

Titre: Vitesse de propagation de la zone normale dans des empilements de rubans supraconducteurs à haute température critique
Title: Speed of propagation of the normal zone in superconducting tape stacks at critical temperature

Auteur: Thomas Leduc
Author:

Date: 2024

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Leduc, T. (2024). Vitesse de propagation de la zone normale dans des empilements de rubans supraconducteurs à haute température critique [Master's thesis, Polytechnique Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/59209/>
Citation:

Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/59209/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Frédéric Sirois
Advisors:

Programme: Génie électrique
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Vitesse de propagation de la zone normale dans des empilements de rubans supraconducteurs à haute température critique

THOMAS LEDUC

Département de génie électrique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise en sciences appliquées*
Génie électrique

Août 2024

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Vitesse de propagation de la zone normale dans des empilements de rubans supraconducteurs à haute température critique

présenté par **Thomas LEDUC**
en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise en sciences appliquées*
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

David MÉNARD, président
Frédéric SIROIS, membre et directeur de recherche
Pascal TIXADOR, membre externe

REMERCIEMENTS

À mes parents, Alain et Danielle, et à mon frère, Benjamin pour leur soutien inébranlable et leur amour inconditionnel, qui m'ont permis de réaliser mes objectifs.

À mes amis, pour leur encouragement et leur patience tout au long de ce parcours. À tous qui m'ont assisté pendant la rédaction de ce mémoire en travaillant à mes côtés.

À mes professeurs et mentors, pour leur accompagnement et leur inspiration, spécialement à Frédéric Sirois et Christian Lacroix, qui m'ont aidé tout au long de ce voyage sans jamais perdre confiance en moi. Ils étaient toujours disponibles pour répondre à mes questions et me guider dans les travaux plus complexes. Lorsque je suis arrivé en stage en 2019, ils m'ont tous les deux très bien accueilli et ont créé un environnement de travail agréable et organisé à travers leur équipe de laboratoire. Ils savent très bien encadrer leur équipe de travail et sont des meneurs adroits. Leur temps investi pour ma réussite est immense et j'en suis très reconnaissant. Je voudrais également remercier mes collègues de laboratoire, principalement Maxime Moreau, Jaël Giguère et Haifa Ben-Saad pour leur soutien et leurs rires, rendant ce projet engageant et plaisant. Haifa a passé un nombre innombrable d'heures à la fabrication des échantillons supraconducteurs, sans compter le temps investi à remplir la bonbonne d'azote qui était toujours vide. Je voudrais donc la remercier.

Je voudrais remercier les organismes CRSNG et FRQNT de m'avoir accordé leur support en finançant mon projet par l'entremise du programme BESC-M et du programme de bourse à la maîtrise B1X.

Finalement, je voudrais remercier les membres du jury d'avoir accepté de lire mon mémoire : David Ménard et Pascal Tixador.

Vous m'avez tous conduit vers la réussite de ce mémoire et je vous en serez éternellement reconnaissant.

RÉSUMÉ

Ces dernières années, des avancées technologiques dans le domaine des rubans supraconducteurs à haute température critique (HTS) ont permis d'améliorer leur robustesse et leur qualité. En ce sens, la recherche se tourne vers le développement de systèmes demandant des arrangements complexes de ces rubans tels des câbles supraconducteurs et des électro-aimants à fort champ magnétique. Ces systèmes de plus en plus complexes nécessitent toutefois une maîtrise grandissante des propriétés supraconductrices des rubans. En effet, ceux-ci restent encore très vulnérables quant à l'apparition de points chauds. Ces points constituent des régions du ruban ayant abruptement perdu leur supraconductivité à cause, par exemple d'un défaut dans le courant critique. Si ces points chauds ne sont pas détectés et contrôlés rapidement, ils peuvent générer une chaleur remarquable en une fraction de seconde menant à la dégradation complète de l'empilement supraconducteur.

L'augmentation de la vitesse de propagation de la zone normale (NZPV) est une approche qui permet d'améliorer la détection des points chauds. Cette vitesse, relativement faible pour les supraconducteurs à haute température critique, peut être augmentée à l'aide de l'architecture *current flow diverter* (CFD) développée dans le laboratoire du prof. Sirois. Celle-ci permet d'augmenter drastiquement la NZPV sans nuire aux propriétés supraconductrices des rubans. De fait, l'architecture CFD modifie la résistance de l'interface entre la couche supraconductrice du ruban et la couche de stabilisateur. L'équipe du Prof. Sirois a montré que cette architecture est efficace quant à l'augmentation de la NZPV dans un ruban. Toutefois, il est primordial de démontrer le fonctionnement de l'architecture CFD dans des systèmes complexes de rubans supraconducteurs.

Ce projet a permis de tester cette architecture sur des empilements de deux et de quatre rubans supraconducteurs pour différents types d'empilements. Les types d'empilements sont les suivants : un empilement conventionnel, un empilement où les couches supraconductrices sont mises face à face et un empilement mixte où un ruban régulier est combiné avec un ruban CFD. Les mesures expérimentales utilisent des rubans de REBCO de la compagnie SuperPower Inc. d'une largeur de 4 mm. Les résultats des expérimentations démontrent que l'architecture CFD ne perd pas ses propriétés dans les empilements étudiés. Par contre, l'empilement mixte de type face à face affiche une plus faible NZPV que l'empilement conventionnel. Finalement, une modélisation par éléments finis des empilements est réalisée par COMSOL Multiphysics pour corroborer les résultats obtenus expérimentalement.

ABSTRACT

In recent years, major technological breakthroughs in the field of High Temperature Superconducting (HTS) tapes have led to improvements in their stability and quality. In this sense, research is focusing on the development of systems requiring complex arrangements of these tapes, such as superconducting cables and high-field electromagnets. These increasingly complex systems, however, require growing management of the superconducting properties of the tapes. In fact, they remain highly vulnerable to the appearance of hot spots. These are regions of the tape that have abruptly lost their superconductivity due to a defect in the critical current. If these hot spots are not detected and controlled quickly, they can generate remarkable heat in a fraction of a second, leading to complete degradation of the superconducting stack.

Increasing the normal zone propagation velocity (NZPV) is one approach to improving hot-spot detection. This velocity, which is relatively low for high-temperature superconductors, can be increased using the current flow diverter (CFD) architecture developed in Prof. Sirois' laboratory. This makes it possible to drastically increase the NZPV without impairing the superconducting properties of the tapes. In fact, the CFD architecture modifies the resistance of the interface between the tape's superconducting layer and the stabilizer layer. Prof. Sirois' team has shown that this architecture is effective in increasing the NZPV in a tape. However, it is essential to demonstrate how the CFD architecture works in complex superconducting tapes systems.

This project tested this architecture on superconducting stacks of two and four tapes for different types of stacking. The stack types are: a conventional stack, a face-to-face stack where the superconducting layers are put face-to-face, and a mixed stack where a regular tape is put with a CFD tape. Experimental measurements use 4 mm wide REBCO tapes from SuperPower Inc. The normal zone is initiated by a magnet, and the NZPV is calculated using voltage measurements. Experimental results show that the CFD architecture does not lose its properties in the stacks studied. However, the mixed face-to-face stack exhibits a lower NZPV than the conventional stack. Finally, COMSOL Multiphysics finite element modeling of the stacks was carried out to corroborate the experimental results.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iii
RÉSUMÉ	iv
ABSTRACT	v
TABLE DES MATIÈRES	vi
LISTE DES TABLEAUX	ix
LISTE DES FIGURES	x
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xii
 CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Mise en contexte	1
1.2 Problématique	2
1.3 Objectif	2
1.4 Organisation du mémoire	3
 CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE SUR LES RUBANS SUPRACONDUC-	
TEURS	4
2.1 Propriétés physiques des supraconducteurs	4
2.1.1 Résistivité nulle	4
2.1.2 Effet Meissner-Ochsenfeld et expulsion du champ magnétique	4
2.1.3 Courant critique et champ magnétique critique	5
2.1.4 Dépendance du courant critique aux contraintes mécaniques	6
2.2 Types de supraconducteurs	7
2.2.1 Supraconducteurs à basse et haute température critique	7
2.2.2 Supraconducteurs de type I et de types II	7
2.2.3 Type de fils supraconducteurs	8
2.2.4 Rubans supraconducteurs à haute température critique de seconde génération	8
2.2.5 Architecture CFD	10
2.3 Empilements de rubans supraconducteurs	12

2.3.1	Empilement face à face	12
2.3.2	Diminution du courant critique dans un empilement de rubans	13
2.3.3	Soudure des contacts de rubans HTS	13
2.4	Techniques d'étude et de caractérisation	14
2.4.1	Vitesse de propagation de la zone normale (NZPV)	14
2.4.2	Détection de points chauds et mesure de la NZPV par stress mécanique	15
2.4.3	Mesure de la NZPV par courant électrique	16
2.4.4	NZPV dans les empilements de rubans supraconducteurs	16
2.5	Modélisation de rubans supraconducteurs	17
2.5.1	Types de modèles	17
2.5.2	Initiation de la zone normale	19
2.6	Applications des supraconducteurs	19
2.6.1	Applications actuelles et potentielles dans divers domaines	19
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE		21
3.1	Fabrication des rubans supraconducteurs	21
3.1.1	Fabrication d'échantillon CFD	21
3.1.2	Électrodéposition des contacts	23
3.1.3	Mesures de l'épaisseur d'argent	25
3.2	Caractérisation des rubans supraconducteurs	25
3.2.1	Circuits imprimés pour les mesures expérimentales	25
3.2.2	Contacts et support pour les mesures expérimentales	26
3.2.3	Empilement des rubans supraconducteurs	28
3.2.4	Source de courant	28
3.2.5	Mesures Courbes E - I	29
3.2.6	<i>Base Line method</i>	31
3.2.7	Mesures R vs T	32
3.3	Mesures expérimentales de la NZPV	33
3.3.1	Analyse d'erreur	33
3.4	Modélisation et simulation des rubans supraconducteurs	34
3.4.1	Physiques utilisées	35
3.4.2	Modélisation du défaut	37
3.4.3	Géométrie	37
3.4.4	Maillage	38
3.4.5	Méthode de résolution des équations	38

CHAPITRE 4 RÉSULTATS DES MESURES SUR DES EMPILEMENTS DE RU-	
BANS SUPRACONDUCTEURS	39
4.1 Mesures R vs T	39
4.2 Acquisition des données brutes	40
4.2.1 Données pour les courbes en tension	40
4.2.2 Données pour la NZPV	42
4.3 Courbes <i>I-V</i>	44
4.4 Mesures de la NZPV d'empilements de rubans supraconducteurs	48
4.4.1 Résultats expérimentaux d'empilements BtoF	48
4.4.2 Résultats expérimentaux d'empilements mixtes	50
4.4.3 Résultats expérimentaux de types d'empilement FtoF	51
4.4.4 Simulations de la NZPV de type d'empilement BtoF	53
4.4.5 Simulations de la NZPV de type d'empilement FtoF	57
4.4.6 Retour sur les mesures de la NZPV	59
CHAPITRE 5 CONCLUSION	60
5.1 Synthèse des travaux	60
5.2 Limitations de la solution proposée	61
5.3 Améliorations futures	61
RÉFÉRENCES	63

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1	Courant critique I_c et exposant de la loi de puissance n pour différents types d'empilement	46
-------------	--	----

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Paramètres critiques d'un supraconducteur	5
Figure 2.2	Section d'un ruban HTS	6
Figure 2.3	Architecture d'un ruban HTS	9
Figure 2.4	Variation du I_c selon l'angle du champ magnétique	10
Figure 2.5	Génération de la chaleur dans un ruban régulier et CFD	11
Figure 2.6	Direction du courant dans un CFD	12
Figure 2.7	Variation typique du I_c selon la longueur d'un ruban REBCO de 12 mm de large à 77 K. [1]	14
Figure 3.1	Ruban supraconducteur régulier	21
Figure 3.2	Section d'un ruban d'architecture CFD	22
Figure 3.3	Échantillons CFD pour les mesures de la NZPV	24
Figure 3.4	PCB pour les mesures de courbes E - I et de NZPV	26
Figure 3.5	Montage expérimental d'empilement de deux rubans pour les mesures de NZPV	27
Figure 3.6	Contact en escalier des empilements de rubans	27
Figure 3.7	Système de mesures pour les courbes NZPV	28
Figure 3.8	Schéma d'un empilement BtoF et FtoF	29
Figure 3.9	Système de mesures expérimentales	30
Figure 3.10	<i>Base Line method</i> pour obtenir des valeurs de I_c et n	32
Figure 3.11	Mesure 4 pointes	32
Figure 3.12	Courbes de mesures de voltage pendant un pulse de courant	34
Figure 3.13	Modélisation du quart de l'empilement de rubans, soit la région représentée en vert.	37
Figure 4.1	Courbe de la résistance d'un ruban supraconducteur selon la température	40
Figure 4.2	Données brutes pour la mesure des courbes E - I	41
Figure 4.3	Données brutes pour une mesure NZPV	42
Figure 4.4	Agrandissement des données brutes pour une mesure NZPV	43
Figure 4.5	Courbe E - I de différents rubans	45
Figure 4.6	Courbe E - I d'un empilement de quatre rubans réguliers et de quatre rubans CFD	46
Figure 4.7	Courbe E - I des différents types d'empilements de deux rubans supraconducteurs	47
Figure 4.8	NZPV d'un ruban régulier et d'un ruban CFD	49

Figure 4.9	NZPV d'un ruban unique, d'un empilement de deux rubans et d'un empilement de quatre rubans	50
Figure 4.10	NZPV d'un empilement de deux rubans pour différentes architectures de rubans utilisés	51
Figure 4.11	NZPV d'un empilement de deux rubans pour différents types d'empilement	52
Figure 4.12	NZPV pour des empilements de deux rubans face à face (FtoF) pour différentes combinaisons des types d'architecture régulière et CFD . .	53
Figure 4.13	NZPV expérimentale et par simulation pour un ruban	54
Figure 4.14	NZPV expérimentale et par simulation pour un empilement de deux rubans	55
Figure 4.15	NZPV expérimentale et par simulation pour un empilement de quatre rubans	56
Figure 4.16	NZPV expérimentale et par simulation pour un empilement mixte . .	57
Figure 4.17	NZPV expérimentale et par simulation pour un empilement de type FtoF de deux rubans	58
Figure 4.18	NZPV expérimentale et par simulation pour un empilement de type FtoF mixte	58

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

BLM	Base Line Method - Méthode de la ligne de base
BtoF	Back to Face - Dos à face
CFD	Current Flow Diverter - Déviateur du flux du courant
CTL	Current Transfer Length - Longueur de transfert
CuSO ₄	Sulfate de cuivre
DIC	Digital Image Correlation - Corrélation de l'image digitale
FeSC	Supraconducteurs à base de fer
FtoF	Face to Face - Face à face
GCM	Groupe de recherche en physique et technologie des couches minces
GdBCO	Galodinium-Baryum-Cuivre-Oxygène
H ₂ O	Eau
H ₂ O ₂	Pexoryde
HTS	High Temperature Supraconductor - Supraconducteur à haute température critique
LTS	Low Temperature Supraconductor Supraconducteur à basse température critique
MgB ₂	Diborure de magnésium
Nb ₃ Al	Niobium-aluminium
Nb ₃ Sn	Niobium-étain
NbTi	Niobium-titanium
NH ₄ OH	Ammoniaque
NZPV	Normal zone propagation velocity - Vitesse de propagation de la zone normale
PCB	Printed Circuit Board - Circuit imprimé
REBCO	Oxyde de terre rare (Rare Earth)-Baryum-Cuivre-Oxygène
sccm	Standard Cubic Centimeters per Minute - Centimètres cubes standard par minute
YBCO	Yttrium-Baryum-Cuivre-Oxygène
<i>a</i>	Coefficient de l'intensité du défaut
<i>A</i>	Aire de la surface déposée (m ²)
<i>B</i>	Champ magnétique (T)
<i>B_c, B_{c2}</i>	Champ magnétique critique (T)
<i>B_{c1}</i>	Champ magnétique critique avant l'état de vortex (T)

C_p	Capacité thermique massique à pression constante (J/(K·kg))
δ	Épaisseur électrodepositée (m)
d	Coefficient d'aplatissement de la gaussienne
E	Champ électrique (V/m)
F	Constante de Faraday (s·A/mol)
f	Coefficient de recouvrement
h	Épaisseur des couches (m)
I	Courant (A)
I_c	Courant critique (A)
Courbe I - V	Courbe Courant-tension
J	Densité de courant (A/m ³)
k	Conductivité thermique (W/(m·K))
L	Longueur du ruban(m)
M_{Cu}	Masse molaire du cuivre (g/mol)
Ω	Surface sur laquelle l'intégrale est évaluée
Q_e	Source de chaleur (J)
R	Résistance (Ω /m)
ρ_{Cu}	Masse volumique du cuivre (g/mol)
ρ	Résistivité (Ω ·m)
T_v	Potentiel vectoriel de la densité de courant
V	Tension (V)
σ	Conductivité électrique (S/m)
T	Température (K)
T_c	Température critique (K)
w	Largeur du ruban (m)

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

La supraconductivité présente, depuis plus de cent ans, une fascination auprès de la communauté scientifique. Il existe une pluralité d'utilisations des supraconducteurs notamment dans des applications nécessitant de forts champs magnétiques ou de grandes densités de courant, comme dans des moteurs d'avions ou de bateaux. De plus, les récentes avancées dans le domaine ouvrent la porte à des avancements majeurs en fusion nucléaire, dans la recherche nécessitant des accélérateurs de particules, en protonthérapie et dans le développement de moteurs supraconducteurs électriques pour l'électrification de l'aviation sans émission de gaz à effet de serre.

La supraconductivité a été découverte en 1911 quand Heike Kamerlingh Onnes a observé une résistance nulle dans le mercure refroidi à l'hélium liquide. Deux ans plus tard, cette découverte lui a valu un prix Nobel [2]. En 1933, l'effet Meissner, qui consiste à l'expulsion du champ magnétique par le supraconducteur, fut découvert par Meissner et Ochsenfeld. Cet effet est à la deuxième caractéristique propre à l'état supraconducteur. Puis, en 1950, une deuxième théorie de la supraconductivité est proposée par Ginzburg et Landau expliquant le comportement des matériaux supraconducteurs à partir de l'énergie libre. Une nouvelle théorie voit le jour en 1957 alors que Bardeen, Cooper et Schrieffer expliquent comment, à très basse température, les électrons se couplent en paires de Cooper et forment une fonction d'onde macroscopique [3,4]. Cette percée a contribué à une compréhension plus profonde de la supraconductivité.

En 1968, Bednorz et Müller découvrent un matériau céramique supraconducteur à haute température critique, de l'anglais *High Temperature Supraconductor* (HTS), marquant ainsi une étape cruciale pour les applications pratiques des supraconducteurs. De fait, leur découverte a permis le développement des rubans supraconducteurs pouvant atteindre des hauts champs magnétiques et électriques [5]. La découverte de cette céramique REBCO mène au développement des supraconducteurs à haute température critique. Cette céramique REBCO fait partie d'une famille de composés nommée les cuprates. Ces derniers possèdent un état encore supraconducteur à 77 K, soit la température d'ébullition de l'azote liquide. Cette caractéristique représente un atout majeur dans l'utilisation des supraconducteurs car l'utilisation de l'azote liquide comme liquide cryogénique est beaucoup plus simple, sécuritaire et accessible que l'hélium liquide, représentant donc un avantage économique significatif.

1.2 Problématique

Les rubans supraconducteurs à haute température critique sont très efficaces pour supporter de forts courants sans dissiper d'énergie. Pour cette raison, ceux-ci sont idéaux pour des applications nécessitant de puissants champs magnétiques. Toutefois, ces rubans restent très sensibles aux variations de leurs propriétés et, plus précisément, aux défauts de leur courant critique sur leur longueur. En effet, la détection et la gestion rapides des points chauds sont un enjeu majeur dans leur application. Ces points chauds apparaissent quand le courant dépasse la densité de courant critique locale, ce qui mène à une perte abrupte des propriétés supraconductrices et une génération intense de chaleur. Ce phénomène est appelé *quench*. Si cette chaleur n'est pas rapidement dissipée, la température du ruban peut monter de plusieurs centaines de degrés en une fraction de seconde, pouvant lourdement endommager le ruban supraconducteur. Ces difficultés limitent à ce jour l'efficacité et la fiabilité des rubans, nécessitant ainsi des solutions pour améliorer leur durabilité et leur performance. L'augmentation de la vitesse de propagation de la zone normale, de l'anglais *normal zone propagation velocity* (NZPV) des rubans HTS est cruciale pour la détection rapide des points chauds. En ce sens, l'équipe du Prof. Sirois a développé une architecture innovante, le *Current Flow Diverter* (CFD), qui augmente considérablement la NZPV, ce qui facilite la détection précoce et la gestion des points chauds.

Une des solutions classiques pour gérer les points chauds consiste à épaissir la couche métallique de stabilisateur autour du ruban, généralement en cuivre, offrant ainsi un chemin alternatif pour le courant. Cependant, cette approche réduit considérablement la densité de courant d'opération du ruban. En revanche, l'architecture CFD permet une détection plus rapide des points chauds sans réduire la densité de courant, bien que la mise en œuvre de cette technologie sur des grandes longueurs reste un défi.

1.3 Objectif

Ce projet a comme objectif principal de caractériser le comportement électrothermique d'un empilement de rubans supraconducteurs ayant une NZPV élevée lors de l'apparition d'un point chaud. Pour ce faire, des empilements de deux et quatre rubans d'architecture régulière et CFD ont été conçus afin de comparer leur comportement en régime points chauds. Leurs performances ont été évaluées après chaque *quench* afin d'évaluer si une dégradation des propriétés supraconductrices est apparue pendant le *quench*.

Dans l'atteinte de cet objectif, trois sous-objectifs ont émergé. Ceux-ci sont formulés comme suit :

1. Modéliser le comportement électrothermique d'un empilement de rubans supraconducteurs d'architecture de type CFD.
2. Fabriquer un empilement de rubans CFD et vérifier son comportement par rapport à un empilement de rubans réguliers.
3. Valider expérimentalement et par simulation différents types d'empilements utilisant l'architecture CFD.

En d'autres mots, ce projet vise à mesurer la NZPV de l'architecture CFD dans des empilements de rubans supraconducteurs et à la comparer à des empilements de rubans réguliers. La première étape de ce projet demandait de construire des simulations numériques des empilements de rubans supraconducteurs afin de cibler les expérimentations pertinentes à réaliser. Les mesures expérimentales sont réalisées et sont ensuite soutenues par des modélisations numériques. Les types d'empilements étudiés sont un empilement conventionnel, un empilement mixte où un ruban CFD et un ruban régulier sont utilisés pour l'empilement et le type d'empilement face à face, où les couches supraconductrices sont mises face à face dans l'empilement. Afin de bien comprendre la dynamique de *quench* des empilements, chaque ruban est caractérisé préalablement.

1.4 Organisation du mémoire

Le mémoire comporte cinq chapitres : l'introduction (chap. 1), la revue de littérature (chap. 2), la méthodologie (chap. 3), les résultats (chap. 4) et la conclusion (chap. 5). La revue de littérature met en évidence les principaux fondements physiques utiles dans la compréhension des supraconducteurs, la stabilité thermique des rubans, les différentes approches de mesures de la NZPV, l'architecture d'un ruban HTS ainsi que l'architecture CFD, la caractérisation de câbles supraconducteurs et les différentes simulations utilisées pour modéliser les empilements de rubans.

La méthodologie présente les étapes expérimentales suivies pour la fabrication et la caractérisation des empilements de rubans supraconducteurs. Elle présente aussi les paramètres utilisés pour leur modélisation ainsi que les approximations et hypothèses employées. Ensuite, les résultats font l'état des mesures prises dans ce projet, les comparatifs avec les simulations ainsi qu'une discussion des résultats. Finalement, la conclusion synthétise l'ensemble du projet et énonce les perspectifs que celui-ci apporte.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE SUR LES RUBANS SUPRACONDUCTEURS

2.1 Propriétés physiques des supraconducteurs

Les supraconducteurs présentent un ensemble distinct de propriétés physiques qui les différencient des matériaux conducteurs ordinaires. Il devient important de bien comprendre ces phénomènes afin de mieux adapter ces technologies au monde qui nous entoure. Les propriétés fondamentales des supraconducteurs seront décrites dans cette section. La supraconductivité se définit par deux critères majeurs. Les matériaux supraconducteurs doivent afficher une résistivité nulle et expulser le champ magnétique. Ce dernier phénomène est appelé effet Meissner-Ochsenfeld [6].

