du conducteur déposé de deux mètres

Pour assurer un bon maintien du ruban, nous l'avons déposé dans une gorge hélicoïdale de 5 mm de large, celle-ci étant usinée sur un mandrin en fibre de verre. Il faut cependant s'assurer que l'inductance générée par cette bobine est négligeable. Les tensions induites lors des forts pics de courant ne doivent pas perturber les mesures et le fonctionnement du limiteur. Le diamètre minimum est imposé par le rayon de courbure limite du ruban (50 mm) tandis que le diamètre maximum est fixé par le cryostat (200 mm). Un calcul d'optimisation de l'inductance a été réalisé entre le nombre de spires et le diamètre du mandrin (Figure VI.25).

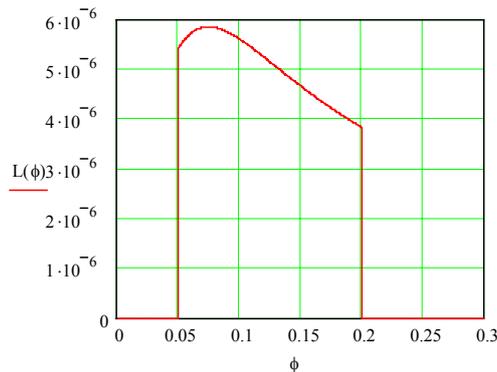


Figure VI.25 : Optimisation de l'inductance en fonction du diamètre du mandrin

Ainsi il est plus intéressant de fabriquer une bobine proche du diamètre maximum autorisé pour diminuer son inductance. Nous avons choisi un mandrin de 132 mm de diamètre, laissant suffisamment d'espace avec la paroi du cryostat pour réaliser les connexions électriques. Pour ce diamètre, l'inductance de la bobine est de 5 μ H et le nombre de spires est compris entre 4 et 5. Les précédents essais ont révélé des di/dt de l'ordre de 500 kA/s soit une tension de 2,5 V avec cette bobine. Cet échantillon sera testé sous une centaine de volts, la surtension créée par la bobine est donc négligeable.

La Figure VI.26 est une vue d'ensemble de l'échantillon sur son support.



Figure VI.26 : Vue d'ensemble de l'échantillon sur son support

Afin d'assurer les connexions entre les sorties du cryostat et l'échantillon, nous avons réalisé une platine (Figure VI.27) assurant de solides amenées de courant ainsi que de nombreuses prises de potentiel le long du ruban. Cette platine est fabriquée à partir d'une plaque d'époxy pour circuit imprimé. Après réalisation d'un masque et gravure, celle-ci à été recouverte d'étain afin de protéger le cuivre, augmenter la valeur du courant transportable et accroître l'effet de masse thermique du dispositif.

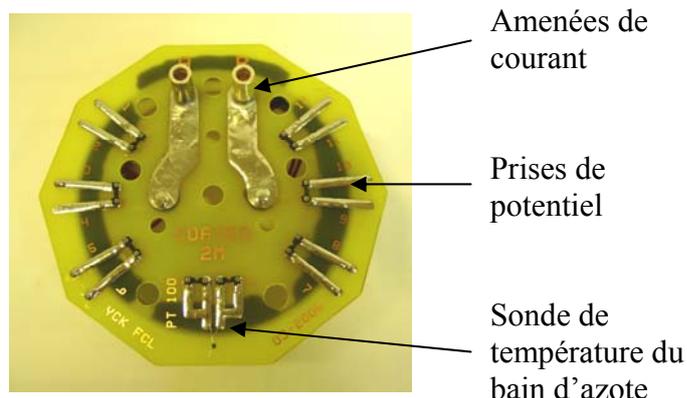


Figure VI.27 : Platine de connexion

Les amenées de courant sont des parties importantes dans la mise en œuvre des supraconducteurs. Elles doivent être les moins résistives possible afin d'éviter tout échauffement et transition involontaire du HTS. La fragilité des conducteurs déposés nous empêchant de souder efficacement, les amenées de courant sont réalisées sur le principe du serrage à l'indium.

Un barreau de ce matériau a été laminé à 1 mm d'épaisseur, puis découpé et placé entre le shunt du ruban et le presseur en cuivre de l'amenée de courant (Figure VI.28).

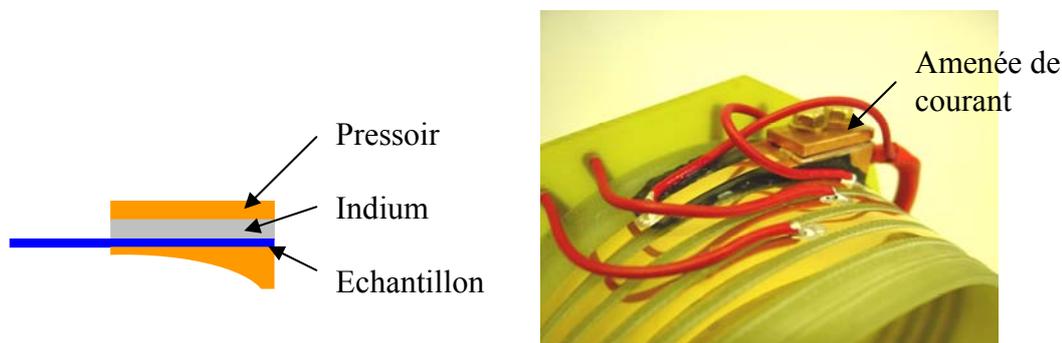


Figure VI.28 : Amenées de courant en indium pressé

Afin de mesurer précisément la répartition et l'évolution des champs électriques le long du ruban, nous avons réalisé 12 prises de potentiel (Figure VI.29).

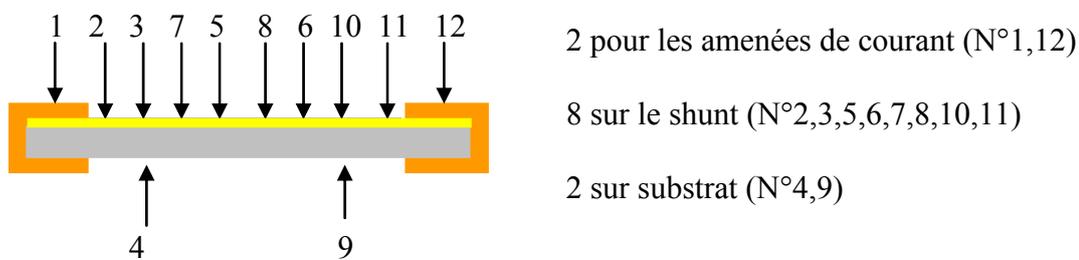


Figure VI.29 : Répartition de prises de potentiel

Les prises de potentiel ont été pré-collées à la cyannolite (colle à prise rapide permettant d'assurer le maintien) puis collées à la laque d'argent pour assurer le contact électrique.

VI. C. 2) Caractérisation de l'échantillon de deux mètres

VI. C. 2. a) Mesure de la résistance de l'échantillon de deux mètres

Lors du remplissage du cryostat, une mesure en continu de la résistance de l'échantillon nous permet de tracer la courbe suivante (Figure VI.30).

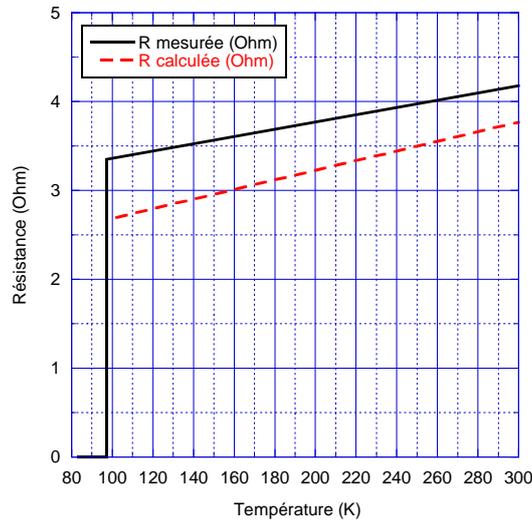


Figure VI.30 : Résistance de l'échantillon en fonction de sa température

Observons un écart moyen de 12 % entre la mesure et le calcul, cette différence est due au manque d'information sur le type d'acier inoxydable utilisé dans le ruban.

VI. C. 2. b) Mesure du courant critique

Le document constructeur donne un courant critique de 47,5 A à 77 K. Pour confirmer cette valeur et obtenir une courbe du courant critique de l'échantillon en fonction de la température, nous avons effectué une mesure de I_c au CRETA (Consortium de Recherche sur l'Emergence des Technologies Avancées). La mesure consiste à alimenter l'échantillon par une rampe de courant paramétrable et de mesurer en temps réel la tension générée par le supraconducteur. Lorsque celle-ci dépasse un certain seuil, l'alimentation est immédiatement coupée. Pour obtenir des résultats exploitables, nous fixons le seuil à deux fois le critère de supraconductivité.

Dans un premier temps nous observons la résistance des amenées de courant (Figure VI.31).

