



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Électrotechnique

Commande électrique

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :
Chamsseddine Messaoudi Helmi Merabti

Le : lundi 2 juin 2025

LIMITEUR DE COURANT A BASE D'UN SUPRACONDUCTEUR

Jury :

Dr.	BOUCETTA IKRAM	MCB	Université de Biskra	Président
Dr	BEN ALIA KHALED	MCB	Université de Biskra	Rapporteur
Dr	SIDI AHMED KATIA	MCB	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2025/2024



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Électrotechnique
Commande électrique

Réf. : Entrez la référence du document

LIMITEUR DE COURANT A BASE D'UN SUPRACONDUCTEUR

Le : 02/06/2025

Présenté par :

Helmi Merabti
Chamsseddine Messaoudi

Avis favorable de l'encadreur :

Signature Avis favorable du Président du Jury

Cachet et signature

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

*Au nom d' **ALLAH**, le tout miséricordieux, le très miséricordieux, Par de divinité à part lui, le vivant, celui qui subsiste par lui même.*

*Nous remercions avant tous **ALLAH** pour son aide, ses Innombrables dons, **ALLAH** qui nous a donné la force, la volonté et Le moral pour accomplir nos études master en électrotechnique.*

***NOUS** remercions notre encadrant **Mr : BEN ALIA KHALED**.*

***NOUS** remercions vont aussi au président **Dr BOUCETTA IKRAM** et aux **membres du Jury** examinateurs **Dr SIDI AHMED KATIA** qui a fait l'honneur de participer à l'évaluation de ce Travail.*

MESSAAOUI CHAMSEEDINNE

MERABTI HELMI

Dédicace

À Gaza,

Terre meurtrie mais jamais soumise,

**À ses enfants, martyrs de la vérité, témoins du courage et de la
résistance.**

**À ceux qui, malgré les bombes et les ruines, élèvent la dignité
humaine au rang de miracle quotidien.**

À un peuple qui inspire la liberté, la résilience, et l'espoir.

**Que ce modeste travail académique porte en lui, à défaut de justice,
un témoignage de solidarité profonde.**

Gaza dans nos cœurs, Gaza pour toujours.

Dédicace

Au nom de Dieu, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux, et que la paix et la bénédiction soient sur le Noble Prophète.

Tout d'abord, nous remercions Allah, exalté soit-Il, au début comme à la fin. À Lui reviennent toute grâce et toute louange.

Louange à Allah pour l'achèvement de ce long parcours.

Aujourd'hui, nous nous tenons fièrement devant notre réalisation, et nous dédions cette réussite et cette joie à tous ceux qui ont marché à nos côtés et nous ont soutenus. Vous avez été un véritable appui, que Dieu vous garde toujours à nos côtés.

Nous dédions ce diplôme à ceux qui nous ont élevés, transmis les valeurs et les principes :

à nos familles: qui attendent cette joie avec plus d'impatience que nous-mêmes,

à ceux qui ont veillé tard et ont rêvé de nous voir atteindre les plus hauts rangs,

à nos parents, qui ont illuminé l'obscurité de notre chemin,

et nous avons eu l'honneur qu'ils nous voient porter l'insigne de la réussite.

Puisse Dieu prolonger vos vies et nous permettre de vous rendre ne serait-ce qu'une petite part de ce que vous avez sacrifié pour nous. Que vous restiez pour nous un refuge sûr.

À ma chère mère «Aïcha», lumière de ma vie, qui m'a guidé, encouragé et entouré d'amour.

Aussi longtemps que j'écirai, je ne pourrai jamais t'offrir ce que tu mérites vraiment.

À mon cher et précieux père « Mohamed » soutien et âme, qui m'a accompagné toute ma vie et dont j'ai puisé la force.

Merci pour tout ce que vous avez fait pour moi.

À mes sœurs, qui ont été un appui précieux durant cette période :

Ahlam, qui a été une sœur exemplaire et une mère aimante à mes côtés ;

Tasnim, Arij, et Tayma.

Un hommage tout particulier à ceux que nous considérons comme une famille également : avec eux, les difficultés sont devenues plus légères, leur compagnie et leur amour ont été un soutien irremplaçable.

Parmi eux, ceux que nous considérons comme des frères et compagnons de vie :

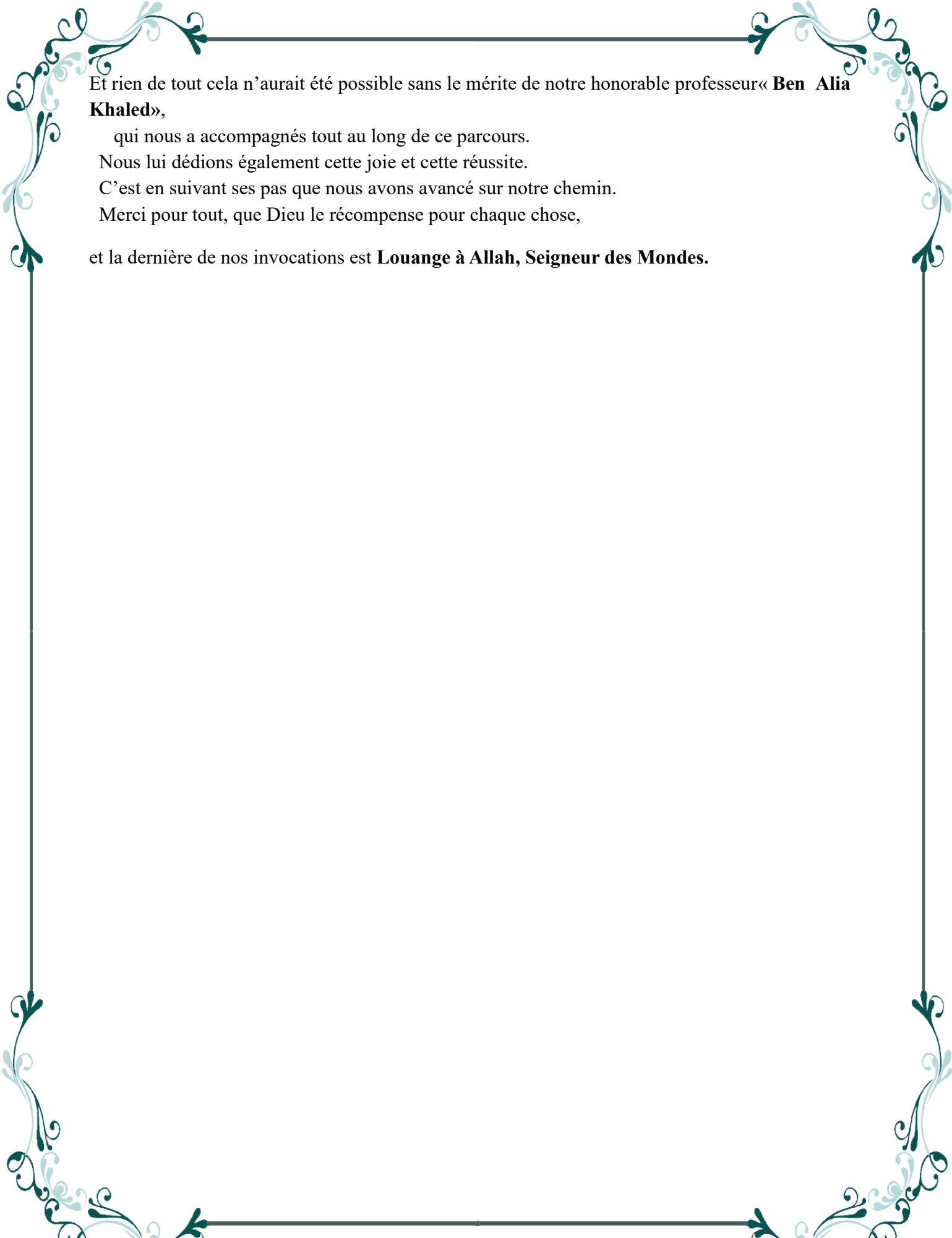
mon ami **Hatem, Wassim, Achraf, Abdo, Abboud, Achref et Taher**, et tous les amis de toujours.

Soumia, qui a aussi été comme une sœur, souhaitant toujours me voir heureux.

Et enfin, à mon premier et éternel compagnon, source de ma joie et de ma force, celle qui a toujours été à mes côtés pour me soutenir.

Les mots ne suffiront jamais à te rendre justice **«Yasmine»**.

À tous ceux qui ont été les plus proches dans ma vie.



Et rien de tout cela n'aurait été possible sans le mérite de notre honorable professeur« **Ben Alia Khaled**»,

qui nous a accompagnés tout au long de ce parcours.

Nous lui dédions également cette joie et cette réussite.

C'est en suivant ses pas que nous avons avancé sur notre chemin.

Merci pour tout, que Dieu le récompense pour chaque chose,

et la dernière de nos invocations est **Louange à Allah, Seigneur des Mondes.**

Résumé :

Nous avons présenté dans ce mémoire une étude du comportement d'un limiteur de courant supraconducteur (SFCL) lors d'un court-circuit triphasé, basée sur une modélisation des phénomènes électrothermiques dans les matériaux supraconducteurs à haute température critique. Deux topologies de réseaux électriques ont été étudiées : un réseau radial à 3 JB et un réseau bouclé à 5 JB . Les différents résultats, à la fois électriques et thermiques, ont été largement analysés à l'aide de simulations réalisées sous SIMULINK/MATLAB.

Mots clés : supraconducteur à HTc, limiteur de courant SFCL, courant de défaut.

Abstract:

This thesis presents a study of the behavior of a superconducting fault current limiter (SFCL) during a three-phase short circuit, based on the modeling of electrothermal phenomena in high-temperature superconducting (HTS) materials. Two power system topologies were considered: a radial network with 3 buses and a meshed network with 5 buses. Various electrical and thermal results were extensively analyzed using simulations performed in SIMULINK/MATLAB.

Keywords: HTS superconductor, SFCL, fault current.

ملخص

قمنا في هذا البحث بدراسة سلوك محدد التيار الفائق التوصيل (SFCL) أثناء حدوث دائرة قصر ثلاثية الطور، وذلك بالاعتماد على نمذجة الظواهر الكهروحرارية في المواد فائقة التوصيل ذات درجة الحرارة العالية. تم دراسة حالتين من طوبولوجيا الشبكات الكهربائية: شبكة شعاعية بثلاث حافلات (bus) وشبكة حلقة بخمس حافلات. وقد تم تحليل النتائج الكهربائية والحرارية المختلفة بشكل واسع اعتماداً على محاكاة باستخدام برنامج SIMULINK/MATLAB.

الكلمات المفتاحية: موصل فائق الناقلية، محدد تيار SFCL، تيار العطل.

Sommaire

	Titre	Page
	INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
Chapitre I Introduction à la supraconductivité		
	Introduction	3
I.1	Définition de la supraconductivité	3
I.2	Historique du phénomène de la supraconductivité	3
I.3	Classification des supraconducteurs	4
I.3.1	Température critique	5
I.3.1.1	Supraconducteur à basse température critique (SBTc)	6
I.3.1.2	Supraconducteur à haute température critique (SHTc)	6
I.3.2	Champ magnétique critique (H_c)	7
I.3.3	Supraconducteurs de type I	7
I.3.4	Supraconducteurs de type II	8
I.4	Modèles des matériaux supraconducteurs	9
I.4.1	Modèle de l'état critique de Bean	9
I.4.2	Modèle de la loi de puissance	10
I.4.3	Modèle de Kim	10
I.4.4	Modèle de Flux Flow et Flux-Creep	11
I.5	Applications des supraconducteurs en électrotechnique	12
I.5.1	Lignes de transport	12
I.5.2	Systèmes de stockage de l'énergie (SMES)	13
I.5.3	Machines électriques	14
I.5.4	Application médicale (IRM)	14
I.5.5	Les câbles supraconducteurs	15
I.5.6	Maglev	15
I.5.7	Limiteur de courant	17
	Conclusion	18
Chapitre II		
Techniques de limitation du courant de défaut dans les réseaux électriques		
	Introduction	19
II.1	Intérêt du limiteur de courant de défaut	19
II.2	Principe général de la limitation de courant	21
II.3	Limiteurs de courant classiques	21
II.3.1	Réactance Série	21
II.3.2	Limiteur à redresseurs commandés	21
II.3.3	Résistance variable	23
II.4	Limiteurs de courant à base de supraconducteurs (SFCL)	23
II.4.1	SFCL résistive	25
II.4.2	SFCL de type noyau magnétique écranté	26

II.4.3	SFCL de type pont redresseur	28
II.4.4	Le SFCL de type contrôleur de courant de défaut	29
II.4.5	SFCL de type à noyaux magnétiques saturés	30
II.5	Comparisons des différents types de SFCL	31
II.6	Formulation de l'équation magnétodynamique et thermique	32
II.6.1	Formulation de l'équation magnétodynamique	32
II.6.2	Formulation de l'équation thermique	34
II.6.2.1	La forme locale	34
II.6.2.2	La forme globale	36
II.6.3	Procédure de calcul	36
	Conclusion	37
CHAPITRE III : Simulation et résultat		
	Introduction	38
III.1	Etude d'un réseau radial	38
III.1.1	Description du réseau	38
III.1.2	Cas d'un court-circuit entre JB1-JB2	40
III.1.3	Cas d'un court-circuit entre JB2-JB3	43
III.1.4	Influence de la Température	47
III.2	Etude d'un réseau bouclé	49
	Conclusion	52
Conclusion générale		

Liste des figures

	Les figures	Page
Figure I.1	Découverte de la supraconductivité par Kamerlingh Onnes	4
Figure I.2	Comportement de la résistivité en fonction de la température	5
Figure I.3	Diagramme de classification des supraconducteurs	6

Figure I.4	Variation du champ magnétique critique (H_c)	8
Figure I.5	Différences entre supraconducteur de type I et II	9
Figure I.6	Modèle de l'état critique de Bean	10
Figure I.7	Caractéristique courant-tension selon la loi de puissance	11
Figure I.8	Effet Flux Creep et Flux Flow dans un supraconducteur	13
Figure I.9	Schéma d'une ligne de transport supraconductrice	13
Figure I.10	SMES : système de stockage de l'énergie	14
Figure I.11	Structure interne d'une machine électrique supraconductrice	14
Figure I.12	Principe de fonctionnement d'un IRM	15
Figure I.13	Courants de court-circuit avec et sans limiteur	17
Figure II.1	Limitation de courant par transformateur court-circuité	22
Figure II.2	Limitation de courant par thyristors contrôlant un circuit résonnant	22
Figure II.3	Courants de court-circuit avec et sans limiteur	24
Figure II.4	Schéma d'un SFCL résistif inséré dans un réseau	25
Figure II.5	SFCL résistif avec transition assistée magnétiquement	26
Figure II.6	SCFCL de type noyau magnétique écranté.	27
Figure II.7	Schéma équivalent du SCFCL de type noyau magnétique écranté	27
Figure II.8	SCFCL de type pont redresseur.	28
Figure II.9	SCFCL de type contrôleur du courant de défaut.	29
Figure II.10	SCFCL de type noyaux magnétiques saturés	30
Figure II.11	Modèle en puissance (trois ponts)	34
Figure II.12	Organigramme de fonctionnement du SFCL thermique proposé.	36
Figure III.1	Schéma unifilaire du réseau électrique (a) sans SFCL ; (b) avec insertion d'un SFCL	40

Figure III.2	Tensions mesurées au niveau du jeu de barres 1 (sans SFCL)	41
Figure III.3	Courants mesurés au niveau du jeu de barres 1 (sans SFCL)	41
Figure III.4	Tensions mesurées au niveau du jeu de barres 2 (sans SFCL)	41
Figure III.5	Courants mesurés au niveau du jeu de barres 2 (sans SFCL)	41
Figure III.6	Tensions mesurées au niveau du jeu de barres 1 (avec SFCL)	42
Figure III.7	Courants mesurés au niveau du jeu de barres 1 (avec SFCL)	42
Figure III.8	Tensions mesurées au niveau du jeu de barres 2 (avec SFCL)	42
Figure III.9	Courants mesurés au niveau du jeu de barres 2 (avec SFCL)	42
Figure III.10	Résistance du SFCL pendant un court-circuit (JB1-JB2)	43
Figure III.11	Température du SFCL pendant un court-circuit (JB1-JB2)	43
Figure III.12	Tensions mesurées au niveau du jeu de barres 1 (sans SFCL – défaut JB2-JB3)	44
Figure III.13	Courants mesurés au niveau du jeu de barres 1(sans SFCL)	44
Figure III.14	Tensions mesurées au niveau du jeu de barres 2 (sans SFCL)	44
Figure III.15	Courants mesurés au niveau du jeu de barres 2 (sans SFCL)	44
Figure III.16	Tensions mesurées au niveau du jeu de barres 1 (avec SFCL)	45
Figure III.17	Courants mesurés au niveau du jeu de barres 1 (avec SFCL)	45
Figure III.18	Tensions mesurées au niveau du jeu de barres 2 (avec SFCL)	45
Figure III.19	Tensions mesurées au niveau du jeu de barres 2 (avec SFCL)	45
Figure III.20	Résistance du SFCL pendant un court-circuit (JB2-JB3)	46
Figure III.21	Température du SFCL pendant un court-circuit (JB2-JB3)	46
Figure III.22	Températures du SFCL durant $T_a = 75 \text{ K}$	47
Figure III.23	Températures du SFCL durant $T_a = 80 \text{ K}$	47

Figure III.24	Températures du SFCL durant $T_a = 85 \text{ K}$	47
Figure III.25	Températures du SFCL durant $T_a = 90 \text{ K}$	47
Figure III.26	Résistance du SFCL durant $T_a = 75 \text{ K}$	48
Figure III.27	Résistance du SFCL durant $T_a = 80 \text{ K}$	48
Figure III.28	Résistance du SFCL durant $T_a = 85 \text{ K}$	48
Figure III.29	Résistance du SFCL durant $T_a = 90 \text{ K}$	48
Figure III.30	Schéma unifilaire d'un réseau à 5JB	50
Figure III.31	Résistances si le SFCL entre 3-4	51
Figure III.32	Températures si le SFCL entre 3-4	51
Figure III.33	Résistances si le SFCL entre 2-4	52
Figure III.34	Températures si le SFCL entre 2-4	52

LISTE DES TABLEAUX

II.1	Comparaison des différents types de SFCL	32
III.1	Paramètres de supraconducteur	39
III.2	Les données des lignes et des générateurs	49
III.3	Valeurs des courants dans les différentes lignes de réseau	50

Liste des Symboles et Unités

Symbole	Description	Unité
<i>B</i>	Induction magnétique	T
<i>H</i>	Champ magnétique	$A \cdot m^{-1}$
<i>M</i>	Aimantation dans le matériau	$A \cdot m^{-1}$
μ_0	Perméabilité magnétique du vide	$H \cdot m^{-1}$
μ_r	Perméabilité magnétique du matériau	$H \cdot m^{-1}$
ρ_c	Résistivité de régime flux-creep	$\Omega \cdot m$
<i>T</i>	Température	K
U_0	Potentiel de pénétration	eV
<i>K</i>	Constante de Boltzmann	$J \cdot K^{-1}$
J_c	Densité de courant critique	$A \cdot m^{-2}$
<i>E</i>	Champ électrique	$V \cdot m^{-1}$
<i>B</i>	Champ d'induction magnétique	T
<i>H</i>	Champ magnétique	$A \cdot m^{-1}$
<i>J</i>	Densité de courant électrique	$A \cdot m^{-2}$
σ	Conductivité du milieu	$\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$
ρ	Résistivité du milieu	$\Omega \cdot m$
μ	Perméabilité magnétique du milieu	$H \cdot m^{-1}$
$\lambda(T)$	Conductivité thermique	$W \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}$
ρ	Masse volumique	$kg \cdot m^{-3}$
$C_p(T)$	Chaleur spécifique du matériau	$J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$
<i>W</i>	Puissance volumique	$W \cdot m^{-3}$
<i>h</i>	Coefficient de convection du fluide cryogénique	$W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}$
T_0	Température du fluide cryogénique	K
θ_{sc}	Résistance thermique	-
R_{supra}	Résistance du supraconducteur	Ω
R_{shunt}	Résistance du shunt	Ω
R_{ext}	Résistance externe	Ω
$I_{réseau}$	Courant du réseau	A
L_{transe}	Bobine résistive de champ magnétique	H
<i>m</i>	Rapport de transformation	—
R1	Résistance de l'enroulement	Ω

L_f	Inductance de fuite	H
L_m	Inductance magnétisante	H
I_{dc}	Courant continu de déclenchement	A
L_{supra}	Inductance supraconductrice	H

Introduction générale

Introduction générale :

Dans les réseaux électrique hauts et moyennes tension, les défauts tels que les courts-circuits constituent des perturbations sévères susceptibles de compromettre la stabilité du système. Un court-circuit, qu'il soit monophasé, biphasé ou triphasé, engendre une circulation de courants de défaut de forte amplitude, pouvant dépasser plusieurs kA, ce qui provoque une chute importante de la tension aux bornes des charges sensibles et entraîne des échauffements excessifs dans les équipements. Ces courants de défaut impactent directement la continuité de service, la qualité de l'énergie (diminution du facteur de puissance, harmoniques transitoires) ainsi que la durée de vie des composants (transformateurs, jeux de barres, lignes de transmission). Pour atténuer ces effets, l'architecture des réseaux intègre des dispositifs de protection sélective comme les relais différentiels, les relais de distance, et les disjoncteurs à coupure rapide. Par ailleurs, des technologies avancées telles que les limiteurs de courant supraconducteurs ou les convertisseurs de puissance à base d'électronique intelligente (FACTS, HVDC) sont de plus en plus utilisées pour isoler les défauts, limiter les courants de court-circuit, et renforcer la stabilité dynamique du réseau.