2.1.1 Résistivité nulle

Il est commun de penser que la résistivité devient très faible à basse température, ce n'est toutefois pas le cas. Elle est à tout proprement parlé nulle. En effet, un changement de phase s'opère lorsque l'état supraconducteur est atteint. Les électrons libres s'associent entre eux pour former des paires de Cooper, n'interagissant plus avec la matrice cristalline. Donc, l'effet Joule dû aux collisions des électrons avec la matrice, est alors nul. Il n'y a plus aucune énergie dissipée par cet effet. De plus, les paires de Cooper agissent comme un super-fluide, amenant la résistivité à zéro [6]. On peut désormais définir précisément le changement de phase thermodynamique à la température critique T_c du supraconducteur comme étant la température où la résistivité atteint strictement zéro.

2.1.2 Effet Meissner-Ochsenfeld et expulsion du champ magnétique

La présence de supraconductivité se détermine également par la présence de l'effet Meissner-Ochsenfeld. Ce dernier est exprimé par l'expulsion complète du champ magnétique en présence d'un champ magnétique externe lors de l'apparition de la supraconductivité. En effet, une résistivité nulle ne suffit pas à expliquer l'expulsion du champ magnétique. La résistivité nulle garantie une invariance du champ magnétique dans un conducteur parfait par l'équation de Maxwell

$$\nabla \times \mathbf{E} = \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

puisque le champ électrique E est nul. Le champ magnétique B dans un conducteur parfait est donc constant et peu rester non-nul. Cependant, lorsqu'un matériau supraconducteur est soumis à un champ magnétique, ce champ est expulsé. Cette propriété est donc différente de la résistivité nulle [6]. De nos jours, mesurer cette propriété est le deuxième critère principal garantissant l'apparition de la supraconductivité. Il est important de noter que cette expulsion est complète seulement pour un faible champ magnétique externe dans le cas des supraconducteurs de type II. À plus haut champ, cette expulsion n'est pas complète due à la formation de vortex.

2.1.3 Courant critique et champ magnétique critique

La température critique n'est pas le seul paramètre critique qui, une fois dépassé, rompt l'état supraconducteur du matériau. Un supraconducteur est aussi soumis à des contraintes maximales en courant et en champ magnétique nommés courant critique I_c et champ magnétique critique B_c . Lorsque ces paramètres critiques sont dépassés, le matériau subit un changement de phase et perd abruptement ses propriétés supraconductrices. Les courants circulant dans le matériau génèrent alors de la chaleur par effet Joule, pouvant ainsi augmenter sa température en une fraction de seconde [7]. Ces trois paramètres critiques s'influencent les uns les autres et forment donc une surface critique, tel qu'illustré à la figure 2.1. Par exemple, un supraconducteur possède un courant critique beaucoup plus élevé s'il est utilisé à très basse température que s'il est utilisé très proche de sa température critique.

Dans certains cas, il est aussi utile de parler de densité de courant critique J_c et de densité de courant critique d'opération J_{co} , où

$$J_c = \frac{I_c}{\text{section de la couche supraconductrice}} \quad \text{et} \quad J_{co} = \frac{I_c}{\text{section totale du ruban}} . \quad (2.2)$$

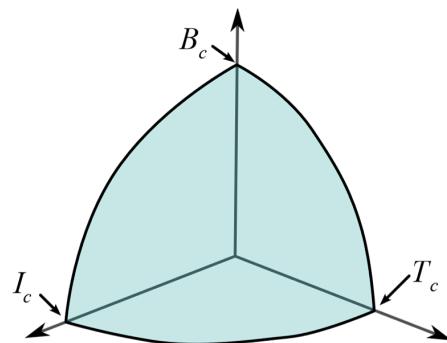


FIGURE 2.1 Surface critique définie par les trois paramètres critiques du supraconducteur : température critique T_c , champ magnétique critique B_c et courant critique I_c .

Par exemple, un ruban avec une couche protectrice de cuivre de $40\text{ }\mu\text{m}$ d'épaisseur aura le même J_c qu'un ruban sans cette couche protectrice, mais un J_{co} beaucoup plus faible. Une telle architecture de ruban avec couche protectrice de cuivre est illustrée à la figure 2.2.

Le courant critique est déterminé par la caractéristique E - I représentée par une loi de puissance :

$$E = E_0 \left(\frac{I}{I_c} \right)^n , \quad (2.3)$$

où E est la norme du champ électrique et E_0 est un paramètre qui détermine le courant critique. Généralement, E_0 est égal à $1\text{ }\mu\text{V}/\text{cm}$ dans la communauté des rubans HTS afin de comparer les courants critiques entre eux. Finalement, n est un paramètre qui représente à quel point la transition est abrupte entre l'état supraconducteur et l'état normal [7].

2.1.4 Dépendance du courant critique aux contraintes mécaniques

Le courant critique est aussi influencé par les stress mécaniques appliqués sur le ruban [7]. Différents stress peuvent être appliqués : un stress en compression, en tension, en torsion et en flexion. Ce projet utilise des empilements de rubans déposés à plat sur une surface, les contraintes de torsion ne sont alors pas considérées. Par contre, des forces mécaniques et thermiques peuvent générer les autres types de contraintes.

Une diminution du I_c est observée à partir de 30 MPa , ce qui indique une faible résistance à la compression du ruban REBCO [8]. Ce stress impose une limite au stress en tension et en flexion du ruban. La déformation irréversible des rubans SuperPower Inc. est située à 0.66 \% en tension. De même, le rayon de courbure minimal pour les rubans REBCO de SuperPower est entre 2 mm et 4 mm [9]. Il est donc important de concevoir des empilements ne créant pas de stress mécaniques intenses.

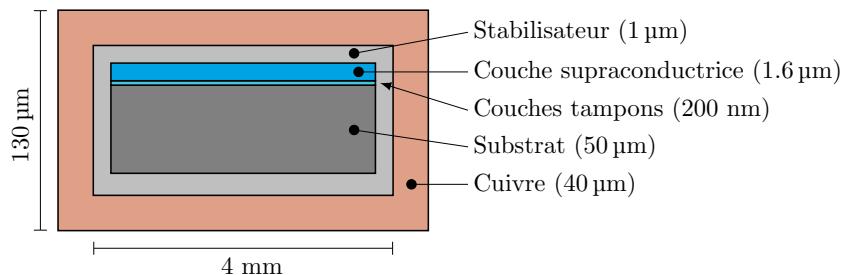


FIGURE 2.2 Section d'un ruban HTS de la compagnie SuperPower Inc. avec une couche protectrice de cuivre de $40\text{ }\mu\text{m}$. La figure n'est pas à l'échelle.

2.2 Types de supraconducteurs

Les supraconducteurs ont évolué rapidement durant les cent dernières années, mais pour bien comprendre leur fonctionnement et les avantages qu’apporte les rubans supraconducteurs à haute température critique, il faut se tourner vers les premiers supraconducteurs développés et comprendre les différents types de supraconducteurs existants.

2.2.1 Supraconducteurs à basse et haute température critique

Les supraconducteurs se distinguent en deux catégories selon leur température critique. La première catégorie inclut les supraconducteurs à basse température critique, de l’anglais *low temperature superconductors* (LTS). Ces derniers ont une température critique inférieure à 30 K et sont généralement refroidis à l’hélium liquide dont le point d’ébullition est 4 K à pression atmosphérique. Dans cette catégorie se retrouve les métaux purs, le niobium-titané (NbTi), le niobium-étain (Nb_3Sn) et le niobium-aluminium (Nb_3Al). Ces matériaux sont déjà bien compris et utilisés couramment dans l’industrie.

La seconde catégorie inclut les supraconducteurs à haute température critique, de l’anglais *High temperature superconductors* (HTS), qui ont une température critique au-dessus de 30 K. Il est généralement possible de les refroidir à l’azote liquide, ayant un point d’ébullition de 77 K à pression atmosphérique. Les cuprates, les supraconducteurs à base de fer (FeSC) et le diborure de magnésium (MgB_2) font partie de cette catégorie. Le MgB_2 possède une T_c plus faible que les autres avec 39 K, mais est généralement inclus dans cette catégorie. Certains supraconducteurs à base de fer (FeSC) ont le potentiel d’être fabriqués à l’aide de mêmes procédés que ceux utilisés pour les cuprates. Les FeSC pourrait offrir des avantages uniques dans la fabrication d’aimants de grand diamètre et à haut champ magnétique. Les cuprates sont toutefois la famille de matériaux la plus étudiée avec les REBCO et BSSCO comme représentants. Les REBCO sont formés à base d’une terre rare, de l’anglais *rare earth* (RE), de barium, de cuivre et d’oxygène. Les exemples les plus connus sont l’YBCO, à base d’yttrium et le GdBCO, à base de galodinium. Dans ce projet, ce sont des rubans de REBCO qui sont utilisés [10].

2.2.2 Supraconducteurs de type I et de types II

Les supraconducteurs se distinguent en deux types selon leurs propriétés magnétiques. Les supraconducteurs de type I et de type II. Les supraconducteurs de type I affiche un changement de phase marqué à l’atteinte de la température critique et expulse complètement le champ magnétique lorsque soumis à un champ magnétique externe (effet Meissner-Ochsenfeld) [6].

Les matériaux de ce type sont des métaux purs comme le plomb ou le mercure et ont une T_c très basse.

Les supraconducteurs de type II ont une transition de phase plus douce avec un état mixte où le champ magnétique pénètre progressivement dans le supraconducteur. En effet, passé un certain champ magnétique critique B_{c1} , des vortex se créent dans le supraconducteur, laissant un champ magnétique passer au travers du supraconducteur. En continuant d'augmenter le champ magnétique externe, un second champ magnétique critique B_{c2} est atteint [6]. Après celui-ci, le matériau tombe dans son état normal. Les avantages de ce type de supraconducteur sont leur capacité à supporter des champs magnétiques beaucoup plus élevés et leur température critique beaucoup plus haute. Entre autres, les HTS sont tous des supraconducteurs de type II.

2.2.3 Type de fils supraconducteurs

Les supraconducteurs viennent en fil de plusieurs formes. Les fils constitués de LTS sont généralement de section circulaires. Les brins, de quelques millimètres de diamètre, sont insérés dans une matrice métallique pour garantir une bonne flexibilité du fil. Par contre, les HTS sont généralement sous forme de rubans, de minces bandes métalliques de section rectangulaire. En effet, les supraconducteurs qui sont formés par dépôt de couches minces nécessitent une surface lisse et plane afin d'accroître les différentes couches du ruban [6]. Le REBCO en est un exemple. Certains autres supraconducteurs sont étirés et laminés pour donner leur forme en ruban comme les BSCCO.

Il est aussi important de noter que les rubans supraconducteurs utilisés dans le cadre de ce projet sont des rubans dit de seconde génération. En effet, ces rubans se distinguent par une technologie de fabrications de rubans par couches minces, contrairement à ceux de la première génération qui utilisaient une technique de fabrication de poudres en tube. Leurs propriétés électromagnétiques étant significativement supérieures aux rubans de première génération, ces derniers ne se fabriquent presque plus et sont désormais désuets [7].

2.2.4 Rubans supraconducteurs à haute température critique de seconde génération

Les rubans supraconducteurs de seconde génération sont fabriqués par dépôt de couches minces. Un exemple d'architecture de ce type de ruban est illustrée à la figure 2.3.

Premièrement, un substrat composé d'acier inoxydable ou d'un alliage de nickel permet de garantir une résistance aux contraintes mécaniques de torsion tout en maintenant une bonne

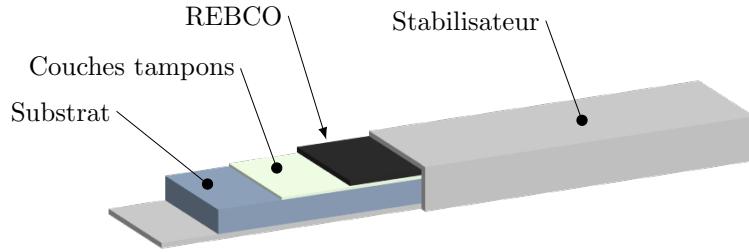


FIGURE 2.3 Architecture d'un ruban HTS ayant une couche de REBCO comme couche supraconductrice.

flexibilité du ruban. Il offre aussi une grande masse thermique pour dissiper des surplus de chaleur générée.

Sur ce substrat s'ajoute une série de couches minces de quelques nanomètres à quelques centaines de nanomètres nommées couches tampons. Ces couches varient énormément de composition entre chaque manufacturier. Elles offrent un guide propice à la croissance de la couche supraconductrice en facilitant l'agencement des mailles cristallines. De plus, elles créent un isolant électrique et une barrière de diffusion entre le substrat et la couche supraconductrice, car les ions du substrat peuvent venir modifier la maille cristalline du supraconducteur, détruisant l'état supraconducteur [7].

La couche supraconductrice croît sur ces couches tampons et peut atteindre quelques micromètres d'épaisseur. La croissance épitaxiale de cette couche crée une couche polycristalline. Ces cristaux doivent tous posséder un axe *c* presque complètement parallèles pour obtenir de bonnes propriétés supraconductrices. L'axe *c* est l'axe perpendiculaire à la surface de la couche mince tandis que les axes *a* et *b* sont dans le plan de la couche. De plus, la maille cristalline du supraconducteur est fortement anisotrope, ce qui provoque de grandes variations des propriétés supraconductrices en fonction des axes, principalement au niveau des champs magnétiques appliqués [11]. Un tel comportement au niveau du courant critique est illustré à la figure 2.4. En effet, un champ magnétique perpendiculaire à la surface du ruban engendre une création de vortex plus prononcée dans cette orientation car ils traversent plus facilement les plans supraconducteurs. Les vortex sont aussi moins bien ancrés. Le champ magnétique critique est plus faible dans cette orientation. Par contre, un champ magnétique parallèle aux plans supraconducteurs offre des conditions plus difficiles à la création des vortex et leur mouvement est restreint par les plans [7]. Un champ magnétique critique plus élevé résulte de ces deux facteurs.

Finalement, puisque la couche supraconductrice est très fragile et sensible à l'oxygène, un

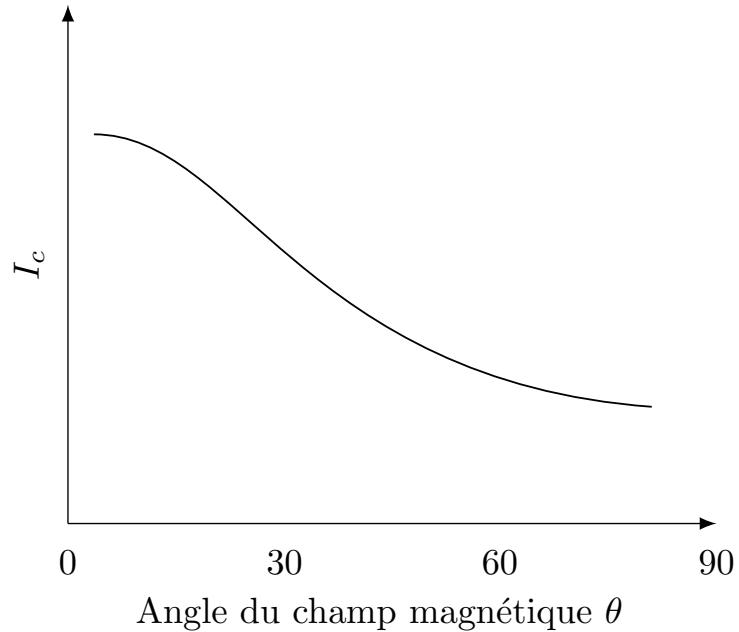


FIGURE 2.4 Comportement du I_c face à une variation de l'angle du champ magnétique par rapport à la surface du ruban. Un angle de 0° indique un champ parallèle à la surface et un angle de 90° indique un champ parallèle à l'axe c du ruban.

revêtement métallique s'ajoute tout autour du ruban pour l'isoler de l'atmosphère. Généralement, ce revêtement de quelques micromètres est d'argent ou d'or. Dû aux prix très élevés de ces métaux, cette couche protectrice demeure très mince. Par contre, un stabilisateur de cuivre de quelques dizaines de micromètres peut être ajouté pour augmenter la masse thermique et électrique du ruban. Puisque le cuivre réagit avec la couche supraconductrice en raison de sa composition stoechiométrique. Il ne peut être utilisé dans la composition de la couche protectrice.

2.2.5 Architecture CFD

À ce jour, les rubans HTS réguliers possèdent une NZPV nettement plus faible que les fils LTS. Une architecture particulière a été développée dans le laboratoire de Frédéric Sirois afin d'améliorer de façon notable la NZPV de ces rubans. L'architecture développée est le *current flow diverter* (CFD). Celle-ci améliore la NZPV jusqu'à un ordre de grandeur sans nuire aux propriétés électrothermiques des rubans. Cette architecture cherche à dévier la direction du courant en insérant une interface résistive entre la couche supraconductrice et la couche

d'argent [12]. Cette interface ne couvre pas la totalité de la largeur du ruban, laissant intact une mince bande de chaque côté du ruban. Cette largeur, quantifiée comme un ratio de largeur entre l'interface résistive et la largeur totale du ruban, se nomme facteur de couverture f . Pour que l'architecture CFD soit pleinement efficace, le facteur de couverture doit être le plus grand possible, allant de 0.75 à 0.95.

Le succès de cette architecture provient de la vitesse de propagation de la zone normale lorsque survient un point chaud. Cette propagation est représentée à la figure 2.5. À l'apparition d'un point chaud, la couche supraconductrice perd ses propriétés conductrices localement. Elle devient fortement résistive et force le courant circulant dans celle-ci à se transférer dans la couche d'argent. Le courant cherche alors à passer par le chemin offrant le moins de résistance possible. Pour un ruban régulier, ce chemin est uniforme et rectiligne sur la section. Par contre, sur la longueur du ruban, une certaine distance est requise pour que le courant transfère complètement dans la couche d'argent. Cette "longueur de transfert" est communément notée CTL, de l'anglais *current transfer length*. De plus, de la chaleur générée par effet Joule provient du passage du courant dans cette interface résistive. Cette chaleur est donc concentrée uniformément sur la largeur du ruban [12, 13]. Cette chaleur générée par le passage du courant dans le stabilisateur d'argent permet de faire propager la zone normale sur la longueur du ruban. À titre de référence, l'interface résistive entre les deux couches varient entre $0.05 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$ et $1 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$.

Pour un ruban d'architecture CFD, une interface résistive empêche le courant de transférer uniformément de la couche supraconductrice à la couche d'argent. Cette interface résistive est

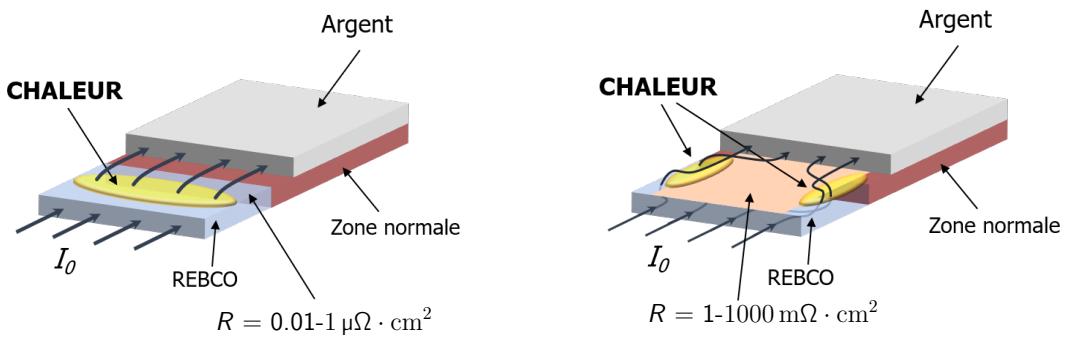


FIGURE 2.5 Propagation du courant de la couche supraconductrice de REBCO vers la couche stabilisatrice d'argent lors de l'apparition d'une zone normale pour un ruban régulier et CFD. Le transfert de courant engendre une génération de chaleur uniforme sur la section pour le ruban régulier et non-uniforme sur la section pour le ruban CFD.

plusieurs ordres de grandeur plus résistif que l'interface d'un ruban régulier, soit de l'ordre de $1\text{-}1000 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ [12].

Afin de minimiser la résistance du chemin, le courant cherche alors à emprunter les interfaces de faible résistance de chaque côté du ruban comme illustré à la figure 2.6. Le courant est alors concentré dans ces régions, forçant le transfert de courant à s'effectuer sur une plus grande longueur. La CTL en est donc allongée. De plus, la génération de la chaleur se crée sur la longueur de chaque côté du ruban. La zone normale se propage alors sur une plus grande longueur, augmentant ainsi la NZPV [14].

2.3 Empilements de rubans supraconducteurs

En se tournant vers des systèmes électriques demandant de plus en plus de forts champs magnétiques et de courant, l'utilisation des empilements de rubans supraconducteurs devient une nécessité. Les empilements de rubans apportent toutefois une complexité grandissante. Cette section s'intéresse aux différents types d'empilement envisagés et à leurs propriétés.

2.3.1 Empilement face à face

L'empilement le plus commun est un empilement conventionnel où les rubans HTS sont empilés les uns sur les autres en ayant la couche supraconductrice vers le haut du ruban. Le second type d'empilement est un empilement où les couches supraconductrices sont mises face à face. Ce type d'empilement se nomme face à face, ou en anglais *face to face* (FtoF). À titre comparatif, l'empilement conventionnel est nommé dos à face, en anglais *back to face* (BtoF) dans ce mémoire. L'empilement FtoF apporte une dynamique de distribution du courant et une réponse au champ magnétique externe différente de l'empilement BtoF.

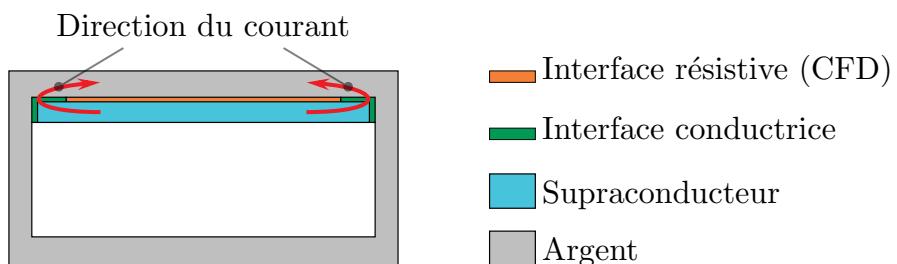


FIGURE 2.6 Dans un ruban d'architecture CFD, le courant doit contourner l'interface résistive pour atteindre la couche d'argent. Ce phénomène agrandit alors la longueur de transfert du courant.

Kim et al. [15] a montré qu'un empilement FtoF subissait certaines pertes AC comparables à un empilement BtoF et que la variation du courant critique dû à un champ magnétique externe est comparable entre les deux empilements. Les stress mécaniques sont aussi différents pour les deux empilements comme indiqué par [16]. Par contre, l'empilement FtoF est peu caractérisé en régime de points chauds.

2.3.2 Diminution du courant critique dans un empilement de rubans

Le courant critique d'un empilement de rubans HTS est fortement influencé par le nombre de rubans le composant. Ce phénomène est causé par un effet du champ propre. Ce champ est un champ magnétique généré par l'empilement lui-même et les rubans qui le compose. [17] [18]. Cette diminution du courant critique peut atteindre 5 % du I_c total pour un empilement de deux rubans, 15 % pour un empilement de 4 rubans et 25 % pour un empilement de 8 rubans [17].

2.3.3 Soudure des contacts de rubans HTS

Afin de ne pas générer de chaleur aux extrémités des rubans supraconducteurs, il est important que ces régions, aussi appelées contacts, aient la résistance la plus faible possible. Une génération de chaleur dans ces régions pourraient générer une tension bruitant les données et ultimement provoquer la rupture de la supraconductivité du ruban. Une bonne résistance de contact se situe entre 10^{-7} ou $10^{-8} \Omega \cdot \text{cm}^2$ tandis qu'une résistance élevée et mal contrôlée se situe vers 10^{-3} à $10^{-1} \Omega \cdot \text{cm}^2$.