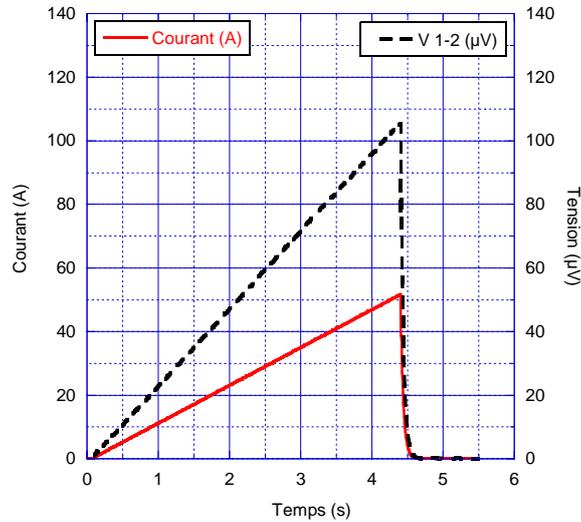


Figure VI.31 : Résistances des amenées de courant

Nous constatons une faible résistance des amenées de courant de $2,1 \mu\Omega$. Ce résultat est bien meilleur que pour l'échantillon sur substrat de saphir car dans ce cas l'indium est pressé et maintenu par les amenées de courant. Ainsi en fonctionnement assigné sous 45 A elles dissipent chacune 4 mW, ce qui est suffisamment faible pour ne pas perturber le fonctionnement du limiteur. Intéressons nous à présent au courant critique à 77 K. Le courant critique total de l'échantillon mesuré à 77 K est donné par la Figure VI.32.

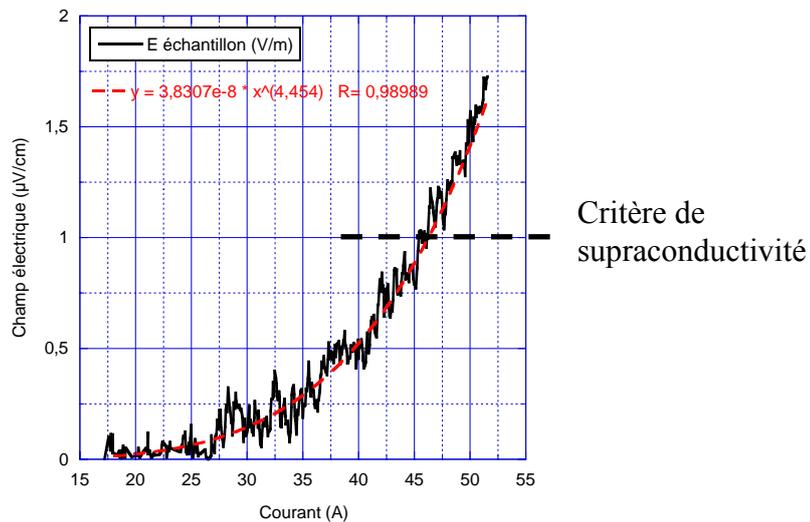


Figure VI.32 : Courant critique total de l'échantillon à 77 K

L'ajustement de la courbe $E(I)$ est le suivant : $E = E_c (I / 46.3)^{4.45}$. Le coefficient $n = 4,45$ est faible par rapport aux valeurs courantes ($n = 15$). Il est possible que nous

n'observons que le départ de la transition et qu'en mesurant des champs plus élevés nous puissions obtenir un coefficient plus important. Notons cependant que le courant critique de 46,3 A est proche de la valeur de 47,5 A annoncée par le fabricant. Une série de mesures identiques réalisées jusqu'à 86 K permet de tracer la Figure VI.33.

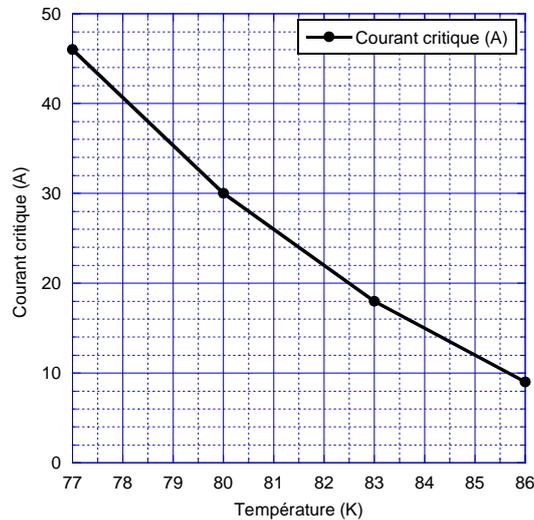


Figure VI.33 : Courant critique en fonction de la température

La caractérisation de l'échantillon décrite ci-dessus nous permet de paramétrer avec précision les essais en court-circuit.

VI. C. 3) Essais en limitation de courant du conducteur de 2 m

VI. C. 3. a) Paramétrage des essais

D'après les précédents essais, il apparaît que la température contribue à homogénéiser les transitions, nous décidons donc de commencer nos essais à 86 K, pour descendre progressivement jusqu'à 77 K. Ceci afin d'éviter la détérioration du conducteur déposé.

L'estimation du courant maximal à 86 K est $3 \times I_c$ soit 28.5 A, or il est important que les amplificateurs de puissance ne perturbent pas la mesure en limitant le courant. Nous fixons la configuration du banc à 40 A sous 100 V. Nous débutons nos essais sous une tension faible de 10 V, puis augmentons jusqu'à 100 V.

Nos premiers essais dureront 10 ms, car dans un premier temps il est important d'étudier le comportement aux premiers instants de la transition et de peu solliciter l'échantillon.

VI. C. 3. b) Essai à 86 K sous 10 V pendant 10 ms

Voici le premier essai réalisé sur l'échantillon (Figure VI.34).

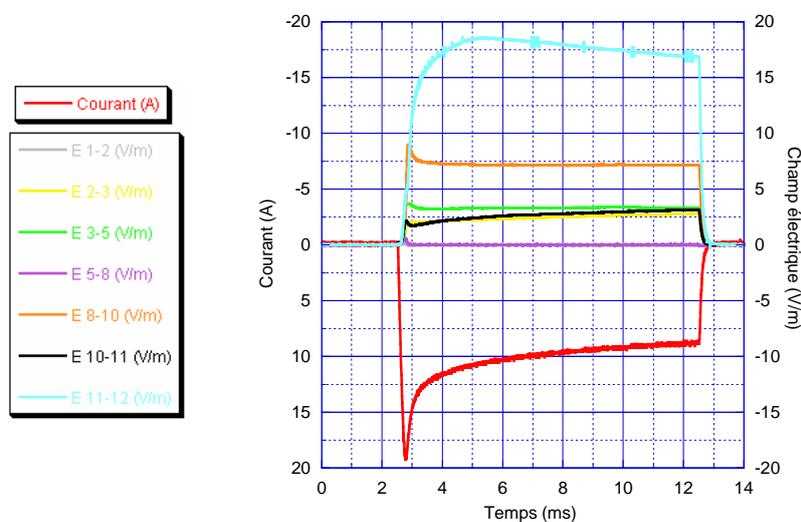


Figure VI.34 : Essai à 86 K sous 10 V pendant 10 ms

Il apparaît une importante inhomogénéité, celle-ci étant due à la faible tension appliquée à l'échantillon. Constatons que la portion 5-8 n'a pas transité alors que le courant la traversant est le double de son courant critique. Ceci peut s'expliquer par une circulation particulière du courant entre deux points ayant transités. Dans cette zone le courant circule essentiellement dans le substrat car ce parcours est favorable à celui passant par le HTS. En effet, ce dernier nécessite le passage du courant par les bords du ruban, dont la résistance n'est pas négligeable à cause de sa faible section. La portion entre les deux zones normales reste donc supraconductrice tant que sa température n'a pas dépassé la T_c (Figure VI.35) [Tix07].

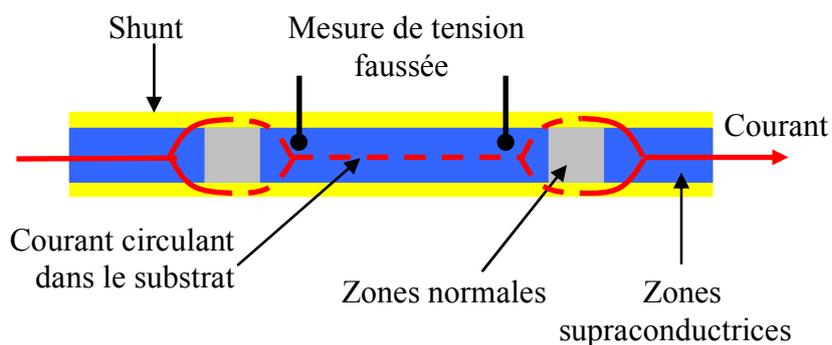


Figure VI.35 : Circulation du courant dans le substrat entre deux zones normales

VI. C. 3. c) Essais à 86 K sous 50V pendant 10 ms

Le deuxième essai consiste à augmenter la tension pour vérifier l'amélioration de l'homogénéité (Figure VI.36).