Dans ce contexte, l'intégration de limiteurs de courant à base de matériaux supraconducteurs (SFCL - Superconducting Fault Current Limiter) offre une solution technique avancée. En fonctionnement normal, le matériau supraconducteur (ex. BSCCO ou YBCO) est dans un état supraconducteur, caractérisé par une résistance nulle, ce qui permet au courant de circuler sans pertes ni perturbation du réseau. Lorsqu'un courant dépasse un seuil critique, le matériau passe brutalement à l'état résistif (transition de phase supraconducteur-normal), augmentant instantanément l'impédance de la branche où il est installé. Cette transition se produit en quelques microsecondes, bien avant la réponse des dispositifs de coupure classiques, ce qui permet de limiter efficacement le pic de courant de court-circuit dès sa phase transitoire initiale.

L'utilisation des SFCL présente plusieurs avantages techniques majeurs : réduction significative des courants de court-circuit, amélioration de la sélectivité des protections, diminution des contraintes électrodynamiques sur les composants, et maintien de la continuité de service. Leur intégration est particulièrement bénéfique dans les réseaux interconnectés modernes, notamment avec l'essor des énergies renouvelables, où la capacité de court-circuit globale tend à augmenter. Par ailleurs, les SFCL permettent d'éviter le surdimensionnement des équipements, réduisant ainsi les coûts d'investissement et de maintenance à long terme.

Le présent mémoire met en évidence l'intérêt et les avantages de l'intégration des limiteurs de courant à base de matériaux supraconducteurs dans les réseaux électriques pour améliorer leur protection et leur fiabilité.

Le travail présenté dans ce mémoire est structuré autour de trois chapitres principaux.

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique approfondie sur les matériaux supraconducteurs, visant à identifier leurs principales caractéristiques, les grandeurs critiques associées, ainsi que leurs domaines d'application en électrotechnique.

Le deuxième chapitre présente les limiteurs du courant classiques ; suivi par le fonctionnement d'un limiteur de courant ; après ceci le limiteur à base de supraconducteur avec ses différents types, et se termine par une modélisation électrique et thermique du limiteur de courant résistif.

Le troisième chapitre présentera les résultats des simulations des comportements électriques et thermiques d'un limiteur de courant supraconducteur durant un court-circuit triphasé, obtenus à partir d'un code de calcul développé et implémenté sous l'environnement MATLAB pour visualiser les différentes grandeurs électriques et thermiques. Le code a été élaboré sur la base de modèle de **Steven M. Blair** (pour le supraconducteur).

Finalement, une conclusion générale résume l'essentiel de notre travail ainsi que les perspectives envisagées.

Chapitre I :

Introduction à la supraconductivité

Introduction :

Ce chapitre est consacré à fournir des informations générales sur les matériaux supraconducteurs et les propriétés physiques de la supraconductivité. Nous discutons de son histoire, des types et des modèles de ces matériaux. Enfin, nous discuterons de certaines des principales applications de la supraconductivité en physique fondamentale et en génie électrique.

I.1. Définition :

Un supraconducteur désigne un matériau qui perd complètement sa résistance électrique lorsqu'il est refroidi en dessous d'une température spécifique, appelée température critique. Plusieurs éléments, alliages et composés possèdent cette propriété de supraconductivité. L'état dans lequel la résistivité devient nulle est appelé "état supraconducteur". En plus de cette caractéristique, un supraconducteur présente également un diamagnétisme parfait : cela signifie que lorsqu'un flux magnétique est appliqué à un supraconducteur, la densité du flux magnétique interne devient nulle. Lorsque la température dépasse la température critique, le matériau retourne à un état normal, où il agit comme un conducteur avec une résistance non nulle [1].

I.2. Historique Phénomène de la supraconductivité :

En 1911, Heike Kamerlingh Onnes découvre la supraconductivité en observant qu'à très basse température, la résistivité de certains matériaux chute brusquement à zéro, permettant à un courant électrique de circuler indéfiniment sans perte d'énergie. Ce changement, appelé transition vers l'état supraconducteur, se produit à une température critique.

En 1933, W. Meissner et R. Ochsenfeld mettent en évidence l'effet Meissner : les supraconducteurs expulsent les champs magnétiques externes grâce à des super-courants, une propriété qui les distingue des simples conducteurs.

En 1957, John Bardeen, Leon Cooper et John Schrieffer proposent la théorie BCS, expliquant que, sous basse température, les électrons forment des paires de Cooper via l'interaction avec les vibrations du réseau cristallin. Ces paires, se comportant comme des bosons, se regroupent dans un état quantique unique (condensation de Bose-Einstein), circulant sans résistance.

Cette théorie limite cependant la température critique à environ 30 Kelvins. En 1986, Johannes Bednorz et Karl Müller révolutionnent le domaine en découvrant un supraconducteur en oxyde de

cuivre, lanthane et baryum, opérant à 35 Kelvins. Cette avancée relance les recherches, conduisant en 1998 à la découverte de matériaux supraconducteurs fonctionnant jusqu'à 164 Kelvins.[2]

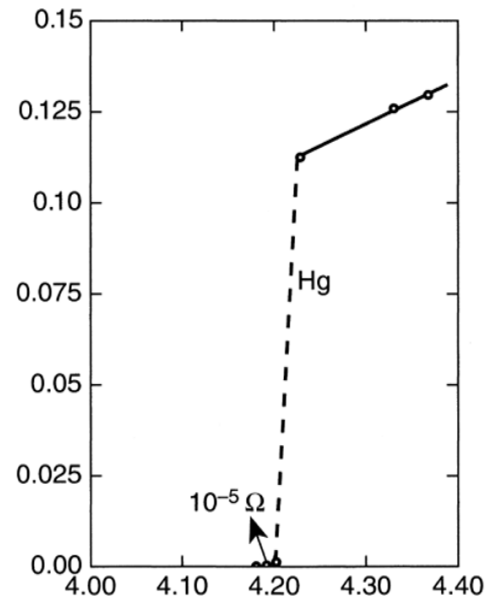
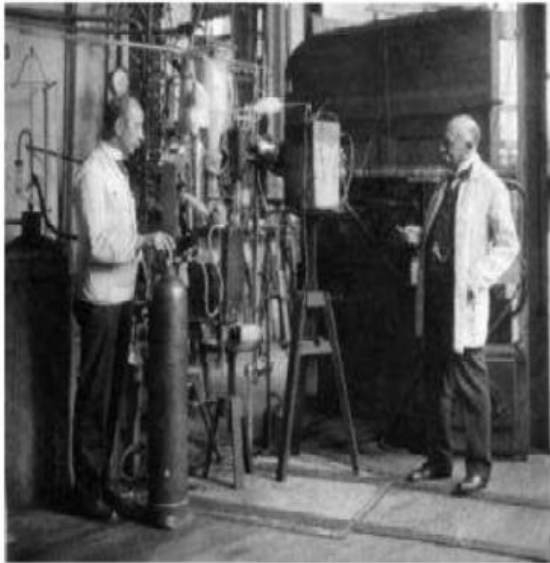


Figure I.1: Heike Kamerling Onnes première liquéfaction de l'hélium (1908) et découverte de la supraconductivité (1911). [15]

I.3 Classification des supraconducteurs :

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

Ces trois grandeurs sont dépendant les unes des autres et forment ainsi une surface critique (Fig.I.2.) au-delà de laquelle le matériau cesse d'être non dissipatif [3][4]

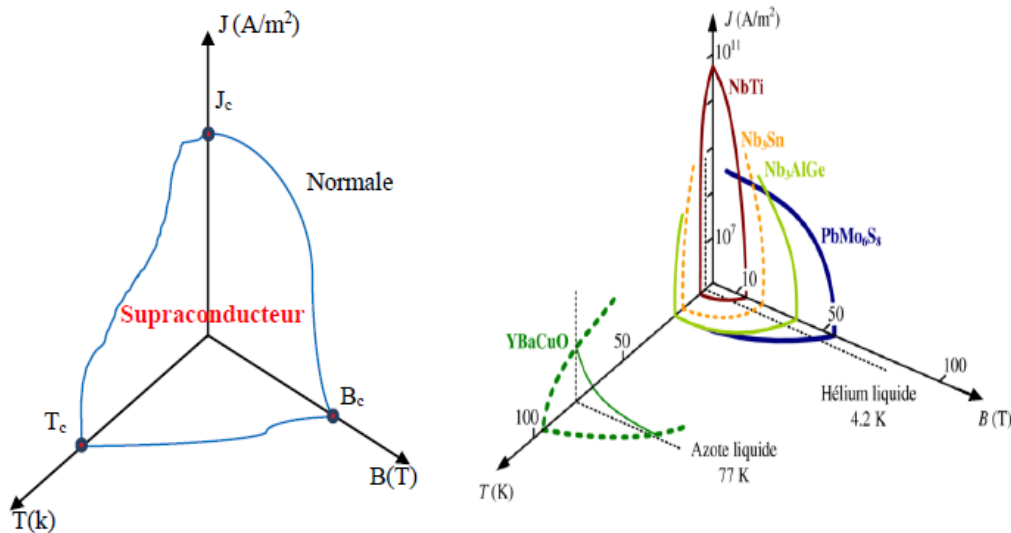


Figure.I.2 Surface critique et ordres de grandeur de quelques Supraconducteurs [2]

Les supraconducteurs de type I comprennent tous les éléments purs, à l'exception du niobium et du vanadium. En revanche, les alliages, composés chimiques et oxydes à haute température critique appartiennent au type II.

En raison de leur faible champ critique (B_c), les supraconducteurs de type I ne sont pas adaptés aux applications de limitation de courant de défaut. À l'inverse, les supraconducteurs de type II, grâce à leur champ critique élevé (B_{c2}), sont utilisés pour limiter les courants de court-circuit.

I.3.1 Température critique:

La température critique d'un supraconducteur dépend de plusieurs facteurs, notamment du matériau, de la densité de courant qui le traverse et du champ magnétique externe appliqué.

Les supraconducteurs se distinguent par leur température critique (T_c). Les matériaux à température critique basse (LTS pour *Low Temperature Superconductors*) peuvent atteindre des températures de l'ordre de 20K, ce qui les rend principalement adaptés à l'utilisation avec de l'hélium liquide. En revanche, les matériaux à température critique élevée (HTS pour *High Temperature Superconductors*) peuvent atteindre des températures allant jusqu'à 120K, permettant leur utilisation avec une large gamme de fluides, tels que l'hélium liquide, l'hélium gazeux, le néon liquide, le néon gazeux, l'hydrogène, ainsi que le naphte et l'azote sous forme liquide ou gazeuse [5].

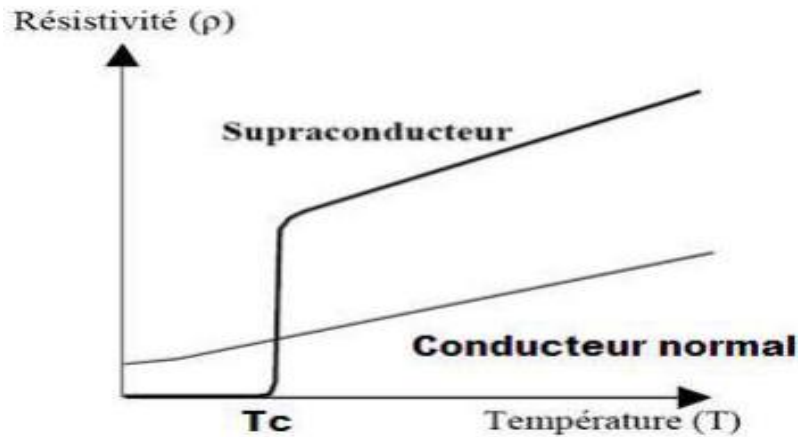


Figure I.3: Allure des résistivités d'un supraconducteur et d'un conducteur normal en fonction de la température [2]

I.3.1.1 Supraconducteur à basse température critique (SB T_c) :

Ce sont les premiers supraconducteurs utilisés dans des applications pratiques. Ils appartiennent aux supraconducteurs de type I. Leur température critique est inférieure à 20K, et ils sont donc utilisés principalement avec de l'hélium liquide. Des matériaux comme le NbTi ou le Nb₃Sn sont couramment utilisés, offrant une grande facilité de mise en forme pour des bobines capables de supporter un fort champ magnétique. Ces supraconducteurs sont par exemple utilisés dans les appareils d'imagerie médicale [5].

I.3.1.2 Supraconducteur à haute température critique (SHTc):

Découverts en 1986, ces supraconducteurs reposent sur des matériaux céramiques tels que le baryum et l'yttrium. Deux catégories principales émergent : les BSCCO et les YBCO. Le premier type, le BSCCO, présente une structure de type PIT (Powder In Tube), ce qui le rend robuste et facile à utiliser pour des applications comme les moteurs électriques. Actuellement, des câbles d'une longueur maximale de 1000 mètres peuvent être produits. Quant aux YBCO, avec leur structure multicouche de matériaux cuits et recuits, ils permettent une utilisation à des densités de courant et des champs magnétiques plus élevés, atteignant actuellement près de 500 mètres de longueur. Ils sont largement utilisés dans le domaine du transport d'électricité [5].

I.3.2 Champ magnétique critique (H_c) :

Le champ magnétique critique dépend également du type de supraconducteur. Pour les supraconducteurs de type I, le champ critique est relativement faible, tandis que pour ceux de type II, il existe deux champs critiques séparés par une zone d'état mixte. En général, le champ magnétique critique représente la somme du champ magnétique interne du supraconducteur et du champ externe, ce qui provoque le passage du matériau à son état normal lorsque la densité de courant devient nulle et que la température atteint un minimum [5].

L'induction magnétique dans le matériau est donnée par la relation suivante :

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (\text{I.1})$$

Avec : $\mathbf{M} = \chi \mathbf{H}$

Où :

$\mathbf{B}$: Induction magnétique [T]

$\mathbf{H}$: Champ magnétique [$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$]

$\mathbf{M}$: Aimantation dans le matériau [$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$]

μ_0 : Perméabilité magnétique du vide [$\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$]

μ_r : Perméabilité magnétique relative du matériau [$\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$]

Lorsqu'un champ magnétique appliqué de valeur H_0 est utilisé, l'aimantation chute brusquement à zéro, et le champ magnétique pénètre dans le matériau. On peut alors définir le champ magnétique critique H_c qui dépend de la température T par la formule suivante :

$$H_a = H_0 [1 - (T / T_0)^2] \quad (\text{I.2})$$

Il existe deux types de supraconducteurs : les supraconducteurs de type I et de type II.

I.3.3 Supraconducteurs de type I :

Les supraconducteurs de type I possèdent un seul champ critique (H_c). Lorsque le champ magnétique pénètre le matériau, il génère des super-courants sur une zone définie par la longueur de pénétration.

Le comportement des supraconducteurs de type I se caractérise par deux états distincts :

- L'état normal, où le matériau présente une résistance élevée.
- L'état supraconducteur, marqué par un diamagnétisme presque parfait.

Dans ces supraconducteurs, la supraconductivité disparaît brutalement lorsque le champ magnétique atteint la valeur critique H_c . Cette valeur reste faible, avec $\mu_0 H_c$ ne dépassant pas 0,1 tesla. La figure I.4 illustre la courbe $B(H)$ caractéristique d'un supraconducteur de type I.

Ce type des supraconducteurs n'ont aucune application industrielle à l'heure actuelle.[4][6]

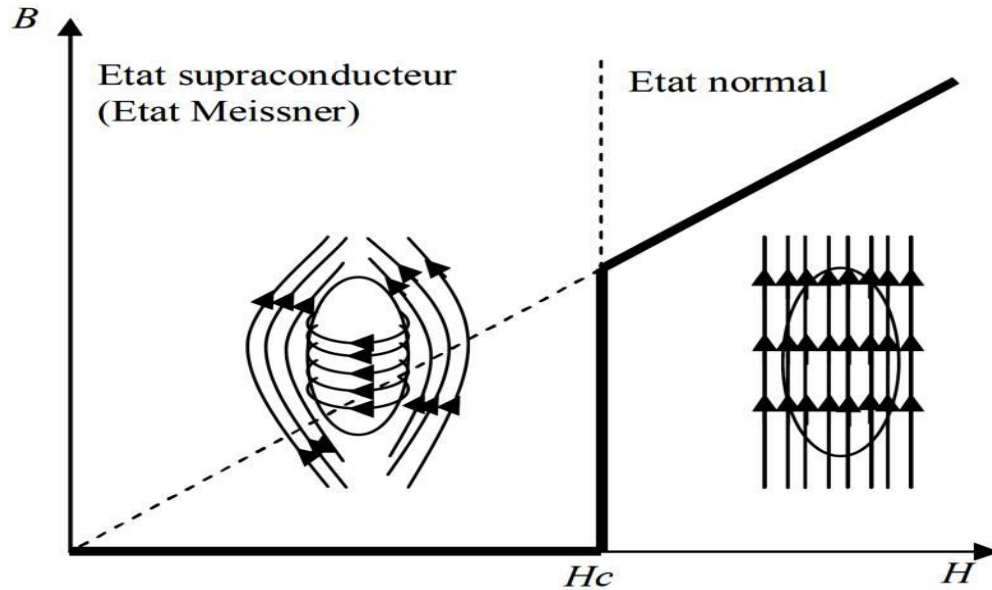


Figure.I.4. Caractéristique $B(H)$ d'un supraconducteur de type I. [20]

I.3.4 Supraconducteurs de type II :

À la différence des supraconducteurs de type I, ceux de type II présentent un diagramme de phase caractérisé par deux transitions : $H_{c1}(T)$ et $H_{c2}(T)$, cette dernière pouvant atteindre plusieurs dizaines de Teslas. Ces transitions aboutissent à la température critique T_c lorsque le champ magnétique est nul. Elles délimitent deux phases distinctes de l'état supraconducteur : la **phase de Meissner** et la **phase de Shubnikov** (ou **état mixte**).

Dans la **phase de Meissner** ($H < H_{c1}$), le matériau agit comme un diamagnétique parfait, excluant totalement le champ magnétique de son volume ($B=0$), sauf dans une fine couche proche de la surface. La magnétisation M est alors donnée par $M = -H$, comme dans un supraconducteur de type I.

Dans la **phase de Shubnikov** ($H_{c1} < H < H_{c2}$), le supraconducteur reste diamagnétique mais de manière incomplète. L'effet Meissner est partiel, la magnétisation moyenne de l'échantillon $-M$ diminue avec

H , et le champ magnétique commence à pénétrer sous forme de vortex, entraînant une induction magnétique non nulle à l'échelle globale ($B \neq 0$). [4][6][7]

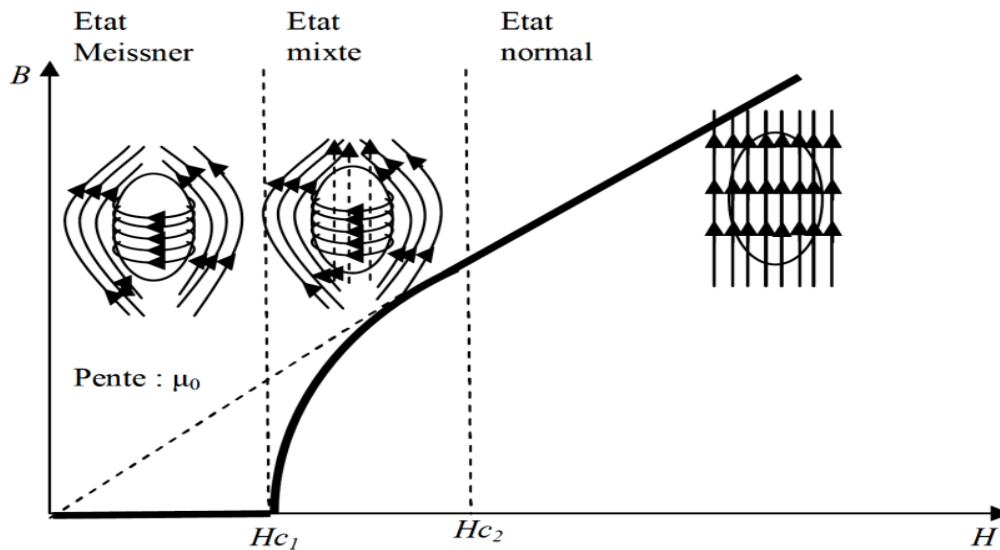


Figure.I.5. Caractéristique $B(H)$ d'un supraconducteur de type II. [20]

I.4 Modèles des matériaux supraconducteurs :

I.4.1 Le modèle de l'état critique de Bean:

Plusieurs modèles existent pour déterminer les distributions de courant et de champ, ainsi que d'évaluer les pertes en courant alternatif (AC) des supraconducteurs dans diverses conditions. Parmi eux, le modèle de l'état critique de Bean [8], ou modèle de Bean, est sans doute le plus reconnu. Introduit au début des années 1960 par C. Bean, ce modèle repose sur l'idée qu'une densité de courant macroscopique maximale, notée J_e (ou J_c), existe et est indépendante du champ magnétique, ce que le supraconducteur peut transporter.

