

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

N° : ELM-06



FILIERE : ELECTROMÉCANIQUE

OPTION : ELECTROMÉCANIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par : KHERBACHI ALI

TITRAOUI SADDAM HOCINE

THEME

ETUDE D'UN DISJONCTEUR
SUPRACONDUCTEUR

Soutenu devant le jury composé de :

Dr. DEFDAF Mabrouk	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Président
Dr. BELKHIRI Salah	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Rapporteur
Dr. BENDAIKHA A.Malik	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Examineur
Pr. DJERIOUI Ali	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Examineur
Mr. YAHIAOUI Slimane	SPE de M'sila	Invité

Année universitaire : 2023 / 2024

Remerciements

Nous remercions avant tout **ALLAH** tout puissant de nous avoir
donné et la volonté d'accomplir ce travail.

Nous voudrions adresser toute nos gratitude à notre encadreur de ce mémoire,

Dr. BELKHIRI Salah, pour sa patience, sa disponibilité
et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter
notre réflexion.

A travers ce mémoire, nous exprimons notre gratitude à tous nos enseignants qui ont
contribué à notre formation tout au long de notre vie.

Nous tenons à remercier vivement toutes les personnes qui nous ont aidés
à élaborer et réaliser ce mémoire.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

À Ma mère et Mon père

À toute ma famille

À mes amis : Salah, Fares, Sami, Aymen, Ahmed, Slimen

À toute la promotion de génie électrique 2024

Ali

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À mon père

À ma chère mère

À toute ma famille

À tous mes amis

À toute la promotion de génie électrique 2024

SADDAM HOCINE

ملخص:

تقديم مواد موصل فانق الدرجة الحرارة العالية مثل YBCO و BSCCO فانقة التوصيل إلى مجال الهندسة الكهربائية، بما في ذلك تصميم القواطع الكهربائية، أثار اهتمام الباحثين بشكل كبير في السنوات الأخيرة. يتمثل جوهر هذه الظاهرة في استبدال المواد التقليدية بالمواد فانقة التوصيل، مما يسمح بزيادة كفاءة القواطع بفضل كثافة التيار العالية واختفاء المقاومة الكهربائية عند درجات حرارة منخفضة للغاية. يجعل الأداء العالي لهذه القواطع منها تطبيقاً مثيراً للاهتمام للأنظمة الكهربائية الحديثة. هدف رسالتنا الرئيسي هو تقديم دراسة مقارنة بين نوعين من القواطع الكهربائية؛ الأول هو القاطع التقليدي، والثاني ذو الموصلية الفائقة. سيتم عرض نتائج المحاكاة على نطاق واسع لفهم سلوك هذين النوعين، باستخدام برنامج PSIM.

Résumé

L'introduction de matériaux supraconducteurs à haute température, tels que l'YBCO et leBSCCO, dans le domaine de l'électrotechnique, notamment dans la conception de disjoncteurs, a suscité un vif intérêt parmi les chercheurs au cours des dernières années. Ce phénomène repose sur le remplacement des matériaux conventionnels par des matériaux supraconducteurs, permettant d'améliorer l'efficacité des disjoncteurs grâce à une densité de courant élevée et à l'élimination de la résistance électrique à des températures extrêmement basses. Les performances supérieures de ces disjoncteurs en font une application attrayante pour les systèmes électriques modernes. Notre objectif principal est de conduire une étude comparative entre deux types de disjoncteurs : le traditionnel et le supraconducteur. Des résultats de simulation à grande échelle seront présentés afin de comprendre le comportement de ces deux approches, en utilisant le logiciel PSIM.

Abstract

The introduction of high-temperature superconducting materials, such as YBCO and BSCCO, in the field of electrical engineering, particularly in the design of circuit breakers, has attracted great interest among researchers in recent years. This phenomenon is based on the replacement of conventional materials with superconducting materials, making it possible to improve the efficiency of circuit breakers thanks to high current density and the elimination of electrical resistance at extremely low temperatures. The superior performance of these circuit breakers makes them an attractive application for modern electrical systems. Our main objective is to conduct a comparative study between two types of circuit breakers: the traditional and the superconducting. Large-scale simulation results will be presented in order to understand the behavior of these two approaches, using PSIM software.