Afin de minimiser la résistance de ces contacts, une procédure est employée par Ekin. Si une soudure a besoin d'être appliquée aux contacts, il faut s'assurer que la couche d'argent (ou de métal noble) soit au moins de 7 μm à 10 μm . Si ce n'est pas le cas, il faut épaissir ces contacts en ajoutant un métal noble ou un autre métal ne créant pas une interface résistive avec la couche supraconductrice [7]. Par exemple, du cuivre sur de l'argent. Ce dépôt doit bien sûr utiliser une autre méthode que la soudure. Le matériau pour souder doit aussi être un matériau qui ne réagit pas avec la couche d'argent et a une faible température de fusion. En ce sens, un alliage de soudure approprié est le In-3%Ag avec un point de fusion de 143 °C. Par contre, l'étain interagit fortement avec les métaux nobles. Déposé sur une couche d'argent, il cherche à l'absorber, provoquant un lessivage de cette couche stabilisatrice. L'étain rentre alors en contact avec le REBCO et détruit ses propriétés supraconductrices. De même, l'indium aussi diffuse facilement à travers une mince couche d'argent (1 μm à 2 μm) et s'approprie l'oxygène du REBCO, ce qui crée une interface résistive, rendant la résistance de contact de mauvaise qualité [7].

Dans ce projet, des contacts de résistance suffisamment faibles pour ne pas nuire aux mesures de courant critique ont été atteints sans soudure en utilisant une électrodepositon sur les contacts. Les échantillons n'ont donc pas subi une soudure des contacts.

2.4 Techniques d'étude et de caractérisation

Les rubans supraconducteurs à haute température critique ouvrent la possibilité à l'amélioration de nombreuses technologies à de plus faibles coûts. Leur performance reste cependant un enjeu majeur dans l'accessibilité de cette technologie et une caractérisation précise de ces matériaux est cruciale à l'étude de ces rubans. Cette prochaine section aborde les différentes techniques d'étude et de caractérisation des rubans supraconducteurs.

2.4.1 Vitesse de propagation de la zone normale (NZPV)

L'étude de la vitesse de propagation de la zone normale, de l'anglais *normal zone propagation velocity* (NZPV), demande de caractériser les rubans supraconducteurs dans des conditions anormales d'utilisation. La création d'une zone normale, zone ayant perdu ses propriétés supraconductrices, demande que la température locale du ruban ait dépassé sa température critique. Le système est donc volontairement poussé en dehors dans un régime hors équilibre communément appelé régime de point chaud. L'apparition de la zone normale provient d'un défaut dans le courant critique I_c du ruban. En effet, ce I_c n'est pas uniforme sur la longueur du ruban. Cette variabilité peut provenir de plusieurs facteurs ; elle peut être due aux procédés de fabrication des manufacturiers comme illustrée à la figure 2.7, ou par exemple aux variations locales du champ magnétique dans un système complexe.

Cette disparité entraîne un défaut à l'endroit de plus faible courant critique. Lorsqu'un cou-

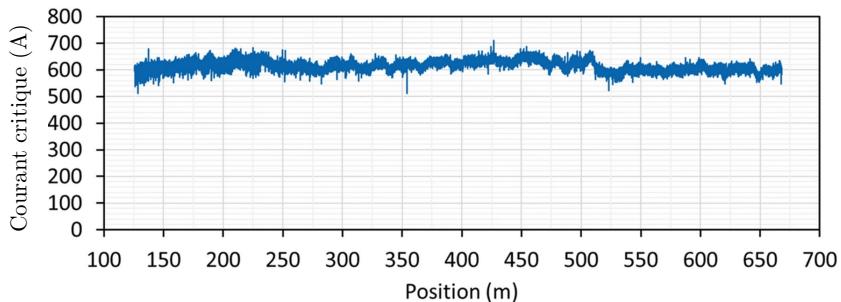


FIGURE 2.7 Variation typique du I_c selon la longueur d'un ruban REBCO de 12 mm de large à 77 K. [1]

rant continu circule dans le ruban et qu'il dépasse le courant critique du défaut, le ruban commence à générer une résistance non-nulle. Le courant circulant dans cette région veut continuer à emprunter le chemin de moindre résistance et transfère alors dans la couche d'argent, et subséquemment dans les autres couches du ruban. Puisque la résistance n'est pas nulle dans la couche d'argent, de la chaleur est générée par effet Joule. Cette chaleur peut faire augmenter rapidement la température locale du ruban. Lorsque cette dernière dépasse la température critique du ruban, il perd localement ses propriétés supraconductrices. Ce phénomène se nomme un *quench* [14]. Cette région devient une zone dite normale. Contrairement à un échauffement de l'ensemble du ruban, un échauffement local sans briser l'état supraconducteur de l'ensemble du ruban se nomme un régime de points chauds.

En régime de points chauds, la chaleur générée dans la zone normale diffuse vers les régions encore supraconductrices, augmentant la température dans ces régions et brisant leur supraconductivité. La zone normale s'agrandit donc et se propage sur la longueur du ruban. Cette propagation se fait à une vitesse propre à l'architecture du ruban et au courant injecté. Elle se nomme NZPV.

2.4.2 Détection de points chauds et mesure de la NZPV par stress mécanique

Wang *et al.* propose une approche pour évaluer la NZPV dans les rubans par stress mécanique. Cette approche optique utilise une caméra pour détecter la déformation, le déplacement et le stress du ruban supraconducteur soumis aux forces électromagnétiques. Elle se base sur un motif tacheté pulvérisé sur le ruban afin de détecter les petites variations de mouvement lors de l'apparition d'un quench. Cette méthode nommée DIC, de l'anglais *digital image correlation* ne demande pas de contacts avec l'échantillon et les biais de stress mécaniques ou électriques sont facilement évités. Avec cette approche, Wang *et al.* [19] a pu modéliser et déterminer expérimentalement les déformations sur COMSOL et calculer de façon fiable la NZPV de l'ordre de grandeur de quelques mm/s pour des températures allant de 30 K à 70 K.

Toutefois, cette méthode a été utilisée sur des rubans recouvert de 40 µm. Cette grande masse thermique abaisse significativement la NZPV à des vitesses de 10 mm/s. Le temps de pulse variant alors jusqu'à 20 s. Ces ordres de grandeurs sont moins en accord avec les valeurs utilisées dans le présent projet tel qu'une NZPV allant jusqu'à 400 cm/s pour des temps de pulse de 10 ms.

2.4.3 Mesure de la NZPV par courant électrique

Le calcul de la NZPV par mesures de tension est la technique la plus répandue dans la caractérisation de cette vitesse. Elle a l'avantage d'être facile d'utilisation et fiable et cela, pour être une très grande plage de conditions expérimentales.

Cette mesure est basée sur l'utilisation de pointes conductrices de petites tailles mises en contact avec l'échantillon sur la longueur du ruban. Ces pointes peuvent être soudées sur l'échantillon comme des fils de cuivre soudés ou peuvent être pressées tel que des *pogopins*. Lorsque le ruban répond à l'apparition d'un point chaud, il perd localement sa supraconductivité et affiche alors une résistance non-nulle [7]. Cette résistivité est fortement dépendante de la température locale du ruban. En mesurant la tension entre deux points points et en connaissant leur distance, il est alors possible d'évaluer adéquatement la variation du champ électrique entre ces deux. On peut alors calculer la NZPV de ces valeurs, comme démontré dans [14] et [12].

Cette mesure a l'avantage d'être robuste face aux stress mécaniques et thermiques pouvant être détectés sur l'échantillon et produit des résultats précis de la NZPV. Par contre, elle demande un contact physique avec l'échantillon. Elle ne peut donc pas être utilisée sur des rubans intérieur d'un câble ou d'un empilement. Elle constitue aussi une mesure discrète, évaluant la tension entre deux points. La précision de cette mesure dépend donc fortement de la capacité à approcher les deux points. Une mesure continue n'est pas restreinte par ce principe.

2.4.4 NZPV dans les empilements de rubans supraconducteurs

La NZPV peut varier sensiblement dans un empilement de rubans HTS par rapport à un ruban unique. Shi *et al.* [20] a caractérisé la NZPV d'un empilement de deux rubans REBCO avec 40 µm de cuivre en créant un défaut physique dans un ruban. Ce défaut est créé en courbant le ruban au-delà de sa courbure critique, atteignant une diminution du I_c de 40 % localement. La zone normale est initiée par impulsion thermique. Shi a trouvé que la NZPV est plus faible lorsque le ruban a un défaut. Une approche similaire a été réalisée par [21].

Ren *et al.* [22] a comparé la NZPV d'un empilement de deux rubans avec une bobine de deux rubans et a montré une augmentation de la NZPV pour la bobine.

Finalement, Haro et al. [23] a simulé le comportement électrothermique d'un empilement de deux rubans avec une couche stabilisatrice de cuivre. Il a montré que la NZPV dépend de l'évolution de la distribution de la température et se stabilise plus loin du défaut.

Ces travaux restent toutefois limités quant à la compréhension du comportement électrother-

mique des empilements de rubans supraconducteurs.

2.5 Modélisation de rubans supraconducteurs

Les mesures expérimentales peuvent être très coûteuses en temps et en énergie. Les outils numériques deviennent alors de plus en plus importants dans la recherche sur les rubans supraconducteurs. Les simulations numériques permettent de caractériser les propriétés électromagnétiques et thermiques des rubans supraconducteurs tout en tenant compte des conditions environnementales et des systèmes complexes dans lesquels les empilements de rubans supraconducteurs se retrouvent.

Il faut noter que la modélisation de l'architecture CFD implique une propagation du courant sur la largeur du ruban et par le fait même une répartition de la chaleur non-uniforme sur sa largeur. De plus, la zone normale se propage sur la longueur du ruban. Une telle dynamique peut donc seulement être correctement modélisée par un modèle en 3D.

2.5.1 Types de modèles

Les empilements de rubans supraconducteurs sont des systèmes complexes. La compréhension de leur dynamique nécessite de les modéliser afin d'extraire l'impact de chaque paramètre sur leur comportement. Selon les variables étudiées, de nombreuses approches sont possibles. Dans ce projet, l'étude de la NZPV oblige de modéliser les rubans supraconducteurs en régime temporel hors équilibre.

Les formulations mathématiques pour la résolution de la dynamique des empilements supraconducteurs sont variées et nombreuses. Toutefois, elles cherchent toutes à résoudre le problème en limitant le nombre de temps de calcul et en ayant une bonne précision. Les méthodes abordées dans cette section sont celles qui peuvent s'employer dans les logiciels d'éléments finis, ou en anglais *finite element method* (FEM). Les autres méthodes utilisant des différences finies, équations aux dérivées partielles ou encore volumes finis s'éloignent trop de l'axe du projet. Parmi les méthodes utilisant des FEM, on retrouve la formulation en H, en A-V, en T-A et en T- Ω . Ces simulations sont optimisées pour le calcul de pertes AC, pertes dues aux passages de courants alternatifs dans le ruban supraconducteur. Deux de ces formulations sont abordées ici, soit la formulation en H et la formulation en T-A, et les raisons pourquoi elles n'ont pas été retenues sont expliquées.

La formulation en H est la méthode la plus populaire pour la modélisation du comportement des rubans supraconducteurs [24] [25]. Ceci est fortement lié à sa simplicité d'implémentation dans des logiciels couramment utilisés comme COMSOL Multiphysics. Cette formulation

permet de calculer le champ magnétique dans le ruban et dans l'espace en ayant des temps de calculs relativement courts, une bonne convergence et une bonne précision. Cette méthode utilise l'équation de Faraday avec le champ magnétique $\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$ et la loi de puissance de l'équation 2.3 pour \mathbf{E} :

$$-\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times \mathbf{E} \quad \rightarrow \quad \frac{\partial \mu \mathbf{H}}{\partial t} + \nabla \times (\rho \nabla \times \mathbf{H}) = 0 . \quad (2.4)$$

En utilisant l'approximation quasi-statique, on peut trouver la densité de courant \mathbf{J} :

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} . \quad (2.5)$$

Ce modèle peut être couplé avec les équations thermiques comme mentionné dans Shen (2020) [24]. Par contre, cette modélisation augmente rapidement en complexité avec l'augmentation du nombre de rubans, surtout si elle ne simule pas les supraconducteurs comme des objets sans épaisseur. De plus, le temps de calcul augmente rapidement pour des simulations demandant de calculer la propagation du courant entre chaque couche du ruban et entre chaque ruban. Ce calcul peut alors devenir extrêmement coûteux [24].

Un problème apporté par la formulation H est le calcul du champ dans les régions non-conductrices, ce qui demande un effort de calculs non nécessaire. Une approche pour remédier à ce problème est la formulation H- ϕ où la région non-conductrice utilise la formulation ϕ pour le calcul du champ scalaire ϕ par $\mathbf{H} = -\nabla\phi$. Cette astuce permet de réduire le temps de calculs pour la même précision que la formulation H. Elle a été implémentée dans COMSOL par Arsenault et Riva [26] [27].

Une autre formulation fréquemment utilisée est la formulation en T-A. Cette formulation utilise le potentiel vectoriel \mathbf{A} du champ magnétique avec $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ pour exprimer l'équation de Faraday et le potentiel vectoriel de la densité de courant T_v avec $\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{T}_v$. Cette méthode est utilisée par Berrospe-Juarez [28] et Hong [29] pour simuler des systèmes complexes comme des bobines et des bobines de forme *racetrack*. Cette méthode calcule complètement le comportement électromagnétique des rubans et est généralement plus rapide et demande moins de mémoire que la formulation en H. Cependant, elle devient uniquement avantageuse lorsque l'approximation d'une région infiniment mince supraconductrice peut être appliquée et n'est pas avantageuse pour des géométries de rubans complexes comme pour le MgB₂ [28].

Ces deux méthodes peuvent comporter un nombre important de degrés de liberté et devenir très lourde en terme de temps de calculs et de mémoire utilisée pour la simulation des empilements de rubans en régime points chauds. Une approche différente permet d'ignorer le champ magnétique dans certains cas. Comme la diffusion thermique prédomine sur la dif-

fusion magnétique puisqu'elle représente le processus le plus lent des deux, il est possible de considérer le comportement du ruban comme purement électrique et thermique [30]. Ce modèle est employé dans ce projet et est décrit dans la section méthodologie. Cette approximation est néanmoins, de moins en moins valide en augmentant le nombre de rubans utilisés dans le système en raison du champ magnétique généré par les autres rubans.

2.5.2 Initiation de la zone normale

Différentes approches sont utilisées pour générer le défaut dans le ruban pour initier la zone normale. Deux approches sont populaires : un défaut dans le courant critique et un terme source de chaleur de courte durée. Le défaut dans le courant critique crée une zone de faiblesse au centre du ruban. Lorsque le courant dépasse ce courant critique local, de la chaleur est générée et le courant transfère dans la couche d'argent, initiant la zone normale [12]. Cette technique est employée dans ce projet. Une autre façon est d'utiliser un terme source local à l'endroit du défaut. Ce terme source, dont la durée est courte contrairement à celle de la simulation, augmente la chaleur du ruban jusqu'à ce que la température critique du REBCO soit atteinte. Il passe alors à son état normal. Cette méthode est employée dans [31].

2.6 Applications des supraconducteurs

Cette section a pour objectif de décrire les différentes applications et domaines des supraconducteurs en passant de la proton-thérapie à la fusion nucléaire.

2.6.1 Applications actuelles et potentielles dans divers domaines

L'utilisation des supraconducteurs dans le développement des technologies de proton-thérapie est très prometteuse. Ce type de traitement utilise de forts champs magnétiques ciblés qui s'apparentent à ceux des imageries par résonance magnétique (IRM). La technologie supraconductrice pourrait permettre l'amélioration des systèmes existants notamment par la création de champs magnétiques plus puissants quant aux aimants de l'accélérateur de protons [32].

Dans les perspectives d'avenir des technologies derrière le Grand collisionneur de hadrons résident l'utilisation de supraconducteurs. Des équipes de recherches européennes étudie la possibilité d'utiliser les HTS pour les aimants à accélérateur de particules [33]. Dans le même ordre d'idées, la technologie des supraconducteurs est un élément central dans les prototypes de réacteurs à fusion nucléaire. De fait, les supraconducteurs à haute température critique sont actuellement considérés dans la mise en place de telle technologie, le but étant de tendre

vers la carboneutralité [34, 35]. La technologie des Tokamak utilisé dans le projet ITER et des stellarator demande de confiner le plasma par de puissants champs magnétiques très bien contrôlés. Les HTS ont permis de redonner un regain d'intérêts à ces technologies grâce à leur résistance à de plus forts champs magnétiques que les LTS [36].

Les technologies de moteurs électriques se tournent avidement vers les HTS pour générer le couple nécessaire dans des domaines nécessitant de puissants moteurs comme les avions et les bateaux. American Superconductor a créé un moteur à propulsion de bateau [37]. Le but de ces moteurs est de réduire le nombre de systèmes utilisés et d'augmenter leur performance et leur fiabilité. [38].

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

3.1 Fabrication des rubans supraconducteurs

Les rubans supraconducteurs utilisés pour l'ensemble des mesures sont des rubans à haute température critique de seconde génération provenant de la compagnie SuperPower Inc. Ces rubans, illustrés à la figure 3.1, sont de 4 mm de largeur par 54 μm d'épaisseur. Le matériau supraconducteur utilisé est un oxyde mixte de baryum, de cuivre et de terre rare (REBCO) de 1.6 μm d'épaisseur. Pour assurer une protection minimale de la couche supraconductrice, le ruban est recouvert d'une couche d'argent ayant une épaisseur de 1 μm sur le dessus et de 1.5 μm sur le dessous. Les rubans non altérés sont nommés « rubans réguliers » dans le cadre de ce mémoire, en opposition aux autres types d'architectures de ruban, telle que l'architecture *Current Flow Diverter* (CFD).

3.1.1 Fabrication d'échantillon CFD

L'architecture élaborée dans le laboratoire pour améliorer la vitesse de propagation de la zone normale, (NZPV de l'anglais *Normal Zone Propagation Velocity*), est l'architecture CFD. Cette architecture est obtenue en modifiant la résistance d'interface d'un ruban régulier entre la couche supraconductrice et la couche d'argent. Dans le cadre de ce projet, cette interface est créée en gravant la couche d'argent sur une partie de la largeur. La région du supraconducteur désormais en contact avec la solution de gravure s'oxyde, augmentant ainsi sa résistivité. Ensuite, on dépose à nouveau de l'argent pour recouvrir entièrement le ruban.

Pour créer un ruban CFD, une mince bande d'argent d'une largeur se situant entre 80 % et

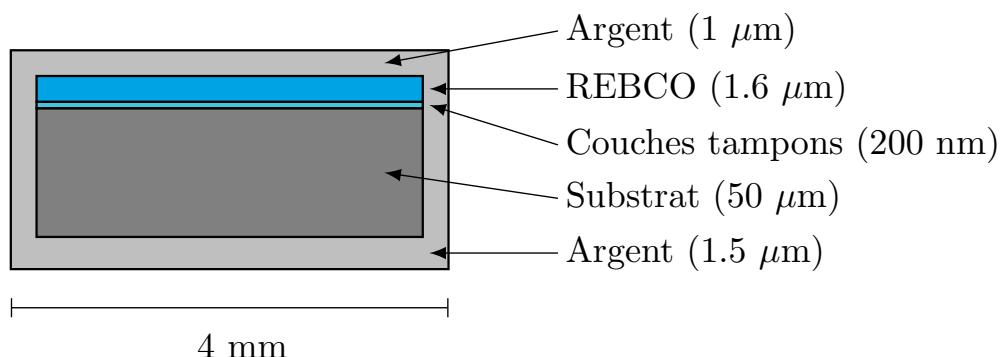


FIGURE 3.1 Schéma d'un ruban supraconducteur régulier de la compagnie SuperPower Inc.

95 % de la largeur du ruban, soit de 0.2 mm à 0.6 mm, doit rester intacte de chaque côté du ruban. La figure 3.2 illustre la section d'un ruban d'architecture CFD où l'on peut apercevoir cette distinction entre les deux interfaces.

Cette bande est donc masquée pendant la gravure par une encre ou du kapton, un ruban adhésif stable chimiquement et résistant aux hautes températures. La gravure se fait en versant une solution aqueuse à la surface du ruban masqué. La solution pour graver l'argent est composée de peroxyde (H_2O_2), d'ammoniaque (NH_4OH) et d'eau (H_2O) dans une proportion de 1 : 1 : 4 volumique. L'échantillon est soumis à un jet doux de la solution à l'aide d'une pipette jusqu'à ce que l'argent ait complètement disparu. Cette manipulation prend une dizaine de minutes. La solution diffuse seulement sur 5 à 10 nm de profondeur et ne vient donc pas altérer les propriétés supraconductrices de la couche de REBCO. Par contre, dans la région de diffusion de la solution, une couche résistive d'environ $10 \mu\Omega \cdot cm^2$ vient se créer.

Une fois la couche résistive réalisée, le ruban est alors prêt pour le dépôt d'argent sur toute sa surface. Ce dépôt se fait par pulvérisation à l'aide d'un magnétron («Magnetron sputtering»). L'appareil E-Beam de la salle blanche du Groupe de recherche en physique et technologie des couches minces (GCM) a été utilisé à cette fin.

La pulvérisation par magnétron est un procédé physique qui permet de créer une couche mince et uniforme d'argent sur la surface de l'échantillon supraconducteur. Ce procédé utilise l'énergie cinétique pour déposer les ions métalliques, générant ainsi peu de chaleur sur l'échantillon. Cet avantage est considérable car le REBCO ne peut pas être chauffé à de hautes températures. L'appareil crée un plasma gazeux d'argon sur une cible d'argent, libérant ainsi ces ions métalliques qui s'en vont bombarder l'échantillon supraconducteur et y adhèrent. Puisque les ions proviennent d'une direction, l'échantillon est en constante rota-



- █ Interface résistive (CFD)
- █ Interface conductrice
- █ Supraconducteur
- █ Argent

FIGURE 3.2 Section d'un ruban d'architecture CFD. L'interface résistive (orange) est formée à partir du supraconducteur en contact avec la solution de gravure de l'argent sur environ 90% de la largeur du ruban tandis que l'interface conductrice n'est pas gravée.

tion pour assurer un dépôt uniforme. La vitesse de déposition est de 220 nm/minute dans une atmosphère d'argon à un flot de 15 sccm (*Standard Cubic Centimeters per Minute*). Le plasma est généré par une source envoyant un courant continu. Une puissance de 300 W est utilisée. La chambre de dépôt est conservée une pression de 10 mTorr. Les couches d'argent déposées pour l'ensemble des échantillons varient entre 0.9 μm et 1.1 μm .

3.1.2 Électrodéposition des contacts

Le projet nécessite d'acheminer de forts courants dans des empilements de rubans supraconducteurs de deux ou quatre rubans. Le courant est acheminé dans ces empilements par des terminaux en cuivre. Ces terminaux sont pressés sur les contacts des échantillons à l'aide de vis. Les contacts sont des régions de 3 cm de longueur à chaque extrémité des échantillons qui ne sont pas altérés pendant les manipulations. Pour un échantillon CFD, cela veut dire que les contacts n'ont pas d'interfaces résistives. En effet, la résistance des contacts doit être gardée au minimum. Si la résistance des contacts n'est pas bien contrôlée, celle-ci peut générer des tensions parasites, causer une distribution non-uniforme du courant, et même chauffer les contacts, nuisant ainsi grandement aux résultats des expérimentations.

De plus, pour réduire la résistance des interfaces aux contacts, une électrodéposition de cuivre est faite sur tous les contacts des échantillons. L'électrodéposition permet de déposer une couche de cuivre de 10 μm à 15 μm d'épaisseur sur les contacts. Les terminaux étant aussi en cuivre, cela permet de créer des interfaces cuivre à cuivre de bonne qualité au lieu d'interfaces cuivre à argent. Ces nouvelles interfaces et le fait que la quantité de conducteur soit nettement plus grande, permet de diminuer la résistance de quelques ordres de grandeur.

L'électrodéposition se fait en trempant les extrémités des échantillons sur une longueur de 3 cm dans un bassin de solution de CuSO₄ à concentration de 250 g/L et 40 mL/L d'acide sulfurique concentré à 98%. La solution est chauffée à 40 °C pendant le dépôt. L'acide sulfurique permet de retirer la couche d'oxyde à la surface de l'argent, assurant une meilleure adhérence du cuivre. Il est toutefois important de noter que l'acide s'attaque rapidement à l'argent et qu'une exposition trop longue à l'acide peut endommager l'échantillon. Les échantillons sont donc plongés dans la solution en même temps que le courant circule. Le courant envoyé est un courant continu qui circule de la cathode en cuivre vers l'anode (échantillon). Pour une déposition optimale, la densité de courant maximale ne doit pas dépasser 30 mA/cm².