Selon le modèle de Bean, le supraconducteur peut se trouver dans deux états distincts :

- Une densité de courant nulle dans les régions où le champ magnétique est constant.
- Une densité de courant $\pm J_c$ dans les zones où le supraconducteur oppose une résistance aux variations du champ magnétique.

Comme indiqué sur la Figure I.6 ci-dessous :

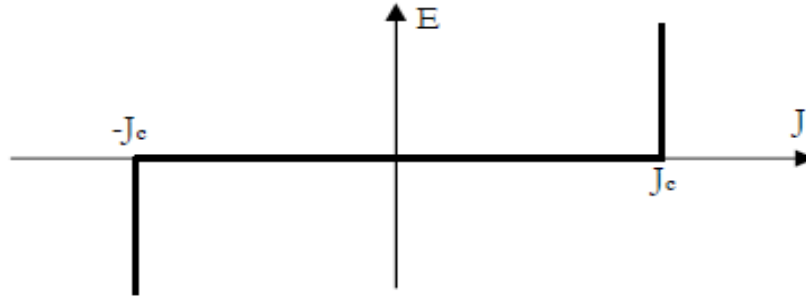


Figure .I.6: Caractéristique $E(j)$ d'un supraconducteur, modèle de l'état critique [2]

I.4.2 Modèle de loi de puissance :

C'est un modèle qui représente de manière précise le comportement des supraconducteurs à haute température critique (HTC) en fonction de J_c [2]

$$\vec{E}(\vec{J}) = \frac{E_c}{J_c} \left[\frac{J}{J_c} \right]^{n-1} \vec{J} \quad (\text{I.3})$$

$$\vec{B}(\vec{H}) = \mu_0 \vec{H} \quad (\text{I.4})$$

Les paramètres influençant cette loi sont la densité de courant critique, J_c , et l'exposant, « n ». Ce modèle permet d'ajuster les courbes $E(J)$, ce qui permet de modéliser un conducteur normal pour $n = 1$ (loi de comportement linéaire), jusqu'à obtenir une courbe très raide, comme dans le cas du modèle de l'état critique pour $n > 100$ [2].

I.4.3. Modèle de KIM :

Le modèle de Bean, ainsi que la loi en puissance, supposent que le matériau supraconducteur est isotrope et isotherme, et ne prennent pas en compte l'échauffement éventuel du conducteur dû aux pertes, ce qui pourrait entraîner une diminution du courant critique. Dans le modèle de Bean, la densité de courant critique est considérée comme constante, indépendamment du champ magnétique extérieur. Toutefois, dans la réalité, la densité de courant varie considérablement en fonction de son orientation par rapport au champ et de l'induction magnétique B . Kim a proposé une expression de $J_c(B)$ dans le cas isotrope

$$J_c(|B|) = \frac{J_{c0} B_0}{|B| + B_0} \quad (\text{I.5})$$

C'est le modèle le plus couramment utilisé pour modéliser la dépendance de la densité de courant critique par rapport à l'induction magnétique [2]

I.4.4 .Modèle de Flux Flow et Flux-Creep:

La caractéristique du champ électrique E en fonction de la densité de courant J , est présentée sur la Figure (I.7).

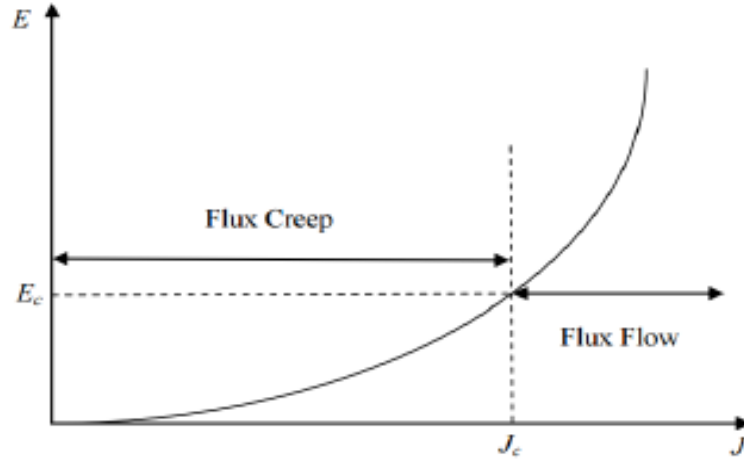


Figure. I.7: La caractéristique du champ électrique E en fonction de la densité de courant J [20]

C'est le modèle le plus couramment utilisé pour modéliser la dépendance de la densité de courant critique par rapport à l'induction magnétique

On peut définir deux modèles de fonctionnement pour le supraconducteur en fonction de la densité de courant critique J_c :

- Pour les faibles valeurs de E , lorsque $J \leq J_c$, la courbe $E(J)$ présente une forme exponentielle. Cela correspond à la zone de 'Thermally Activated Flux-Creep' (TAFC)', où les vortex, bloqués par les défauts du matériau (tels que les impuretés), se déplacent sous l'effet de l'activation thermique. Dans cette région, le champ électrique est défini par :[9]

$$E = 2\rho_c J_c \sinh\left(\frac{U_0}{kT} \cdot \frac{J}{J_c}\right) e^{-\frac{U_0}{kT}} \quad (\text{I.6})$$

Avec :

ρ_c : Résistivité de régime flux-creep [$\Omega \cdot m$],

T : Température [K] (I.6)

U_0 : Potentiel de pénétration [ev],

K : Constante de Boltzmann [$J.K^{-1}$]

J_c : Densité de courant critique [$A.m^{-2}$]

Pour des valeurs élevées de E , lorsque $J > J_c$, on entre dans la zone de "Thermally Activated Flux-Flow" (TAFF), où les vortex se déplacent librement. La densité de courant critique correspond ainsi à celle qui permet de détacher les vortex des défauts, provoquant ainsi le passage à l'état de "flux-flow". Dans cette région, le champ électrique est défini par :

$$E = \rho_c J_c + \rho_c J_c \left(\frac{|J|}{J_c} - 1 \right) \quad (I.7)$$

ρ_c : Résistivité de régime flux flow [$\Omega. m$].

Étant donné que la densité de courant critique marque la frontière entre le régime de flux-creep et celui de flux-flow, et que cette limite est souvent floue, la densité critique de courant est généralement déterminée par la valeur d'un champ électrique critique, E_c

I.5. Applications des supraconducteurs en électrotechnique :

I.5.1. Lignes de transport :

Actuellement, les câbles utilisés pour le transport de courant entre les centrales et les industries sont fabriqués en cuivre ou en aluminium. Cependant, ces deux matériaux présentent l'inconvénient d'avoir une résistance, entraînant ainsi des pertes d'énergie (pertes joules). Pour réduire ou éliminer ces pertes, des supraconducteurs, qui ne présentent aucune résistance, ont été utilisés. En mars 2004, la société Furukawa Electric, au Japon, a installé un câble de 500 mètres de long, fonctionnant sous 77 kV et 1 kA, refroidi à l'azote, dans le réseau électrique afin de le tester pendant un an.

L'expérience a démontré que le câble supraconducteur réduisait considérablement les pertes d'énergie (pertes Joule) par rapport aux câbles en cuivre ou en aluminium [10].



Figure. I.8 : ligne de transport [31]

I.5.2. Systèmes de stockage de l'énergie :

Les matériaux supraconducteurs, ayant une résistance nulle, permettent un stockage efficace de l'énergie sous forme magnétique dans une bobine supraconductrice à inductance propre L , dans laquelle un courant I circule. Ces systèmes sont appelés SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage). L'objectif du bobinage supraconducteur est d'éliminer les pertes joules lorsqu'il est mis en court-circuit.[11]

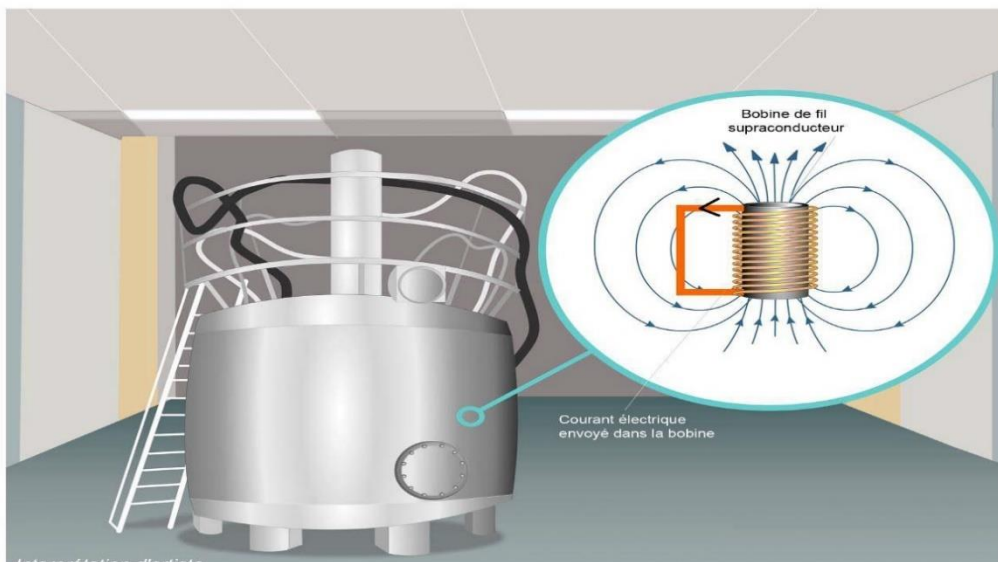


Figure. I.9 : stockage de l'énergie [32]

I.5.3. Machines électriques:

L'intégration des supraconducteurs à haute température critique (Htc) a conduit à une évolution constante des moteurs supraconducteurs. Ces derniers ont remplacé les bobines en cuivre par des enroulements supraconducteurs, permettant ainsi d'améliorer la densité de courant des fils et d'augmenter le couple massique des machines.

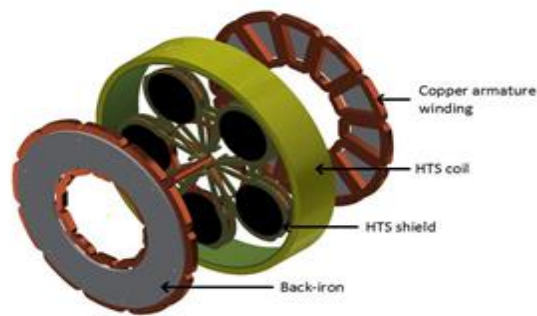


Figure. I.10 : Moteur supraconducteur pour l'aéronautique

I.5.4 Application médicale :

Les supraconducteurs sont utilisés dans le domaine médical, notamment pour l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM), qui repose sur le principe selon lequel les atomes d'hydrogène du corps réémettent l'énergie accumulée lorsqu'ils sont exposés à un champ magnétique intense, à une fréquence vibratoire détectable. Les supraconducteurs interviennent à deux niveaux : d'abord dans l'électroaimant, qui génère le fort champ magnétique nécessaire à l'accumulation et à la détection des signaux d'hydrogène du corps, et sont utilisés à deux niveaux : dans l'électroaimant et dans les systèmes de refroidissement [12]



Figure I.11. Montage d'un système IRM.[12]

I.5.5 Les câbles supraconducteurs :

Les matériaux supraconducteurs offrent une des applications les plus prometteuses dans le domaine de la fabrication de câbles pour le transport d'énergie. Ces câbles, également appelés câbles à forte puissance à diélectrique froid, bénéficient des progrès réalisés dans le domaine de la cryogénie. Le développement de ces systèmes de câbles représente un défi tant technique qu'économique. Les premiers résultats techniques sont encourageants, tout comme les perspectives économiques. Ces câbles, associés aux limiteurs de courant et aux moteurs, font partie des applications des supraconducteurs à haute température critique qui pourraient se concrétiser à court ou moyen terme dans un cadre industriel.[5]

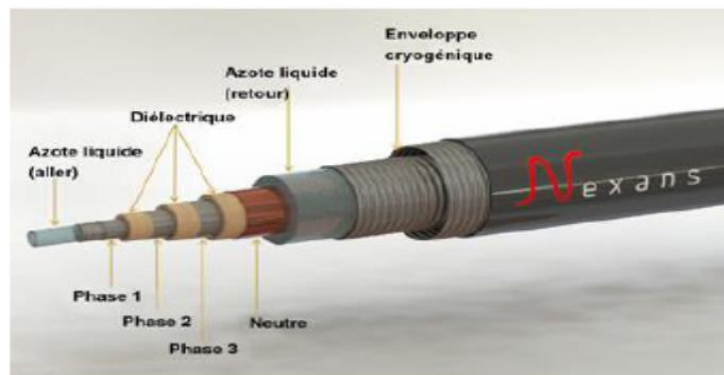


Figure I.12: Câble supraconducteur 110kg de câbles supraconducteurs remplacent 8200kg de cuivre[33].

I.5.6 Maglev :

La première utilisation pratique des trains à lévitation magnétique (maglev) remonte aux années 1960 et 1970, marquant une étape importante dans l'histoire des transports. Voici un aperçu détaillé de cette innovation :

L'idée de la lévitation magnétique a été explorée théoriquement dès le début du XXe siècle, mais ce n'est qu'avec les avancées en supraconductivité et en électromagnétisme que des applications pratiques ont vu le jour. Les premières recherches intensives ont été menées dans les années 1960, notamment au Japon, en Allemagne et aux États-Unis.

- Japon : Dans les années 1960, le Japon a commencé à développer des prototypes de trains maglev. En 1962, l'ingénieur japonais Hiroshi Yamaguchi a réalisé des expériences

pionnières avec des modèles réduits. Le Japon a ensuite construit le ML-100, un prototype de train maglev utilisant des aimants conventionnels, qui a été testé en 1972.

- Allemagne : En parallèle, l'Allemagne a développé son propre système maglev, connu sous le nom de Transrapid. Les premiers tests ont eu lieu dans les années 1970, avec un prototype fonctionnel présenté en 1979. Le Transrapid utilisait des électroaimants plutôt que des supraconducteurs, mais il a ouvert la voie à des applications commerciales.

Le Japon a été le premier à intégrer des supraconducteurs dans les trains maglev. En 1979, le ML-500, un prototype utilisant des aimants supraconducteurs, a atteint une vitesse record de 517 km/h sur une piste d'essai. Ce succès a conduit au développement du système SCMaglev (Superconducting Maglev), qui utilise des bobines supraconductrices refroidies à l'hélium liquide pour générer des champs magnétiques puissants.

Bien que les premiers prototypes aient été testés dans les années 1970, la première ligne commerciale de maglev n'a été inaugurée qu'en 2004 à Shanghai, en Chine. Cette ligne, basée sur la technologie allemande Transrapid, relie l'aéroport de Pudong au centre-ville sur une distance de 30 km, atteignant des vitesses de **430 km/h**.

L'utilisation de supraconducteurs dans les trains maglev a permis d'atteindre des vitesses encore plus élevées et une efficacité énergétique accrue. Le Japon continue de développer sa technologie SCMaglev, avec des projets comme la ligne **Chūō Shinkansen**, qui reliera Tokyo à Nagoya à des vitesses pouvant atteindre **500 km/h**.

En résumé, la première utilisation des trains maglev a marqué une révolution dans les transports, combinant vitesse, silence et efficacité. Les supraconducteurs ont joué un rôle clé dans cette innovation, ouvrant la voie à des systèmes de transport futuristes.



Figure I.13: Train Maglev

I.5.7 Limiteurs de courant :

Parmi les différents principes envisageables pour le fonctionnement des limiteurs de courant de défaut supraconducteurs, celui qui est le plus couramment utilisé repose sur la grande résistance non linéaire qui apparaît lorsque le courant dépasse la valeur critique du supraconducteur. Cela provoque une transition instantanée du supraconducteur à un état résistif. Cette transition, qui se produit presque instantanément à l'échelle du temps alternatif, transforme un fil supraconducteur en une résistance, permettant ainsi de limiter immédiatement le courant de défaut. Une configuration courante pour un limiteur de courant autonome est l'empilement de bobines supraconductrices à enroulement bifilaire. L'enroulement bifilaire (avec un sens de courant alternatif entre les couches) permet de maintenir une inductance faible et donc une impédance négligeable dans des conditions normales de fonctionnement. Ces bobines peuvent être connectées entre elles en série ou en parallèle, selon les besoins spécifiques en termes de courant et de tension. Le module est immergé dans de l'azote liquide, lequel peut être mis sous pression pour fonctionner à haute tension. L'un des principaux défis de conception est de prévenir la surchauffe et les dommages des bobines dans leur état résistif avant l'activation d'un disjoncteur. Ces défis ont été surmontés grâce à plusieurs démonstrations et premières installations commerciales en Europe. Bien que plusieurs solutions existent pour limiter le courant, les disjoncteurs sont les plus couramment utilisés, bien qu'ils aient un temps de réponse limité et nécessitent également des protections contre les courants de défaut trop élevés. Les fusibles, bien que simples et peu coûteux, nécessitent souvent une réinitialisation manuelle après refroidissement des

bobines supraconductrices. Des limiteurs de courant électroniques de puissance sont également en développement, mais les limiteurs de courant de défaut supraconducteurs ont l'avantage de s'activer automatiquement et en toute sécurité, sans avoir besoin d'un dispositif électronique de puissance. Ajouter des inducteurs dans le réseau peut réduire les courants de défaut, mais cela génère une chute de tension supplémentaire, ce qui perturbe la stabilité du système et nuit au rétablissement transitoire. En revanche, les limiteurs de courant supraconducteurs peuvent être conçus avec une inductance très faible et une chute de tension minimale. Une des innovations majeures dans ce domaine est l'utilisation de fils supraconducteurs intégrés directement dans les câbles et les transformateurs pour concevoir des câbles et transformateurs limiteurs de courant, ce qui élimine la nécessité d'un équipement supplémentaire tout en offrant des caractéristiques uniques. Plusieurs recherches ont étudié ces limiteurs supraconducteurs. Par exemple, au laboratoire CNRSCRTBT/LEG, un limiteur de 1 kV a été testé, montrant l'intérêt de l'YBaCuO mono-domaine pour ce type d'application, avec des performances encore susceptibles d'être améliorées. Une étude a également comparé les limiteurs de courant continu et alternatif.[4][13]

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exploré l'histoire de la supraconductivité, ses grandeurs critiques (TC, HC, JC) ainsi que ses propriétés spécifiques. Nous avons également distingué les deux principaux types de supraconducteurs : les supraconducteurs de type I et de type II. Dans la dernière partie, nous avons abordé les limiteurs de courant supraconducteurs et passé en revue les diverses applications de la supraconductivité dans plusieurs domaines. Dans le prochain chapitre, nous présentons les différents types de limiteurs de courant classique et à base de supraconducteur.

Chapitre II :

Techniques de limitation du courant de défaut dans les réseaux

Introduction :

Dans ce chapitre, nous abordons l'étude des limiteurs de courant dans les réseaux électriques, un sujet crucial pour assurer la sécurité et la fiabilité des installations électriques. Les limiteurs de courant sont des dispositifs qui protègent les équipements contre les surintensités en limitant la quantité de courant qui peut circuler dans un circuit. Ils sont particulièrement importants dans des systèmes où la gestion de l'énergie et la protection des composants contre les courants excessifs sont primordiales, comme dans les réseaux électriques à haute tension ou dans les applications nécessitant une grande fiabilité.

Nous commencerons par explorer les principes de fonctionnement des limiteurs de courant classiques avant de nous intéresser aux limiteurs à base de supraconducteurs, qui représentent une avancée technologique importante dans ce domaine. Nous détaillerons plusieurs types de limiteurs de courant supraconducteurs (SFCL), en expliquant leur fonctionnement et nous ferons une comparaison entre ces différents types.