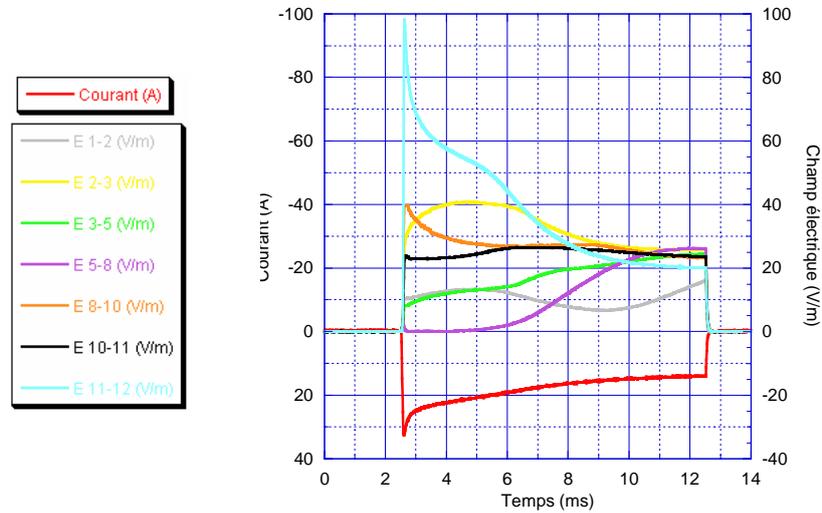


Figure VI.36 : Essai à 86 K sous 50 V pendant 10 ms

Cet essai nous permet d'observer une évolution de l'homogénéité de la transition, en effet durant 5 ms la limitation est totalement inhomogène, la partie [5-8] n'a pas encore participé à la limitation. A la fin de l'essai, les champs électriques présents le long du ruban deviennent relativement proches et la transition s'homogénéise. Nous pouvons conclure que dans ces conditions la transition devient homogène au bout de 10ms, c'est dans ce cas le temps nécessaire pour faire transiter la totalité du ruban.

VI. C. 3. d) Essai à 86 K sous 100 V pendant 10 ms

L'essai à 86 K, pour le niveau maximal de tension du banc d'essais (100 V), soit 50 V/m aux bornes de l'échantillon, est donné par la Figure VI.37.

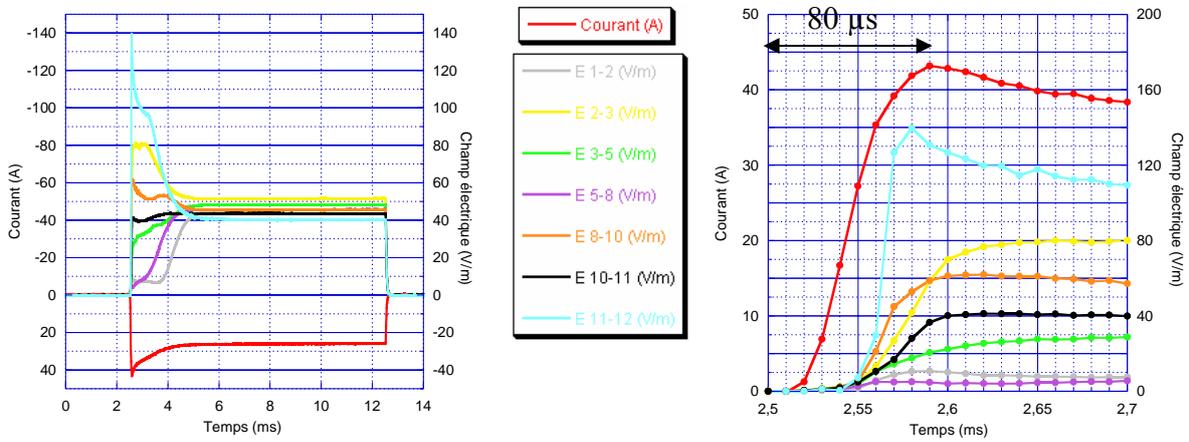


Figure VI.37 : Essai à 86 K sous 100 V pendant 10 ms

Il apparaît que l'homogénéité est atteinte plus rapidement (2,5 ms) que pour l'essai de la Figure VI.36. La limitation de courant est rapide, nous obtenons une valeur maximale du courant de 44 A en 80 μ s soit une montée du courant de 550 A/ms, puis un courant limité stabilisé à 26 A en 2,5 ms. Notons que le champ électrique de la portion 11-12 atteint la valeur de 140 V/m soit 2,8 fois le champ moyen. Cette partie étant constituée d'une amenée de courant, il est possible que celle-ci contribue à la transition du supraconducteur.

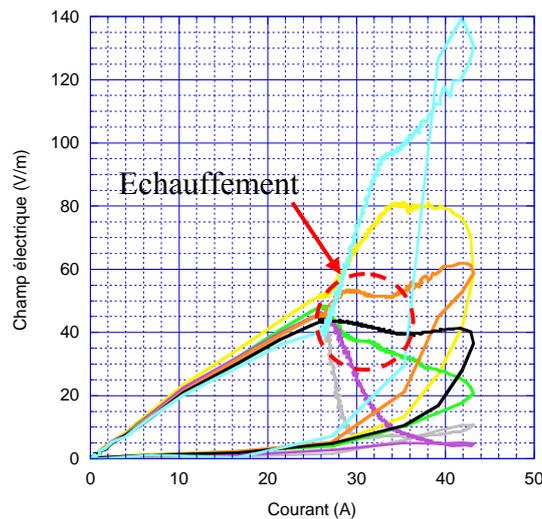


Figure VI.38 : Courbes E(I) de l'essai à 86 K sous 100 V pendant 10 ms

Sur la courbe E(I) il n'apparaît pas d'échauffement important caractérisé par une augmentation linéaire du champ électrique lorsque le courant décroît. En conclusion nous

pouvons dire que l'augmentation de la tension contribue à accélérer l'homogénéisation de la transition, ceci par accroissement de l'effet Joule entraînant une propagation plus importante de la chaleur et donc favorisant la transition du supraconducteur.

VI. C. 3. e) Evolution du courant de limitation

L'évolution du courant crête pour des tensions de court-circuit comprises entre 10 V et 100 V est montrée dans la Figure VI.39.

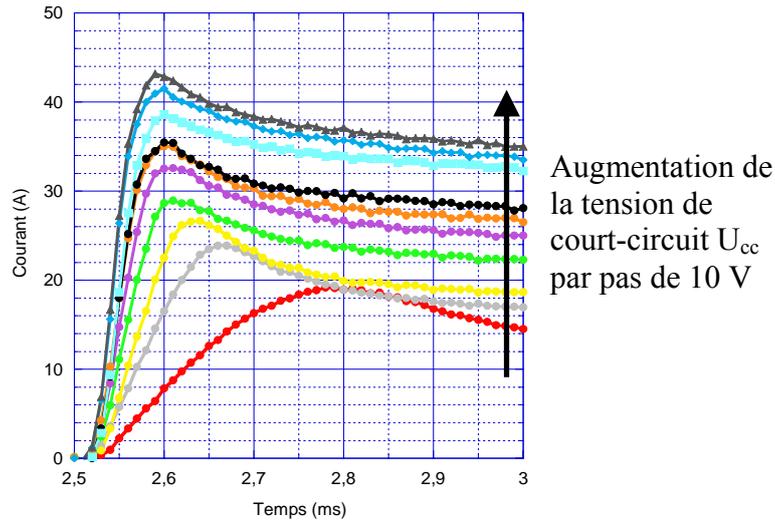


Figure VI.39 : Courants crêtes en fonction de la tension de court-circuit

Ces essais nous permettent de déduire la valeur du courant maximal en fonction de la tension de court-circuit (Figure VI.40).

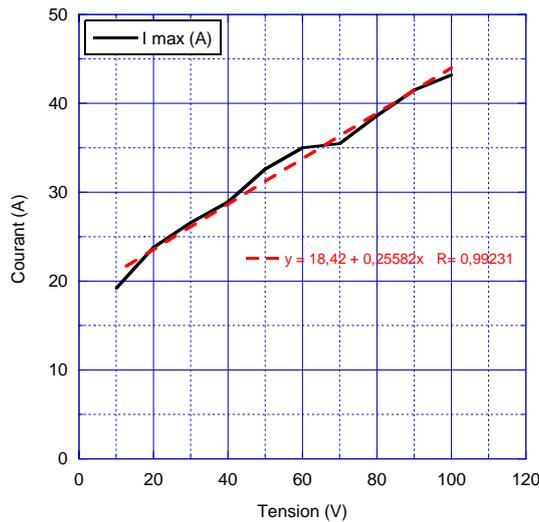


Figure VI.40 : Courant maximal en fonction de la tension de court-circuit

D'après la Figure VI.40, le courant maximal peut s'exprimer sous la forme d'une fonction affine (VI.4).

$$I_{\max} = I_0 + \alpha \times U_{cc} \quad (VI.4)$$

Avec le terme I_0 dépendant du courant critique et le terme $\alpha \times U_{cc}$ représentant un courant défini par une résistance (VI.5).

$$I_{\max} = K \times I_c + I_{\text{resistif}} \quad (VI.5)$$

Nous pouvons ainsi conclure d'après la courbe précédente que $K \times I_c = 18,42$ d'où $K = 1,9$. D'après la loi en puissance $E(I)$, la résistivité équivalente de l'YBaCuO pour un courant de $1,9 \times I_c$ est $\rho_{\text{YBaCuO}} = 1,5 \times 10^{-10} \Omega \cdot \text{m}$. Ceci permet d'expliquer la valeur du courant maximal, car cette résistivité est de l'ordre de grandeur de celle du shunt (Au) à 86 K. Ainsi, à partir de $1,9 \times I_c$ une partie du courant commence à circuler dans le shunt. Intéressons nous maintenant au terme I_{resistif} , ce dernier varie proportionnellement à la tension de court-circuit appliquée : $I_{\text{resistif}} = 0,26 \times U_{CC}$. Ainsi la résistance équivalente est de $3,8 \Omega$ cette valeur correspond à la résistance de l'échantillon à 200 K. Il est donc possible de modéliser les premiers instants d'une phase de limitation de courant par une source de courant en parallèle avec une résistance (Figure VI.41).