L'épaisseur du dépôt se calcule à partir des caractéristiques du métal utilisé. Cette épaisseur δ est calculée à partir de la formule 3.1

$$\delta = \frac{MI\Delta t}{A\rho\chi_e F} , \quad (3.1)$$

où $M_{Cu} = 63.548$ g/mol est la masse molaire du cuivre, I est le courant injecté, Δt est le temps de dépôt, A est l'aire de la surface à déposer, $\rho_{Cu} = 8.96$ g/cm³ est la masse volumique du cuivre, $\chi_e = 2$ est la susceptibilité électrique du cuivre et $F = 96485$ s·A/mol est la constante de Faraday. Pour le cuivre, la formule 3.1 devient

$$\delta [\mu\text{m}] = 0.01103 \cdot \Delta t . \quad (3.2)$$

Pour un dépôt de 10 µm, le temps requis est de 907 secondes.

Une fois ces étapes réalisées, les échantillons ressemblent à ceux montrés à la figure 3.3. Les échantillons sont de longueur différente pour l'empilement en escalier décrit dans la section *contacts et support pour les mesures expérimentales*.

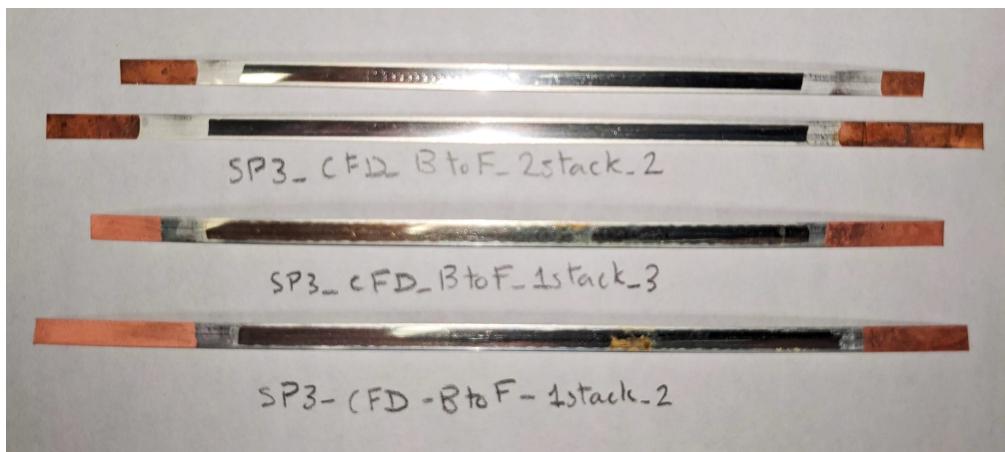


FIGURE 3.3 Quatre échantillons CFD pour les mesures de la NZPV avec leurs extrémités électrodéposées en cuivre.

3.1.3 Mesures de l'épaisseur d'argent

Toutes les mesures d'épaisseur des couches minces déposées sont prises au profilomètre Dek-tak 150, un appareil du GCM qui mesure le relief de la surface de l'échantillon à l'aide d'une aiguille. Cet instrument a une résolution de 10 nm pour les paramètres utilisés, ce qui est plus que nécessaire pour caractériser la surface des échantillons supraconducteurs qui peuvent avoir des reliefs de quelques centaines de nanomètres. Cet appareil a aussi l'avantage de pouvoir mesurer de fortes variations jusqu'à 1 µm sans endommager la surface de l'échantillon.

3.2 Caractérisation des rubans supraconducteurs

3.2.1 Circuits imprimés pour les mesures expérimentales

Les rubans supraconducteurs sont caractérisés à partir de mesures de tension. Ces mesures sont prises en envoyant un courant à travers le ruban et en mesurant la différence de potentiel à la surface du ruban. Ces mesures sont prises à espacement régulier sur toute la longueur du ruban. Des *pogopins* sont insérées sur un circuit imprimé (ou PCB de l'anglais *printed circuit board*) pour assurer un contact avec le ruban pour chaque point de mesure. La distance séparant chaque *pogopins* Δd est fixée à 1.27 mm. Le PCB se décline en deux variantes : une variante pour mesurer des courbes V - I du ruban, et une variante pour les mesures NZPV possédant un trou au centre. Ce trou permet d'insérer l'aimant qui produit le défaut dans le ruban, initiant un point chaud au centre du ruban. Comme on peut le voir à la figure 3.4, le PCB mesure 5 cm de longueur et est fixé à un support à l'aide de vis, les *pogopins* assurant une pression faible mais constante sur les échantillons. La variante du PCB pour mesures V - I possède 37 *pogopins* tandis que la variante pour mesures NZPV possède 33 *pogopins*. L'aimant utilisé est de 5 mm de diamètre et est pressé contre le ruban à l'aide d'une tige métallique.

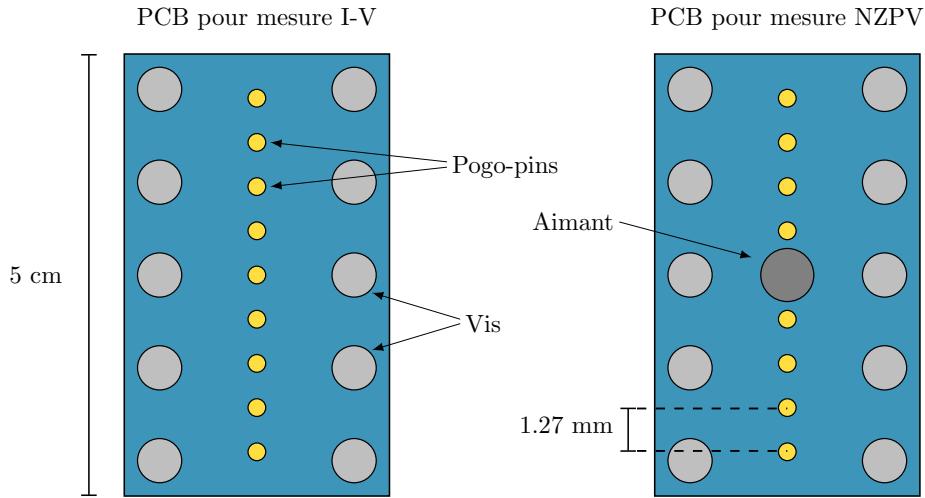


FIGURE 3.4 PCB pour les mesures de courbes E - I et de NZPV. Le PCB possède un trou de 8 mm de diamètre au centre pour pouvoir insérer l’aimant qui crée un défaut local dans le ruban. Le PCB pour les mesures E - I comporte 37 *pogopins* et le PCB pour les mesures de la NZPV comporte 33 *pogopins*.

3.2.2 Contacts et support pour les mesures expérimentales

Pour réaliser les mesures, les échantillons sont d’abord installés côté REBCO vers le haut sur un support en G10, un matériau non-conducteur avec un faible coefficient de dilatation thermique ($10 \mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$) et résistant à de fortes variations en température et en pression. Les extrémités des échantillons sont ensuite pressées sur le support par des terminaux en cuivre. Ces terminaux sont des plaques de cuivre de 3 cm de longueur vissées sur le support et reliées à la source de courant par des fils de cuivre torsadés. Le courant est donc injecté dans les échantillons par le dessus. La figure 3.5 illustre le montage des échantillons.

Pour les empilements de plusieurs rubans, il devient indispensable de concevoir un assemblage garantissant une résistance minimale aux extrémités de l’empilement. En effet, une forte résistance aux extrémités engendre de la chaleur qui se traduit par une élévation de la température dans ces régions. Lors des mesures, cette élévation de la température peut ajouter une tension indésirable dans les mesures et ultimement, un *quench* de l’empilement à partir des extrémités, rendant toutes mesures de la NZPV incorrectes.

Plusieurs assemblages existent pour réduire la résistance aux extrémités : un nettoyage de la surface, une pression accrue sur les extrémités, un ajout de métal par soudure ou seulement pressé. Dans ce projet, toutes ces méthodes ont été essayées. La soudure n’a pas offert des résultats préliminaires satisfaisants. Les mauvais résultats peuvent être dûs à une mauvaise

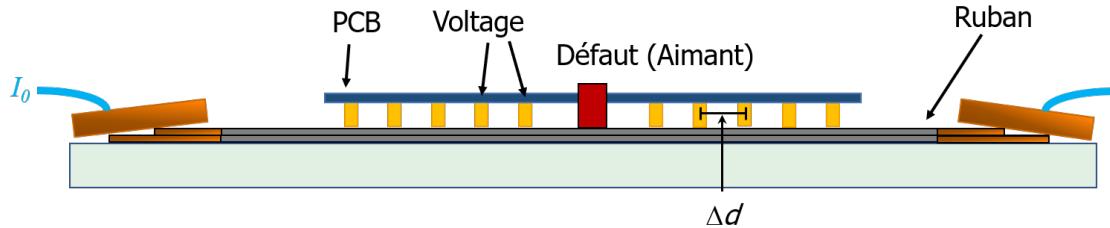


FIGURE 3.5 Montage expérimental d’empilement de deux rubans pour les mesures de NZPV. Les terminaux de cuivre sont inclinés pour être en contact avec chacun des rubans de l’empilement. La distance entre les *pogopins* Δd est égale entre chaque *pogopins*, ce qui assure une mesure précise de la NZPV.

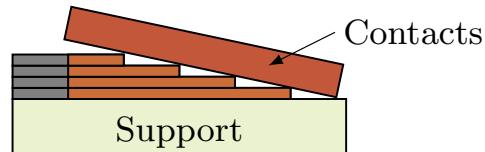


FIGURE 3.6 Contacts en escalier des empilements de rubans pour assurer que chaque ruban soit en contact avec les terminaux de cuivre.

utilisation du flux, la température, le métal de soudure ou les manipulations. La procédure suivie est celle expliquée dans le livre de Ekin [7].

L’assemblage utilisé pour les expériences finales fut de modifier la longueur des rubans et d’incliner les terminaux de cuivre. Plus précisément, chaque ruban était 0.5 cm plus long que celui au-dessus de lui. Cet assemblage permettait aux extrémités de chaque ruban d’être directement en contact avec les terminaux, tel qu’illustiqué à la figure 3.6. En effet, un empilement de type escalier aux extrémités permet d’injecter directement le courant dans chacun des rubans. Ainsi, le courant n’a pas à traverser plusieurs interfaces résistives entre chaque ruban. Par cet avantage, cet assemblage réduit suffisamment la résistance aux extrémités de l’empilement pour éviter tout échauffement néfaste dans ces régions. On peut remarquer toutefois une élévation de la tension pour des empilements de quatre rubans.

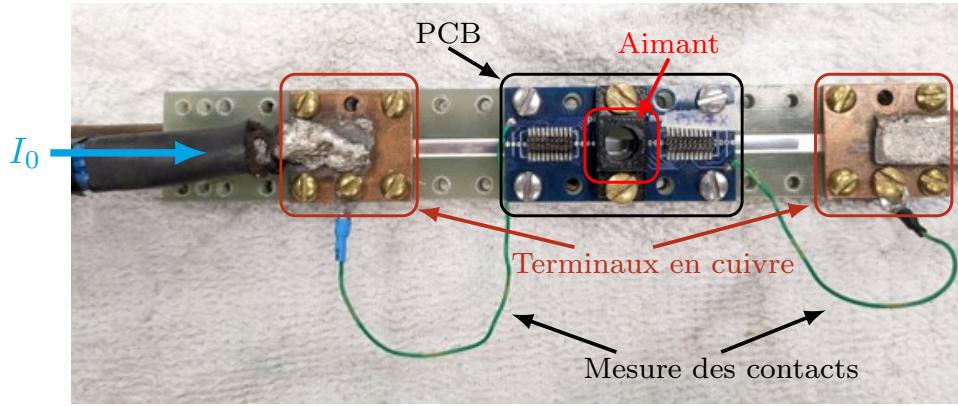


FIGURE 3.7 Système de mesures NZPV des échantillons. Les points de mesure de tension sont des *pogopins* en contact avec l'échantillon. Les terminaux en cuivre sont pressés sur l'échantillon avec des vis.

3.2.3 Empilement des rubans supraconducteurs

La caractérisation des rubans supraconducteurs est faite aussi sur des empilements de rubans. Ces empilements sont réalisés de deux façons différentes : un empilement conventionnel, dans lequel la couche supraconductrice est placée vers le haut pour chaque ruban. Ce type d'empilement est dit « dos à face ». Le second type d'empilement est de type « face à face ». Dans ce cas, les couches supraconductrices d'une paire de rubans sont mises face à face. Ces types d'empilements sont illustrés à la figure 3.8.

D'autres parts, les deux types d'empilements sont testés pour des empilements de deux rubans identiques et deux rubans différents, soit un ruban régulier et un ruban CFD. Lorsque l'empilement est formé de deux rubans identiques, il est appelé non-mixte et lorsqu'il est formé de deux rubans différents, il est nommé mixte. Les configurations mixtes et non-mixtes sont testées pour les deux types d'empilements BtoF et FtoF. Les empilements mixtes ont seulement été caractérisés pour des empilements de deux rubans.

3.2.4 Source de courant

Les mesures expérimentales en tension et en courant sont réalisées à l'aide d'une source de courant pulsée. Cette source est contrôlée par le logiciel LABVIEW qui, par l'entremise de cartes *National Instruments* (NI), communique avec la source de courant par des commandes

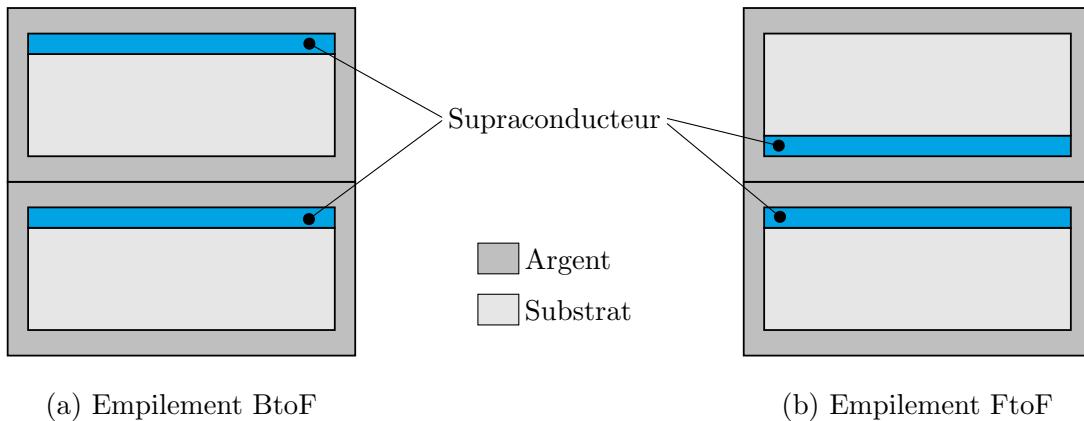


FIGURE 3.8 Schéma d'un empilement de type (a) *back to face* (BtoF) où les couches supraconductrices sont vers le haut et de type *face to face* (FtoF) où les couches supraconductrices sont face à face.

en tension. Le système de mesure est illustré à la figure 3.9. La source est constituée d'un ensemble de transistors de puissance et utilise le courant provenant de supercondensateurs pour injecter des pulses précis de courant continu dans les échantillons. Ces pulses peuvent aller de 5 A jusqu'à 1500 A avec une précision relative de 0.2 %. La durée des pulses varient entre 2 ms et 50 ms pour le projet. L'acquisition des tensions mesurées sur le dessus des échantillons est réalisée par une carte NI PXI-6255. Cette carte d'acquisition haute-fréquence possède 40 entrées en tension différentielle ayant une résolution de 0.05 mV pour les tensions employées et une fréquence d'acquisition de 750 kSample/s. On obtient donc environ 20 Sample/ms pour chaque entrée utilisée. Cette fréquence d'acquisition permet de recréer le signal parfaitement et est nettement supérieure à la vitesse de variation d'un point chaud dans le ruban. Avec ce système, le bruit sur les mesures est de l'ordre de 100 μ V.

3.2.5 Mesures Courbes $E-I$

La caractérisation des échantillons supraconducteurs demandent de connaître le courant critique I_c et l'exposant n de la loi de puissance. On peut trouver ces paramètres en mesurant la réponse en tension de l'échantillon pour un courant donné. Ces mesures, communément appelées courbes $E-I$, sont réalisées en envoyant un pulse de 5 ms pour un courant donné et en mesurant la tension générée dans les échantillons. Cette mesure est reproduite sur une grande plage de courant pour obtenir la réponse en tension de l'échantillon selon le courant envoyé. La réponse en tension de l'échantillon est mesurée entre les *pogopins* aux extrémités du PCB de mesure, soit sur une longueur de 47 mm. En analysant les données en champ

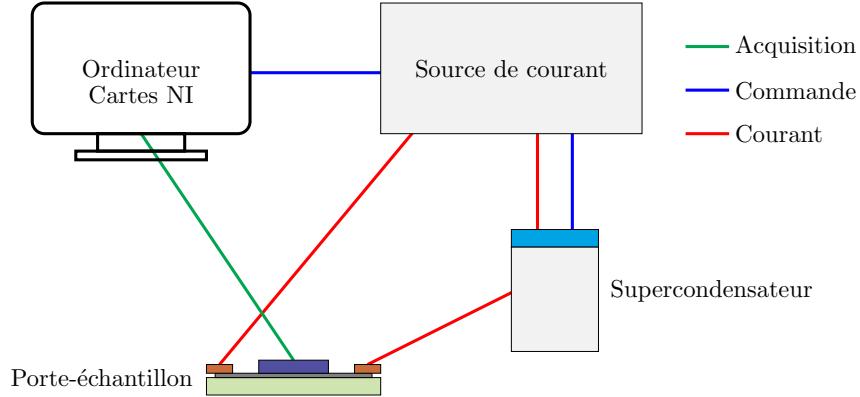


FIGURE 3.9 Système de mesures expérimentales pour caractériser les échantillons supraconducteurs.

électrique ($E = V/L$), on peut alors comparer la courbe obtenue avec le modèle en loi de puissance

$$E = E_0 \left(\frac{I}{I_c} \right)^n , \quad (3.3)$$

où E_0 est un seuil de champ électrique pour lequel le I_c est déterminé. Par convention, on utilise $E_0 = 1 \mu\text{V}/\text{cm}$. En échelle logarithmique, on trouve

$$\underbrace{\log E}_y = \underbrace{\log E_0 - n \log(I_c)}_b + \underbrace{n \log(I)}_a , \quad (3.4)$$

qui représente une droite de la forme $y = b + ax$. Une régression linéaire est utilisée pour déterminer la pente a et l'ordonnée à l'origine b . Cette régression est réalisée seulement sur les valeurs de haute tension car les plus faibles valeurs sont parasitées par du bruit et d'autres phénomènes générant de faibles tensions. On trouve alors

$$n = a \quad , \quad \log I_c = \frac{\log E_0 - b}{a} . \quad (3.5)$$

Graphiquement, I_c correspond à la valeur I de la droite lorsque $E = E_0$.

3.2.6 Base Line method

Cette méthode fonctionne très bien lorsqu'il est possible d'obtenir des valeurs de tensions pour des courants au-dessus du courant critique. Cependant, ce n'est pas toujours possible. Il se peut que le ruban chauffe rapidement au-dessus de son courant critique, entraînant ainsi une variation de la résistivité du ruban due à la température. Cette variation se transcrit par une pente non-nulle sur les courbes de voltage en fonction du temps. Puisque la courbe I-V se fait à température fixe, soit à la température de l'azote liquide, l'échauffement du ruban empêche d'obtenir des valeurs de tension concluantes.

Un autre problème pouvant survenir durant la prise de mesures est l'apparition d'une tension non-négligeable à faible courant, c'est-à-dire loin du courant critique. Cette tension peut être due à une résistance d'interface élevée entre les rubans ou entre les rubans et le contact en cuivre.

Ces deux problèmes peuvent être contournés en utilisant une méthode différente de traitement de données : la *base line method*. Cette méthode consiste à utiliser les tensions à faible courant pour faire passer une loi de puissance de faible pente ($n_b \approx 5 - 10$) et de faible courant critique $I_{c,b}$ pour soustraire cette courbe aux tensions à hauts courants. On peut ensuite retrouver un nouveau n et I_c . En d'autres mots,

1. On trouve n_b et $I_{c,b}$ en ajustant une loi de puissance sur des tensions de faibles courants.
2. On soustrait les deux lois de puissance entre elles :

$$E_{mod} = E_{mes} - E_0 \left(\frac{I}{I_{c,b}} \right)^{n_b}$$

où E_{mes} sont les valeurs de champ électrique mesurées.

3. On ajuste une nouvelle loi de puissance sur les nouvelles valeurs de tension à hauts courants.

On peut voir cette méthode à la figure 3.10.

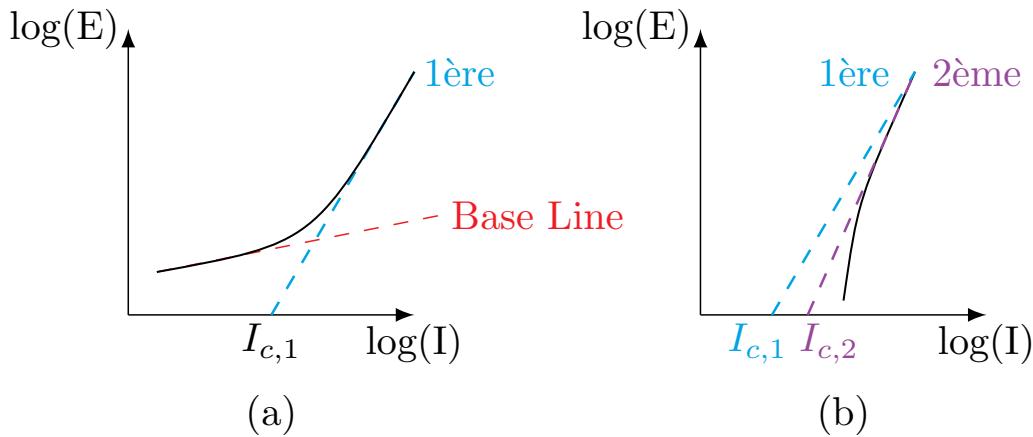


FIGURE 3.10 *Base Line method* pour obtenir des valeurs de I_c et n du ruban lorsque les valeurs de E de plus hauts courants sont bruitées. La 1ère loi de puissance est rectifiée par la régression *base line* pour obtenir la 2ième loi de puissance. On peut alors trouver les nouvelles valeurs de courant critique du ruban $I_{c,2}$ et de n .

3.2.7 Mesures R vs T

La mesure de la résistance du ruban selon la température permet de déterminer la réponse du ruban lorsqu'un quench engendre une élévation de la température locale du ruban. Cette mesure est prise à l'aide d'un nanovoltmètre et d'un système par mesure 4 pointes. Le courant est injecté dans les deux pointes extérieures et la tension est mesurée dans les deux pointes intérieures comme l'illustre la figure 3.11. De cette façon, la mesure permet d'ignorer la résistance des sondes de mesures. L'échantillon est soumis à la température de l'azote liquide

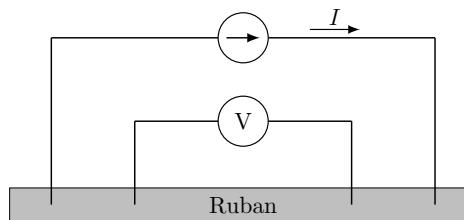


FIGURE 3.11 Mesure 4 pointes pour caractériser la résistivité du ruban supraconducteur selon la température. Le courant est envoyé aux extrémités de l'échantillon tandis que la mesure de tension est prise loin des extrémités. Le courant change de direction à chaque mesure pour retirer l'effet thermoélectrique.

et est lentement réchauffé pour obtenir sa plage de réponse en température entre 77 K et 300 K. Chaque mesure est la moyenne des tensions pour un courant injecté dans une direction puis dans l'autre. Cette méthode permet d'éliminer l'effet thermoélectrique.