Enfin, une attention particulière sera accordée aux équations mathématiques qui sous-tendent la compréhension et l'analyse des phénomènes électromagnétiques dans les systèmes de protection contre les surintensités.

II.1 Intérêt du limiteur de courant de défaut :

Les courants de défaut restent un défi majeur dans les réseaux électriques à courant alternatif haute tension, car ces courants ne sont pas limités, mais seulement coupés lorsqu'ils passent par zéro par des disjoncteurs. Ce problème s'aggrave dans les systèmes à courant continu, où le courant ne passe pas par zéro, rendant son interruption plus complexe. Étant donné que les courants de défaut ne sont pas contrôlés en amplitude, mais seulement en durée, tous les équipements électriques doivent être surdimensionnés pour résister aux efforts électrodynamiques engendrés, qui sont proportionnels au carré du courant. Les courants de défaut peuvent atteindre des valeurs énormes, environ 20 fois le courant nominal normal, générant des forces jusqu'à 400 fois plus importantes que celles en conditions

normales. Par conséquent, le réseau est conçu pour que les courants de défaut ne dépassent pas les limites autorisées et n'excèdent pas la capacité de coupure des disjoncteurs.

Le réseau peut être schématisé simplement comme une source de tension (V) connectée en série avec l'impédance de la ligne (Z_{cc}) et la charge. En cas de court-circuit, le courant de défaut est déterminé uniquement par l'impédance de la ligne selon la relation :

$$I_{cc} = I_{Défaut} = \frac{E}{Z_{cc}} \quad (\text{II.1})$$

Cependant, si l'impédance de la ligne réduit favorablement le courant de défaut, elle provoque également une chute de tension ($Z_{cc} \cdot I$), ce qui est indésirable en conditions normales, car cela entraîne des fluctuations de l'amplitude de la tension. La qualité de la tension (stabilité de l'amplitude) s'améliore avec l'augmentation de la puissance de court-circuit.

$$(S_{cc} = 3EI_{cc} = 3E^2/Z_{cc}). \quad (\text{II.2})$$

Cependant, cette puissance est limitée par la tension du réseau (E) et la capacité de coupure des disjoncteurs (I_{cc}).

Par conséquent, un compromis précis doit être trouvé entre le maintien de la qualité de la tension et le contrôle des courants de défaut. Bien que l'augmentation des chemins d'alimentation pour les consommateurs améliore la fiabilité du réseau, elle entraîne également une augmentation des courants de défaut, car ces courants deviennent la somme des courants de défaut provenant de multiples sources (selon la loi des nœuds). Compte tenu de l'importance cruciale de la qualité de la tension et de la fiabilité du réseau, le limiteur de courant de défaut est considéré comme la solution idéale à ces défis.

Cet appareil permet d'atteindre une puissance de court-circuit "quasi infinie", tout en maintenant le courant de défaut dans des limites raisonnables. De plus, il réduit les contraintes mécaniques et électriques sur tous les composants du réseau, diminuant ainsi le besoin de surdimensionner les équipements pour résister aux courants de défaut élevés. Cependant, cet appareil idéal n'est pas encore disponible dans les réseaux haute tension, mais les avancées dans le domaine des matériaux supraconducteurs pourraient offrir des solutions prometteuses à ce problème à l'avenir.[14]

II.2. Principe général de la limitation de courant :

Le principe de la limitation de courant repose sur l'utilisation d'une impédance variable insérée en série avec le réseau. Cette impédance peut être purement résistive dans le cas des réseaux à courant continu (DC), mais elle devient inductive dans le cas des réseaux à courant alternatif (AC). Lorsqu'un court-circuit se produit, l'impédance augmente de manière brusque et rapide, généralement en moins d'une milliseconde. Cette augmentation permet de limiter le pic initial du courant à une valeur bien inférieure à celle théorique du court-circuit. Durant un défaut, le limiteur subit quasiment la pleine tension du réseau, entraînant ainsi une dissipation de puissance considérable. [15]

II. 3. Limiteurs de courant classiques :

Peu de solutions classiques permettent de limiter naturellement un courant de défaut. Le Fusible est la solution la plus utilisée en basse et moyenne tension, mais ils présentent l'inconvénient majeur de ne pas être réutilisables et de nécessiter une intervention humaine pour la remise sous tension du système. Par contre, l'utilisation de circuits auxiliaires commandés permet d'augmenter l'impédance apparente d'un système lors d'une montée de courant. [2]

II.3.1. Réactance série :

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

II.3.2. Limiteur à redresseurs commandés :

Pour limiter ces inconvénients, il est préférable d'introduire des composants de commutation telle que les thyristors au moment du défaut. Un des dispositifs de référence est le transformateur série court-circuité par des thyristors [16] (Figure II.1).

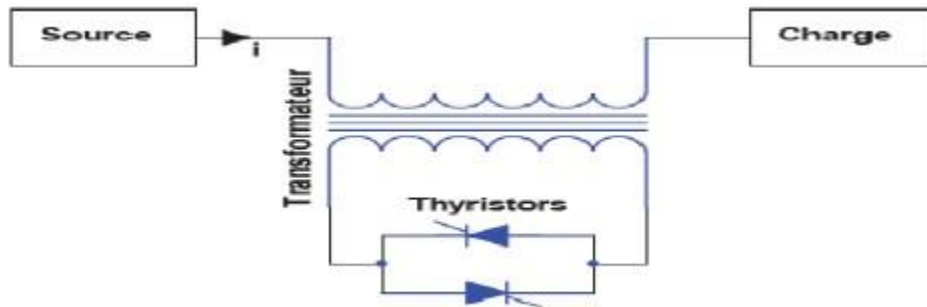


Figure II.1. Limitation de courant par transformateur court-circuité

Lorsque les thyristors sont passants le transformateur est en court-circuit, l'impédance série est négligeable devant la charge. Cependant lorsque les thyristors sont bloqués, le transformateur est en circuit ouvert et son impédance augmente fortement. [2]

Il est également possible d'utiliser des dispositifs à résonance [23] insérés en série avec des Thyristors (Figure II.2), permettant de contrôler l'impédance du circuit LC en modifiant la Commande de l'angle d'amorçage.

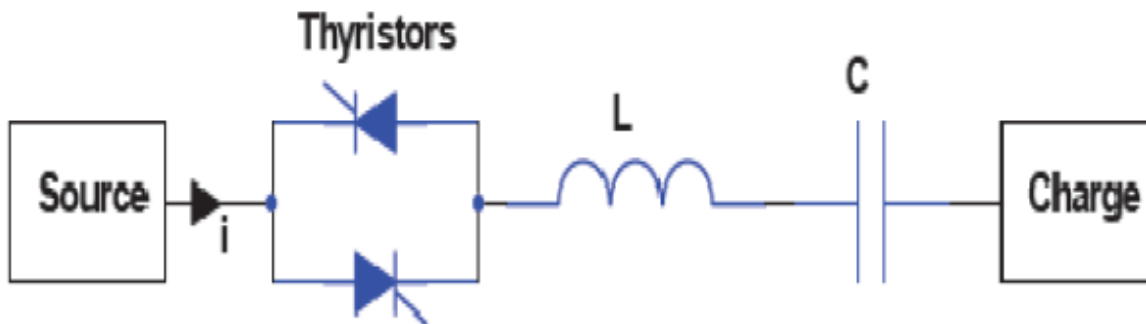


Figure II.2. Limitation de courant par thyristors contrôlant un circuit raisonnant [17]

L'inductance et la capacité sont choisies et raccordées de manière à garantir que les limites de di/dt des thyristors ne soient pas dépassées. Les dispositifs commandés, tels que les disjoncteurs statiques, permettent une commutation rapide du courant, passant d'une branche à faible impédance à une

branche à impédance élevée. Toutefois, la synchronisation des dispositifs à semi-conducteurs de commutation reste un défi. De plus, ces systèmes sont encore complexes à adapter aux puissances élevées et à la haute tension, et les composants de puissance entraînent des chutes de tension significatives lorsqu'ils sont en état passant.[2]

II.3.3. Résistance variable :

Une solution à la fois élégante et efficace consiste à utiliser une résistance variable insérée dans le circuit. Cette variation peut résulter soit d'un changement de phase, soit d'un changement d'état du matériau de la résistance. Cependant, dans le cas d'un changement d'état non homogène, la concentration de puissance dans une zone restreinte peut entraîner la destruction du matériau.[16]

II.4 Limiteur de courant à base de supraconducteur SFCL :

Un réseau électrique doit être dimensionné non seulement pour supporter son fonctionnement normal, mais aussi pour résister à un régime de court-circuit en cas de défaillance. En effet, le courant de court-circuit peut atteindre jusqu'à 30 fois la valeur du courant nominal, ce qui implique que l'ensemble du réseau (générateurs, transformateurs, jeux de barres, etc.) doit être surdimensionné, tant électriquement que mécaniquement, ce qui engendre des coûts très élevés.

Dans ce contexte, il est fortement recommandé d'utiliser des dispositifs capables de limiter le courant de court-circuit, tels que le **limiteur de courant à base de supraconducteurs** (Superconducting Fault Current Limiter, SFCL) [18]. Ce principe repose sur l'introduction d'une impédance supplémentaire dès qu'un défaut se produit. Grâce à la transition de l'état supraconducteur à un état résistif, on crée une impédance variable. Lorsqu'un élément supraconducteur inséré dans la ligne dépasse son courant critique, il passe automatiquement à l'état résistif en cas de court-circuit, sans avoir besoin d'un dispositif de détection pour initier cette transition (voir Figure II.3).

Ce système présente l'avantage de sa simplicité et de ses performances exceptionnelles, surpassant largement les techniques classiques de limitation du courant. Il est donc idéal pour améliorer la qualité de service des réseaux électriques actuels. De plus, son fonctionnement est autonome et répétitif,

contrairement aux fusibles, qui nécessitent un remplacement et l'intervention d'un opérateur humain après chaque utilisation.

Ainsi, le courant de court-circuit pourrait devenir une notion théorique qui ne serait jamais réellement atteinte. Par exemple, si les courants de court-circuit sont limités à huit fois la valeur du courant nominal, la puissance dissipée durant un court-circuit serait plus de six fois inférieure à celle générée par les systèmes traditionnels.

Ce principe, à la fois simple et inaccessible aux méthodes traditionnelles de limitation du courant, présente un intérêt majeur pour améliorer la qualité de service des réseaux électriques modernes. En outre, son fonctionnement est à la fois répétitif et autonome, ce qui en fait un équivalent de fusible permanent ne nécessitant ni remplacement, ni intervention humaine. Par conséquent, le courant de court-circuit deviendrait une valeur théorique, jamais atteinte dans la pratique. Par exemple, si les courants de court-circuit sont limités à un maximum de huit fois le courant nominal, la puissance dissipée durant un court-circuit serait alors réduite de plus de six fois par rapport aux systèmes actuels.

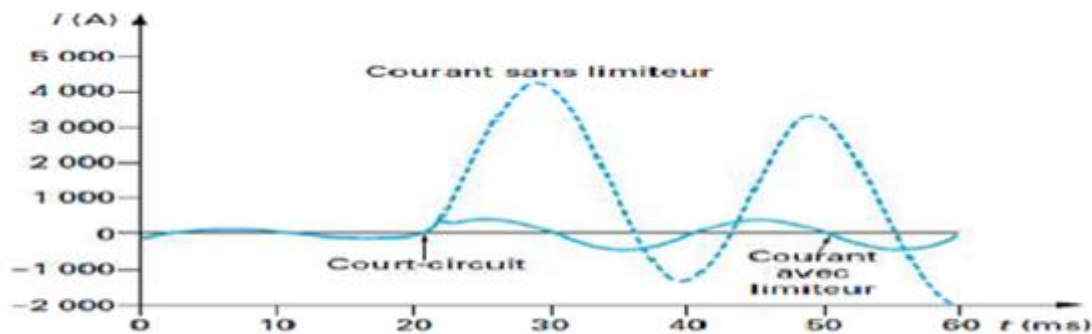


Fig.II.3. Courants de court-circuit avec et sans limiteur [18]

Il est envisageable de repenser totalement le dimensionnement des réseaux électriques de demain, en particulier dans les pays en développement où l'infrastructure est encore à construire. Le transport d'électricité pourrait alors être assuré non plus par des lignes à Très Haute Tension (THT), mais par des lignes supraconductrices en Moyenne Tension (MT), capables de véhiculer des courants élevés grâce à l'intégration systématique de limiteurs de courant. Ainsi, tous les disjoncteurs traditionnels

pourraient être remplacés par des interrupteurs simples, simplifiant considérablement l'architecture du réseau.[19]

II.4.1. SFCL résistif :

Un réseau peut être représenté par une source de tension $U_{\text{réseau}}$ alimentant un courant $I_{\text{réseau}}$. Ce réseau comprend une résistance de ligne $R_{\text{réseau}}$, une inductance de ligne $L_{\text{réseau}}$, un disjoncteur et une charge. Dans le cadre de cette étude, nous introduisons un SFCL résistif, connecté en série avec le réseau, comme illustré dans (la Figure II.4).

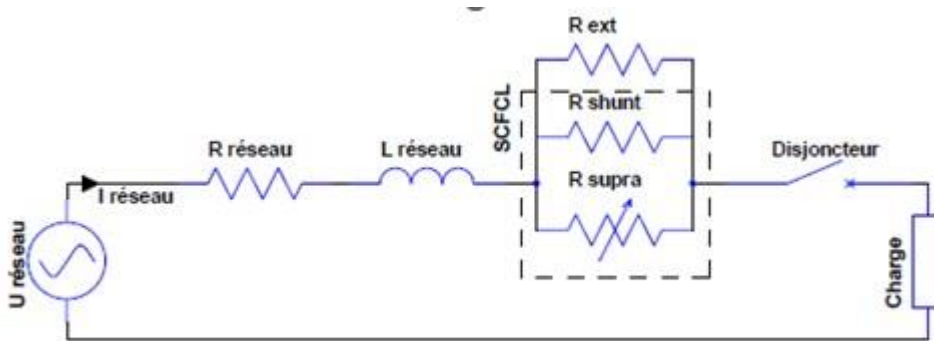


Figure II.4 : Schéma d'un SFCL résistif inséré dans un réseau

La transition soudaine d'un supraconducteur, combinée à sa résistivité élevée en état normal, permet d'introduire rapidement et naturellement une forte résistance en série avec le réseau, limitant ainsi le courant.

En régime normal, la résistance du supraconducteur R_{supra} est pratiquement négligeable, et en cas de court-circuit, c'est celle du shunt, notée R_{shunt} , qui prédomine. Lorsqu'un défaut se produit et que le courant $I_{\text{réseau}}$ traverse le SFCL en dépassant le courant critique du supraconducteur, sa résistance augmente de manière brutale.

La résistance du shunt est essentielle pour protéger le supraconducteur des points chauds destructeurs causés par l'inhomogénéité des transitions. Cette résistance doit être parfaitement en contact électrique avec toute la longueur du supraconducteur. Une résistance externe R_{ext} peut aussi être

ajoutée pour ajuster le courant limité et éviter les surtensions générées par les transitions rapides. Afin de ne pas dépasser la température maximale du supraconducteur, il est nécessaire d'interrompre le court-circuit en moins de 100 millisecondes, ce qui peut être réalisé par l'ouverture d'un disjoncteur.

L'inhomogénéité est un problème majeur dans la limitation de courant par supraconducteurs, car elle peut provoquer la formation de points chauds, menant à la destruction du matériau.

Le SFCL résistif avec transition assistée magnétiquement (voir Figure II.5) se compose d'un limiteur supraconducteur résistif couplé en parallèle avec une bobine résistive de champ magnétique, appelée L_{transe} [20].

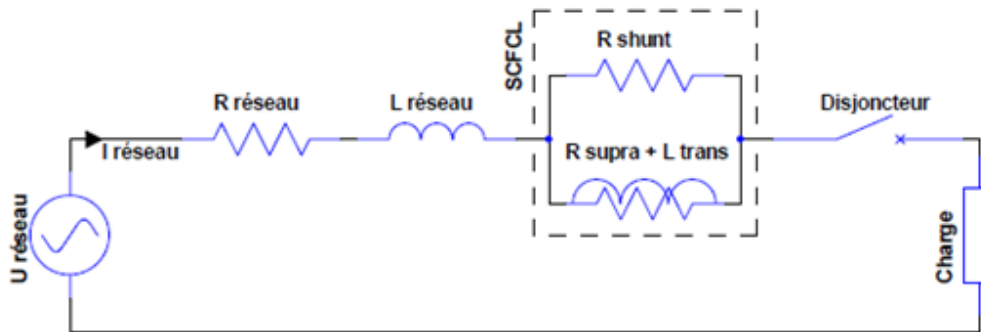


Figure II.5 : SFCL résistif avec transition assistée magnétiquement

La plupart des projets récents se concentrent sur les SFCL résistifs, avec une prédominance des démonstrateurs utilisant du BSCCO-2212, qui sont parmi les plus puissants. Nexans SuperConductors a réussi à développer le limiteur résistif à haute température supraconductrice (HTS) le plus puissant, en recourant à des enroulements bifilaires de BSCCO-2212. Le démonstrateur triphasé CURL 10, d'une capacité de 10 kV / 10 MVA, a été conçu en 2003 et a été testé avec succès pendant une année sur le réseau de distribution de RWE en Allemagne

II.4.2 SFCL de type noyau magnétique écranté :

Ce type de limiteur est souvent appelé SFCL inductif, il est composé d'un enroulement primaire conventionnel bobiné autour d'un noyau magnétique entre les quels ce trouve un cylindre supraconducteur (Figure II.6).

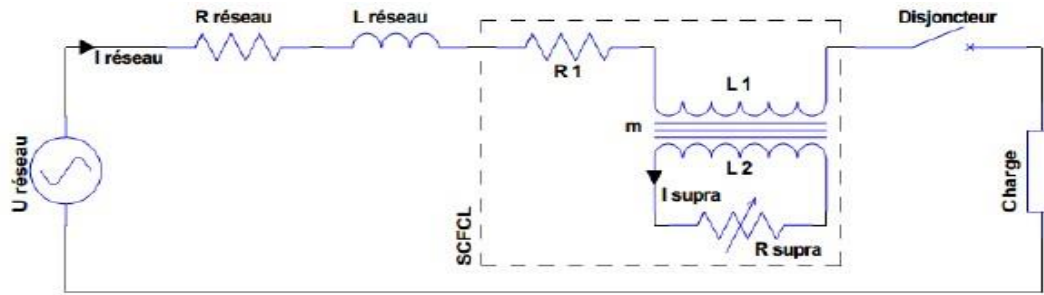


Figure II.6 SFCL de type noyau magnétique écrané.

Son principe de fonctionnement est semblable à un transformateur avec un rapport de transformation « m » et un enroulement secondaire court-circuité (Figure II.7)

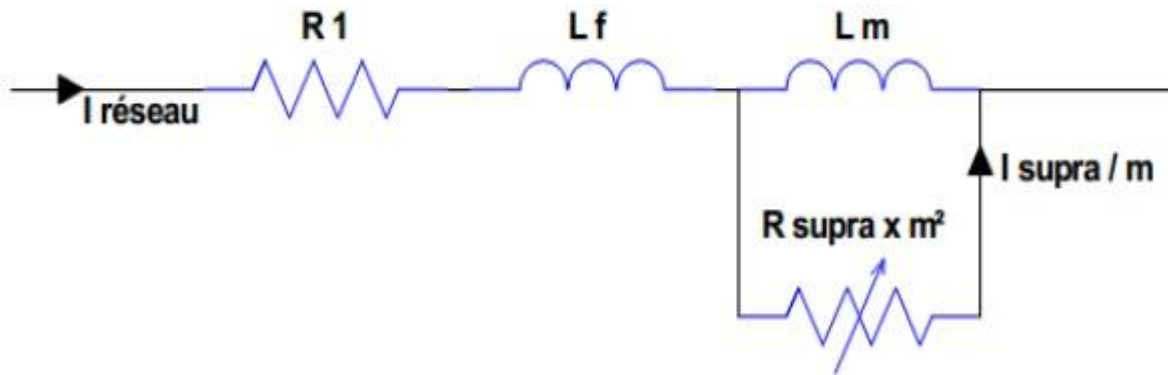


Figure II.7 Schéma équivalent du SFCL de type noyau magnétique écrané

En régime normal, le courant circulant dans le cylindre supraconducteur reste inférieur à son courant critique, ce qui permet au cylindre de fonctionner comme un écran magnétique parfait pour l'enroulement primaire. De ce fait, le flux dans le noyau magnétique est négligeable. La faible impédance apparente du SFCL se comporte alors comme la résistance $R1$ de l'enroulement primaire ainsi que l'inductance de fuite L_f entre l'enroulement primaire et le cylindre supraconducteur.