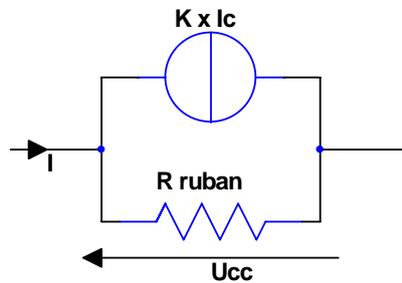


Figure VI.41 : Schéma équivalent du limiteur aux premiers instants de la limitation

Intéressons nous maintenant à la valeur du courant de limitation, celui pour lequel le ruban a entièrement transité.

Nous ne prendrons que les points au dessus de 50 V pour lesquels une transition homogène est observée (Figure VI.42).

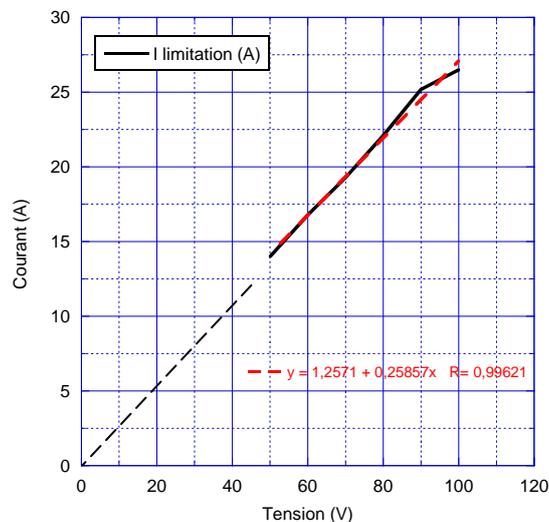


Figure VI.42 : Courant de limitation en fonction de la tension de court-circuit

La courbe du courant de limitation nous permet de conclure à un comportement purement résistif avec une résistance de $3,9 \Omega$, ceci correspond à une circulation du courant dans toute la longueur du ruban à 240 K.

Lorsque le supraconducteur atteint 1,9 fois la valeur de son courant critique, nous observons une phase dans laquelle le shunt se met à conduire. Localement apparaissent des zones où le supraconducteur transite vers son état normal. C'est la progression de ces zones, par propagation thermique de l'échauffement du shunt, qui fait transiter le supraconducteur jusqu'à atteindre la longueur totale du ruban et l'homogénéité, dans laquelle le HTS ne participe plus à la limitation de courant.

A partir des conclusions précédentes, voici le chronogramme d'une phase de limitation de courant (Figure VI.43).

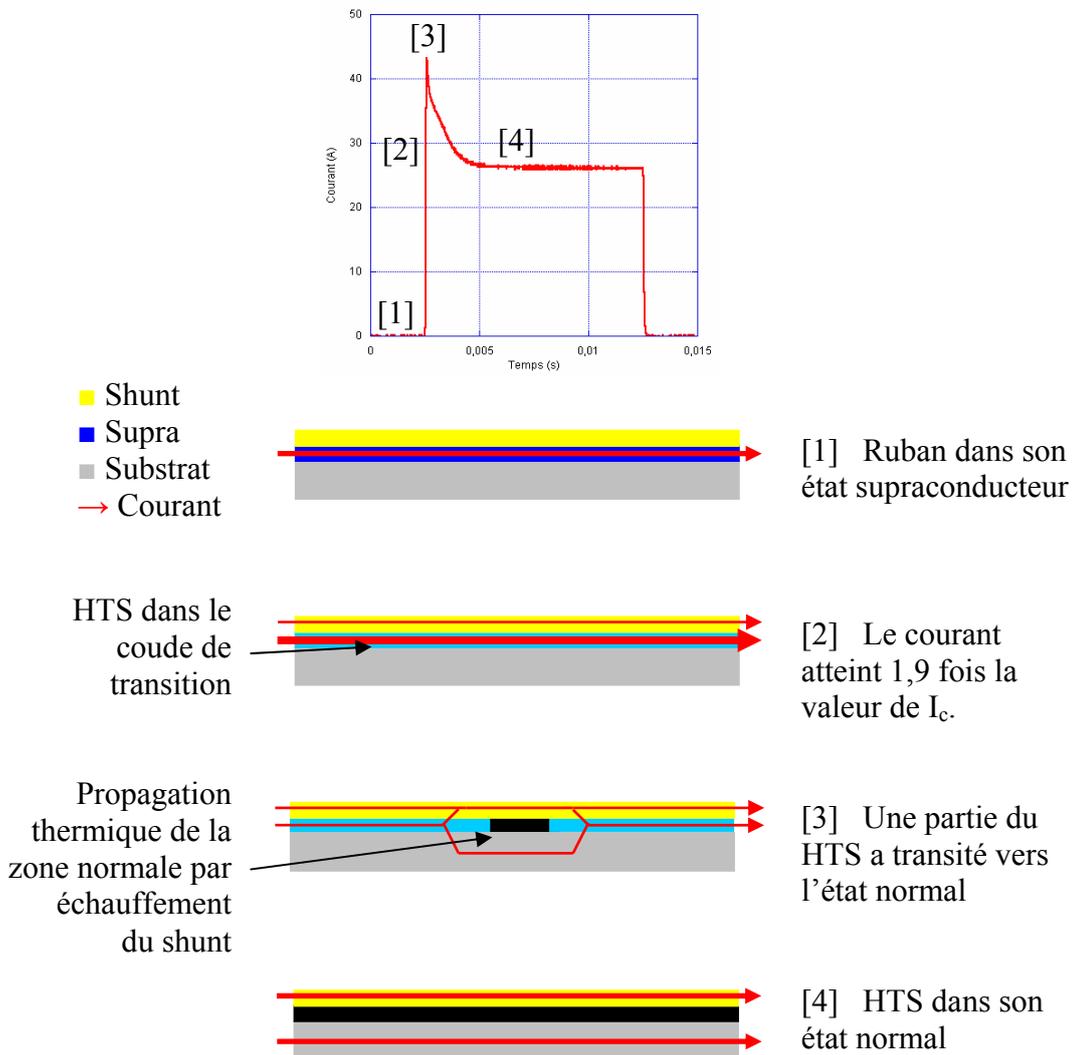


Figure VI.43 : Chronogramme d'une phase de limitation de courant

Constatons au temps [3] du chronogramme que le courant doit d'abord traverser une partie du shunt pour circuler ensuite dans le substrat, en passant par les bords du ruban.

Certaines mesures avaient révélé des incohérences sur la répartition des courants dans les conducteurs déposés lors de la limitation de courant (Figure VI.34). En effet certaines zones semblaient ne pas transiter alors qu'elles étaient parcourues par des courants plusieurs fois supérieurs à leurs I_c . L'explication avancée était que le courant circulait par certains endroits en passant uniquement par le substrat, les prises de potentiel présentent sur le shunt ne permettant donc plus de visualiser la tension ainsi générée. Nous avons ainsi disposé deux

prises de potentiel sur le substrat (4 et 9) en face de deux prises de potentiel sur le shunt (3 et 10) afin de comparer ces tensions (Figure VI.44).

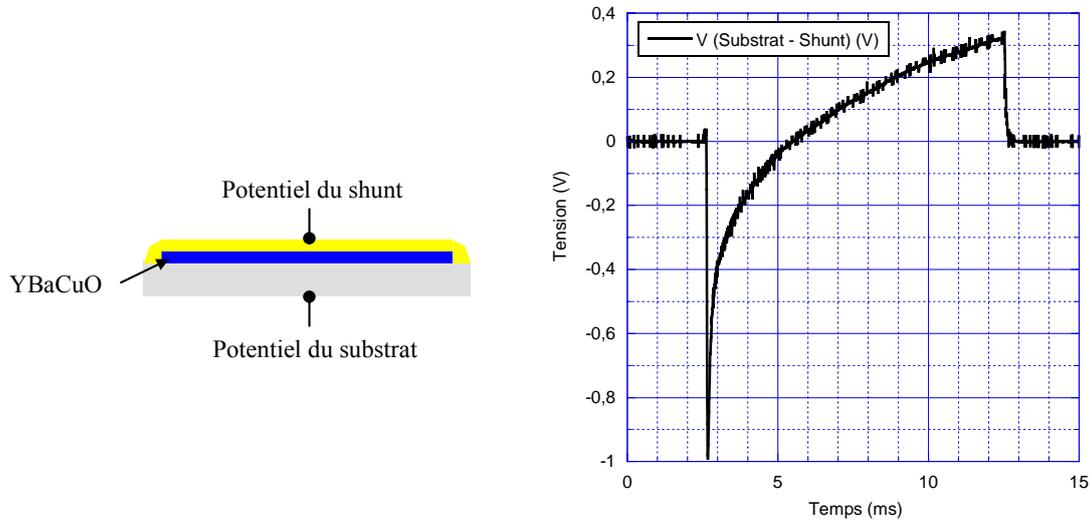


Figure VI.44 : Tension entre le shunt et le substrat

Il n'apparaît pas une importante différence de potentiels entre le shunt et le substrat. Cependant, cette tension d'amplitude proche du volt, prouve l'existence de courants transversaux circulant entre le shunt et le substrat par les bords du ruban. Cette tension change de sens, ce qui signifie que le courant circule dans un premier temps du shunt vers le substrat puis inversement. Ceci est conforme à notre théorie sur la répartition spatiale du courant (Figure VI.35) car dans un premier temps deux zones normales dévient le courant vers le substrat et freine sa circulation intermédiaire dans le supraconducteur et le shunt. Lorsque la totalité de la zone a transité, une partie du courant quitte le substrat pour circuler dans le shunt et le HTS

VI. C. 3. f) Essai à 86 K sous 100 V pendant 150 ms

Cet essai est intéressant car il montre la faisabilité d'un limiteur à partir de conducteurs déposés et pour des niveaux d'énergies importants.