3.3 Mesures expérimentales de la NZPV

La mesure de la vitesse de propagation de la zone normale se fait en introduisant un défaut au centre du ruban pour imposer une région de plus faible courant critique. Ce défaut est généré par un aimant cylindrique déposé sur le dessus de l'échantillon. Le champ magnétique de l'aimant fait diminuer le courant critique local d'environ 30 à 50 %. En imposant un pulse de courant au dessus du courant critique du défaut, on impose un point chaud local au centre de l'échantillon. Ce point chaud génère de la chaleur et entraîne également un quench dans la région avoisinante. Cette zone s'agrandit et se propage à vitesse fixe pour un courant donné, nommée NZPV. Il est possible de déterminer la NZPV en détectant la propagation de la zone résistive. En effet, la perte des propriétés supraconductrices dans la zone chaude impose une résistivité non-nulle. Le courant voyage dans l'argent et une différence de tension peut être détectée.

Cette différence de tension est détectée par le système de la source de courant et du PCB de mesure. Les courbes de tension selon le temps sont parallèles et, grâce à leur espacement, on peut déduire la NZPV

$$NZPV = \frac{\text{distance entre deux } pogo \text{ pins}}{\text{temps écoulé entre deux courbes de tension}} , \quad (3.6)$$

où la distance entre deux *pogo pins* est égale à 1,27 mm. Les courbes de tension affichent deux régimes différents, une région à température quasi-constante et une région où le ruban a dépassé la température critique. La NZPV est déterminée à partir du premier régime comme on peut le voir à la figure 3.12 car cette vitesse suit le front de propagation et non la variation de résistivité longtemps après le quench.

Une mesure du courant critique de l'échantillon est fait après la mesure de la NZPV pour s'assurer que cette dernière n'a pas dégradé l'échantillon pendant l'expérience.

3.3.1 Analyse d'erreur

Les mesures sont généralement bruitées et les courbes de tension pour la mesure de la NZPV peuvent ne pas être parfaitement parallèles. Pour de forts courants, la zone normale proche du défaut peut s'échauffer très rapidement. Cet échauffement oblige d'envoyer des pulses de

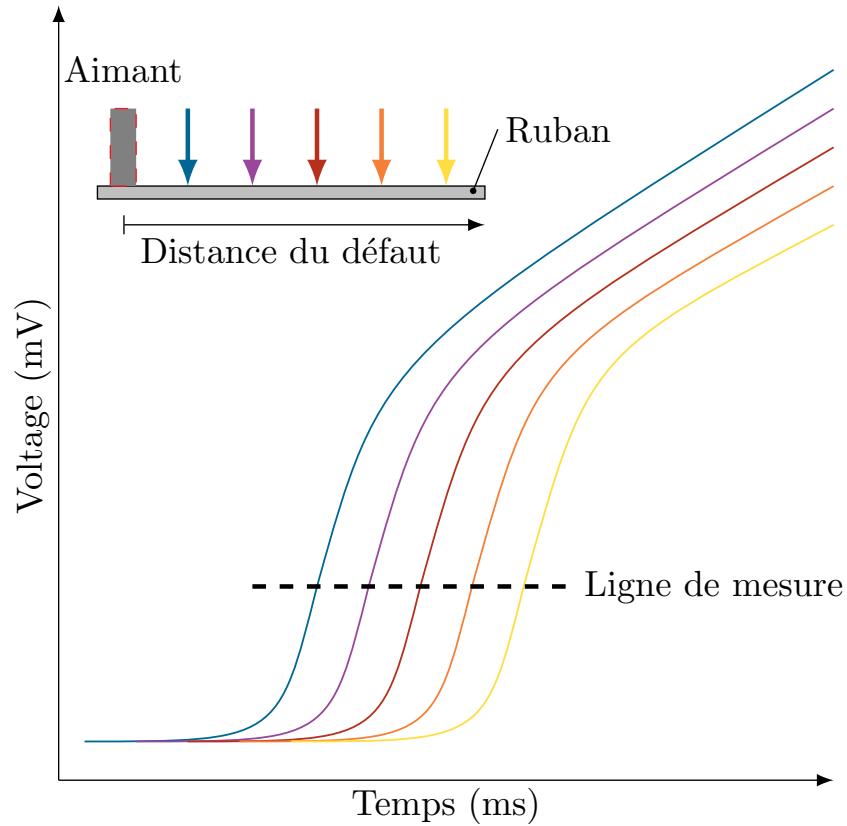


FIGURE 3.12 Courbes de mesures de voltage pendant un pulse de courant pour différents points de mesure. La première courbe a affiché une résistance non-nulle est celle la plus proche de l'aimant. La mesure de la NZPV se fait dans le régime de tension le plus faible.

très courte durée, empêchant ainsi de faire *quencher* le ruban sur une grande distance. La mesure est alors prise avec quelques points de tension seulement. Ces différentes contraintes augmentent la variabilité du calcul de la NZPV. Une façon de calculer cette variabilité est d'utiliser plusieurs lignes de mesure pour le calcul de la NZPV. Il s'agit donc de déterminer pour une certaine mesure une plage de tension pour laquelle la NZPV est calculée. Cette plage de tension est divisée en 50 lignes de mesures et la NZPV est calculée en faisant la moyenne de chaque ligne. L'écart-type est alors calculé pour déterminer la variabilité de la NZPV due au bruit de la mesure.

3.4 Modélisation et simulation des rubans supraconducteurs

Dans le but de mieux comprendre la propagation de la chaleur et la distribution électrothermique des empilements de rubans supraconducteurs, des simulations à l'aide de COMSOL

Multiphysics ont été réalisées. Ces simulations ont été essentielles pour mieux comprendre le développement de la zone normale dans les empilements de rubans supraconducteurs et d'élaborer les mesures expérimentales intéressantes à réaliser dans ce projet. Ces simulations avaient donc davantage pour rôle d'aider à concevoir les mesures expérimentales, avant de servir à corroborer les résultats de ces dernières.

Ce logiciel propose un modèle par éléments finis pour résoudre les équations physiques. Les simulations ont été réalisées pour les comparer avec les résultats expérimentaux, assurant ainsi une meilleure compréhension de la dynamique des empilements de rubans.

3.4.1 Physiques utilisées

Les simulations estiment la propagation de la zone normale dans les rubans et ne considèrent pas le problème physique complet. Elles modélisent la dynamique électrothermique des rubans et ne tiennent pas compte de la dépendance en champ magnétique du problème. Les variables indépendantes utilisées sont la tension V et la température T . Ces deux variables sont reliées entre elles par le terme source de l'effet Joule. Puisque la propagation de la zone normale correspond à un régime hors équilibre, il est essentiel d'étudier ce phénomène dans le temps. L'équation de la chaleur est, sans échange avec l'extérieur,

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_e , \quad (3.7)$$

où ρ est la densité volumique du matériau, C_p est la capacité thermique massique à pression constante du matériau, k est la conductivité thermique du matériau et Q_e est un terme source de génération de chaleur. Dans le cas actuel,

$$Q_e = \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} , \quad (3.8)$$

où \mathbf{J} est la densité de courant, \mathbf{E} est le champ électrique.

La tension V est obtenue à l'aide de la loi de conservation du courant

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} , \quad \mathbf{E} = -\nabla V, \text{ et } \nabla \cdot \mathbf{J} = 0 , \quad (3.9)$$

$$(3.10)$$

où σ est la conductivité du matériau. En combinant ces équations, on trouve donc :

$$\nabla \cdot \sigma \nabla V = 0 , \quad (3.11)$$

qui est l'équation finale solutionnée dans COMSOL. La couche supraconductrice est modélisée par une loi de puissance. Son équation pour la conductivité est

$$\sigma = \frac{J_c}{|\mathbf{E}|} \left(\frac{|\mathbf{E}|}{E_0} \right)^{1/n} \quad (3.12)$$

où J_c est la densité de courant critique du ruban, n est l'exposant associé à la loi de puissance et est propre à chaque ruban. Il vaut environ 20. E_0 est une valeur arbitraire pour laquelle le courant critique est défini. Dans notre cas, $E_0 = 1 \mu\text{V}/\text{cm}$. Le courant critique dépend de la température par

$$J_c(T) = J_{c,0} (1.98 \cdot 10^{-7} \cdot T^4 - 4.39 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 + 0.00358 \cdot T^2 - 0.176 \cdot T + 5.87) \quad \text{pour } T < T_c \quad (3.13)$$

où $J_{c,0}$ est le courant critique à 77 K et T_c est la température critique du supraconducteur. Dans notre cas, $T_c = 90$ K.

Pour la simulation, on assume un ruban suffisamment grand pour que les effets de longueur n'aient pas d'impacts sur la propagation de la zone normale. Cette approximation oblige le ruban à être deux fois plus long que la longueur de la zone normale à la fin de la simulation. Si la longueur du ruban est trop petite, une élévation de la température apparaît à l'extrémité la plus loin du défaut. En suivant cette approximation, on estime que le courant circule uniquement dans la couche supraconductrice loin du défaut. Le courant est donc injecté purement dans la couche supraconductrice par une condition de Neumann pour conserver une valeur de potentiel V constante.

$$I_0 = \int_{\Omega} -\mathbf{n} \cdot \mathbf{J} \, dS \quad (3.14)$$

où Ω est la section de REBCO à l'extrémité du ruban. Le courant est injecté progressivement pendant 3 ms dans le ruban pour atteindre le courant désiré en suivant une fonction de heavyside continue jusqu'à la seconde dérivée. De plus, on suppose que le ruban est isolé électriquement et thermiquement sur le temps de la simulation avec les conditions frontières

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{J} = 0 \quad \text{et} \quad -\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = 0 , \quad (3.15)$$

où $\mathbf{q} = -k\nabla T$ est le flux de chaleur ;. associé à la température.

3.4.2 Modélisation du défaut

Le défaut est modélisé comme une faiblesse dans le courant critique au milieu du ruban. Il suit une gaussienne de la forme

$$J_c(x, T) = J_c(T) \left(1 - a e^{-(x-L/2)^2/d^2}\right) \quad (3.16)$$

où a est un coefficient de l'intensité du défaut compris entre 0 et 1. Pour les simulations, il est fixé à 0.8, soit une diminution de 80 % du courant critique au défaut. L est la longueur du ruban et d est un coefficient d'aplatissement de la gaussienne. Il vaut 4 mm pour toutes les simulations.

La tension est imposée à la terre à l'extrémité la plus proche du défaut.

3.4.3 Géométrie

Les rubans supraconducteurs possèdent une géométrie hautement anisotropique, ayant une épaisseur totale de 54 µm et une longueur de 10 cm. Il est important de définir une géométrie qui exploite la symétrie du problème. Puisque le ruban utilisé pour les expériences provient de SuperPower, les épaisseurs des couches sont de 1.6 µm pour le REBCO, de 1 µm pour l'argent sur le dessus, et 1.5 µm pour l'argent sur le dessous. Les deux couches d'argent sont connectées sur le côté du ruban par une couche d'argent latérale de même épaisseur que celle du dessus.

Pour réduire le nombre d'éléments à simuler, le ruban est modélisé seulement sur la moitié de sa longueur et la moitié de sa section. Il est donc considéré que le ruban se comporte de la même façon de chaque côté du défaut. La figure 3.13 représente cette astuce.

Les couches tampons et l'interface résistive pour l'architecture CFD sont représentées par une interface résistive équivalente sans épaisseur. Elles imposent donc une discontinuité du

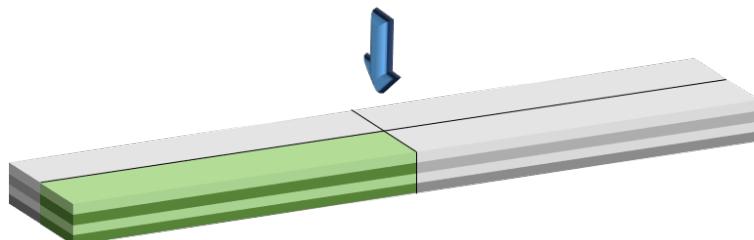


FIGURE 3.13 Modélisation du quart de l'empilement de rubans, soit la région représentée en vert.

potentiel électrique de chaque côté de l'interface de la forme

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{J}_i = (-1)^i \frac{\sigma}{h} (V_1 - V_2) \quad \text{pour } i = \{1, 2\} \quad (3.17)$$

où \mathbf{J}_i est la densité de courant de chaque côté de l'interface, V_i sont les tensions de chaque côté de l'interface, σ est la conductivité électrique des couches tampons et h est l'épaisseur des couches tampons. Celles-ci isolent électriquement le substrat de la couche supraconductrice, mais elles laissent diffuser la chaleur.

3.4.4 Maillage

Le maillage est défini de façon à permettre une bonne modélisation de la propagation du quench tout en limitant le nombre d'éléments utilisés. Ceci constitue un enjeu majeur puisque les simulations peuvent rapidement prendre quelques heures pour un seul ruban et deviennent de plus en plus difficiles à faire converger pour plusieurs rubans. Les éléments du maillage utilisés sont des hexaèdres, car ils s'ajustent bien à la géométrie de forme rectangulaire. Les éléments sont d'abord produits sur une section du ruban, puis ensuite un balayage de type "extension" est fait sur la longueur du ruban peut engendrer la troisième dimension. Le nombre d'éléments augmente en s'approchant du défaut. Les éléments mesurent entre 0.1 mm et 0.5 mm selon l'architecture et la position de l'élément.

3.4.5 Méthode de résolution des équations

Le modèle se résout dans le domaine temporel pour bien comprendre la dynamique de la propagation de la chaleur. Il se résout avec un solveur linéaire direct. Les deux physiques sont complètement couplées.

Les éléments sont des polynômes du premier degré pour réduire la charge de calcul.

CHAPITRE 4 RÉSULTATS DES MESURES SUR DES EMPILEMENTS DE RUBANS SUPRACONDUCTEURS

Ce chapitre aborde les résultats des mesures expérimentales et les simulations effectuées pour mieux comprendre la dynamique électrothermique des empilements de rubans supraconducteurs. Avec les mesures, on cherche à déterminer si l'architecture CFD continue d'augmenter efficacement la vitesse de propagation de la zone normale (NZPV) dans un empilement de rubans, tout comme dans un ruban isolé. Les propriétés des rubans sont d'abord caractérisées individuellement, puis en empilement, dans le but de bien comprendre la dynamique de propagation du courant et de la chaleur dans un régime de point chaud. Des mesures de la NZPV sont finalement réalisées sur plusieurs empilements différents de deux et quatre rubans. Des empilements mixtes de rubans d'architectures régulière et CFD sont aussi étudiés.

4.1 Mesures R vs T

Les propriétés électromagnétiques des rubans supraconducteurs varient grandement avec la température. Une propriété utile à caractériser est la résistivité du ruban. À l'aide d'une mesure quatre pointes, il est possible de tracer la réponse en tension du ruban pour la plage de températures variant entre la température de l'azote liquide (77 K) et la température ambiante (298 K). Il est alors possible de trouver la résistance linéaire du ruban à l'aide de

$$R = \frac{V}{I L} , \quad (4.1)$$

où $I = 100$ mA est le courant injecté et $L = 2.5$ cm est la distance entre les pointes de mesure de tension. Cette mesure est illustrée à la figure 4.1. On remarque que le ruban cesse d'être supraconducteur à partir de 96 K, soit sa température critique T_c . À partir de cette température, la résistance de l'argent domine et le ruban affiche une résistance s'approchant de celle d'un conducteur métallique. On peut donc voir que la résistance augmente de façon presque linéaire sur la plage de température. Cette résistance atteint 11.2 mΩ/cm à 298 K.

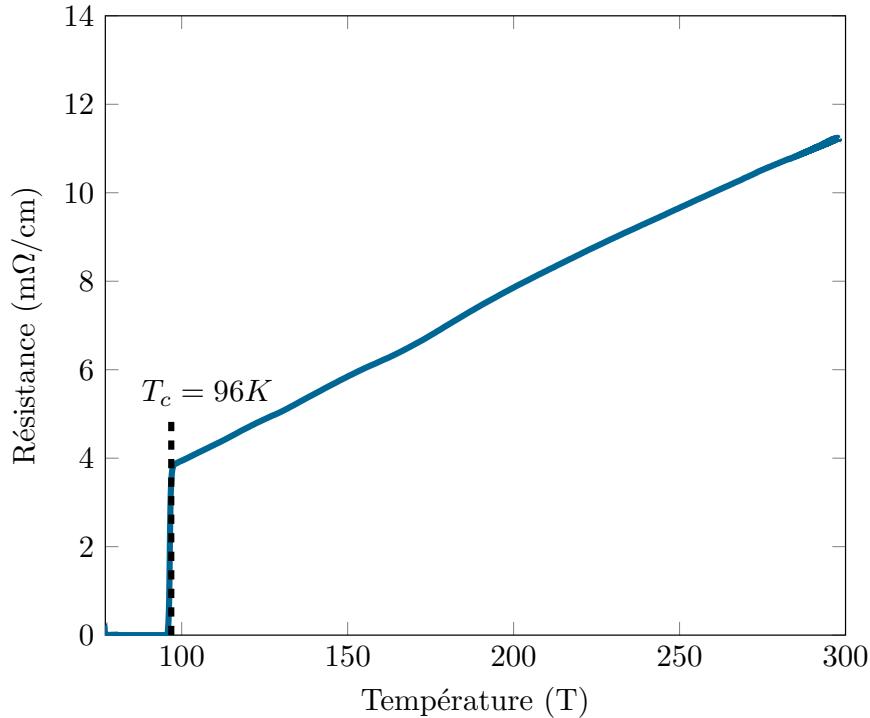


FIGURE 4.1 Résistance vs température pour un ruban supraconducteur commercial de la compagnie SuperPower Inc.. La température critique T_c du ruban est d'environ 96 K, et la résistance du ruban atteint 11.2 mΩ/cm à la température ambiante, soit 298 K.

4.2 Acquisition des données brutes

Comme mentionné dans la section méthodologie, les données brutes sont des données en tension prise à partir d'une source pulsée contrôlée en courant. Cette section permet de présenter ces données avant l'analyse et d'expliquer quelles sont les étapes nécessaires pour extraire les données pour les courbes E - I et la NZPV.

4.2.1 Données pour les courbes en tension

La première mesure cherche à déterminer les valeurs de tension en fonction du courant pour établir la courbe E - I . Cette courbe permet alors d'extraire le courant critique I_c et l'indice de transition résistive n . Pour obtenir cette première mesure, la source envoie un pulse de courant précis pendant un certain temps. Dans la figure 4.2, le courant injecté est de 291 A pendant 7 ms. L'empilement de ruban ne générera pas de tension si le courant injecté est faible par rapport au courant critique. En effet, loin du I_c , l'empilement conduit parfaitement le courant sans aucune résistance. En dépassant le I_c , une faible résistance commence à apparaître. La tension mesurée n'est plus nulle sur l'ensemble du ruban, ce qui se traduit par

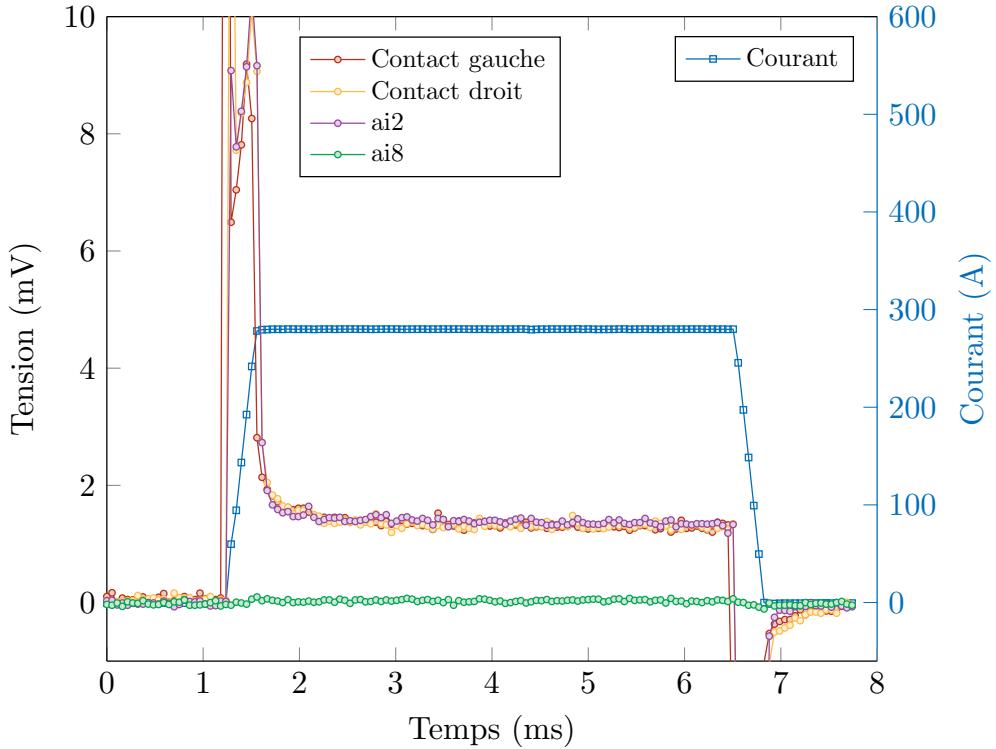


FIGURE 4.2 Données recueillies pour la mesure des courbes E - I d'un empilement BtoF de deux rubans réguliers. Le pulse envoyé est un courant continu de 291 A d'une durée de 7 ms. Les contacts sont des mesures des tensions aux extrémités de l'empilement. L'identification "ai2" représente la tension sur toute la longueur du PCB (5 cm) et ai8 représente une mesure entre deux *pogopins*.

une tension constante observée. Dans l'exemple de la figure 4.2, les tensions mesurés avec une identification "aiX" représente la notation utilisée par les cartes d'acquisition NI pour la mesure du signal entre deux points et signifie *analog input*. Dans les mesures du projet, "ai1" et "ai79" sont des mesures de tension entre un terminal de cuivre et la *pogopin* la plus proche du terminal sur le PCB de mesure. Ces mesures déterminent s'il y a une résistance et un échauffement aux contacts de l'échantillon. La tension de "ai2" est la tension mesurée par les *pogopins* aux extrémités du PCB de mesure L_{PCB} . Finalement, les identifications "ai3" à "ai79" représentent des tensions mesurées par une paire de *pogopins* consécutive.

Dans l'exemple de la figure 4.2, la tension "ai2", notée V_{ai2} , vaut 1.2 mV. Cette valeur est propre au courant de 291 A. En prenant la même mesure sur une grande plage de courant, on peut tracer la courbe E - I où E est le champ électrique ($E = V_{ai2}/L_{PCB}$).

Dans la figure 4.2, on remarque aussi qu'il y a des pics de tension durant la montée et la descente du pulse de courant. Ces pics sont dus à l'induction produite par le changement

rapide de courant dans le système. Ils n'impactent pas la lecture de la mesure. Dans le système, les tensions des contacts, soit la tension entre un terminal de cuivre et la première *pogopins* du PCB de mesure, sont surveillés. Cette mesure permet de savoir s'il se produit un échauffement aux contacts, ce qui peut entraîner des mesures erronées des tensions.

Finalement, à la figure 4.2, les tensions doivent être constantes sur la durée du pulse. En effet, une tension qui affiche une pente ne peut pas être prise en considération lors du calcul de la courbe $E-I$. Cette pente est causée par un changement de température pendant le pulse, ce qui augmente la résistance de l'empilement et donc la tension mesurée.