En cas de défaut, lorsque le courant dans le supraconducteur dépasse sa valeur critique, celui-ci développe une résistance R_{supra} . Le flux magnétique pénètre alors dans le noyau, créant une impédance de limitation qui résulte de la mise en parallèle de l'inductance magnétisante L_m et de la résistance R_{supra} , cette dernière étant ramenée au primaire sous la forme de $R_{\text{supra}} \times m^2$. Ainsi, la

conception du système détermine si l'impédance de court-circuit est principalement résistive ou inductive.

L'avantage de ce type de SFCL réside dans le fait que le supraconducteur n'est pas directement connecté au réseau, ce qui élimine le besoin de connexions à basse température. Lors d'un défaut, le supraconducteur est soumis à une faible tension, correspondant à la tension du réseau atténuée par le rapport de transformation m . Les principaux inconvénients de ce dispositif sont son volume et son poids, qui sont comparables à ceux d'un transformateur de puissance équivalente. De plus, il est nécessaire de respecter un temps de récupération avant de pouvoir utiliser à nouveau le SFCL [21].

II.4.3 SFCL de type pont redresseur :

Ce type de SFCL (Figure II.8) est composé d'un pont redresseur à diodes ou thyristors, d'une bobine supraconductrice *L supra* et d'une source de tension continue U_{dc}

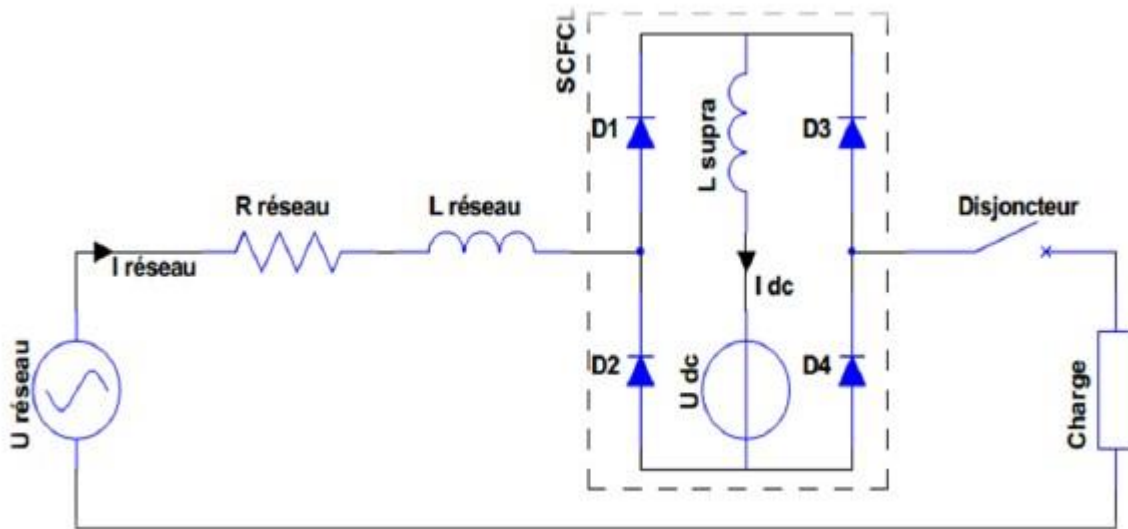


Figure II.8 SFCL de type pont redresseur.

Un courant continu I_{dc} traverse une bobine supraconductrice L_{supra} , alimentée par une source de tension U_{dc} . En régime normal, lorsque le courant $I_{réseau}$ est inférieur au courant I_{dc} , les diodes sont passantes et le courant $I_{réseau}$ ne traverse pas l'inductance L_{supra} . Dans ce cas, l'impédance du SCFCL est faible, et seules les pertes dues à l'électronique de puissance sont générées.

Cependant, si le courant $I_{réseau}$ dépasse I_{dc} , les diodes (D1, D4) ou (D2, D3), selon la phase du court-circuit, se bloquent. Ce fonctionnement quasi en pont redresseur fait circuler le courant $I_{réseau}$ dans la bobine L_{supra} , ce qui limite le courant grâce à la forte inductance de la bobine.

En théorie, la bobine peut être non supraconductrice, mais cela augmenterait les pertes par effet Joule et exigerait également un enroulement plus volumineux. En remplaçant les diodes par des thyristors, il devient possible d'interrompre le court-circuit au passage par zéro du courant. De plus, le courant de déclenchement peut être réglé par I_{dc} , ce qui permet une adaptation facile aux besoins du réseau. Toutefois, ce fonctionnement reste relativement peu fiable, car en régime de défaut, un dysfonctionnement d'une diode pourrait court-circuiter la bobine et annuler ainsi l'effet de limitation du courant. [21]

II.4.4. Le SFCL de type contrôleur de courant de défaut :

On utilise un composant d'électronique de puissance, tel qu'un thyristor, pour aiguiller un courant vers une impédance de limitation lorsqu'il s'ouvre. Grâce à la possibilité d'ajuster le seuil de déclenchement de la commande, ce type de SFCL agit comme un contrôleur de courant de court-circuit. Il est constitué de deux thyristors, T1 et T2, montés en opposition série et court-circuités respectivement par les inductances supraconductrices L1L_1 et L2L_2 (voir Figure II.9).

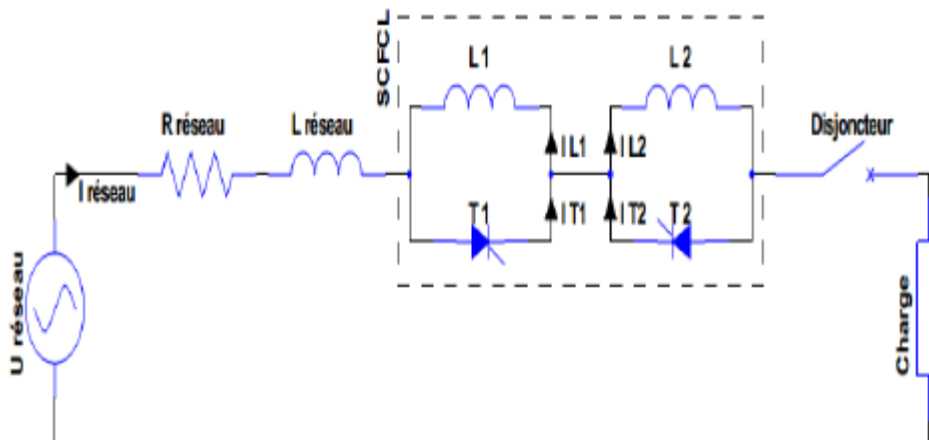


Figure II.9 SFCL de type contrôleur du courant de défaut.

Pour activer le système, une charge doit d'abord être connectée au réseau, puis les thyristors T1 et T2 sont commandés alternativement afin de faire circuler un courant continu d'amplitude I_{dc} dans les bobines supraconductrices L1 et L2.

En régime normal, lorsque l'amplitude du courant $I_{réseau}$ est inférieure à I_{dc} , les thyristors restent en conduction permanente, et l'impédance du SFCL correspond simplement à la chute de tension à travers les thyristors. En régime de défaut, lorsque le courant $I_{réseau}$ dépasse I_{dc} , les thyristors se bloquent alternativement, dirigeant ainsi le courant vers les inductances qui leur sont associées. Par conséquent, les inductances supraconductrices L1 et L2 sont insérées alternativement sur le réseau à chaque passage par zéro du courant, augmentant ainsi l'impédance et limitant le courant.

Cette configuration présente les mêmes caractéristiques que le SFCL avec pont redresseur, mais elle ne nécessite ni source de tension supplémentaire ni électronique de puissance complexe. [22]

II.4.5. SFCL de type à noyaux magnétiques saturés :

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

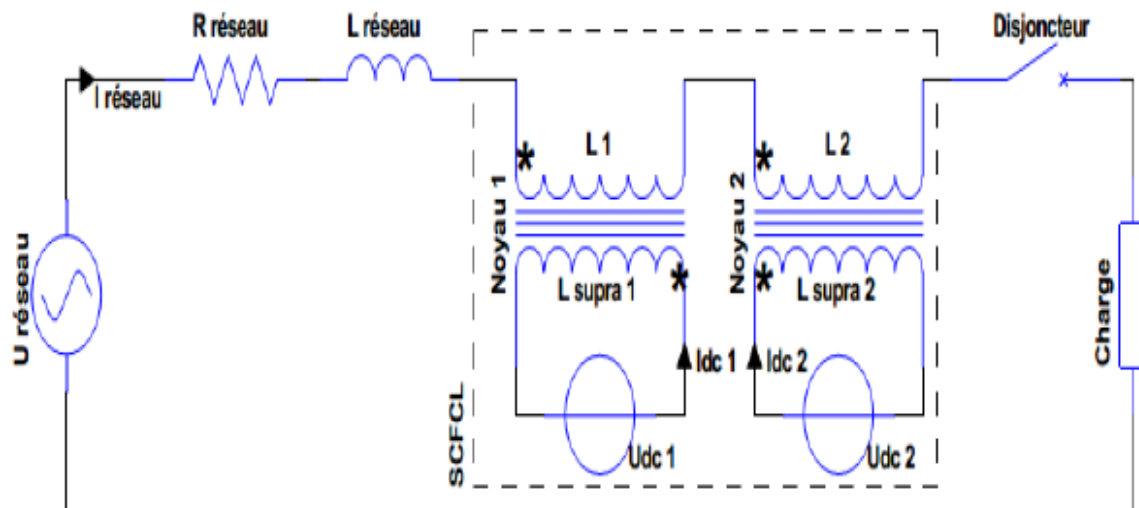


Figure II.10 SFCL de type noyaux magnétiques saturés

Les deux noyaux magnétiques étant saturés, l'inductance apparente du SFCL reste faible, correspondant à la somme des résistances et réactances des inductances L_1 et L_2 . En régime normal, le courant $I_{réseau}$ reste suffisamment faible pour maintenir les noyaux dans leur saturation complète, assurant ainsi une impédance faible pour le SFCL. Lors d'un défaut, l'augmentation du courant $I_{réseau}$ provoque la sortie alternée des noyaux de leur saturation, les plaçant dans une zone de perméabilité élevée. Cela entraîne une augmentation significative de l'impédance apparente du SFCL, créant un champ électrique qui limite efficacement le courant. Étant donné que l'enroulement supraconducteur est faiblement traversé par le courant variable, les pertes thermiques restent faibles, évitant ainsi la nécessité d'un système de refroidissement complexe. Toutefois, le noyau en fer et l'ensemble de l'installation restent relativement volumineux. [22]

II.5. Comparisons des différents types de SFCL :

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

Tableau II.1 : Comparaison des différents types de SFCL [24]

La commercialisation des SFCL n'est pas encore de jour. Comme il est encore difficile de prévoir quel type sera le plus prometteur pour l'avenir. Cependant il est possible de les distinguer en fonction de 4 principales caractéristiques [18] :

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

En général, le SFCL résistif est le plus compact parmi tous les types, bien que ceux ne nécessitant pas la transition supraconductrice offrent de meilleurs temps de récupération. Les SFCL intégrant des composants d'électronique de puissance présentent souvent une fiabilité inférieure, car en cas de défaillance du système, il n'y a aucune limitation intrinsèque pour empêcher l'aggravation du défaut.

II.6 Formulation de l'équation magnétodynamique et thermique

II.6.1 Formulation de l'équation magnétodynamique

À l'échelle macroscopique, les équations de Maxwell demeurent valables pour décrire les phénomènes électromagnétiques dans un supraconducteur. En considérant un régime quasi-stationnaire (où les courants de déplacement sont négligés), elles peuvent être formulées comme suit :

$$\text{rot}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{div}(\vec{B}) = 0 \quad \text{rot}(\vec{H}) = \vec{J} \quad (\text{II.3})$$

Comme pour les autres conducteurs, les équations suivantes viennent compléter les équations de *Maxwell* :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad \vec{J} = \sigma \vec{E} \quad \vec{E} = \rho \vec{J} \quad (\text{II.4})$$

Dans les équations II.3 et II.4 :

- E est le champ électrique (en Vm^{-1}).
- B est le champ d'induction magnétique (en T).

- H est le champ magnétique (en Am^{-1})
- J est la densité de courant électrique (en Am^{-2}).
- σ est la conductivité du milieu (en $\Omega^{-1}m^{-1}$)
- ρ est la résistivité du milieu (en Ωm).
- μ est la perméabilité magnétique du milieu (en Hm^{-1})

À partir des mesures de courant et de tension réalisées sur un échantillon, on peut déterminer la caractéristique expérimentale $V(I)$, qui est généralement exprimée sous la forme d'une loi de puissance. En supposant que cette caractéristique s'applique également à la densité de courant, la relation $E(J)$ peut être écrite comme suit :

$$E(J) = \begin{cases} E_C \left(\frac{J}{J_C(T)} \right)^{\alpha(T)} & T < T_C, J \leq J_C \text{ "SC state"} \\ E_0 \left(\frac{E_C}{E_0} \right)^{\frac{\beta}{\alpha(T)}} \left(\frac{J_C(77k)}{J_C} \right) \left(\frac{J}{J_C(77k)} \right)^{\beta} & T < T_C, J > J_C \text{ "FluxFlow"} \\ \rho(T_C) \left(\frac{T}{T_C} \right) J & T \geq T_C \text{ "Conducting"} \end{cases} \quad (II.4)$$

Dans cette équation, l'exposant α et β dépend à la fois du matériau, de la température et de l'induction. Plus l'exposant α et β est élevé, plus la transition est abrupte (comme illustré sur la figure II.11).

Les valeurs des paramètres, $(E_0, \alpha, \beta \text{ à } 77k)$ dépendent des conditions de traitement du matériau supraconducteur. Ils sont limités comme suit [2]:

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

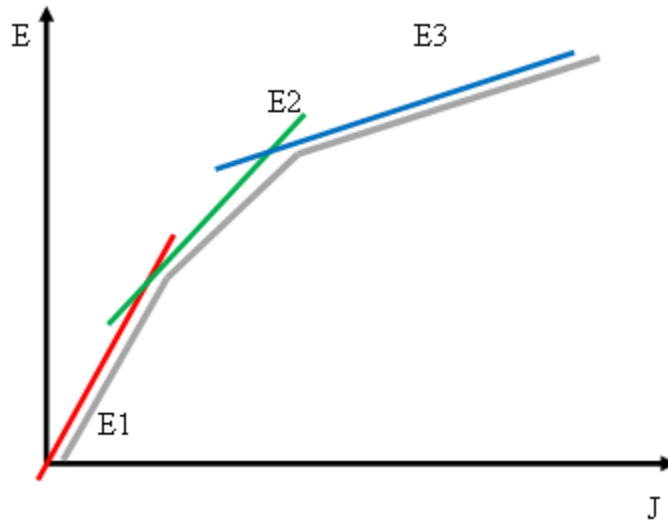


Figure II.11 modèle en puissance (trois ponts) [30]

II.6.2. Formulation de l'équation thermique :

II.6.2.1 La forme locale:

Les phénomènes thermiques, qui existent lorsqu'un courant et/ou un champ magnétique sont appliqués au SHTC, sont régis par l'équation de diffusion de la chaleur:

$$\rho c_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div}(\lambda(T) \overrightarrow{\text{grad}T}) = W \quad (\text{II.5})$$

Où :

$\lambda(T)$: la conductivité thermique en $(\text{W.K}^{-1}.\text{m}^{-1})$

ρ : la masse volumique en (Kg.m^{-3})

$C_p(T)$: la chaleur spécifique du matériau en $(\text{J.K}^{-1}.\text{Kg}^{-1})$

W : la puissance volumique en (W.m^{-3})

L'expression de l'ensemble des pertes dissipées dans le supraconducteur est donnée par :

$$W = E.J = \sigma(E, T)E^2 \quad (\text{II.6})$$

La résolution de l'équation (II.43) permet de connaître la répartition de la température en tout point du supraconducteur. Cependant il est nécessaire d'introduire les équations qui traduisent les échanges thermiques entre le supraconducteur et le fluide cryogénique qui sont considérés comme étant dus essentiellement à la convection. Ainsi sur la frontière du supraconducteur, l'équation à résoudre est donnée par [26]:

$$K(T)\overrightarrow{\text{grad}T}n_{as} = h(T - T_0) \quad (\text{II.7})$$

Où :

h : Le coefficient de convection du fluide cryogénique exprimé en $[W.Km^{-2}]$

T_0 : La température de ce même fluide.

II.6.2.2 La forme globale:

Pendant les états de flux flow et normal, la puissance est dissipée, et l'augmentation de la température par rapport au temps peut être calculée par (6) [29], où C_{sc} est la capacité calorifique par volume.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C_{sc}} E.J \quad (\text{II.8})$$

La forme intégrale de cette dernière équation est :

$$T(t) = Ta + \frac{1}{C_{sc}} \int_0^t (Q_{sc} - Q_{\text{évacuée}}) . dt \quad (\text{II.9})$$

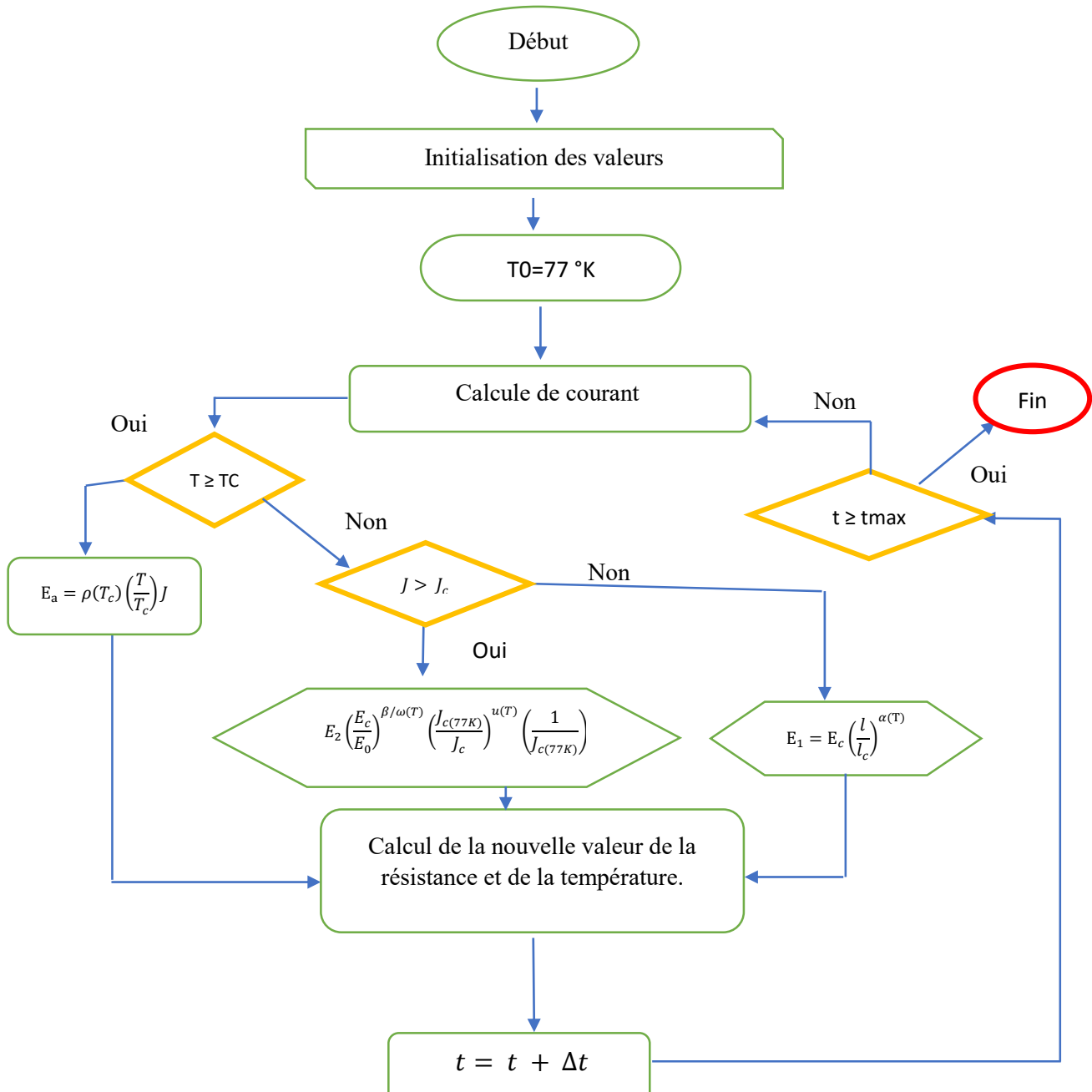
$$Q_{\text{évacuée}} = \int \frac{T(t) - Ta}{k_{sc}} . dt \quad (\text{II.10})$$

$$Q_{sc} = \int_{t_0}^{t_f} i_{sfcl}(t)^2 . R_{sfcl} . dt \quad (\text{II.11})$$

k_{sc} : la résistance thermique

Où Ta est la température ambiante, Q_{sc} la chaleur dissipée dans le supraconducteur et $Q_{\text{évacuée}}$ la chaleur évacuée par le liquide de refroidissement.