Intéressons nous dans un premier temps aux mesures des potentiels.

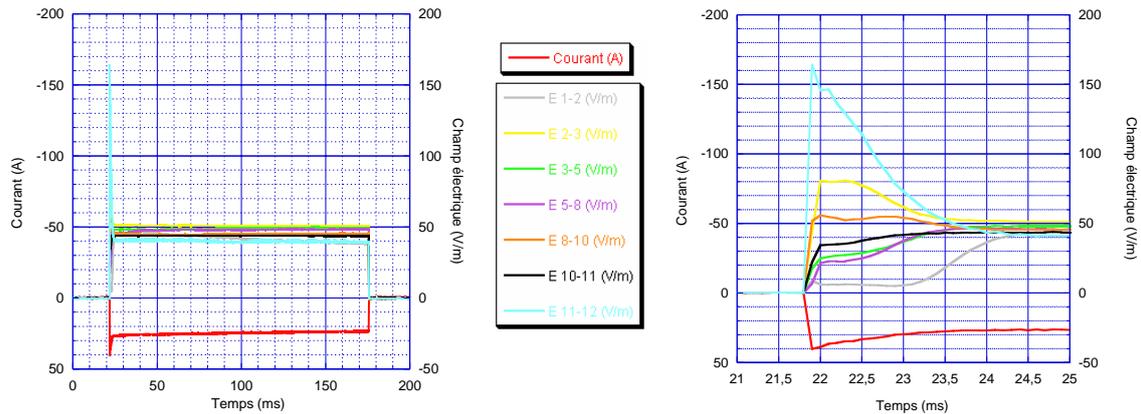


Figure VI.45 : Essai à 86 K sous 100 V pendant 150 ms

Le courant crête est de 41 A pour un champ électrique maximal de 165 V/m, s'homogénéisant rapidement en 2,5 ms. Le courant de limitation est stabilisé à 23 A. Dans le cadre de cet essai, intéressons nous à la puissance linéique moyenne et l'énergie dissipée (Figure VI.46).

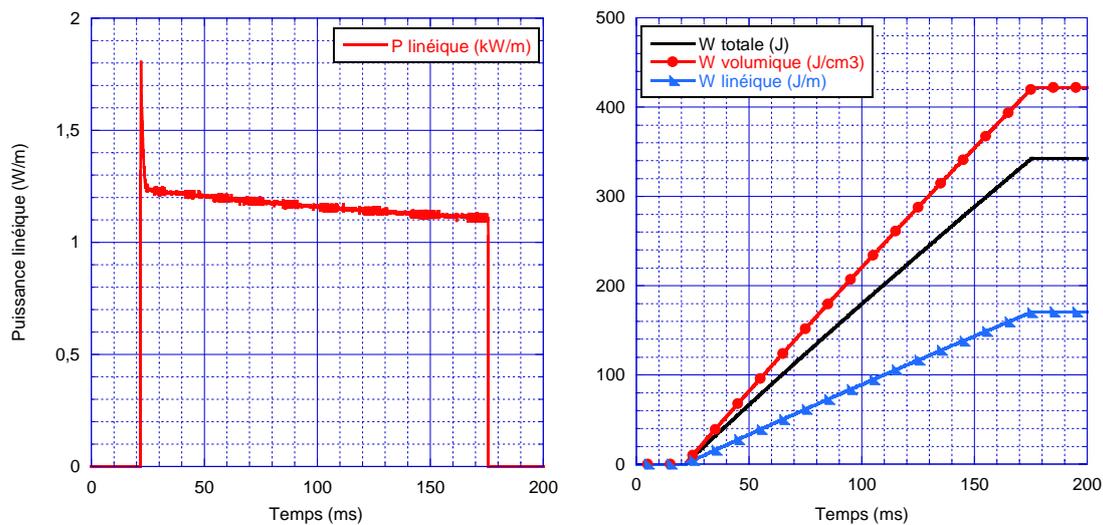


Figure VI.46 : Puissance linéique et énergie dissipées

Les puissances et énergies calculées permettent un dimensionnement du limiteur avec ce type de ruban. Il apparaît une puissance linéique admissible de 1,2 kW/m de ruban, soit une puissance massique maximale de 376 kW/kg de conducteur déposée. L'évolution de la fabrication de ces rubans permet aujourd'hui d'envisager des limiteurs d'une puissance comprise entre 100 kVA et 10 MVA [Cha07] [Oku07]. L'énergie dissipée dans cet échantillon est de 342 J soit 425 J/cm³, ce qui est très important par rapport aux derniers essais de quelques mJ réalisés sur les conducteurs déposées, ces résultats sont très prometteurs.

Observons à présent les températures de l'échantillon pour l'essai à 86 K sous 100 V pendant 150 ms. Comparons la température déduite de la résistance de l'échantillon avec celle calculée à partir de l'énergie, mais également avec la température du hot spot et du modèle théorique décrit dans le chapitre IV (Figure VI.47).

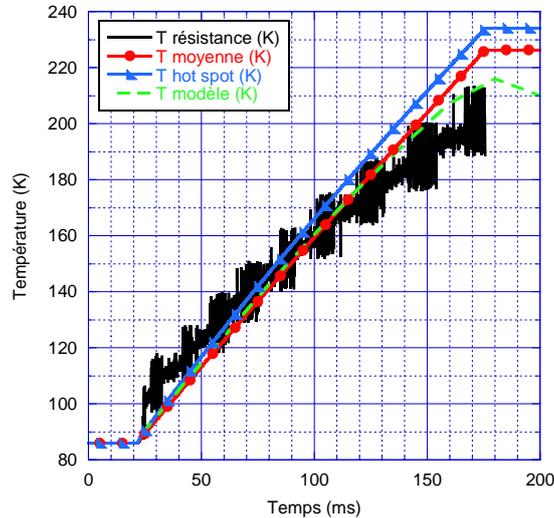


Figure VI.47 : Températures par la résistance, moyenne et du hot spot

Les quatre températures donnent des résultats proches et en accord avec le modèle théorique. L'écart moyen de 4 % entre la température moyenne et celle du hot spot signifie que la transition du ruban est homogène. La montée en température est importante, en effet l'échantillon atteint 230 K avec une montée de 1,5 K/ms, ce qui représente un échauffement rapide et des dilatations thermiques importantes. Il est donc important d'utiliser des matériaux avec une bonne conductivité thermique afin d'éviter les hots spots. Intéressons nous maintenant à la phase de récupération donnée par le modèle analytique (Figure VI.48).

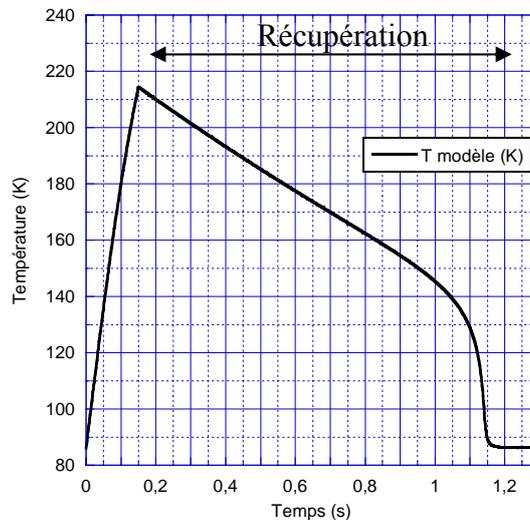


Figure VI.48 : Température analytique de l'essai à 86 K sous 100 V pendant 150 ms

Cette courbe nous permet d'estimer la phase de récupération à 1 seconde. Ce temps est trois fois plus important que le temps de récupération de l'essai sur l'échantillon court (Figure VI.23). Ceci s'explique par la différence des énergies volumiques dissipées, qui dans le cas de l'échantillon de 3,5 cm est de 159 J/cm^3 (Figure VI.22) contre 425 J/cm^3 pour l'échantillon de 2 mètres. Ceci entraîne une montée en température supérieure de l'échantillon long de 62 K, justifiant ainsi l'augmentation du temps de récupération.