4.2.2 Données pour la NZPV

Les mesures de la NZPV sont prises en introduisant un défaut au centre de l'échantillon. Ce défaut est créé par un aimant déposé sur le dessus de l'échantillon, ce qui réduit le courant critique local de 60 %. La mesure cherche à envoyer un courant au-dessus du I_c de ce défaut pour induire une zone normale qui se propage. Sur la figure 4.3, on voit un exemple de courbe

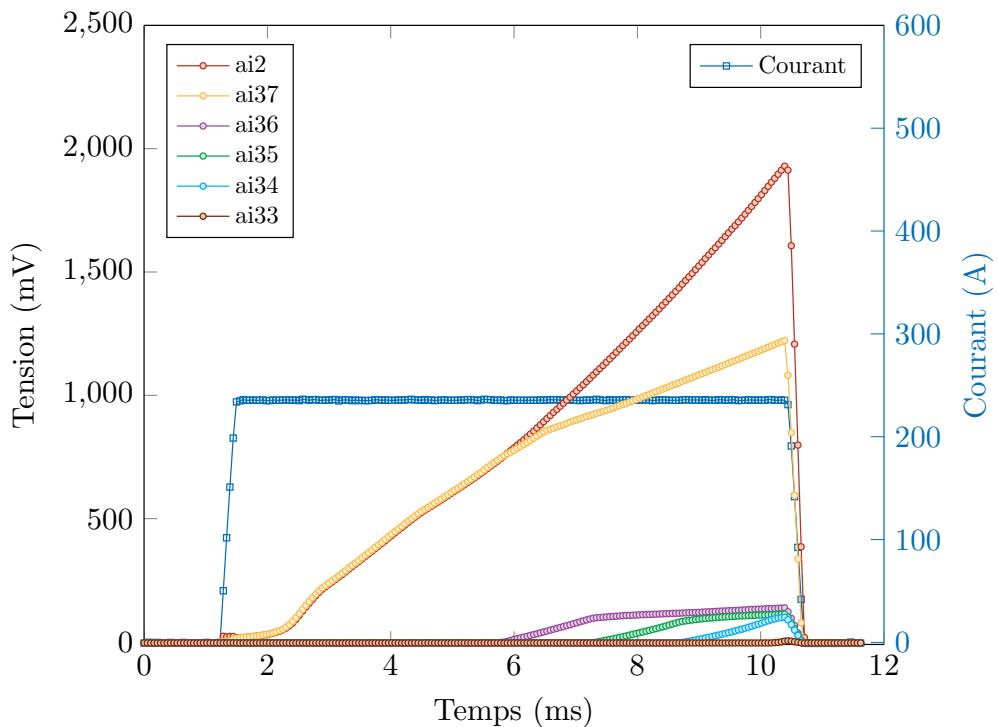


FIGURE 4.3 Données recueillies pour la mesure NZPV d'un empilement BtoF de deux rubans réguliers. Le pulse envoyé est un courant continu de 251 A pendant 9 ms. L'identification "ai2" représente la tension sur toute la longueur du PCB (5 cm), "ai37" est la tension de chaque côté du défaut, "ai36" à "ai33" sont les premières tensions mesurées à gauche du défaut.

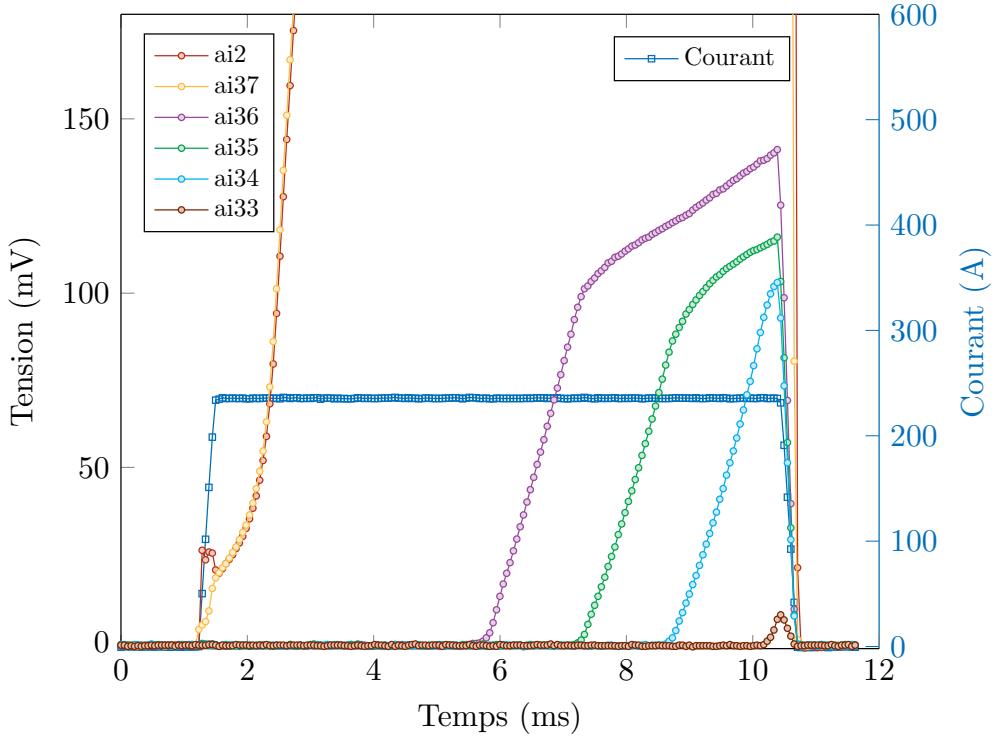


FIGURE 4.4 agrandissement des données recueillies pour la mesure NZPV d'un empilement BtoF de deux rubans réguliers. Le pulse envoyé est un courant continu de 251 A pendant 9 ms. L'identification "ai2" représente la tension sur toute la longueur du PCB (5 cm), "ai37" est la tension de chaque côté du défaut, "ai36" à "ai33" sont les premières tensions mesurées à gauche du défaut. Les courbes "ai36", "ai35" et "ai34" sont parallèles et sont utilisées pour déterminer la NZPV.

pour la mesure de la NZPV. Cet exemple montre pulse de courant de 251 A qui dure 9 ms. La courbe "ai2" représente la tension prise aux extrémités du PCB de mesure (5 cm). La courbe "ai37" mesure la tension de chaque côté du défaut sur une distance de 8 mm, contrairement à la distance entre deux *pogopins* qui est de 1.27 mm. Cette tension est donc beaucoup plus élevée que les autres et ne suit pas la même tendance. Conséquemment, la mesure de "ai37" n'est pas pertinente pour l'évaluation de la NZPV mais permet d'évaluer la hausse de la température du ruban à l'endroit du défaut.

Afin d'évaluer correctement la NZPV, il faut faire un agrandissement des courbes "ai36" à "ai33". La figure 4.4 illustre cet agrandissement pour l'exemple de la figure 4.3. Sur cette figure, on remarque que les courbes "ai36", "ai35" et "ai34" sont parallèles sur une certaine plage de tension. Ce sont ces courbes qui sont utilisées pour appliquer la méthode vue dans la méthodologie pour extraire la NZPV. Il est bon de noter qu'on observe un changement de pente dans chaque courbe. Ce changement est dû à un changement d'état dans l'échantillon

à cet endroit. La mesure de la NZPV est évaluée dans la première région : la région de pente élevée, qui correspond à l'état supraconducteur.

La difficulté de la mesure réside dans le temps du pulse. En effet, un pulse plus long augmente le nombre de courbes qui passent à l'état normal et donc augmente le nombre de points pour estimer la NZPV. Par contre, plus le temps du pulse est long, plus la température à l'endroit du défaut augmente, et plus il est probable que l'échantillon subisse une dégradation permanente. À hauts courants, une augmentation du temps du pulse de 1 ms est suffisant pour augmenter la température des échantillons de 200 K. Il faut noter que ces températures ne sont pas mesurées directement dans le système, mais plutôt estimées à partir de leur résistivité et comparés à leur variation de la résistivité selon la température.

4.3 Courbes I - V

Les mesures de courbes E - I permettent de caractériser les propriétés de l'empilement de rubans en déterminant son courant critique I_c ainsi que l'exposant de la loi de puissance n , tel que vu à l'équation 3.3. Toutes les mesures de I_c sont prises selon le critère de champ électrique $E_0 = 1 \mu\text{V}/\text{cm}$.

Ces mesures permettent également d'évaluer la résistance à faible courant, même si celle-ci n'est pas quantifiée. En effet, la résistance est mesurée systématiquement avant chaque mesure de la NZPV pour assurer que l'empilement ne chauffe pas démesurément à ses extrémités lors du test suivant. En effet, la tension des terminaux doit suivre la même augmentation de résistance que le reste du ruban. Une haute résistance de ceux-ci peut engendrer un échauffement excessif, entraînant possiblement un *quench* aux extrémités de l'empilement. Pendant une mesure NZPV, si un *quench* survient aux contacts, il devient alors impossible de distinguer la propagation de la zone normale provenant d'une extrémité de celle provenant du défaut, rendant ainsi la mesure inutilisable.

Certaines courbes sont ajustées avec la *Base Line Method* pour déterminer I_c et n . Les empilements affichent quand même une résistance trop élevée à de faible courant pour s'abstenir d'utiliser cette méthode. Par exemple, les mesures faites avec un seul ruban ne nécessitent pas d'utiliser la méthode, comme l'illustre la figure 4.5. On peut facilement distinguer le comportement linéaire des points à hauts courants pour ces mesures, et il est aisément d'en extraire les paramètres du modèle des rubans.

Par contre, pour les mesures d'empilement de deux et de quatre rubans, la *Base Line Method* est nécessaire. Comme mentionné par Ekin (2006) [7], les rubans affichent un n s'approchant de 20. Le critère utilisé pour déterminer l'utilisation de la méthode est un n inférieur à 16.

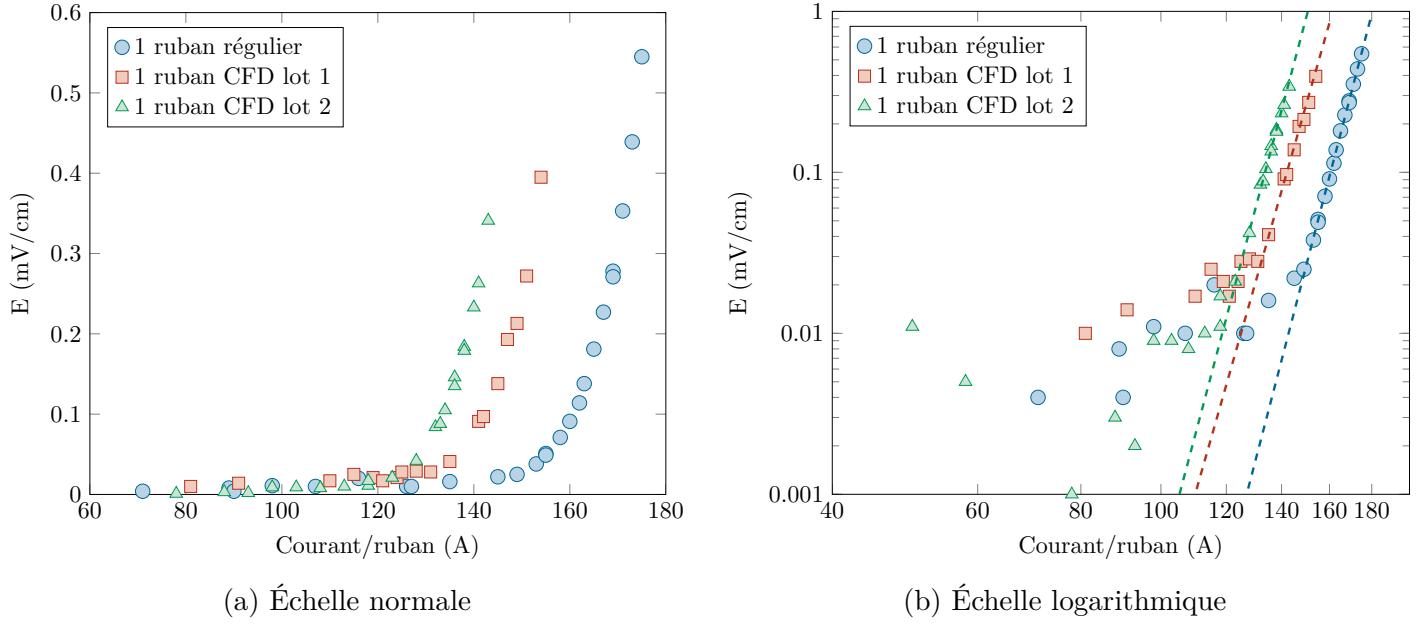


FIGURE 4.5 Courbe E - I de différents rubans. La *Base Line Method* n'a pas été utilisée, car les rubans affichent de faibles tensions à bas courant. Le ruban régulier a un I_c de 127 A et un n de 19.7, le ruban CFD du premier lot a un I_c de 110 A et un n de 18, et le ruban CFD du deuxième lot a un I_c de 105 A et un n de 19.3.

Ce choix est supporté aussi par le fait que le I_c est très faible avant correction. En effet, on peut remarquer à la figure 4.6 que le I_c de l'empilement de quatre rubans réguliers est de 293 A avant correction. Ce courant critique est très loin du courant critique asymptotique formé par la somme des courants critiques de chaque ruban, qui est d'environ 500 A. On remarque aussi dans la figure que les points à haut courant ne se distinguent que faiblement des points à plus faible courant. La correction vient ajuster le I_c à 410 A avec un n de 20. Les points pour la régression linéaire apparaissent désormais clairement avec la correction.

À titre indicatif, les différents empilements de deux rubans supraconducteurs se situent entre les deux, certains demandant la *Base Line Method* et d'autres non. La figure 4.7 illustre les courbes E - I pour tous les types d'empilements à deux rubans testés. On remarque que les rubans CFD ont un I_c environ 85% des I_c des rubans réguliers.

Le tableau 4.1 résume les mesures en courant et en tension de l'ensemble des mesures de I_c faites sur des rubans et des empilements de rubans.

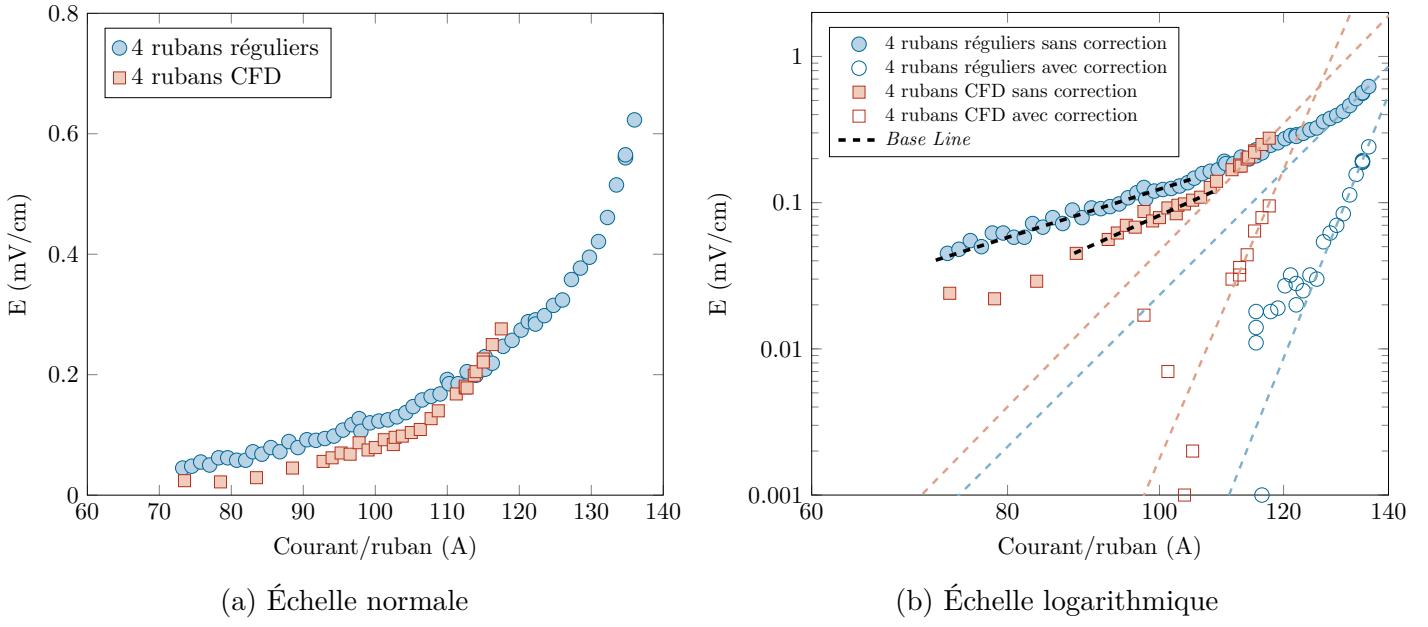
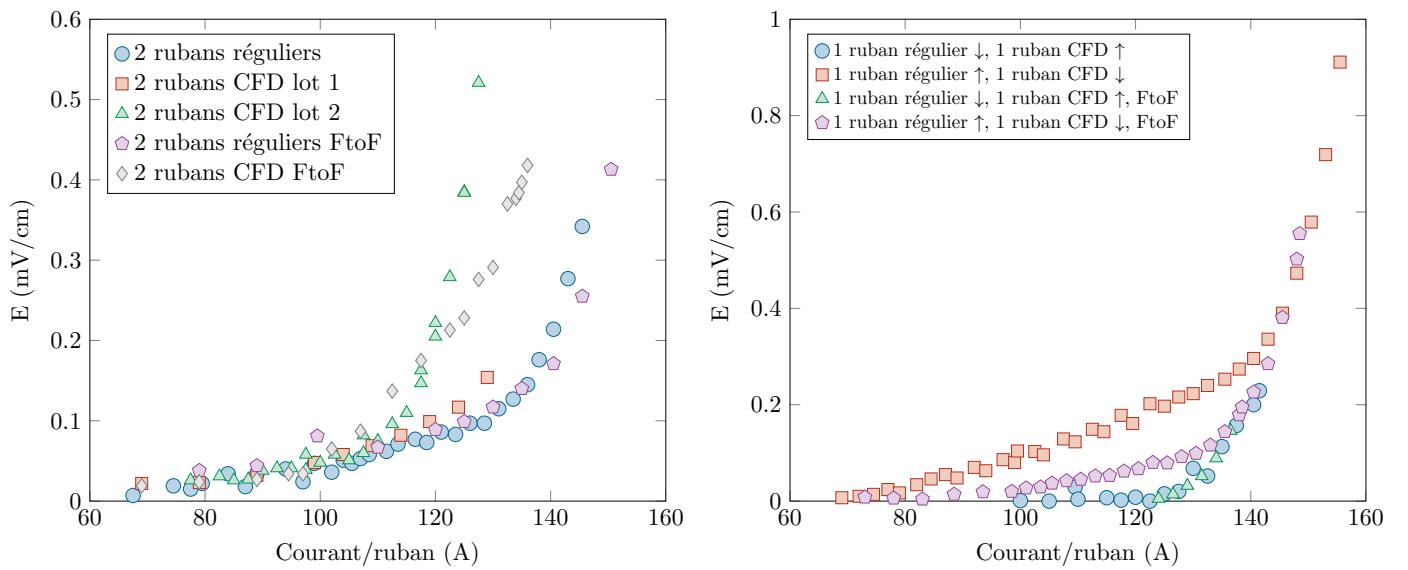


FIGURE 4.6 Courbe E - I d'un empilement de quatre rubans réguliers et de quatre rubans CFD. La *Base Line Method* a été utilisée pour extraire les paramètres de la loi de puissance, car les rubans affichent des tensions à bas courants. L'empilement de rubans réguliers a un I_c de 127 A et un n de 19.7, le ruban CFD du premier lot a un I_c de 110 A et un n de 18, et le ruban CFD du deuxième lot a un I_c de 105 A et un n de 19.3.

TABLEAU 4.1 Courant critique I_c et exposant de la loi de puissance n pour différents types d'empilements de rubans supraconducteurs. La *Base Line Method* (BLM) est utilisée pour des mesures où la tension est non négligeable à faible courant.

Type d'empilement	Sans BLM		Avec BLM	
	I_c	n	I_c	n
1 ruban régulier	127	19	—	—
2 rubans réguliers	175	12	250	35
4 rubans réguliers	293	10	410	20
2 rubans réguliers FtoF	180	12	249	29
1 ruban CFD batch 1	109	17	—	—
1 ruban CFD batch 2	103	18	—	—
2 rubans CFD batch 1	161	11	193	16
2 rubans CFD batch 2	169	15	185	19
4 rubans CFD	268	10	378	22
2 rubans CFD FtoF	121	7	190	16
1 ruban régulier ↓, 1 ruban CFD ↑	207	17	—	—
1 ruban régulier ↑, 1 ruban CFD ↓	185	13	254	31
1 ruban régulier FtoF ↓, 1 ruban CFD ↑	226	26	—	—
1 ruban régulier FtoF ↑, 1 ruban CFD ↓	207	18	243	29



(a) Empilement de deux rubans supraconducteurs réguliers et deux rubans supraconducteurs CFD

(b) Empilement d'un ruban régulier avec un ruban CFD.

FIGURE 4.7 Courbe E - I des différents types d'empilements de deux rubans supraconducteurs. Pour la figure (b), dans un cas, le ruban régulier est en dessous du ruban CFD, et dans l'autre cas, le ruban régulier est au-dessus du ruban CFD. Ces deux empilements sont répétés pour le type d'empilement face à face (FtoF), tel que défini à la figure 3.8.

4.4 Mesures de la NZPV d'empilements de rubans supraconducteurs

La vitesse de propagation de la zone normale, ou NZPV, est une propriété fondamentale en matière de stabilité et de performance des rubans supraconducteurs. Lors de l'apparition d'un point chaud, cette vitesse doit être suffisamment élevée pour distribuer la chaleur plus rapidement vers les extrémités des rubans et ainsi prévenir sa dégradation. Cependant, les rubans à haute température critique ont l'inconvénient d'avoir une NZPV très faible par rapport aux supraconducteurs à basse température critique. L'architecture CFD aide à résoudre cette problématique en améliorant drastiquement cette vitesse de propagation. Cependant, celle-ci ne dépend pas uniquement de l'architecture des rubans, mais également du type d'empilement de rubans utilisé.

Les mesures prises dans le cadre de ce projet visent à caractériser l'efficacité de l'architecture CFD dans un empilement de rubans supraconducteurs, et ce, pour différents types d'empilements. Les deux types d'architectures de rubans étudiés sont :

- l'architecture régulière, sans modification des rubans fournis par SuperPower,
- l'architecture CFD où les rubans ont subi une gravure et un dépôt d'argent pour créer l'effet CFD.

Les types d'empilements sont :

- *back to face* (BtoF), l'empilement conventionnel où les rubans sont empilés un par dessus l'autre,
- *face to face* (FtoF) où les couches supraconductrices des rubans sont mises face à face,
- un empilement mixte, dans lequel les types d'architectures régulières et CFD sont toutes les deux utilisés dans un même empilement.

Les empilements mixtes sont utilisés avec les empilements BtoF et FtoF.

4.4.1 Résultats expérimentaux d'empilements BtoF

Les mesures NZPV sont d'abord prises expérimentalement et elles sont plus tard comparées à des simulations afin d'aider à mieux comprendre les nuances qu'apportent les différents aspects physiques du problème. Puisque la NZPV varie fortement en fonction du courant injecté dans le ruban, les mesures NZPV sont toutes prises en fonction du courant injecté.

Comme pour les mesures *E-I*, les mesures NZPV sont prises sur des échantillons de rubans SuperPower Inc. Les empilements de rubans réguliers proviennent tous du même lot de ruban. Ils possèdent donc tous un I_c et un n très similaires.

En contrepartie, les échantillons de rubans CFD utilisés pour les mesures proviennent de

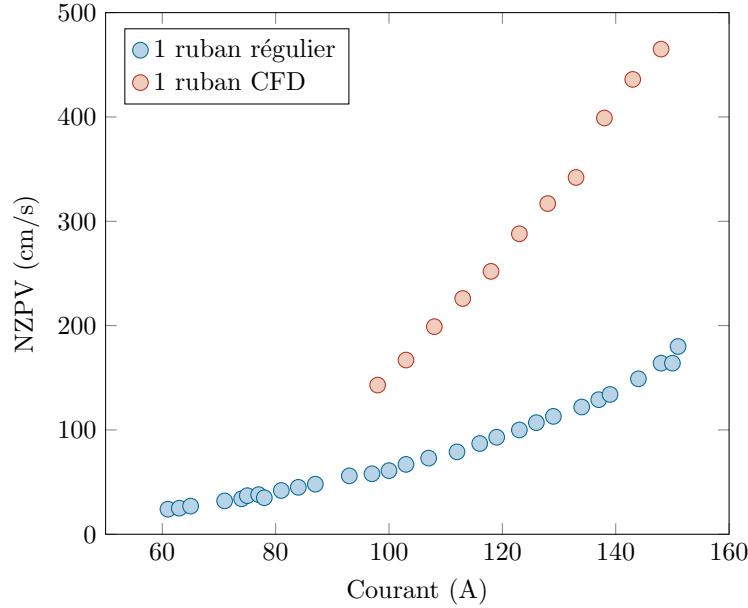


FIGURE 4.8 Mesures NZPV d'un ruban régulier et d'un ruban CFD. La NZPV d'un ruban CFD qui possède un facteur de couverture de 0.75 est environ trois fois plus rapide que celle d'un ruban régulier.

deux lots différents, nommés lot 1 et lot 2. Ces deux lots ont respectivement un facteur de couverture de 0.70 et 0.80. Sur 4 mm, ces facteurs représentent 2.8 mm et 3.2 mm respectivement.