II.6.3 Procédure de calcul



II.12 Organigramme de fonctionnement du SFCL.

Conclusion

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

Nous avons présenté dans ce chapitre deux modèles du limiteur de courant supraconducteur,, un modèle électrique et un modèle thermique,

Dans le modèle électrique, nous utilisant des lois en puissance pour modéliser les zones de supraconducteur (supra intermédiaire normale) qu'est en fonction de la température. Cette dernière est calculée à partir d'un modèle thermique intégral.

Chapitre III :

RÉSULTATS ET SIMULATION

Introduction :

Ce travail vise principalement à simuler le comportement d'un limiteur de courant supraconducteur (SFCL) lors d'un court-circuit triphasé pour différents types de réseaux électriques. Afin d'étudier l'influence de l'emplacement de limiteur et les paramètres clés, la durée du défaut, la température ambiante.

Premièrement, nous analyserons un réseau radial en trois étapes :

1. Court-circuit sans limiteur de courant (SFCL),
2. Court-circuit avec insertion d'un limiteur supraconducteur (SFCL).

Ensuite, nous examinerons un réseau maillé en suivant la même méthodologie :

1. Simulation d'un court-circuit artificiel,
2. Ajout du SFCL et comparaison des résultats.

III.1 Etude d'un réseau radial :

III.1.1 Description du réseau :

Le réseau électrique radial étudié est composé de trois éléments principaux : une source d'alimentation (source de tension ou de courant), ligne (pour transport l'énergie électrique) et une charge électrique.

La source d'alimentation est modélisée comme une source idéale de tension triphasée de 12000 V à une fréquence de 50 Hz, associée à une impédance interne. Les deux charges sont représentées par une charge active 1MW et réactive 10 kVAR.

Ces éléments sont connectés en série suivant une structure radiale, c'est-à-dire en formant une chaîne continue sans embranchement, allant de la source d'alimentation jusqu'à la charge finale.

La résistance et la réactance entre le jeu de barre 1-2 sont 0.003 Ohm et 0.001 Ohm ; et la résistance et la réactance entre le jeu de barre 1-2 sont 0.002 Ohm et 0.002 Ohm..

Dans le tableau III.1 se trouvent toutes les valeurs des grandeurs électriques et thermiques que nous avons utilisées dans cette modélisation.

Description des paramètres	Symbole	Valeur	Unité
Longueur du fil supraconducteur	L_{SC}	50	m
Diamètre du fil supraconducteur	d_{sc}	4.0×10^{-3}	m
Température ambiante du supraconducteur et réservoir de refroidissement	T_a	77	K
Température critique du supraconducteur	T_C	95	k
Expotif de la région de fluage-fluage (à 77K)	n_{77k}	6	—
Expotif de la région de Flux-flow	β	3	—
Densité de courant critique (à 77K), c'est-à-dire densité de courant où $E = 1\text{mV} / \text{cm}$	J_{C77K}	1.5×10^7	A/m^2
Champ électrique à la transition de l'état de flux-flow à l'état de flux-flux	E_0	0.1	V/m
Résistance de l'état de conduite normale (à T_C)	ρ	1.0×10^{-6}	Ωm
Coefficient de transfert de chaleur au réservoir de refroidissement	K	5.5×10^3	w/km^2
Chauffage spécifique volumétrique supraconducteur	CV	1.0×10^6	J/km^3

Tableau .III.1. Paramètres de supraconducteur.

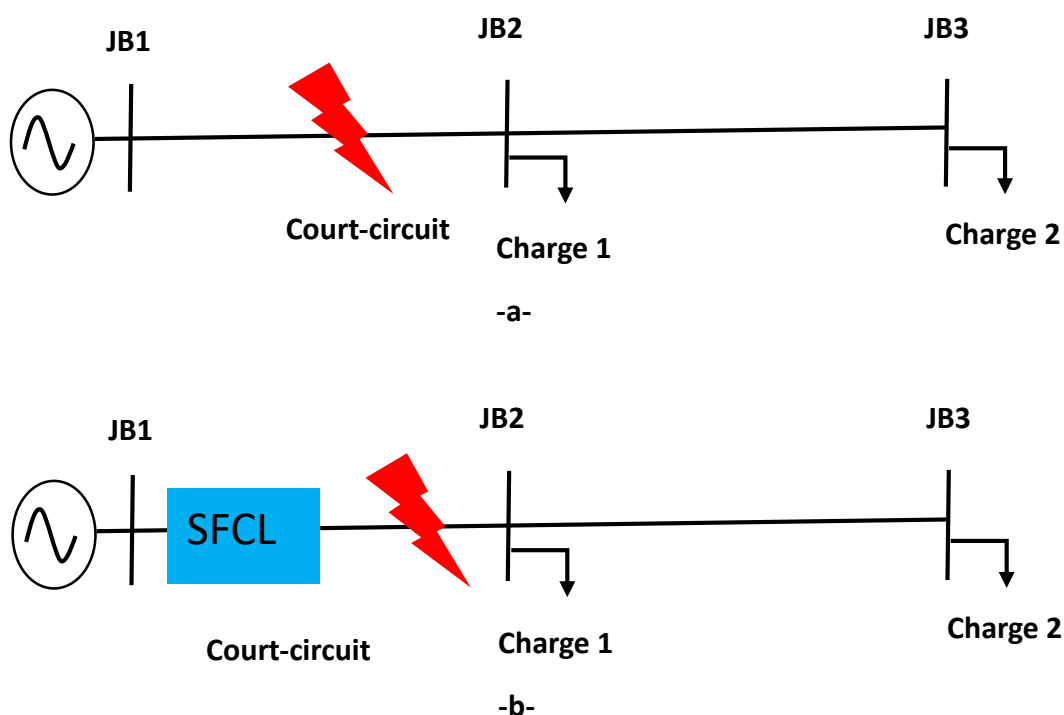
III.1.2 Cas d'un court-circuit entre JB1-JB2:

Figure III.1 Schéma unifilaire du réseau électrique :(a) sans SFCL (b) avec l'insertion d'un dispositif SFCL

Les allures des tensions et des courants aux niveau des jeux de bare 1 et 2 pendant un court- circuit entre le jeu de bare 1-2 sont présentées dans les figures III.2-3-4-5.

Les allures des tensions et des courants aux niveau des jeux de bare 1 et 2 pendant un court- circuit entre le jeu de bare 1-2 avec l'insertion d'un limiteur de courant entre jeu de bare 1-2 sont présentées dans les figures III.6-7-8-9.

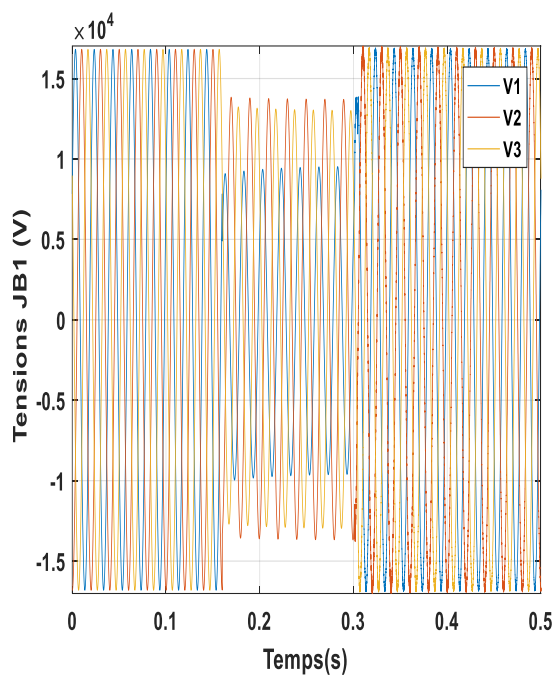


FIGURE III.2 : Tensions mesurées au niveau du jeu de barres 1

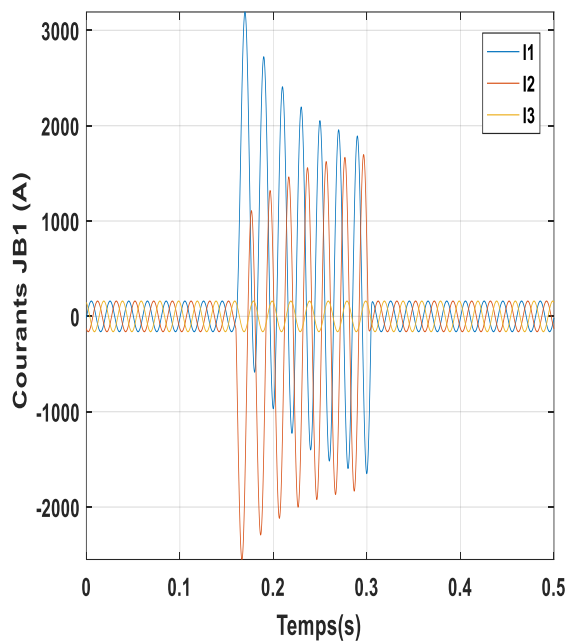


FIGURE III.3: Courants mesurés au niveau du jeu de barres 1

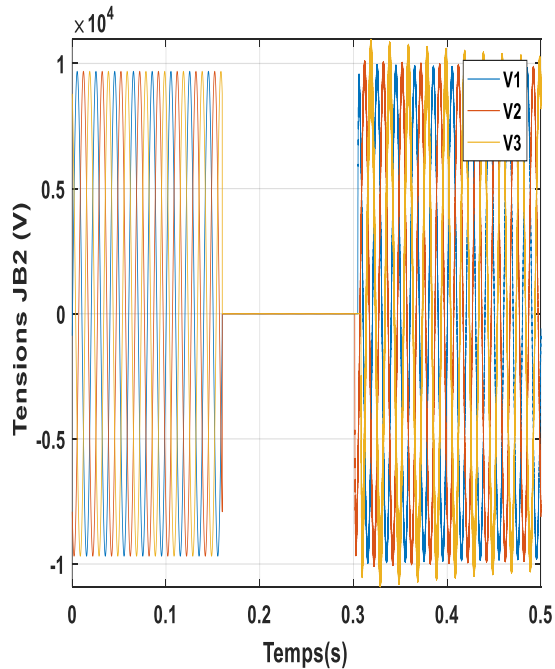


FIGURE III.4 : tensions mesurées au niveau du jeu de barres 2

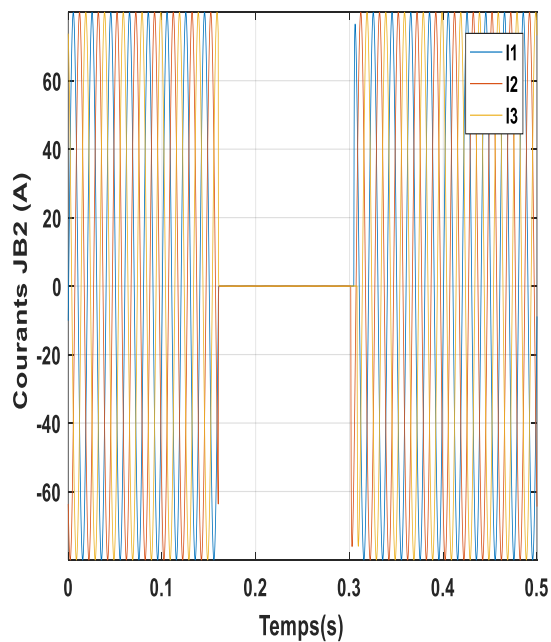


FIGURE III.5 : Courants mesurés au niveau du jeu de barres 2

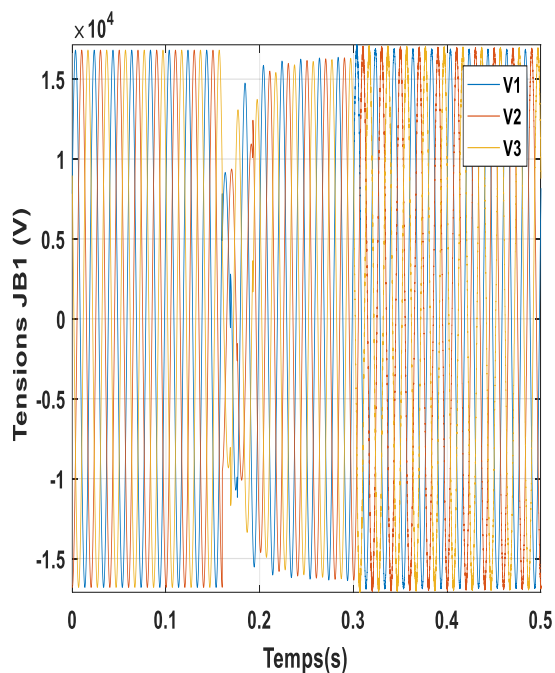


Figure III.6 : Tensions mesurés au niveau du jeu de barres 1

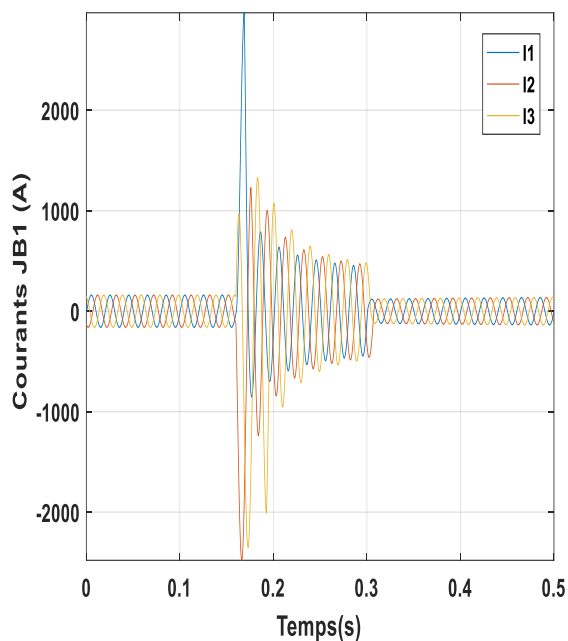


FIGURE III.7 : Courants mesurés au niveau du jeu de barres 1

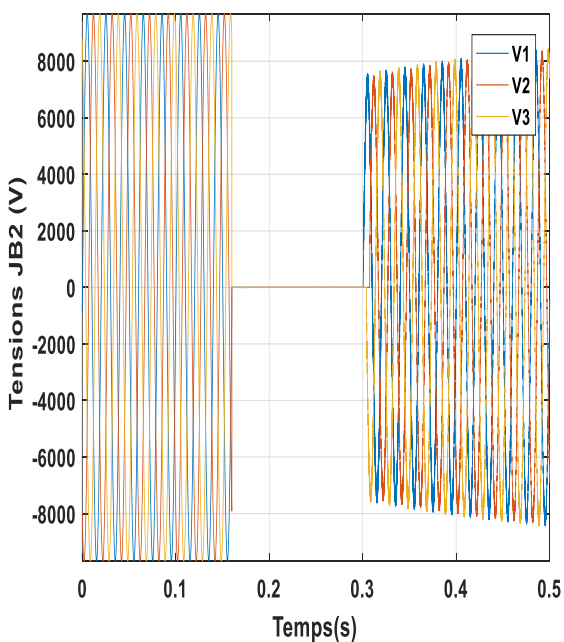


FIGURE III.8 : Tensions mesurés au niveau du jeu de barres 2

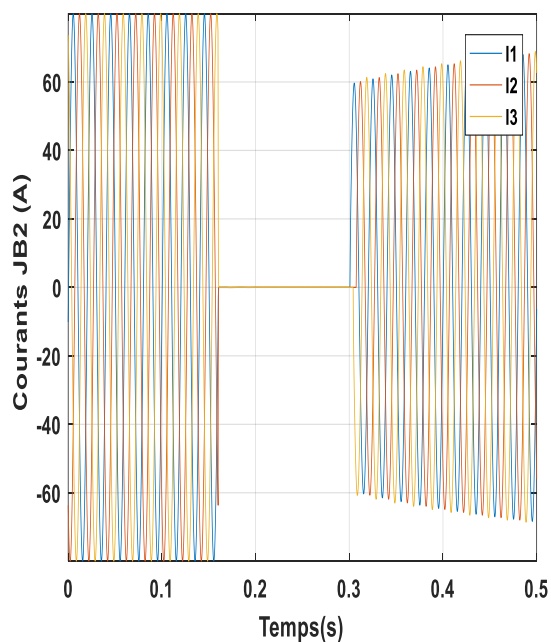


FIGURE III.9 : Courants mesurés au niveau du jeu de barres 2

La variation de la valeur de la résistance et la température de limiteur pendant le court-circuit sont présentées dans les figures III-10-11.

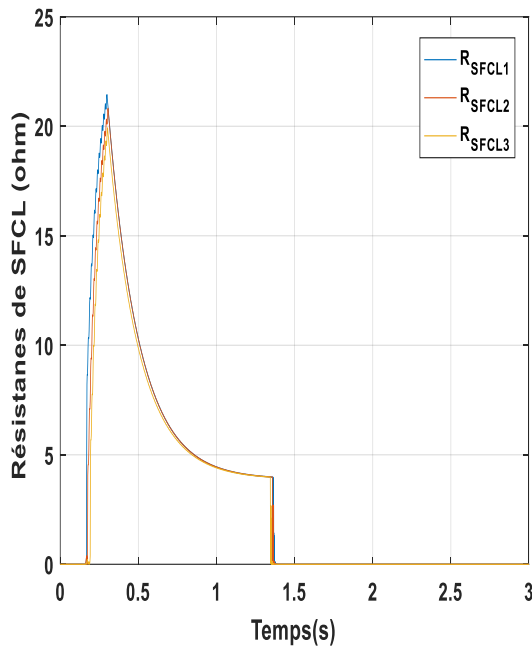


FIGURE III.10 : Résistances de SFCL lors d'un court-circuit

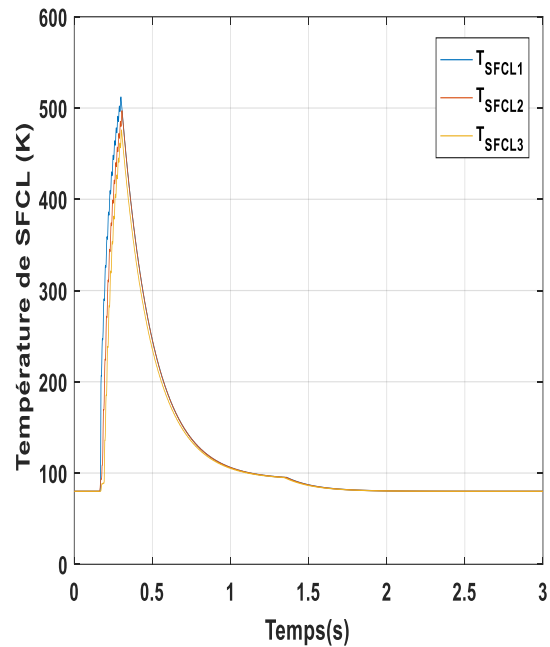


FIGURE III.11 : Températures de SFCL lors d'un court-circuit

D'après les résultats obtenus on remarque que le courant de court-circuit augmente jusqu'à 2000A avec un pic de 3000A au jeu de bare n°1, par contre les courant sont nul au jeu de bare n2

Concernant les tensions, les valeurs sont égales a zero, mais au jeu de bare n°1 10000V.

D'après l'insertion de SFCL, et d'après le court-circuit on remarque que la température augmente jusqu'à 500K pour les trois phase a cause les perte joule dans le limiteur est très importante, et par la suite la résistance (22Ohm) qui diminué le courant de défaut qui devient inférieur de 500A.

On peut conclure qu'après un court-circuit et avec l'insertion du limiteur, un nouveau point neutre apparaît au niveau du défaut. Par conséquent, toutes les charges situées en aval du court-circuit se trouvent isolées, et l'impédance du limiteur devient la nouvelle charge du système.

III.1.3 Cas un court-circuit entre JB2-JB3 :

Les allures des tensions et des courants aux niveau dss jeux de bare 1 et 2 pendant un court-circuit entre le jeu de bare 2-3 sont présentées dans les figures III.12-13-14-15.

Les allures des tensions et des courants aux niveau des jeux de bare 1 et 2 pendant un court- circuit entre le jeu de bare 2-3 avec l'insertion d'un limiteur de courant entre jeu de bare 1-2 sont présentées dans les figures III.16-17-18-19.