VI. C. 3. g) Essai à 84K sous 10 V et 10 ms

Cet essai à malheureusement était destructif, en raison d'un manque d'homogénéité (Figure VI.49):

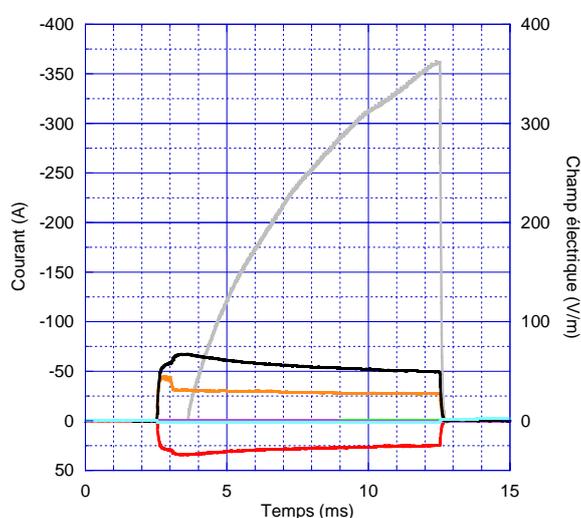


Figure VI.49 : Essai destructif à 84 K

Le champ électrique 1-2 a atteint une importante valeur de 360 V/m, soit plus de 70 fois son champ électrique moyen. Ceci a créé un important hot spot dont la température est montée très haut, détruisant localement le HTS. Voici une photo du ruban montrant la zone détériorée (Figure VI.50).

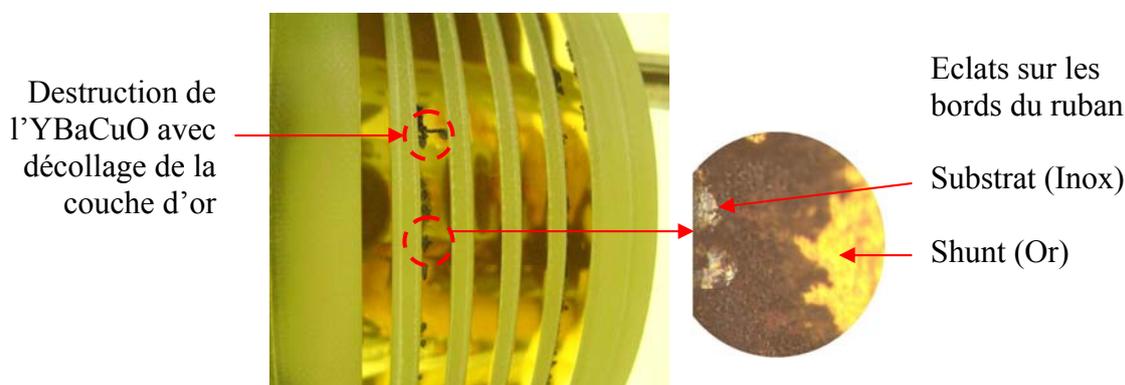


Figure VI.50 : Photo du ruban détérioré après l'essai à 84 K

Nous avons également observé plusieurs éclats répartis sur les cotés du ruban. Ceci confirme notre hypothèse sur le passage du courant par les bords du ruban pour rejoindre le substrat. En ces points, la densité de courant est très importante et entraîne localement de fortes montées en température, détruisant les couches du ruban.

VI. C. 3. h) Etude comparative avec ce type de conducteur déposé

L'étude consiste à observer l'influence de différents paramètres sur les grandeurs électriques et thermiques de ce type de conducteur déposé, en vue d'un dimensionnement pour un futur démonstrateur. Dans un premier temps intéressons nous à l'influence de l'énergie linéique, en effet le modèle analytique du chapitre IV permet de déterminer la température maximale ainsi que le temps de récupération en fonction de l'énergie linéique dissipée dans ce type de ruban (Figure VI.51).

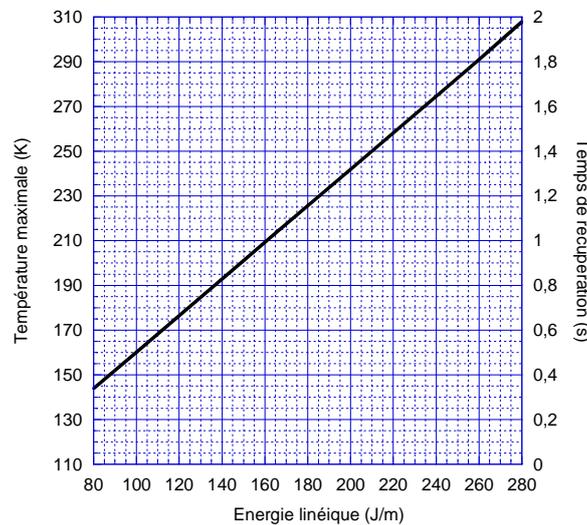


Figure VI.51 : Température max et temps de récupération en fonction de l'énergie linéique

La Figure VI.51 permet d'estimer le temps de récupération en fonction de la température maximale pour un refroidissement dans un bain d'azote liquide. En prenant l'exemple d'un conducteur déposé d'une longueur de 100 m, d'une puissance de court-circuit de 100 kVA et de l'isolement du défaut en 100 ms par un appareil de protection : l'énergie linéique dissipée sera de 100 J/m, la température maximale du ruban sera de 160 K et le temps de récupération du fonctionnement assigné sera de 500 ms. Pour diminuer le temps de récupération il est possible d'augmenter les échanges en utilisant une circulation forcée du liquide cryogénique. Il est également possible de diminuer ce temps en agissant sur la température maximale du ruban. Les précédentes études ont démontré la prédominance du

substrat dans la phase de limitation de courant, intéressons nous à l'influence de son épaisseur sur le courant de limitation et la température maximale du conducteur déposé (Figure VI.52).

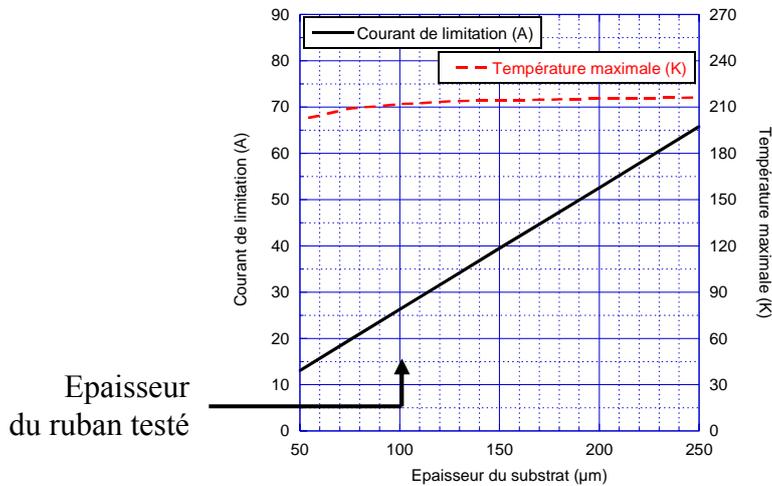


Figure VI.52 : Influence de l'épaisseur du substrat

La Figure VI.52 montre l'influence de l'épaisseur du substrat sur le courant de limitation et la température maximale d'un ruban long de 100 m soumis à une tension de 5 kV (50 V/m). Le courant de limitation varie proportionnellement à l'épaisseur du substrat. En effet, en considérant le substrat comme étant le seul conducteur électrique du ruban durant la phase de limitation, le courant peut s'écrire ainsi (VI.6).

$$U = R \times I \quad \text{et} \quad R = \rho \times \frac{L}{S} \quad \text{d'où} \quad I = \frac{U \times S}{\rho \times L} \quad \text{(VI.6)}$$

- Avec :
- U la tension du court-circuit en V
 - I le courant de limitation en A
 - R la résistance du substrat en Ω
 - ρ la résistivité du substrat en Ω.m
 - S la section du substrat en m²
 - L la longueur du ruban en m

Il apparaît donc sur l'équation (VI.6) que le courant de limitation est proportionnel à l'épaisseur du substrat. Il est donc intéressant de diminuer l'épaisseur afin d'obtenir des courants limités plus faibles. Les courants de limitation de la Figure VI.52 sont faibles (quelques dizaines d'ampères), ce qui confirme l'utilité des limiteurs de courant.

La température maximale du ruban dépend peu de l'épaisseur de son substrat. En effet, en adiabatique et en considérant que seul le substrat dissipe l'énergie du court-circuit, la montée en température se calcule ainsi (VI.7).

$$P = Cp \times Vol \times \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad \text{avec} \quad P = \frac{U^2}{R} \quad \text{et} \quad R = \rho \times \frac{L}{S}$$

$$\text{D'où :} \quad \Delta T = \frac{U^2 \times \Delta t}{\rho \times Cp \times L^2} \quad \text{(VI.7)}$$

Avec : P la puissance dissipée en W
 Cp la chaleur spécifique du substrat en J/m³.K
 Vol le volume du substrat en m³
 ΔT la montée en température moyenne du ruban en K
 Δt la durée du court circuit en s

Il apparaît sur l'équation (VI.7), qu'en adiabatique la montée en température du ruban est indépendante de la section du substrat. Ceci confirme la Figure VI.52 qui montre une faible variation de la température maximale, uniquement dû aux échanges thermiques avec l'azote liquide. Il est donc intéressant de diminuer l'épaisseur du substrat, car ceci n'augmentera pas la température maximale du ruban mais réduira son courant de limitation, ceci permettra d'améliorer les performances du SCFCL.

Cependant, pour assurer un maintien mécanique suffisant, l'épaisseur du substrat ne peut pas facilement être réduite. Intéressons nous à un substrat de 100 μm d'épaisseur et faisons varier sa résistivité pour observer son influence sur le courant de limitation et la température maximale d'un ruban long de 100 m soumis à une tension de 5 kV (50 V/m).