La figure 4.8 illustre la NZPV pour un ruban régulier et un ruban CFD. On remarque que la NZPV du ruban CFD est environ 3 fois plus élevée que celle du ruban régulier. Comme mentionné précédemment, la NZPV d'un ruban CFD est fortement influencée par son facteur de couverture. Dans ce cas, l'échantillon a un facteur de couverture de 0.75. Ce faible facteur est expliqué par un changement de technique dans l'application de l'encre lors du masquage des rubans CFD. Cette technique offrait toutefois un facteur de couverture suffisant pour les expériences. Ce facteur explique la NZPV du CFD plus faible que celle observée dans Lacroix [12]. Sa NZPV est cependant supérieure à celle du ruban régulier et permet de tirer des conclusions pertinentes sur les empilements de rubans.

Par la suite, les mesures de la NZPV sont prises sur des empilements de deux et de quatre rubans possédant des architectures régulières et CFD. Ces mesures cherchent à déterminer si l'augmentation du nombre de rubans dans un empilement affecte la NZPV. Les rubans des empilements réguliers sont identiques entre eux, tandis que l'empilement CFD contient deux lots de rubans CFD différents. Chaque lot contient deux rubans. Pour l'empilement de quatre rubans, les rubans sont disposés de façon à alterner les lots dans l'empilement. La

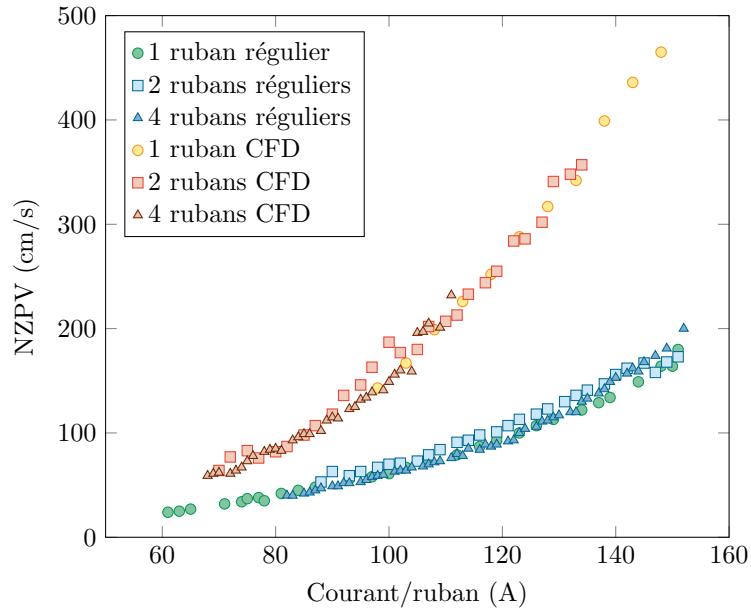


FIGURE 4.9 Mesures NZPV d'un ruban unique, d'un empilement de deux rubans et d'un empilement de quatre rubans pour les architectures régulières et CFD.

figure 4.9 illustre la NZPV de ces différents empilements.

On remarque que la NZPV ne varie que très peu en augmentant le nombre de rubans dans chaque empilement. La NZPV reste trois fois plus grande pour l'architecture CFD par rapport à l'architecture régulière, donc exactement comme pour la comparaison de rubans seuls.

4.4.2 Résultats expérimentaux d'empilements mixtes

Il est intéressant de répondre à la question si l'utilisation d'un empilement mixte serait avantageuse pour conserver une NZPV élevée. Un arrangement mixte contient un ruban d'architecture régulière et un ruban d'architecture CFD. Ces différents empilements sont faits avec les CFD du lot 2. Les expériences sont réalisées sur deux types d'empilements mixtes. Le premier empilement est caractérisé par un ruban régulier en dessous du ruban CFD, et le deuxième par un ruban régulier au dessus du ruban CFD. Les résultats des mesures de NZPV sont présente à la figure 4.10. La courbe pointillée représente la moyenne de la NZPV de l'empilement de deux rubans CFD et de la NZPV de l'empilement de deux rubans CFD. Cette ligne pointillée représente alors un effet neutre pour l'empilement mixte. Cet effet neutre signifie qu'il n'y a d'effets synergiques entre le ruban CFD et le ruban régulier.

Dans légende (ligne pointillée)

Premièrement, on remarque que les deux empilements mixtes ont une NZPV très similaire.

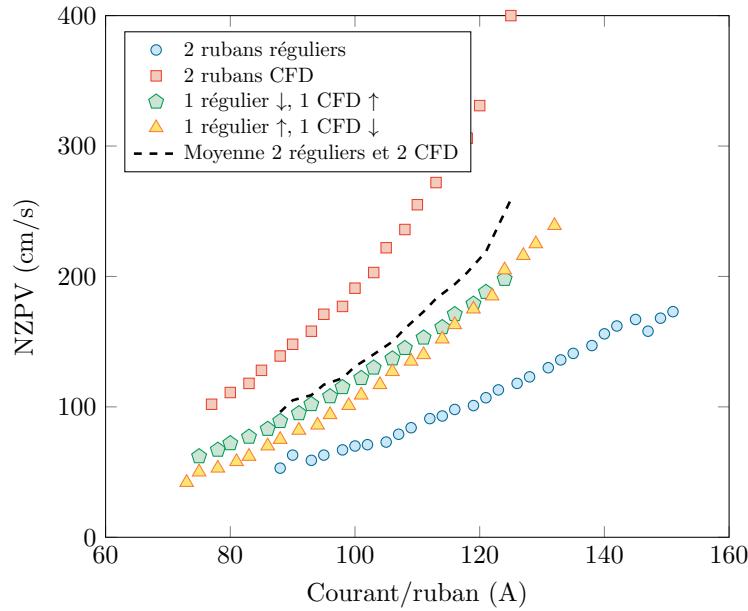


FIGURE 4.10 Mesures NZPV d’empilements de deux rubans pour différentes architectures de rubans utilisés. La moyenne de la NZPV de l’empilement de deux rubans réguliers et de l’empilement de deux rubans CFD est montrée à titre indicatif.

La différence entre les deux courbes est attribuable à la variabilité expérimentale observée en laboratoire. Deuxièmement, la NZPV des empilements mixtes est 1.75 fois supérieure à celle des rubans réguliers. On remarque donc qu’elle se situe en dessous de la courbe pointillée, qui est elle-même deux fois supérieure à celle des rubans réguliers. Une légère diminution est constatée, démontrant que l’empilement mixte nuit légèrement à l’effet CFD, et ce, peu importe la position du CFD dans l’empilement.

4.4.3 Résultats expérimentaux de types d’empilement FtoF

Les mesures précédentes ont toutes été faites sur un type d’empilement conventionnel. Ce type d’empilement se dit dos à face, de l’anglais *Back to Face* (BtoF). Dans un empilement BtoF, le côté supraconducteur de chaque ruban est face vers le haut. Ce nom fait contrepartie à l’empilement dit face à face, de l’anglais *Face to Face* (FtoF). L’empilement face à face vient joindre le côté supraconducteur de chaque ruban ensemble. Nous nous intéressons donc à savoir si l’empilement face à face peut aider ou nuire à l’accélération de la NZPV. En effet, en posant les deux côtés supraconducteurs face à face, on augmente la densité de courant localement autour des deux supraconducteurs. Lors d’une perte de supraconductivité, le courant transfère rapidement dans la mince couche d’argent au-dessus de la couche supraconductrice. L’empilement face à face concentre donc ce phénomène en connectant ces

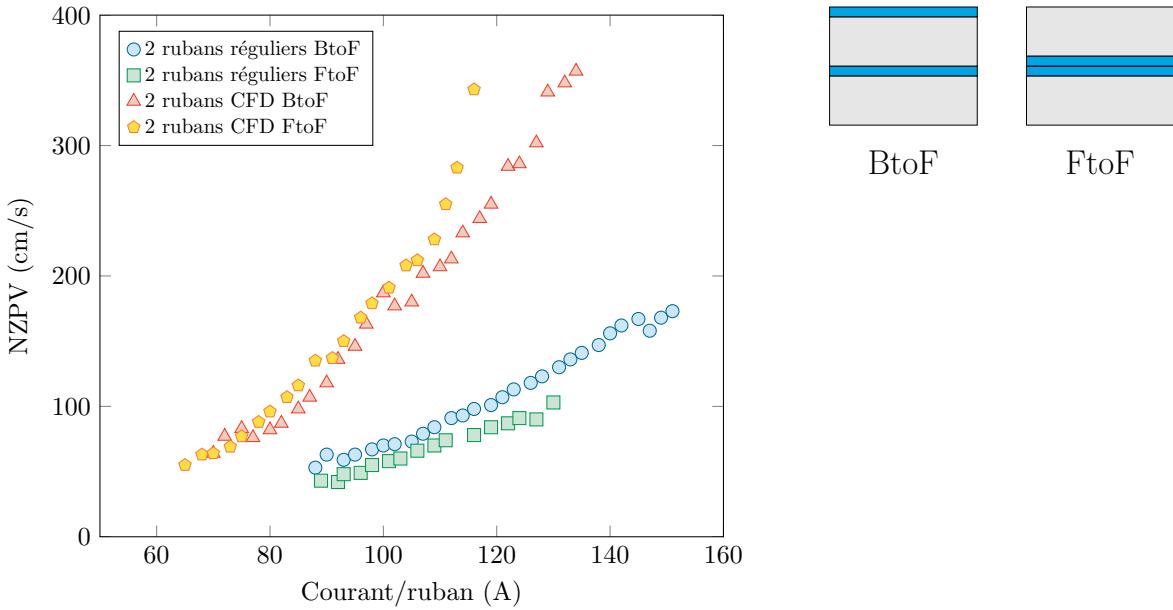


FIGURE 4.11 Mesures NZPV d'un empilement de deux rubans pour différents types d'empilements. Le type dos à face, de l'anglais *Back to Face* (BtoF) est un empilement normal, tandis que le type face à face, de l'anglais *Face to Face* (FtoF) est un empilement où les côtés supraconducteurs sont mis face à face.

deux minces couches ensemble. Donc, le courant à se déplacer rapidement vers les couches d'argent plus loin.

La figure 4.11 représente la NZPV d'empilements FtoF et les compare à des empilements conventionnels BtoF. Les rubans CFD utilisés pour les mesures font partie du premier lot.

La NZPV de l'empilement FtoF de rubans réguliers est plus faible que celle de l'empilement conventionnel des mêmes rubans, tandis que pour les rubans CFD, le comportement inverse apparaît. L'empilement FtoF affiche une NZPV plus élevée que l'empilement BtoF. Dans les deux cas, les différences entre les NZPV sont faibles. Pour les empilements FtoF, le rapport entre la NZPV du CFD sur la NZPV du régulier est de 3.2, tandis que le rapport pour les empilements BtoF est de 3.0.

Pour le type d'empilement FtoF, des mesures sont aussi réalisées sur des empilements mixtes de deux rubans. Une mesure est prise sur un empilement d'un ruban régulier en dessous d'un ruban CFD et une autre mesure est prise avec le ruban régulier au dessus du ruban CFD. La disposition des rubans pour un empilement FtoF étant symétrique, il ne devrait donc pas y avoir de différence entre les deux NZPV de ces empilements. La figure 4.12 confirme ce comportement. En effet, il n'y a pas de différence entre les deux empilements mixtes.

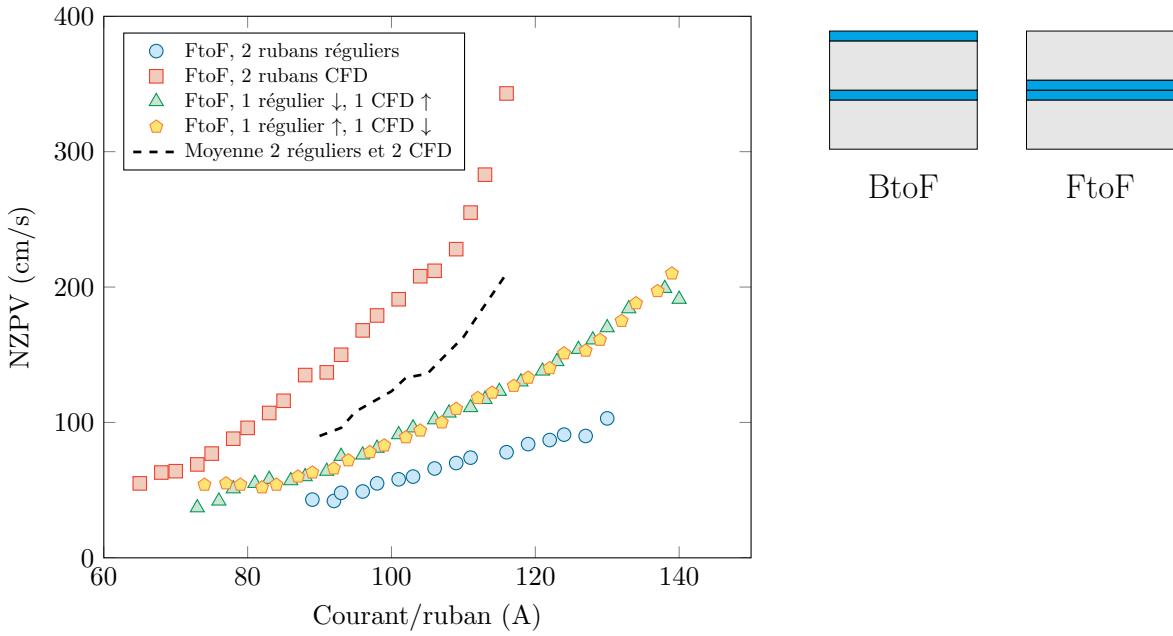


FIGURE 4.12 Mesures NZPV pour des empilements de deux rubans face à face (FtoF) pour différentes combinaisons des types d’architecture régulière et CFD. La moyenne de la NZPV de l’empilement FtoF de deux rubans réguliers et de l’empilement de deux rubans CFD est montrée à titre comparatif.

Cependant, ce type d’empilement possède une NZPV significativement inférieure à la NZPV moyenne des empilements réguliers et CFD. Il est possible de conclure que l’empilement FtoF nuit à l’effet CFD pour un empilement mixte de deux rubans.

4.4.4 Simulations de la NZPV de type d’empilement BtoF

Les résultats obtenus précédemment sont maintenant comparés à des simulations numériques afin d’étudier les différents phénomènes mis en jeu lors du développement de points chauds dans des empilements de rubans. Ces simulations sont basées sur des modèles par éléments finis de COMSOL Multiphysics.

Tel que mentionné dans la méthodologie, le point chaud est généré par une réduction des I_c local dans le courant critique. Ce défaut engendre une zone normale qui se propage sur la longueur du ruban. La longueur simulée du ruban est déterminée par un critère d’élévation de température loin du point chaud. Le critère retenu est une élévation de moins de 1 K au trois quarts du ruban. Ce critère assure que le ruban est suffisamment long pour que l’on puisse négliger les effets des extrémités sur la propagation de la chaleur.

De plus, il est important de rappeler que les simulations ne prennent pas en compte les

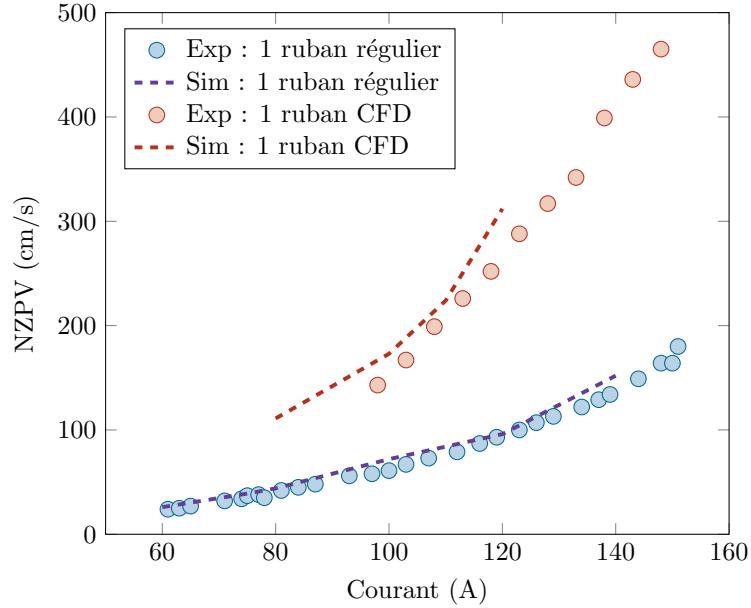


FIGURE 4.13 Comparaison des NZPV expérimentales et simulées pour un ruban régulier et un ruban CFD.

phénomènes magnétiques du problème. En effet, le ruban génère un champ magnétique propre dû au courant circulant dans sa couche supraconductrice. Ce champ est perçu par les autres rubans dans l'empilement, ayant ainsi un impact sur leurs propriétés supraconductrices.

Les simulations sont toutefois construites sur les caractéristiques des rubans utilisés dans les mesures expérimentales. Les rubans simulés possèdent donc les mêmes valeurs de I_c et de n que les rubans réels, et les rubans CFD possèdent la même fraction de couverture. On peut ensuite utiliser des points de mesures de tension pour extraire la NZPV des rubans simulés et ainsi s'approcher le plus possible des conditions expérimentales en laboratoire.

La première mesure montrée à la figure 4.13, compare les mesures expérimentales et par simulation de la NZPV d'un ruban régulier et d'un ruban CFD. Tout d'abord, pour la NZPV d'un ruban régulier, les mesures expérimentales concordent avec les simulations pour toutes les valeurs de courant. On remarque cependant que le ruban CFD simulé surestime la NZPV du ruban expérimental d'environ 25 cm/s. Cette différence se retrouve aussi dans les autres simulations de rubans CFD. La différence peut s'expliquer par l'utilisation d'un facteur de couverture de 0.8 pour toutes les simulations.

De plus, trois hypothèses sont envisagées pour expliquer la différence entre les mesures expérimentales et simulées. La première est l'absence du calcul du champ magnétique dans les simulations. Le champ magnétique a un impact sur le courant critique et la distribution du

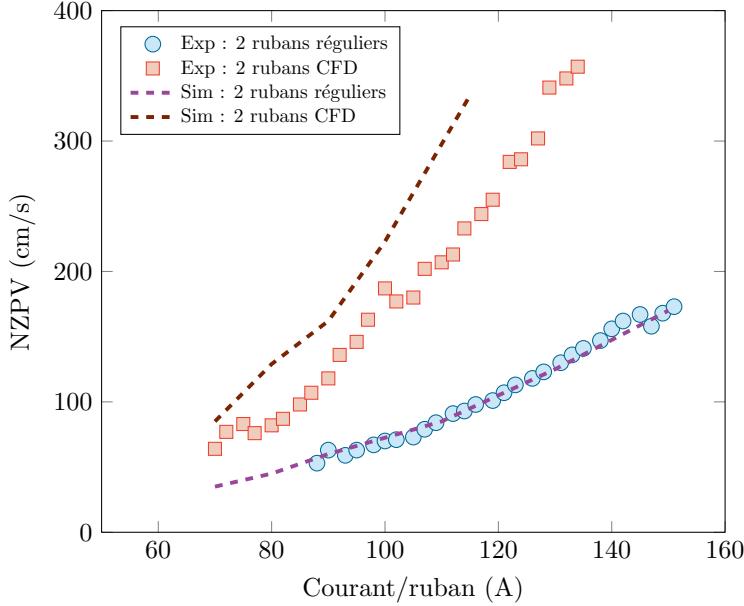


FIGURE 4.14 Comparaison des NZPV expérimentales et simulées pour un empilement de deux rubans réguliers et un empilement de deux rubans CFD.

courant à l'intérieur de l'empilement. Son impact est surtout significatif dans un empilement de plusieurs rubans. La seconde hypothèse provient de la convergence de la NZPV. Comme mentionné par Haro et al. (2015) [23], la NZPV prend du temps à converger à une valeur précise. Une simulation trop courte, par faute de temps de calculs ou de convergence de la simulation, peut empêcher d'obtenir précisément la valeur de la NZPV. La dernière hypothèse, et la plus probable, est une incompatibilité entre les paramètres des rubans supraconducteurs utilisés dans la simulation et la réalité. Malgré l'attention particulière mise sur la concordance entre le I_c , le n , les résistances d'interface, et les autres paramètres, il se peut très bien que leurs valeurs représentent mal les échantillons utilisés.

En passant à des empilements à deux rubans, le défaut est généré dans les deux rubans afin que le point chaud soit initié en même temps. Pour ces mesures, les empilements sont de type BtoF. La tendance des simulations concorde avec les mesures expérimentales en exprimant à nouveau une surestimation de la NZPV pour les simulations des empilements de rubans CFD.

Par la suite, les mesures de la NZPV sont comparées aux simulations pour des empilements à quatre rubans d'architecture régulière et CFD. Pour l'empilement CFD, deux lots de deux rubans sont utilisés pour les mesures. De plus, les rubans sont alternés entre chaque lot dans l'empilement. Les simulations sont alors faites selon les mêmes configurations. La figure 4.15 illustre la NZPV de ces différents empilements. À noter que les simulations à fort courant

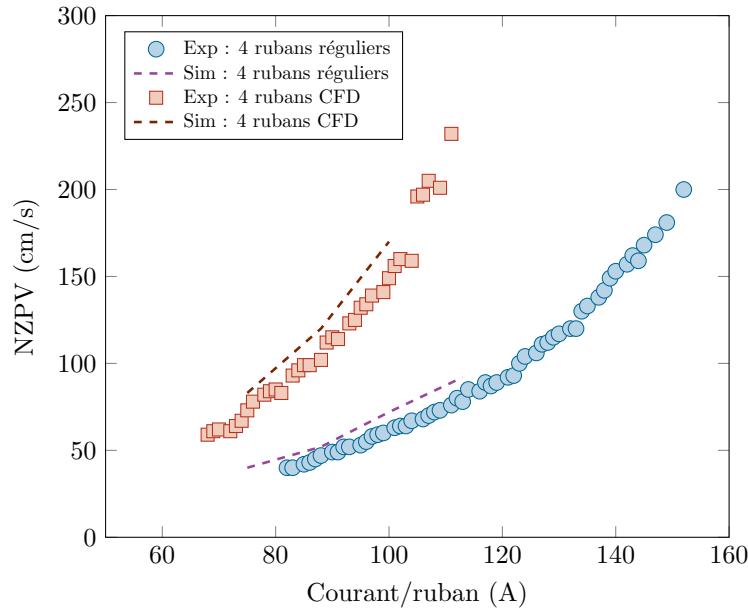


FIGURE 4.15 Comparaison des NZPV expérimentales et simulées pour un empilement de quatre rubans réguliers et un empilement de quatre rubans CFD.

perdent rapidement en précision et ont de grandes difficultés à converger, d'où le faible nombre de points à fort courant.

Enfin, les empilements mixtes sont simulés et comparés à la figure 4.16. Ces empilements consistent en un ruban régulier et un ruban CFD empilé l'un sur l'autre. Les deux configurations sont testées, soit le ruban CFD sur le dessus et le ruban CFD en dessous de l'empilement. Il n'y a que très peu de différence entre les NZPV de ces deux types d'empilements. On peut donc conclure que la position du ruban CFD dans l'empilement n'a pas d'impact sur la NZPV.

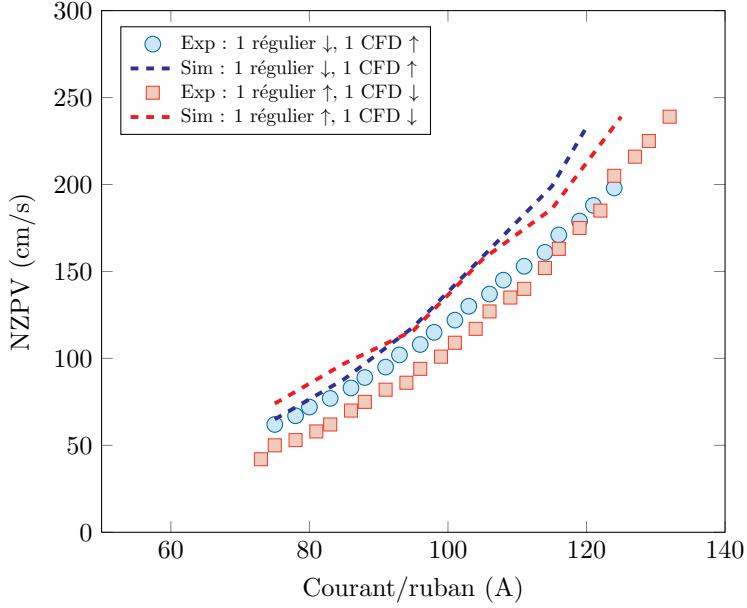


FIGURE 4.16 Comparaison des NZPV expérimentales et simulées pour des empilements mixtes de deux rubans : un ruban régulier et un ruban CFD.