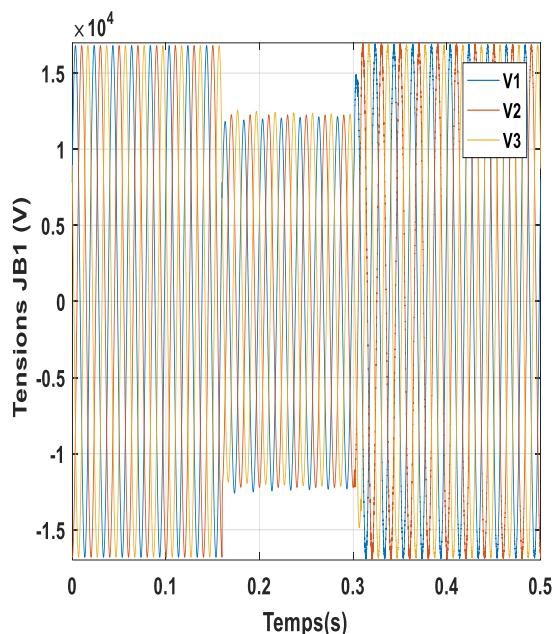


FIGURE III.12 : Tensions mesurés au niveau du jeu de barres 1

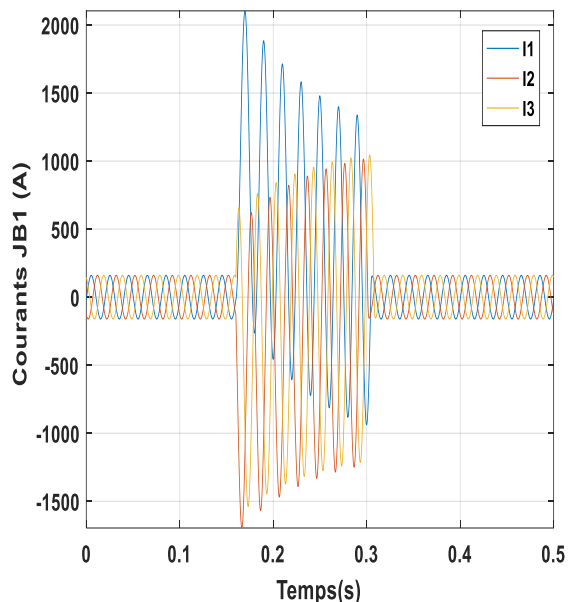


FIGURE III.13: Courants mesurés au niveau du jeu de barres 1

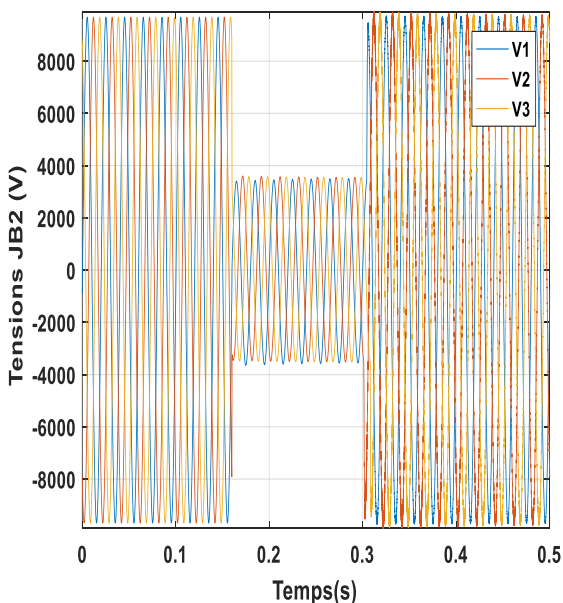


FIGURE III.14 : tensions mesurés au niveau du jeu de barres 2

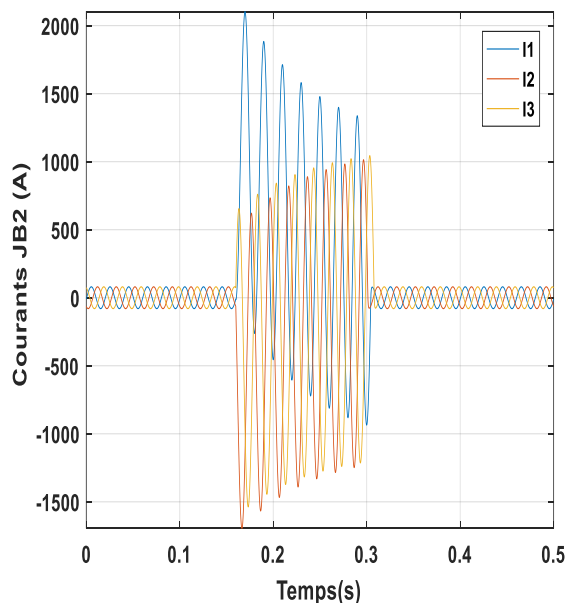


FIGURE III.15 : Courants mesurés au niveau du jeu de barres 2

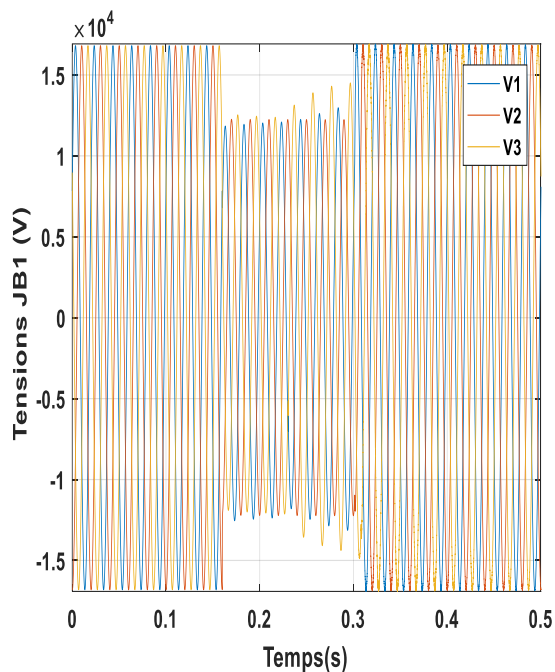


Figure III.16 : Tensions mesurées au niveau du jeu de barres 1

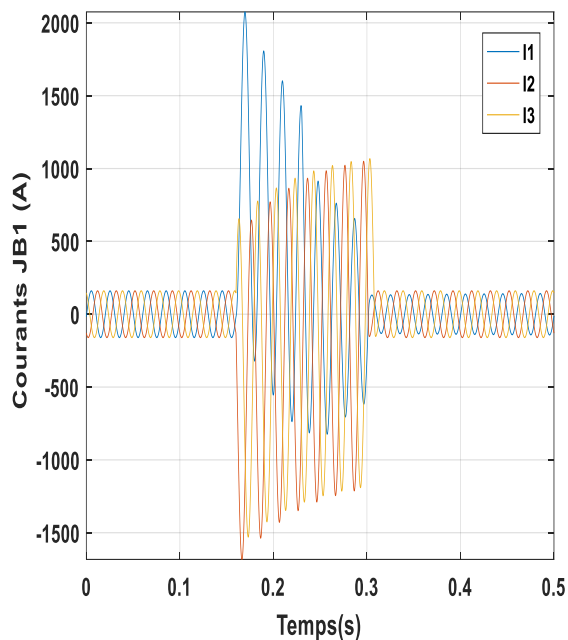


FIGURE III.17 : Courants mesurés au niveau du jeu de barres 1

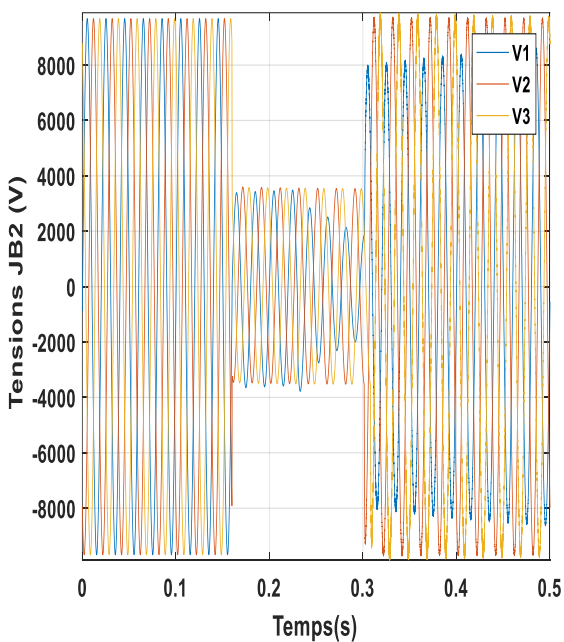


Figure III.18 : Tensions mesurées au niveau du jeu de barres 2

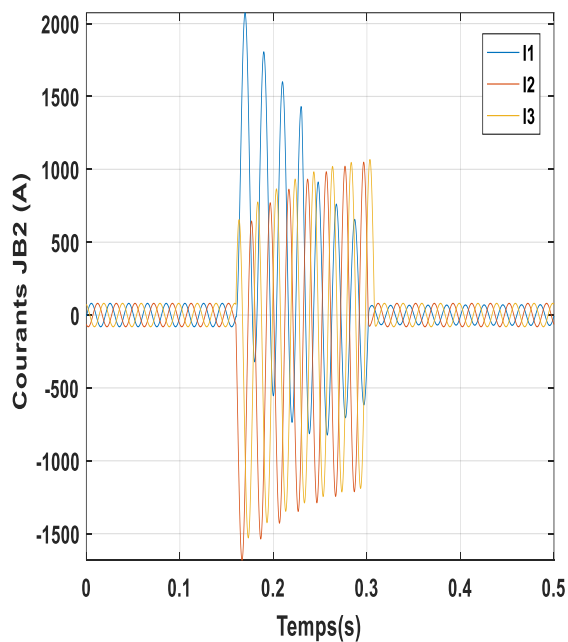


FIGURE III.19 : Courants mesurés au niveau du jeu de barres 2

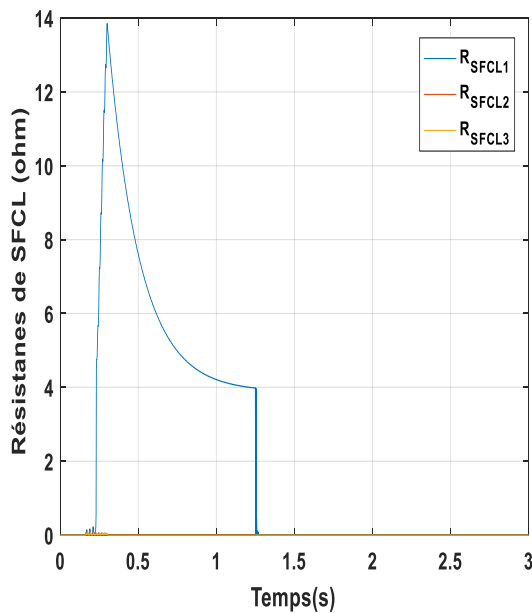


FIGURE III.20 : Résistances de SFCL lors d'un court-circuit

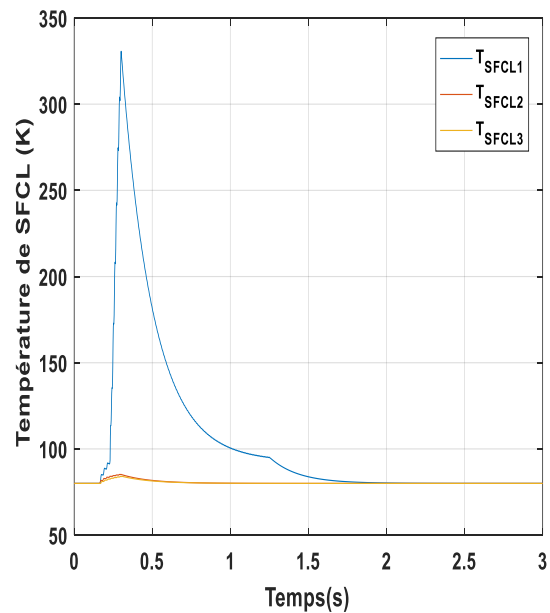


FIGURE III.21 : Températures de SFCL lors d'un court-circuit

D'après les résultats obtenus on remarque que le courant de court-circuit sans SFCL augmente jusqu'à 1300A avec un pic de 2000A au jeu de bare n°1 et 2, avec une petite diminution au niveau le jeux de baree 2:

Concernant les tensions, les valeurs sont égales a 400, mais au jeu de bare n°1 12000V. Cette changement influe sur limitation de courant.

après l'insertion de SFCL, et après le court-circuit on remarque qu'une seule résistance transite vert l'état normale 14 Ohm a cause de sa température mais 325K les autres reste dans l'états supraconducteur ($R < 0.08$ Ohm et $T < 85K$).

Les figures des courant et des tensions montrent que une phase qui varie, et les autres garde leurs états.

III.1.4. Influence de la Température

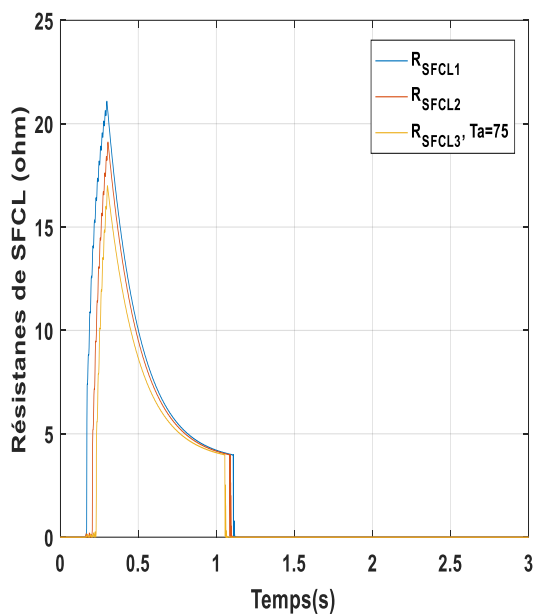


FIGURE III.22 Résistance de SFCL durant $T_a=75(K)$

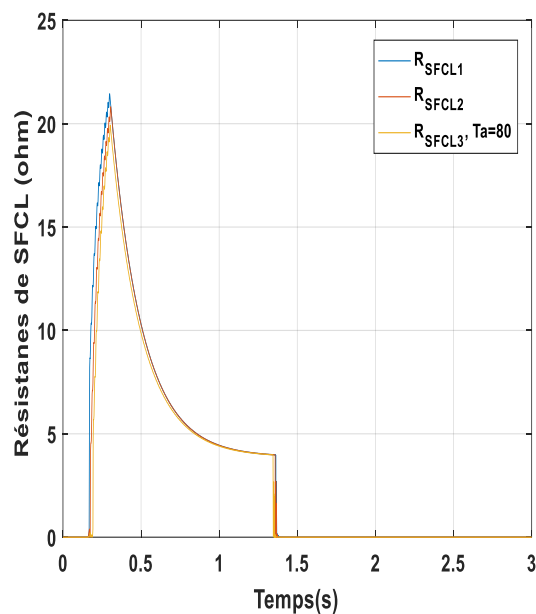


FIGURE III.23 Résistance de SFCL durant $T_a=80(K)$

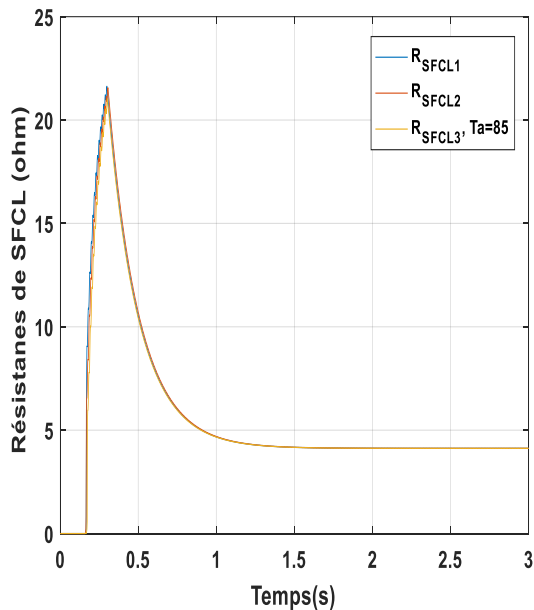


FIGURE III.24 Résistance de SFCL durant $T_a=85(K)$

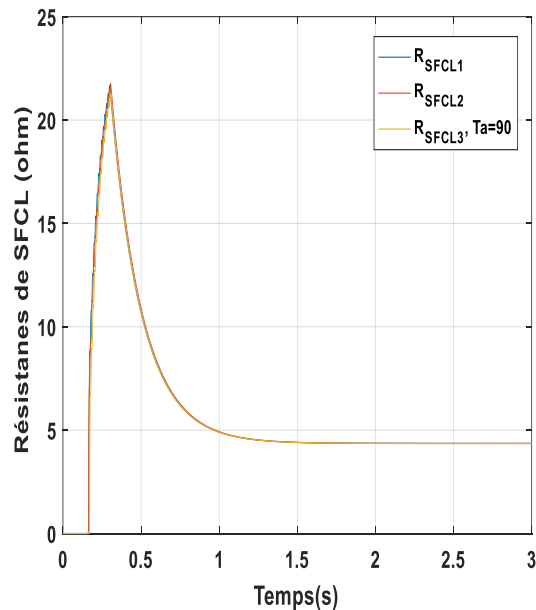


FIGURE III.25 Résistance de SFCL durant $T_a=90(K)$

Dans cet essai, nous avons mesuré la résistance et la température du limiteur de courant pour différentes températures ambiantes : 75 K, 80 K, 85 K et 90 K.

Un court-circuit a été appliqué entre les jeux de barre 1 et 2, et le limiteur de courant a été inséré entre ces mêmes jeux de barres.

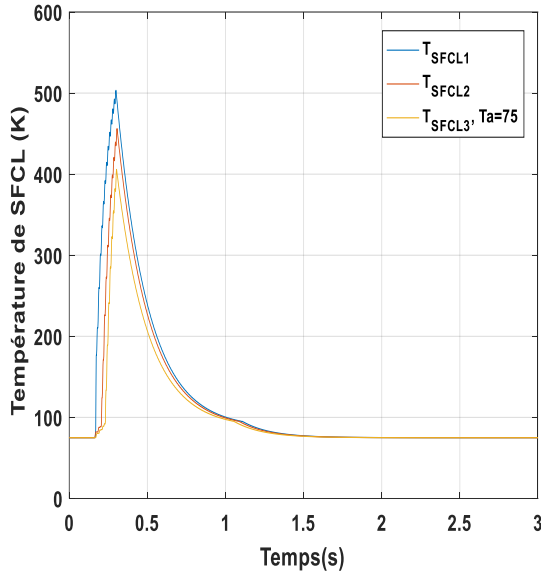


FIGURE III.26 : Températures de SFCL durant $T_a=75(K)$

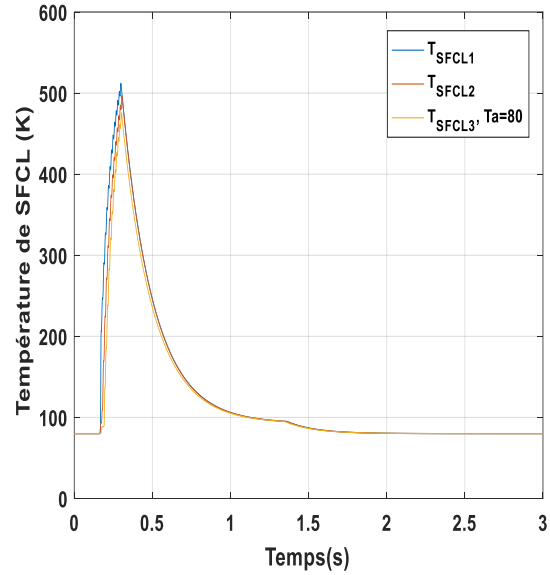


FIGURE III.27 : Températures de SFCL durant $T_a=80(K)$

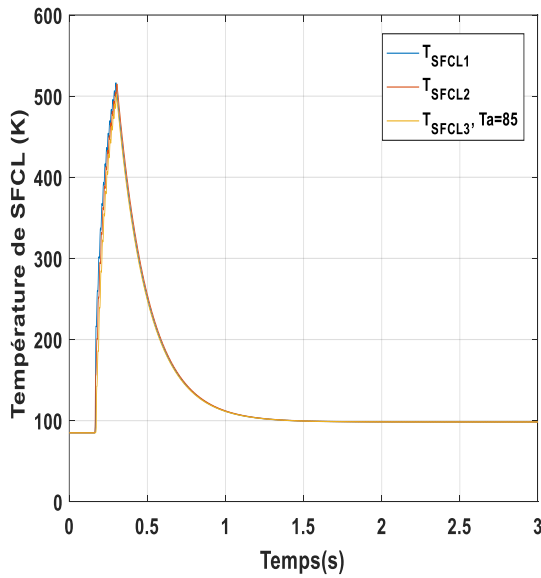


FIGURE III.28 : Températures de SFCL durant $T_a=85(K)$

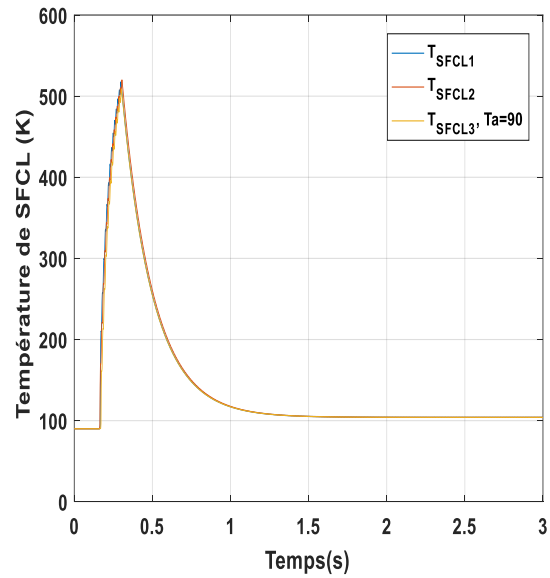


FIGURE III.29 : Températures de SFCL durant $T_a=90(K)$

Nous avons observé que le supraconducteur transite rapidement vers l'état normal (caractérisé par une résistance élevée) lorsque la température ambiante augmente. Par ailleurs, après l'élimination

du défaut, le limiteur met un temps significativement plus long à retrouver son état supraconducteur.