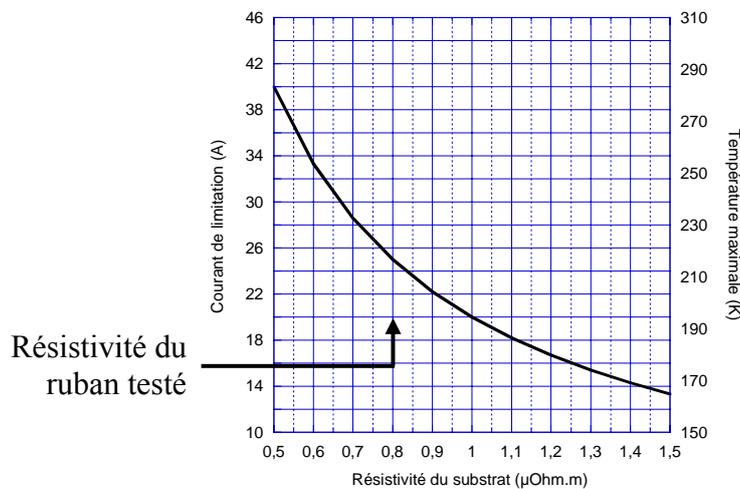


Figure VI.53 : Influence de la résistivité du substrat

Il apparaît sur la Figure VI.53 que le courant de limitation et la température maximale varient en $1/\rho$ (VI.6) et (VI.7). Il est donc intéressant d'utiliser des matériaux ayant des résistivités plus importantes, afin de diminuer le courant de limitation et la température maximale du ruban.

VI. D) Conclusions

En conclusion, nous avons réalisé des essais en limitation de courant sur plusieurs types d'échantillons et pour différents paramétrages de courts-circuits. L'échantillon avec substrat en saphir nous a permis de soulever le premier point important à étudier. En effet, il est apparu nécessaire d'homogénéiser les transitions afin d'optimiser les performances en limitation de courant et de protéger le HTS des hot spots. L'homogénéité est un point clef pour les SCFCL, car pour résister aux énormes contraintes des courts-circuits, l'ensemble du ruban doit rapidement participer à la limitation. De cette optique, nous avons étudié l'influence de la tension de défaut sur l'homogénéité. Il est apparu que la rapidité et l'amplitude de cette tension permettait d'améliorer la répartition des champs électriques et donc l'homogénéité des transitions. Ce résultat paradoxal est intéressant, car il signifie que le limiteur est plus performant lorsque le court-circuit est franc et important, dans les limites d'un échauffement modéré. La spirale nous a également permis de tester un thermomètre particulier, sous forme d'une sonde de cuivre déposée sur l'échantillon. Les mesures effectuées ont donné de bons résultats, conformes à la théorie.

Les conducteurs déposés représentent l'avenir des HTS, il est donc intéressant d'étudier leurs comportements en limitation de courant. L'acier inoxydable utilisé dans les conducteurs déposés est moins bon conducteur thermique que le saphir utilisé pour la spirale. Les hot spots créés lors des transitions inhomogènes deviennent donc plus dangereux pour le HTS. Dans cette optique, l'échantillon court de conducteur déposé nous a permis d'étudier l'homogénéité des transitions en fonction de la température de fonctionnement. Les résultats obtenus sont très concluant car le fonctionnement à quelques Kelvin en dessous la température critique permet d'améliorer fortement l'homogénéité de ses transitions. Nous avons également pu appliquer la mesure de température par sonde déposée à ce type d'échantillon. Les résultats sont conformes à la théorie mais la fragilité de la couche isolante rend son utilisation à basse température difficile.

Ces résultats nous permettent de comprendre les mécanismes d'une transition en phase de limitation de courant. Lorsqu'un défaut apparaît sur le réseau, le courant croît

rapidement et dépasse le courant critique du supraconducteur. Celui-ci transite localement, là où sa densité de courant critique est la plus faible. A partir de cet instant, le courant du réseau décroît car le limiteur est devenu résistif, ainsi le reste du HTS ne peut plus transiter par dépassement de son courant critique. La transition s'homogénéise alors par propagation thermique le long du ruban. Or, en fonctionnant proche de la température critique, l'énergie nécessaire pour élever suffisamment le HTS et provoquer sa transition est plus faible que pour un fonctionnement à 77 K. Cela signifie qu'un fonctionnement proche de la température critique permet d'augmenter considérablement la vitesse de transition et donc d'homogénéiser plus rapidement la limitation.

Ces conclusions nous ont permis de tester l'échantillon de conducteur déposé de deux mètres, afin de mener des essais à plus grande échelle. Un essai réussi en limitation de courant sous 100 V pendant 150 ms a donné des résultats encourageants. Le temps de réponse en limitation de courant est inférieur à 100 μ s, ce qui est assez rapide pour notre application. L'échantillon a dissipé 340 J et sa température a atteint 230 K. L'évolution de la fabrication de ces rubans permet aujourd'hui d'envisager des limiteurs d'une puissance comprise entre 100 kVA et 10 MVA, avec une puissance massique de 300 kW/kg et une énergie linéique de 100 J/m de ruban. Les températures déduites des mesures sont en bonne concordance avec celle du modèle analytique, ceci nous permet de valider nos calculs. L'observation du conducteur déposé après l'essai destructeur à 84 K a confirmé nos hypothèses sur le parcours du courant entre le HTS et le substrat. En effet, des éclats sur les bords du ruban permettent de conclure que le courant passe par le shunt avant de traverser le substrat. Ce passage s'effectue par les bords du ruban, créant localement des densités de courant importantes pouvant chauffer et détruire le supraconducteur.

Une étude comparative sur le substrat, la partie du conducteur déposé ayant un rôle majeur dans la phase de limitation de courant, montre l'intérêt de diminuer son épaisseur et d'utiliser des matériaux plus résistifs. En effet, ceci permet d'une part de réduire le courant de limitation pour améliorer les performances du SCFC et d'autre part d'abaisser la température maximale du ruban et le temps de reprise du régime assigné, diminuant ainsi les contraintes sur le conducteur. Les résultats obtenus sont particulièrement prometteurs pour l'avenir des conducteurs déposés dans les applications de SCFCL.

Références du chapitre VI

- [Ahn07] M.C.Ahn, D.K.Park, S.E.Yang, M.J.Kim, H.M.Chang, Y.S.Yoon, B.Y.Seok, J.W.Park, T.K.Ko, Recovery Characteristics of Resistive SFCL Wound With YBCO Coated Conductor in a Power System, , *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **17** 1859–1862, (2007)
- [Ant07] L.Antognazza, M.Decroux, M.Therasse, M.Abplanalp, J.Duron, B.Dutoit, O.Fischer, Thermally Assisted Transition in Thin Film Based FCL: A Way to Speed Up the Normal Transition Across the Wafer, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **17** 3463–3466, (2007)
- [Ara07] K.Arai, H.Yamasaki, K.Kaiho, M.Furuse, Y.Nakagawa, Temperature Characteristics of Superconducting Thin-Film Fault Current Limiting Elements Using High-Resistivity Alloy Shunt Layers, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **17** 1843-1846, (2007)
- [Bal07] C.A.Baldan, C.Y.Shigue, J.S.Lamas, E.R.Filho, Test Results of a Superconducting Fault Current Limiter Using YBCO Coated Conductor, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **17** 1903-1906, (2007)
- [Cha07] L.Chanjoo, K.Hyoungku, N.Kwanwoo, S.Bok-Yeol, Quench Characteristics of High Temperature Superconducting Coils for Current Limiting Application, Electro-mechanical Research Institute, *Conference on magnet technology*, Philadelphia, (2007)
- [Dec03] M.Decroux, L.Antognazza, S.Reymond, W.Paul, M.Chen, O.Fischer, Studies of YBCO strip lines under voltage pulses: optimization of the design of fault current limiters, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **13** 1988-1991, (2003)
- [Dur07] J.Duron, B.Dutoit, F.Grilli, M.Decroux, L.Antognazza, O.Fischer, Computer Modeling of YBCO Fault Current Limiter Strips Lines in Over-Critical Regime With Temperature Dependent Parameters, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **17** 1839–1842, (2007)
- [Dur05] J.Duron, L.Antognazza, M.Decroux, F.Grilli, S.Stavrev, B.Dutoit, O.Fischer, 3-D finite element Simulations of strip lines in a YBCO/Au fault current limiter, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **15** 1998-2002, (2005)
- [Ich07] Y.Ichiki, H.Ohsaki, Influence of Inhomogeneous Superconducting Properties of YBCO Thin Film on Current Limiting Characteristics, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **17** 1811-1814, (2007)
- [Kat07] K.Kaiho, H.Yamasaki, K.Arai, M.Furuse, T.Manabe, M.Sohma, Study on the Quench Current of YBCO Thin Film FCL, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **17** 1795-1789, (2007)

- [Kim05] H.R.Kim, J.Sim, O.B.Hyum, Temperature distribution in SCFCLs based on Au/YBCO films during quenches, *Elsevier Cryogenics* **46** 305-311, (2005)
- [Nam07] K.Nam, C.Lee, D.K.Park, T.K.Ko, B.Y.Seok, Thermal and Electrical Analysis of Coated Conductor Under AC Over-Current, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **17** 1923-1926, (2007)
- [Nog07] S.Noguchi, T.Tanikawa, H.Igarashi, Operating Property Analysis of Parallelized Resistive Fault Current Limiter Using YBCO Thin Films, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **17** 1835-1838, (2007)
- [Oku07] H.Okubo, C.Kurupakorn, S.Ito, H.Kojima, N.Hayakawa, F.Endo, M.Noé, High-Tc Superconducting Fault Current Limiting Transformer (HTc-SFCLT) With 2G Coated Conductors, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **17** 1768-1771, (2007)
- [Tix05] P.Tixador, C.Villard, Y.Cointe, DC superconducting fault current limiter, *Institute of Physics Supercond. Sci. Technol* **17** S1 - S8, (2005)
- [Tix07] P.Tixador, Y.Cointe, C.Villard, A.Usoskin, Limiting Experiments With Coated Conductors, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **17** 3467-3470, (2007)
- [Vil05] C.Villard, C.Peroz, B.Guinand, P.Tixador, Limitation of DC currents by YBaCuO / Au superconducting films, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **15** 11-16, (2005)

Conclusions et perspectives

La coupure des courants de défaut dans les réseaux DC est un problème mal résolu, freinant ainsi l'essor de ces réseaux. Le développement quasi-instantané et naturel d'un champ électrique important par un supraconducteur au-dessus de son courant critique, ouvre une nouvelle voie innovante pour la limitation de courant. Le champ électrique développé équilibre la tension du réseau et limite le courant à une valeur prédéfinie, permettant d'isoler facilement le défaut. 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. Le limiteur supraconducteur pourrait donc lever le principal inconvénient des réseaux DC que constitue la coupure des courants de défaut.