4.4.5 Simulations de la NZPV de type d'empilement FtoF

En dernier lieu, on traite des empilements de type FtoF. L'hypothèse posée stipule que les empilements de type FtoF propagent le courant de façon différente lors de la migration du courant de la couche supraconductrice vers la couche d'argent. Cette section permet de tester cette hypothèse.

La figure 4.17 représente les mesures expérimentales et simulations de la NZPV d'empilements de type FtoF. Les rubans CFD utilisés pour ces mesures font partie du premier lot. Les simulations sont en accord avec les mesures expérimentales. Le rapport entre la NZPV de l'empilement CFD et celle de l'empilement régulier est aussi de 3.2.

De plus, les simulations d'empilement de rubans mixtes de type FtoF sont illustrées à la figure 4.18. Ces simulations calculent la même NZPV pour les deux empilements, ce qui est attendu puisque l'empilement est symétrique. Par contre, la NZPV simulée est 25 cm/s plus élevée que celle mesurée expérimentalement. Cette différence est la même que pour celle du ruban unique illustré à la figure 4.13 et est causé probablement par le même phénomène.

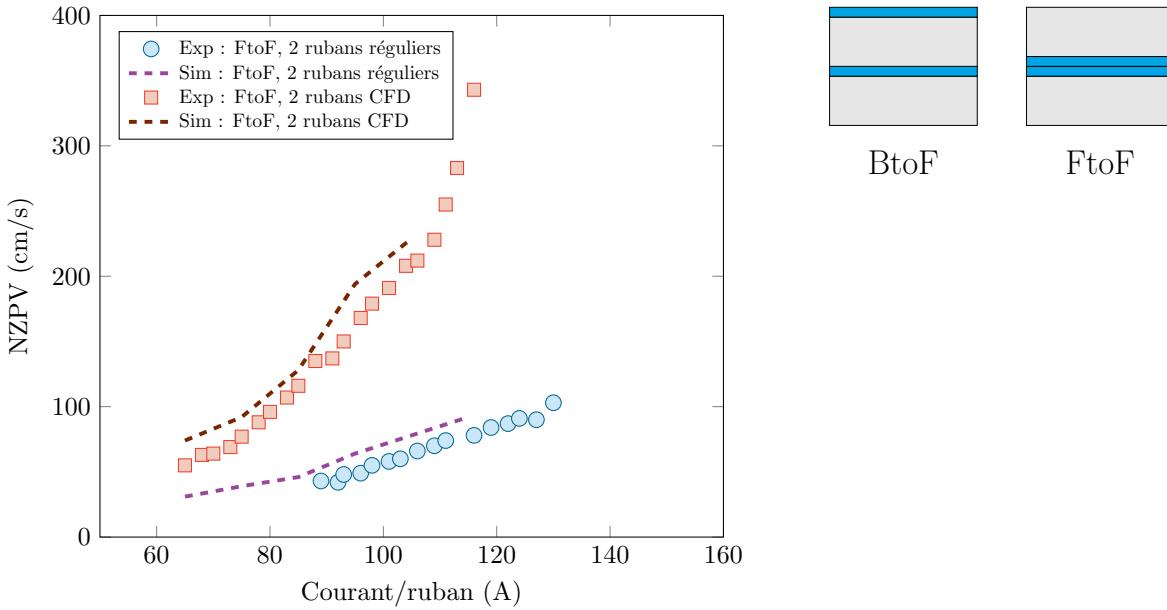


FIGURE 4.17 Comparaison des NZPV expérimentales et simulées pour des empilements de type FtoF avec deux rubans réguliers et deux rubans CFD.

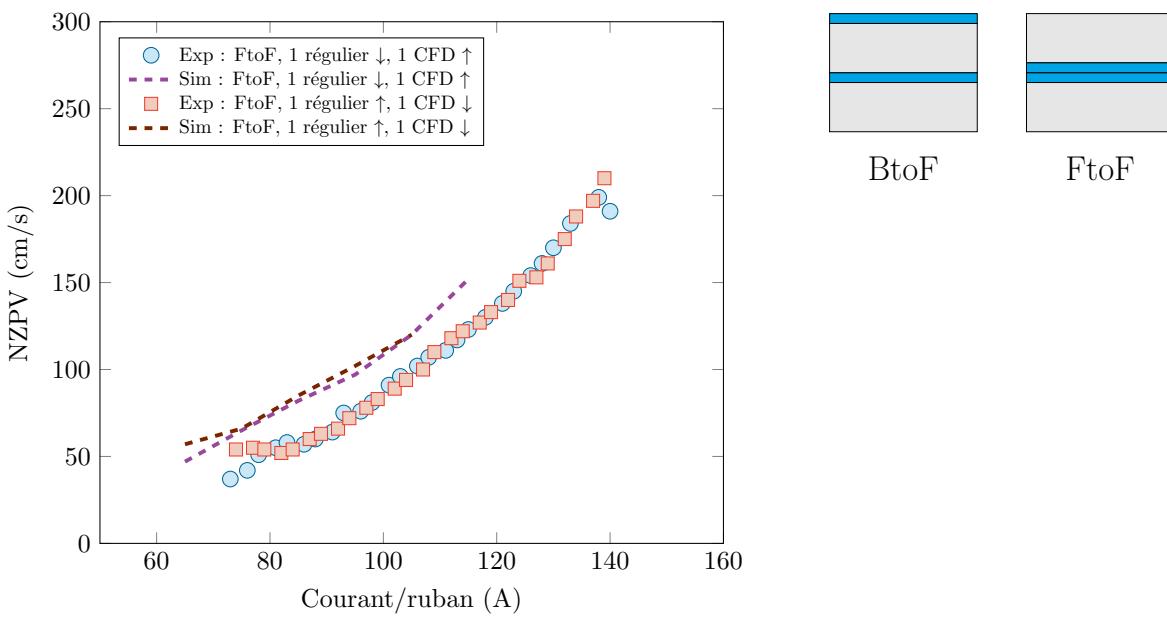


FIGURE 4.18 Comparaison des NZPV expérimentales et simulées pour des empilements de type FtoF d'un ruban régulier et d'un ruban CFD.

4.4.6 Retour sur les mesures de la NZPV

À travers les différents résultats, il a été démontré que la NZPV n'était que très peu affectée par le nombre de rubans utilisés dans les empilements, et ce, pour deux et quatre rubans. L'architecture CFD démontre une efficacité en ce qui à trait à l'amélioration la NZPV pour ces empilements.

Pour un empilement de deux rubans, l'empilement de type FtoF nuit légèrement à la NZPV des rubans réguliers tandis qu'il améliore légèrement la NZPV des rubans CFD. Par contre, ce résultat peut difficilement être extrapolé à un plus grand nombre de rubans. En effet, lorsqu'une paire de rubans est ajoutée à la première paire, une symétrie opposée apparaît à l'interface des deux paires où les couches supraconductrices sont désormais éloignées les unes des autres. Cette opposition peut potentiellement avoir des impacts non négligeables sur la NZPV. Toutefois, la très grande difficulté de convergence des simulations de ce type d'empilements a empêché de les calculer dans ce projet.

Finalement, les empilements mixtes d'un ruban régulier et d'un ruban CFD offrent une NZPV approximativement égale à la moyenne des NZPV des rubans utilisés dans l'empilement. Ceci dit, l'empilement mixte de type FtoF présente une NZPV plus faible que la moyenne. Il n'y a donc pas d'effet synergique à utiliser un empilement mixte, mais il n'y a pas d'effet antagoniste non plus.

CHAPITRE 5 CONCLUSION

5.1 Synthèse des travaux

L'objectif premier de ce mémoire était de caractériser le comportement électrothermique d'empilements de rubans supraconducteurs à l'apparition d'un point chaud et ayant une NZPV élevée. Pour ce faire, les architectures régulières et CFD ont permis la conception d'empilements de deux et de quatre rubans. Les comportements de ces empilements ont été comparés en régime de points chauds. Après chaque *quench*, leurs performances ont été évaluées afin d'identifier une potentielle dégradation des propriétés supraconductrices. Ces mesures expérimentales sont soutenues par des modélisations numériques. De fait, la modélisation des rubans a été faite à partir du logiciel COMSOL Multiphysics. Ce modèle par éléments finis a permis de confirmer la tendance des mesures expérimentales. Ce dernier se base sur un régime transitoire afin de simuler la propagation de la zone normale et prend en considération la propagation du champ électrique et de la chaleur générée par effet Joule. Ce projet avait également trois objectifs secondaires. Le premier sous-objectif était de modéliser le comportement électrothermique d'un empilement de rubans supraconducteurs d'architecture de type CFD. Le second sous-objectif était de fabriquer un empilement de rubans CFD et de vérifier son comportement par rapport à un empilement régulier. Le troisième sous-objectif était de valider expérimentalement et par simulation différents types d'empilements utilisant l'architecture CFD.

Les rubans supraconducteurs utilisés au cours de cette recherche sont des rubans à haute température critique de seconde génération provenant de la compagnie SuperPower Inc. Ces derniers sont de 4 mm de largeur par et le matériau supraconducteur utilisé est une céramique REBCO. Ces empilements de rubans supraconducteurs ont été caractérisés par l'utilisation d'un système de mesure en tension pouvant injecter des pulses de plusieurs dizaines de millisecondes. Afin d'injecter adéquatement le courant dans les rubans, les extrémités des échantillons ont été électrodéposées et sectionnées à différentes longueurs. Ces manipulations ont permis d'atteindre des résistances d'injection suffisamment petites pour que les mesures ne soient pas impactées par les effets des extrémités.

À partir de cette méthodologie, ce projet a permis de montrer que la NZPV des empilements ne varie que très peu quant aux empilements de deux et de quatre rubans. Il a également été démontré que les gains qu'apporte l'architecture CFD à la NZPV sont similaires pour les empilements de deux et de quatre rubans. En ce qui a trait aux empilements face à face, ceux-ci ont une NZPV légèrement inférieure, et ce, indépendamment du type d'architectures

de l'empilement. Il en va de même pour les empilements face à face d'architectures mixtes.

5.2 Limitations de la solution proposée

La principale limite de la méthodologie présentée par ce projet revient à la modélisation complète du ruban avec toutes les interfaces résistives. En effet, cette modélisation engendre des temps de calcul significatifs, ce qui limite grandement les simulations possibles pour les empilements de rubans. De plus, lors des simulations, une courte longueur de ruban est nécessaire pour conserver un temps de simulation restreint, mais apporte, dans certains cas, des effets d'extrémité non désirables. Parmi ces effets, on retrouve un *quench* de l'entièreté de l'empilement lors de très hauts courants et parfois, une mauvaise distribution du courant entre les rubans à l'apparition du point chaud. Un autre enjeu associé aux simulations est que les effets du champ magnétique ne sont pas considérés. Dans le contexte du projet où il n'y a que deux ou quatre rubans dans les empilements, l'impact de cette problématique n'est pas majeur. Toutefois, plus le nombre de rubans augmente, plus l'impact du champ magnétique est important quant au comportement électromagnétique des empilements. Il ne devient donc plus négligeable.

Les empilements face à face, indépendamment de l'architecture, possèdent également une limite puisqu'ils n'ont été testés que sur deux rubans. De cette façon, il n'a pas été possible de visualiser l'effet inverse qui se produit lorsque les couches supraconductrices sont opposées l'une à l'autre. Ensuite, la méthodologie actuelle propose d'utiliser des rubans de différentes longueurs sans soudure des contacts. Cependant, cette méthode ne représente pas une solution envisageable pour un empilement de plus de dix rubans, qui nécessiterait alors une soudure de bonne qualité des contacts pour réduire au maximum leur résistance.

5.3 Améliorations futures

Les connaissances et les technologies actuelles des rubans supraconducteurs sont assez avancées pour permettre le développement potentiel de systèmes plus complexes tels des câbles supraconducteurs et des électro-aimants à fort champ. Toutefois, la fabrication de ces technologies nécessite d'empiler un très grand nombre de rubans, de l'ordre de centaines de rubans empilés.

Pour de futurs projets, il serait donc pertinent de tester l'architecture CFD dans des empilements de plusieurs dizaines de rubans supraconducteurs afin d'élargir les possibilités de développement de technologies. Les expérimentations sur des empilements possédant un plus grand nombre de rubans sont donc intéressantes considérant les résultats de ce projet. Pour

ce faire, des améliorations sont nécessaires quant aux simulations. De fait, la convergence de celles-ci limite la phase expérimentale en restreignant le nombre de rubans à quatre en raison des temps de calcul significatif. De surcroît, il serait primordial de développer un modèle de simulation qui prend en compte le comportement électromagnétique des rubans face à un *quench*. En effet, les simulations du *quench* doivent se faire en utilisant le champ magnétique puisque le courant circulant dans un ruban a un impact sur les autres rubans du même empilement. De plus, le champ magnétique permettrait de créer une contrainte sur la variation du champ électrique et du courant, amortissant ainsi les changements trop rapides liés à des erreurs de calculs dans la simulation, rendant celle-ci plus stable.

RÉFÉRENCES

- [1] A. Molodyk, S. Samoilenkov, A. Markelov, P. Degtyarenko, S. Lee, V. Petrykin, M. Gaifullin, A. Mankevich, A. Vavilov, B. Sorbom, J. Cheng, S. Garberg, L. Kesler, Z. Hartwig, S. Gavrilkin, A. Tsvetkov, T. Okada, S. Awaji, D. Abraimov, A. Francis, G. Bradford, D. Larbalestier, C. Senatore, M. Bonura, A. E. Pantoja, S. C. Wimbush, N. M. Strickland et A. Vasiliev, “Development and large volume production of extremely high current density $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ superconducting wires for fusion,” *Scientific Reports*, vol. 11, n°. 2084, p. 2045–2322, 2021. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81559-z>
- [2] H. K. Onnes, *The resistance of pure mercury at helium temperatures*. Dordrecht : Springer Netherlands, 1991, p. 120. [En ligne]. Disponible : https://doi.org/10.1007/978-94-009-2079-8_15
- [3] V. L. Ginzburg et L. D. Landau, *On the Theory of Superconductivity*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2009, p. 113–137. [En ligne]. Disponible : https://doi.org/10.1007/978-3-540-68008-6_4
- [4] J. Bardeen, L. N. Cooper et J. R. Schrieffer, “Microscopic theory of superconductivity,” *Phys. Rev.*, vol. 106, p. 162–164, Apr 1957. [En ligne]. Disponible : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.106.162>
- [5] J. Bednorz et K. Muller, “Possible high T_c superconductivity in the ba-la-cu-o system,” *Zeitschrift für Physik B Condensed Matter*, vol. 64, p. 189–193, 1986. [En ligne]. Disponible : <http://dx.doi.org/10.1007/BF01303701>
- [6] J. F. Annett, *Superconductivity, superfluids and condensates*, ser. Oxford master series in condensed matter physics. Oxford : Oxford Univ. Press, 2004. [En ligne]. Disponible : <https://cds.cern.ch/record/730995>
- [7] J. Ekin, *Experimental Techniques for Low-Temperature Measurements : Cryostat Design, Material Properties and Superconductor Critical-Current Testing*. Oxford University Press, 10 2006. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198570547.001.0001>
- [8] C. Barth, G. Mondonico et C. Senatore, “Electro-mechanical properties of rebco coated conductors from various industrial manufacturers at 77 k, self-field and 4.2 k, 19 t,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 28, n°. 4, p. 045011, feb 2015. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1088/0953-2048/28/4/045011>

- [9] S. Richter, A. Bernhard, A. Drechsler, A.-S. Müller, B. Ringsdorf, S. Schlachter et D. Schoerling, “Bending Radius Limits of Different Coated REBCO Conductor Tapes - An Experimental Investigation with Regard to HTS Undulators,” dans *Proc. IPAC’21*, ser. International Particle Accelerator Conference, n°. 12. JACoW Publishing, Geneva, Switzerland, 08 2021, p. 3837–3840, <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2021-THPAB042>. [En ligne]. Disponible : <https://jacow.org/ipac2021/papers/thpab042.pdf>
- [10] A. Malozemoff, D. Verebelyi, S. Fleshler, D. Aized et D. Yu, “Hts wire : status and prospects,” *Physica C : Superconductivity*, vol. 386, p. 424–430, 2003, proceedings of the topical conference of the International Cryogenic Materials Conference (ICMC 2002). Superconductors for Practical Applications. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921453402022013>
- [11] X. Zhang, Z. Zhong, J. Geng, B. Shen, J. Ma, C. Li, H. Zhang, Q. Dong et T. A. Coombs, “Study of critical current and n-values of 2g hts tapes : Their magnetic field-angular dependence,” *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, vol. 31, n°. 12, p. 3847–3854, Apr 2018. [En ligne]. Disponible : <http://dx.doi.org/10.1007/s10948-018-4678-8>
- [12] C. Lacroix et F. Sirois, “Concept of a current flow diverter for accelerating the normal zone propagation velocity in 2g hts coated conductors,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 27, n°. 3, p. 035003, jan 2014. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1088/0953-2048/27/3/035003>
- [13] C. Lacroix, J.-H. Fournier-Lupien, K. McMeekin et F. Sirois, “Normal zone propagation velocity in 2g hts coated conductor with high interfacial resistance,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 23, n°. 3, p. 4 701 605–4 701 605, 2013.
- [14] ——, “Normal zone propagation velocity in 2g hts coated conductor with high interfacial resistance,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 23, n°. 3, p. 4 701 605–4 701 605, 2013.
- [15] J.-H. Kim, C. H. Kim, P. Patil, J. Kvirkovic et S. Pamidi, “Electrical characteristics of stacks of ybco tapes in applied magnetic field,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 21, n°. 3, p. 3230–3233, 2011.
- [16] M. Erdogan, S. Yildiz, A. Cicek et F. Inanir, “Two-dimensional finite-element analysis of pinning-induced stress in hts power transmission cables made of 2g superconducting tapes with and without magnetic substrate,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, n°. 6, p. 1–7, 2016.
- [17] N. V. Bykovsky, S. S. Fetisov, A. A. Nosov, V. V. Zubko et V. S. Vysotsky, “Analysis of critical current reduction in self-field in stacked twisted 2g hts tapes,” *Journal*

- of Physics : Conference Series*, vol. 507, n°. 2, p. 022001, may 2014. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/507/2/022001>
- [18] M. Takayasu, L. Chiesa, L. Bromberg et J. V. Minervini, “Hts twisted stacked-tape cable conductor,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 25, n°. 1, p. 014011, dec 2011. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1088/0953-2048/25/1/014011>
- [19] S. Wang, M. Guan, J. Chen, X. Wang et Y. Zhou, “A visual and full-field method for detecting quench and normal zone propagation in hts tapes,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 35, n°. 2, p. 025010, dec 2021. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1088/1361-6668/ac3f9d>
- [20] J. Shi, X. Yang, M. Xu, Y. Zhao et Y. Zhao, “Effect of defects on the quench properties of stacked rebco tapes,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 31, n°. 1, p. 1–5, 2021.
- [21] H. Yu, B. Tang, S. Yang, S. Jiang, D. Jiang et G. Kuang, “Experimental studies on quench behavior measurements of hts tapes with various heater configurations,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 34, n°. 5, p. 1–5, 2024.
- [22] L. Ren, G. Chen, Y. Xu, D. Pu, J. Xu, S. Yan, J. Shi et L. Chen, “Experimental analysis of quench characteristic in hts tapes and coils,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 29, n°. 5, p. 1–6, 2019.
- [23] E. Häörö, J. Järvelä et A. Stenvall, “Variation of quench propagation velocities in ybco cables,” *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, vol. 28, 02 2015.
- [24] B. Shen, F. Grilli et T. Coombs, “Overview of h-formulation : A versatile tool for modeling electromagnetics in high-temperature superconductor applications,” *IEEE Access*, vol. 8, p. 100 403–100 414, 2020.
- [25] F. Grilli, R. Brambilla, F. Sirois, A. Stenvall et S. Memiaghe, “Development of a three-dimensional finite-element model for high-temperature superconductors based on the h-formulation,” *Cryogenics*, vol. 53, p. 142–147, 2013, workshop “CHATS on Applied Superconductivity 2011”. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011227512000598>
- [26] A. Arsenault, B. d. S. Alves et F. Sirois, “Comsol implementation of the h- ϕ -formulation with thin cuts for modeling superconductors with transport currents,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 31, n°. 6, p. 1–9, 2021.
- [27] N. Riva, A. Halbach, M. Llyly, C. Messe, J. Ruuskanen et V. Lahtinen, “h- ϕ formulation in sparselizard combined with domain decomposition methods for modeling superconducting tapes, stacks, and twisted wires,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 33, n°. 5, p. 1–5, 2023.

- [28] E. Berrospe-Juarez, F. Trillaud, V. M. R. Zermeño et F. Grilli, “Advanced electromagnetic modeling of large-scale high-temperature superconductor systems based on h and t-a formulations,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 34, n°. 4, p. 044002, feb 2021. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1088/1361-6668/abde87>
- [29] W. Hong, P. Miao, S. Hu, X. Zhang, H. Liu et F. Liu, “Two quenched models for high-temperature superconducting insulated coils,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 34, n°. 3, p. 1–5, 2024.
- [30] F. Roy, M. Therasse, B. Dutoit, F. Sirois, L. Antognazza et M. Decroux, “Numerical studies of the quench propagation in coated conductors for fault current limiters,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 19, n°. 3, Part II, p. 2496–2499, 2009. [En ligne]. Disponible : <https://publications.polymtl.ca/19004/>
- [31] J. Pelegrin, E. Martinez, L. A. Angurel, Y.-Y. Xie et V. Selvamanickam, “Numerical and experimental analysis of normal zone propagation on 2g hts wires,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 21, n°. 3, p. 3041–3044, 2011.
- [32] A. Godeke, L. Alberty, E. Akcöltekin, R. Babouche, C. Detourbe, R. Nast, C. Radermacher, H. Röcken, A. Roth, M. Schillo, P. vom Stein, M. Walpole, J. Wittsch, K. Hayashi, E. Shizuya, H. J. G. Krooshoop, R. Lubkemann, A. Nijhuis, C. H. Vermeer, W. A. J. Wessel, J. Krause, J. Wiezoreck, A. Otto et L. Saraco, “Research at varian on applied superconductivity for proton therapy,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 33, n°. 6, p. 064001, apr 2020. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1088/1361-6668/ab804a>
- [33] L. Rossi et C. Senatore, “Hts accelerator magnet and conductor development in europe,” *Instruments*, vol. 5, n°. 1, 2021. [En ligne]. Disponible : <https://www.mdpi.com/2410-390X/5/1/8>
- [34] A. Molodyk et D. C. Larbalestier, “The prospects of high-temperature superconductors,” *Science*, vol. 380, n°. 6651, p. 1220–1222, 2023. [En ligne]. Disponible : <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.abq4137>
- [35] N. Mitchell, J. Zheng, C. Vorpahl, V. Corato, C. Sanabria, M. Segal, B. Sorbom, R. Slade, G. Brittles, R. Bateman, Y. Miyoshi, N. Banno, K. Saito, A. Kario, H. T. Kate, P. Bruzzone, R. Wesche, T. Schild, N. Bykovskiy, A. Dudarev, M. Mentink, F. J. Mangiarotti, K. Sedlak, D. Evans, D. C. V. D. Laan, J. D. Weiss, M. Liao et G. Liu, “Superconductors for fusion : a roadmap,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 34, n°. 10, p. 103001, sep 2021. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1088/1361-6668/ac0992>

- [36] S. Meschini, F. Laviano, F. Ledda, D. Pettinari, R. Testoni, D. Torsello et B. Panella, “Review of commercial nuclear fusion projects,” *Frontiers in Energy Research*, vol. 11, p. 1157394, 2023.
- [37] P. J. Masson et C. A. Luongo, “Hts machines for applications in all-electric aircraft,” dans *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2007, p. 1–6.
- [38] S. Kalsi, B. Gamble, G. Snitchler et S. Ige, “The status of hts ship propulsion motor developments,” dans *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*. IEEE, 2006, p. 5–pp.