III.2 Etude d'un réseau Bouclé :

Notre réseau est composé par deux générateurs, 4 charges, et 7 branches. La tension générée par chaque source est 13.8KV (figure III.30), et le court-circuit entre le jeu de barre 2 et 4, le limiteur de courant est inséré entre le jeu de barres 3-4 et 2-4.

lignes	1-2	1-3	3-2	2-4	2-5	4-5
Résistance	0.001	0.002	0.001	0.002	0.001	0.001
réactance	0.035	0.03	0.02	0.035	0.03	0.02

	Code bus	Tension	Génération		charge	
			MW	MVAR	MW	MVAR
1	swing	13.8e3	/	/	/	/
2	PV	13.8e3	40	30	19	13
3	PQ	/	/	/	15	12
4	PQ	/	/	/	15	14
5	PQ	/	/	/	10	10

Tableau III.2 les données des lignes et des générateurs

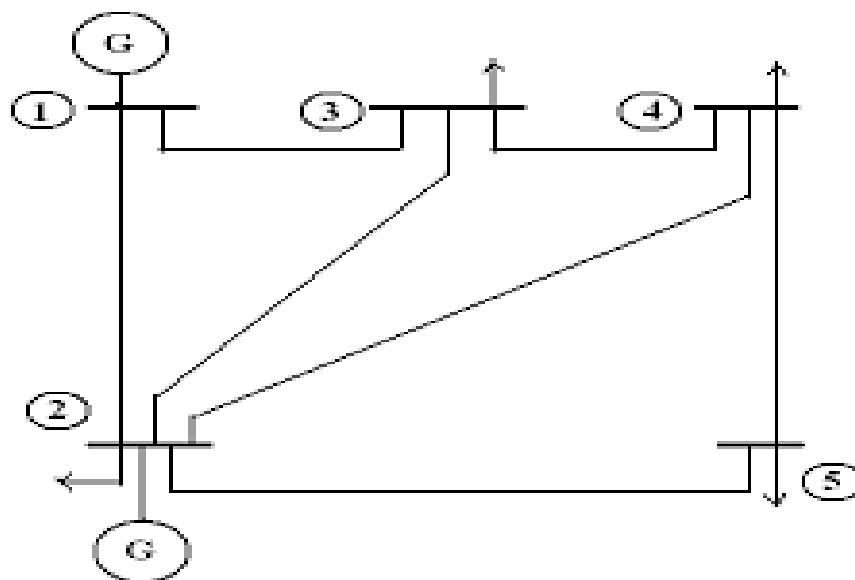


Figure III.30 Schéma unifilaire d'un réseau à 5JB

Lignes		1-2	1-3	3-2	3-4	2-5	4-5
Courant sans défaut	A	126	453	30	130	110	45
Courant de défaut	A	2100	3330	5000	3600	3200	3250
Courant avec SFCL 3-4	A	1100	1200	950	2850	1800	1750
Courant avec SFCL 2-4	A	150	2900	950	3800	1800	1950

Tableau III.3 valeurs des courants dans les différentes lignes de réseau

À partir des résultats du tableau, nous remarquons que les courants électriques sont multipliés par environ vingt en cas de défaut électrique (court-circuit). Cependant, après l'installation du limiteur sur la ligne numéro 3-4, tous les courants sont réduits pour atteindre environ dix fois la valeur nominale de chaque ligne. Donc, le limiteur a réussi à réduire les courants de défaut, passant d'environ vingt fois à environ dix fois la valeur nominale

En revanche, lorsque le limiteur est installé sur la ligne 2-4, bien que les courants électriques sont réduits, mais les lignes 1-3 et 3-4 continuent de transporter des courants de forte intensité.

Nous en concluons donc que l'emplacement le plus approprié pour installer le limiteur est la ligne numéro 3-4 car c'est la qu'il permet la meilleure réduction du courant de court circuit dans l'ensemble du réseau.

L'analyse des figures III.31 à III.34 montre que le limiteur change d'état pendant le défaut, avec une résistance atteignant respectivement $15\ \Omega$ et $12\ \Omega$ selon ses deux positions, ce qui a également une influence sur la température.

Le deuxième critère est le temps de récupération de l'état supraconducteur c.-à-d., Lorsque le limiteur est placé dans la branche 3-4, le supraconducteur est dans l'état normal pendant 0,3 s et 1,1 s. En revanche, lorsqu'il est positionné dans la branche 2-4, il reste dans l'état normal entre 0,3 s et 0,9 s.

On observe donc une réduction du temps de relaxation dans la deuxième configuration, mais avec une efficacité de limitation moindre, car la résistance n'atteint que $15\ \Omega$ lorsque le limiteur est inséré entre les jeux de barres 3 et 4.

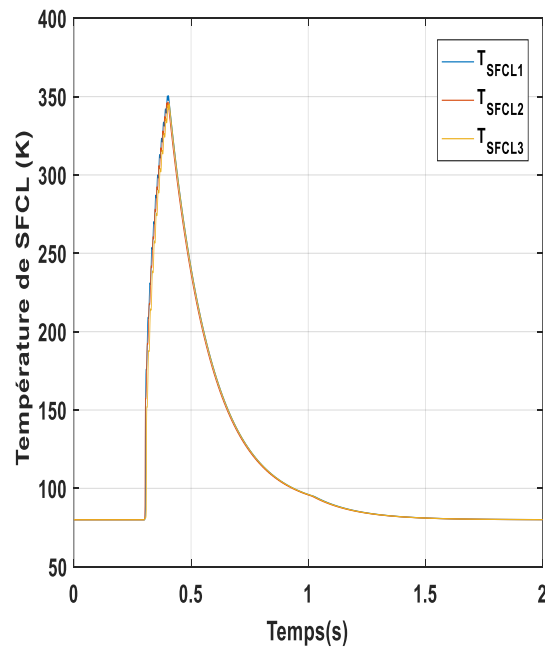
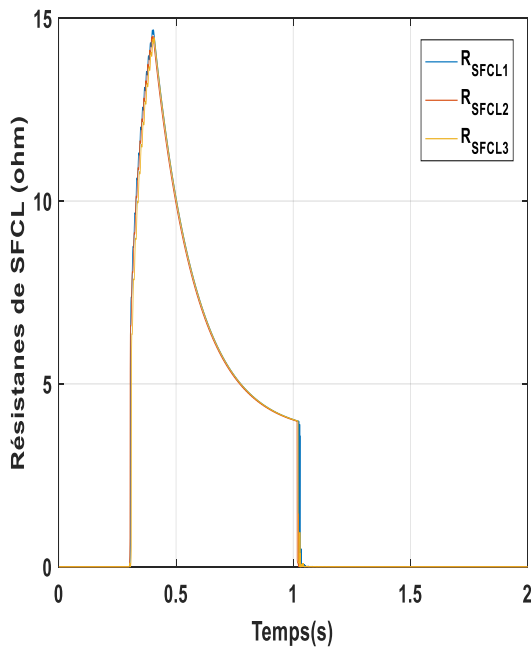


FIGURE III.31 : Résistances si le SFCL entre 3-4 **FIGURE III.32:** Températures si le SFCL entre 3-4

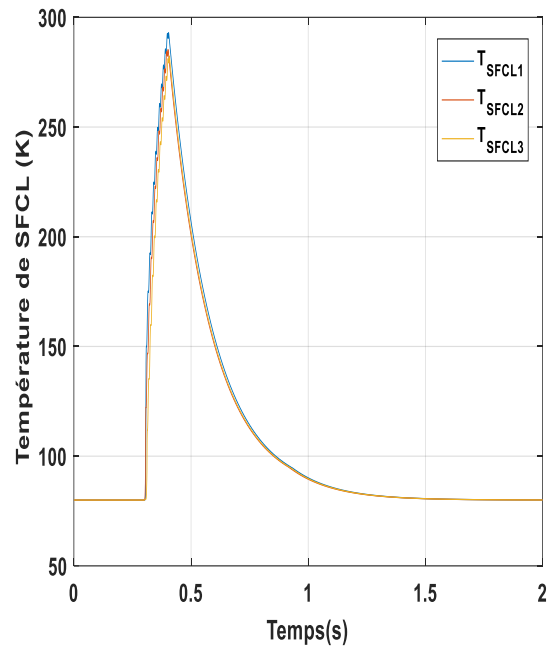
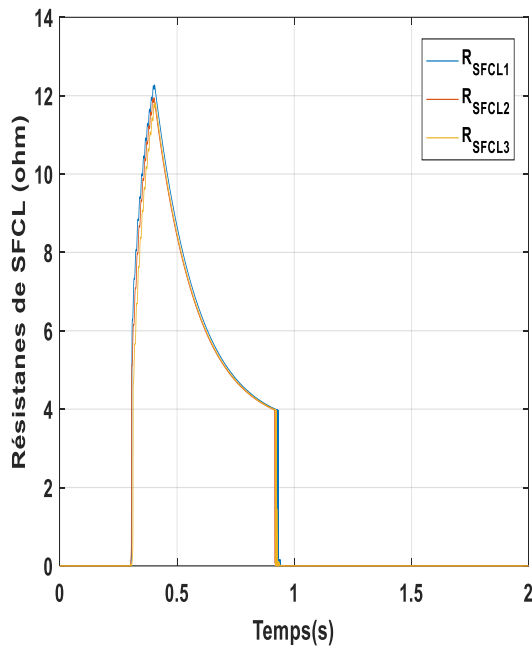


FIGURE III.33 : Résistances si le SFCL entre 2-4 **FIGURE III.34:** Températures si le SFCL entre 2-4

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons simulé deux topologies des réseaux électriques de distribution (radial, bouclé) avec l'intégration des limiteurs de courant, dont l'objectif de calculer les différentes grandeurs électriques et thermiques couplé dans les matériaux supraconducteurs résistif en basant sur les travaux de HOSSEIN HEYDARI et STEVEN BLAIR,

D'après les résultats on constat que les limiteurs sont des systèmes de protection efficaces, mais il faut toujours chercher la meilleure position pour une bonne réaction de supraconducteur.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif de ce mémoire est d'étudier et de modéliser les caractéristiques temporelles d'un limiteur de courant à base de supraconducteur à haute température critique durant le défaut d'un court-circuit.

Pour modéliser le comportement électrothermique de ce limiteur, nous avons utilisé le modèle en puissance (Steven Blair) où le modèle du champ électrique en fonction de la densité de courant est divisé en trois zones : zone supraconducteur, zone intermédiaire et une zone de l'état normale, ces derniers sont en fonction de la température aussi.

Donc la simulation est basée sur le calcul de la valeur de la résistance du limiteur de courant SFCL d'après la connaissance des valeurs des courant de court-circuit et la température ambiante. La résistance de SFCL engendre une perte joule, qui varie la température, et modifier l'impédance de circuit.

Pour cela nous avons étudié deux circuits radial et bouclé.

Concernant le circuit radial, l'insertion de SFCL est plus facile, il y'a un seul sens de l'écoulement de puissance, et Plus on s'éloigne de la source de production, plus la puissance transmise entre les jeux de barres diminue.

Donc pour les configurations radiales des réseaux électriques, et d'après les résultats obtenus, on a une bonne limitation de courant de default.

Par contre, pour les réseaux bouclés ; il faut faire une étude pour connaître la ligne plus sensible, et même si nous la connaissons, elle change en raison de sa résistance.

Nous recommandons donc que le limiteur soit inclus dans toutes les lignes afin qu'aucune ligne ne soit plus chargée que les autres.

De plus, nous avons conclu qu'il y avait une relation proportionnelle entre le temps de transition et la température ambiante.

En perspective, nous proposons d'analyser la stabilité des machines synchrones connectées à un réseau électrique équipé d'un limiteur de courant lors d'un défaut de court-circuit.

Résumé :

Nous avons présenté dans ce mémoire une étude du comportement d'un limiteur de courant supraconducteur (SFCL) lors d'un court-circuit triphasé, basée sur une modélisation des phénomènes électrothermiques dans les matériaux supraconducteurs à haute température critique. Deux topologies de réseaux électriques ont été étudiées : un réseau radial à 3 JB et un réseau bouclé à 5 JB . Les différents résultats, à la fois électriques et thermiques, ont été largement analysés à l'aide de simulations réalisées sous SIMULINK/MATLAB.

Mots clés : supraconducteur à HTc, limiteur de courant SFCL, courant de défaut.

Abstract:

This thesis presents a study of the behavior of a superconducting fault current limiter (SFCL) during a three-phase short circuit, based on the modeling of electrothermal phenomena in high-temperature superconducting (HTS) materials. Two power system topologies were considered: a radial network with 3 buses and a meshed network with 5 buses. Various electrical and thermal results were extensively analyzed using simulations performed in SIMULINK/MATLAB.

Keywords: HTS superconductor, SFCL, fault current.

ملخص

قمنا في هذا البحث بدراسة سلوك محدد التيار الفائق التوصيل (SFCL) أثناء حدوث دائرة قصر ثلاثية الطور، وذلك بالاعتماد على نمذجة الظواهر الكهروحرارية في المواد فائقة التوصيل ذات درجة الحرارة العالية. تم دراسة حالتين من طوبولوجيا الشبكات الكهربائية: شبكة شعاعية بثلاث حافلات (bus) وشبكة حلقية بخمس حافلات. وقد تم تحليل النتائج الكهربائية والحرارية المختلفة بشكل واسع اعتماداً على محاكاة باستخدام برنامج SIMULINK/MATLAB.

الكلمات المفتاحية: موصل فائق الناقلية، محدد تيار SFCL ، تيار العطل.

RÉFÉRENCES

Références:

- [1] : **T. Matsushita**, « Electricity and Magnetism: New Formulation by Introduction of Superconductivity”, CORONA PUBLISHING CO., LTD., Sengoku, Bunkyo, Tokyo, Japan,(2014).
- [2] : **NEMDILI Saad** « Modélisation et simulation du limiteur de courant supraconducteur. », Thèse de doctorat de l’université FERHAT ABBAS, Sétif (2013).
- [3] : **C. Rey**, « Superconductors in the Power Grid: Materials and Applications”, Woodhead Publishing, Langford Lane, Kidlington, UK, (2015).
- [4] :**L. Alloui**, « Modélisation Tridimensionnelle Des Matériaux Supraconducteurs”, Thèse de doctorat de l’université paris sud, Paris.(2007)
- [5] : **Joseph DURON** « Modélisation de Matériaux supraconducteurs -application à un limiteur de courantJoseph DURONTHÈSE NO3469 (2006)
- [6] : **Joe Khachan .Stephen Bosi**, , « Superconductivity” ,online:http:// [www.physics.usyd.edu.au](http://www.physics.usyd.edu.au/~khachan/PTF/Superconductivity.pdf) /~khachan /PTF/ Superconductivity.pdf , (2019).
- [7] : **S. Khene**, « Critical Currents and Superconductivity: Ferromagnetism Coexistence in High-TC Oxides”, Taylor & Francis Group, 2016.
- [8] : **BERGER Kévin** « (Etude des Phénomènes Couplés Magnétothermiques Dans les Supraconducteurs à Haute Température) Thèse de Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1 ,2006.
- [9] : **KHENE Mohamed Lotfi**; «Etude de l’Aimantation dans Les Supraconducteurs.», Thèse de Doctorat de l’Université M.Khider , Biskra 2015.
- [10] : **AIT AMARA Nassim** «Etude Comparative des Machines Synchrones Excitées par Aimants et courants électriques» MÉMOIRE EN VUE DE L’OBTENTION DU DIPLOME DE master en Electromécanique 2014
- [11] : **Mr. Bousalhih Khaled** «Contribution à la conception d’un inducteur supraconducteur (2019)

- [12] : **GUIBADJ Abdenacer** ; «Réalisation de multicouches pour supraconducteurs à haute température critique par méthode chimique. », Thèse de doctorat de l'université HADJ LAKHDER, Batna(2009).
- [13] : **CCAS: U.S. organization**, « Superconductivity: Present and Future Applications», IEEE Council on Superconductivity (CSC), (2009).
- [14] : **GUECHI Charaf eddine** « Etude analytique de phénomène de limitation de courant» (2013).
- [15] : **Bendaoud, M. Hafiane, M.** « *Modélisation Des Phénomènes Magnéto-thermique Dans Les Dispositifs De Limiteur De Courant À La Base De Supraconducteur À Haute Température Critique* » [Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah - Ouergla] (2015).
- [16] : **S.Palanichamy, P.Chinnasamy**, « Semiconductor fault current limiters» *IEEE Proc.* 131-3 94 (1984). Del. 6-3 1031, (1991).
- [17] : **Y.Brunet, P.Tixador**, « Limiteurs supraconducteurs » *Techniques de l'Ingénieur* D 3 662, 1-18, (1997)
- [18] : **DEBBA Mounib, BELHANI Hakima**« Soutenu publiquement »Thème Étude des caractéristiques temporelles d'un limiteur de courant à base de supraconducteur durant les défauts Le (2017)
- [19] : **Djeffal, L.** « *Etude Et Simulation Du Limiteur De Courant Supraconducteur* [Mémoire de Master, Université Mohamed Khider - Biskra]. (2018).
- [20] : **Khaled BEN ALIA.** « ETUDE DES SYSTEMES DE GUIDAGE MAGNETIQUE A BASE DE SUPRACONDUCTEUR HTc» .(2013)
- [21] : **Yannick COINTE**,« Limiteur supraconducteur de courant continu», Thèse de Doctorat, L'institut national polytechnique de Grenoble .(2018)

- [22] : **Guechi, C.** « *Etude Analytique De Phénomène De Limitation De Courant* ». Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2014.
- [23] : **G.C.Karady**, « Concept of a combined short-circuit limiter and series compensator», *IEEE Trans. Pow.*
- [24] : **BELKHIRI Yamina** « UNIVERSITE DE BATNA MEMOIRE DE MAGISTER» (Modélisation des Phénomènes Electromagnétiques et Mécaniques Couplés par la Méthode des Volumes Finis (CVM))
- [25] : **B. Salah**, «Etude de l'évolution des frontières libres de conduction dans les matériaux Supraconducteurs de type II» Université de M'sila, 2013.
- [26] : **BENDAOUD M. Abed Elhalim et HAFIANE M.Tarek** «Modélisation des Phénomènes magnéto-thermique dans les dispositifs de limiteur de courant à base de supraconducteur à haute température critique. », Mémoire de Master académique de l'université KASDI MERBAH, Ouargla 2015.
- [27] : **Boukhari, B. & Amini, T.** «*Calcul Des Pertes Fers Dans La Machine Asynchrone*» [Autre, Université Mouloud Mammeri - Tizi Ouzou]. (2017).
- [28] : **Sami Chaib** « étude des supraconducteurs à haute température critique », Thèse master , université de Biskra, Juin 2006
- [29] : **Steven blair** « current time characteristics of resistive superconducting fault current limiters », IEEE transactions on applied superconductivity, 2012
- [30] : **W.T.B. de Sousa** « Thermal–electrical analogy for simulations of superconducting fault current limiters », Elsevier Cryogenics 62 (2014) 97–109
- [31] : **KHERAKHERIA ZAHRA** « Qualité de l'énergie électrique en moyenne tension », mémoire master, université gualma, 2019.
- [32] : <http://blog.formatis.pro/stokage-w/>
- [33] : **HAMADA M. F., GHETTAS M. L.** « Analyse de l'énergie dissipative dans les limiteurs de courant pour les systèmes à puissance », mémoire master, université ouargla, 2017.