Dans cette optique, les supraconducteurs de deuxième génération appelés conducteurs déposés semblent être les meilleurs candidats pour la limitation de courant. Ils sont constitués d'un substrat métallique souple recouvert d'une couche tampon sur laquelle est déposé un supraconducteur ReBaCuO puis un shunt protecteur en Or ou Argent.

L'application des conducteurs déposés aux limiteurs de courant nécessite une bonne connaissance des phénomènes physiques régissant leurs fonctionnements. Nous avons développé un modèle analytique tenant compte des paramètres géométriques et physiques de ces matériaux. Nous avons également intégré à notre modèle les échanges thermiques avec l'azote liquide, ce fluide étant utilisé dans le cadre de cette étude. Ce modèle permet notamment de simuler les réponses en courant et les montées en température d'un échantillon pour un essai donné. Ce modèle macroscopique ne permettant pas de calculer les phénomènes de propagation thermique, nous avons utilisé en complément des simulations par éléments finis.

Nous avons ensuite réalisé un banc d'essais en limitation de courant permettant la génération de signaux de puissances complexes et entièrement paramétrables pour une puissance de 4 kVA. Ceci permet d'une part de reproduire le court-circuit d'un réseau, mais

également son régime assigné et la phase de récupération du limiteur. Le montage expérimental est également composé d'une instrumentation cryogénique autonome. Celle-ci permet un fonctionnement à température variable, comprise entre 77 K et 86 K, dans un cryostat régulé en pression.

Nous avons également déposé sur le conducteur un fin méandre de cuivre constituant une sonde de température. Ce thermomètre permet de mesurer la température dynamique du ruban avec une bande passante de 500 Hz et une précision de l'ordre du Kelvin, suffisante pour nos essais. Cependant, la fragilité de la couche de parylène servant d'isolation électrique entre le substrat et la sonde, rend son utilisation à basse température délicate.

Notre étude permet de comprendre les mécanismes d'une phase de limitation du courant par conducteurs déposés. Lorsqu'un défaut apparaît sur le réseau, le courant croît rapidement et dépasse le courant critique du supraconducteur. Celui-ci transite localement, là où sa densité de courant critique est la plus faible. A partir de cet instant, le courant du réseau décroît car le limiteur est devenu résistif, ainsi le reste du supraconducteur ne peut plus transiter par dépassement de son courant critique. La transition s'homogénéise alors par propagation thermique le long du ruban. Il est donc nécessaire d'améliorer l'homogénéité des transitions afin d'optimiser les performances en limitation de courant et de protéger le supraconducteur des hots spots. Pour répondre à cette problématique, nous avons décidé de fonctionner avec une température de 86 K, proche de la T_C de 89 K du HTS. En effet, l'énergie nécessaire pour élever suffisamment la température du supraconducteur et provoquer sa transition diminue lorsque la température assignée se rapproche de la T_C . Cela signifie qu'un fonctionnement proche de la température critique permet d'augmenter considérablement la vitesse de propagation de la transition et donc d'homogénéiser plus rapidement la limitation.

Nos mesures électriques et thermiques sont en bonne corrélation avec notre modèle analytique et donnent des résultats importants. En régime assigné le courant circule uniquement dans le supraconducteur, tandis qu'en régime de défaut il circule essentiellement dans le substrat à cause de la résistivité et de l'importante section de l'inox. Le temps de réponse du limiteur pour un court-circuit est inférieur à 100 μ s, ce qui est assez rapide pour notre application. Nos essais ont montré la capacité de ces conducteurs à supporter des champs électriques de 50 V/m pendant 150 ms, en dissipant 425 J/cm³ soit une puissance massique maximale de 376 kW/kg et une puissance linéique maximale de 1,2 kW/m. Durant la phase de limitation de courant, le SCFCL peut être considéré comme un système

adiabatique. En effet, les faibles échanges thermiques avec l'azote liquide s'effectuent essentiellement selon un régime d'ébullition par film et sont de l'ordre du W/cm^2 . Ces échanges sont donc négligeables face à la montée en température provoquée par la forte puissance du court-circuit. Il est évidemment important d'accroître les surfaces d'échange avec l'azote liquide, afin de favoriser la dissipation thermique et diminuer le temps de récupération nécessaire à la reprise du régime assigné. Notre étude a montré qu'un temps de récupération proche de 300 ms peut être obtenu pour une température maximale en fin de limitation de courant de 140 K.

Notre étude comparative sur le substrat, la partie du conducteur déposé ayant un rôle majeur dans la phase de limitation de courant, montre l'intérêt de diminuer son épaisseur et d'utiliser des matériaux plus résistifs. En effet, ceci permet d'une part de réduire le courant de limitation pour améliorer les performances du SCFCL et d'autre part d'abaisser la température maximale du ruban et le temps de reprise du régime assigné, diminuant ainsi les contraintes sur le conducteur. L'architecture du conducteur déposé est donc essentielle, notons que celle de l'échantillon testé n'est pas bien adaptée à la limitation de courant. En effet, outre ses dimensions et les propriétés physiques de l'inox, d'importants courants circulent entre le shunt et le substrat par les bords du ruban, détruisant localement les dépôts. Actuellement, un conducteur de la société American Superconductor long de dix mètres est en phase d'essais en limitation de courant. Il possède une architecture différente, dans laquelle le conducteur déposé est entouré de deux rubans d'inox par l'intermédiaire d'une couche d'étain.

L'évolution de la fabrication des conducteurs déposés permet aujourd'hui d'envisager des limiteurs d'une puissance comprise entre 100 kVA et 10 MVA. Ainsi dans le cadre d'une première mondiale, le prototype Hyundai Heavy Industries de 8,3 MVA (13,2 kV - 630 A) à base de conducteurs déposés, a été réalisé et testé avec succès en décembre 2006. Nos résultats sur l'application des conducteurs déposés dans les limiteurs de courant sont particulièrement encourageants et permettent d'envisager la réalisation d'un démonstrateur.

LIMITEUR SUPRACONDUCTEUR DE COURANT CONTINU

Résumé

Dans le cadre de la libéralisation du marché de l'énergie électrique, les réseaux DC offrent de nombreux avantages par rapport aux réseaux alternatifs, mais leurs protections nécessitent l'utilisation de nouveaux appareils.

Les limiteurs supraconducteurs de courant permettent, par le dépassement d'un courant critique, de limiter le courant de défaut à une valeur prédéfinie, inférieure à la valeur théorique du court-circuit. Les conducteurs déposés offrent d'excellentes perspectives pour ces applications. Nous avons ainsi travaillé sur la mise en œuvre de ces matériaux et réalisé un banc de mesures. Des essais en limitation de courant ont été réalisés afin d'étudier l'homogénéité des transitions pour différents paramètres de court-circuit. Un point important est la mesure de température par des sondes déposées directement sur le ruban, donnant des résultats conformes aux modèles théoriques.

Nos essais ont confirmé l'amélioration des transitions pour les fonctionnements proches de la température critique. Nos résultats permettent de mieux comprendre les mécanismes de la limitation de courant par des conducteurs déposés.

Mots clés

Réseau DC, Limiteur de courant de défaut, Supraconductivité, Conducteur déposé, Homogénéité de transition, Sonde de température, Cryogénie.

SUPERCONDUCTING DC FAULT CURRENT LIMITER

Abstract

Within the framework of the electric power market liberalization, DC networks have many interests compared to alternative ones, but their protections need to use new systems.

Superconducting fault current limiters enable by an overstepping of the critical current to limit the fault current to a preset value, lower than the theoretical short-circuit current. For these applications, coated conductors offer excellent opportunities. We worked on the implementation of these materials and built a test bench. We carried out limiting experiments to estimate the quench homogeneity at various short-circuit parameters. An important point is the temperature measurement by deposited sensors on the ribbon, results are in good correlation with the theoretical models.

Improved quench behaviours for temperatures close to the critical temperature have been confirmed. Our results enable to better understand the limitation mechanisms of coated conductors.

Keywords

DC network, Fault current limiter, Superconductivity, Coated conductor, Quench homogeneity, Temperature sensor, Cryogenics.