TABLE DES MATIERES

Dédicace

Remerciements

Résumé

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles et abréviations

Introduction générale 1

CHAPITRE I : Généralités sur les matériaux supraconducteurs

I.1 Introduction	3
I.2. Histoire	3
I.3. Propriétés des supraconducteurs.....	5
I.3.1. Résistivité électrique nulle.....	5
I.3.2. Effet Meissner.....	6
I.3.3. La surface critique.....	8
I.3.4. Théorie BCS.....	9
I.3.5. Température critique.....	10
I.3.6. Champ magnétique critique.....	11
I.3.7. Densité de courant critique J_c (H, T).....	12
I.4. Types des supraconducteurs.....	13
I.4.1. Supraconducteurs de type I.....	13
I.4.2. Supraconducteurs de type II.....	14
I.5. Matériaux supraconducteurs selon leur température.....	15
I.5.1. Supraconducteurs à basse température critique (SBTC).....	15
I.5.2. Supraconducteurs à haute température critique (SHTC).....	16
I.6. Types des Supraconducteurs à haute température critique.....	18
I.6.1. Supraconducteur BSCCO.....	19
I.6.2. Supraconducteur YBCO.....	22
I.7. Principales applications des supraconducteurs.....	23

I.7.1. Machines tournantes.....	23
I.7.2. Les Aimants permanents supraconducteurs.....	24
I.7.3. Les transformateurs.....	24
I.7.4. Limitation de courant.....	24
I.7.5. Câbles de transport.....	25
I.7.6. Stockage d'énergie.....	26
I.8. Conclusion :.....	27

CHAPITRE II : Modélisation des matériaux supraconducteurs

II.2. Etat de l'art :.....	28
II.3. Equations mathématiques régissent le phénomène physique :.....	29
II.3.2. Relation E (J).....	29
II.4. Les Modèles de comportement.....	30
II.4.1. Modèle de l'état critique ou le modèle de Bean.....	30
II.4.3. Modèle de KIM.....	32
II.4.4. Le modèle exponentiel.....	32
II.4.5. Modèle de Flux Flow et Flux Creep.....	32
II. 5. Formulation des Équations Électromagnétiques.....	34
II. 5.1 : Modèle électrostatique [33].....	34
II. 5. 2 Modèle magnétostatique.....	34
II. 5. 2.1 Modèle magnétostatique scalaire : [33].....	35
II. 5. 2.2 Modèle magnétostatique vectorielle :.....	35
II. 5.3 Modèle magnétodynamique [33].....	36
II.6. Conclusion.....	37

CHAPITRE III : Application sur le calcul des courants de Court-circuit

III.1. Introduction.....	38
III.2. Définition de courant de court-circuit.....	38
III.3. Origines d'un courant de court-circuit.....	38
III.4. Effets et conséquences d'un courant de court-circuit.....	39
III.5. Type de défauts.....	39

III.6. Conséquences des courants de court-circuit.....	40
III.7. Simulation et interprétation des résultats :.....	41
III.7.1. Pour récepteur monophasé :.....	41
III.7.2 Pour un récepteur triphasé.....	47
III.7.3 Cas d'un court-circuit biphasé.....	47
III.7.4 Cas d'un court-circuit triphasé.....	50
III.8 Conclusion.....	56
Conclusion générale.....	58

Liste des figures

Chapitre I :

Figure I.1: Température critique de certains matériaux supraconducteurs en fonction de leur année de découverte.....	5
Figure I.2: Évolution de la résistivité en fonction de la température.....	6
Figure I.3 : Illustrant l'effet de Meissner et la différence entre un supraconducteur et un conducteur parfait.....	7
Figure I.4: Surface critique des matériaux supraconducteurs.....	8
Figure I.5: Illustrant 3 surfaces critiques d'un supraconducteur (Sc_1, Sc_2 et Sc_3). Entre ces surfaces, la supraconductivité apparaît sous différentes formes.....	9
Figure I.6: La formation d'une paire de cuivre : un électron qui passe attire les ions chargés positivement du treillis, provoquant une légère ondulation dans son sillage. Un autre électron passant à l'opposé direction est attiré par ce déplacement.....	10
Figure I.7: Résistance du mercure en fonction de la température.....	11
Figure I.8. Représentation des types de la supraconductivité en fonction du champ.....	12
Figure I.9: Dépendance du champ magnétique en fonction de la température.....	13
Figure I.10: a – Diagramme de phase d'un supraconducteur de type I .b – caractéristique $B(H)$.	14
Figure I.11: a – Diagramme de phase d'un supraconducteur de type II .b – la caractéristique $B(H)$	15
Figure I.12: (a) fil de NbTi finalisé, (b) montage des barreaux avant tréfilage, (c) fil Nb ₃ Sn avant traitement thermique.....	16
Figure I.13: Fils supraconducteurs HTC.....	17
Figure I.14: Cellule unitaire de Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _x et présentation schématique de la Technique OPIT. Chaleur intermédiaire et finale le traitement n'est pas indiqué.....	20
Figure I.15: Structure cristallographique de Bi ₂ Sr ₂ CaCu ₂ O ₈	21
Figure I.16: Variation de la température critique en fonction de d dans Bi ₂ Sr ₂ CaCu ₂ O _{7+d}	21
Figure I.17: Structure cristallographique d'YBa ₂ Cu ₃ O _y	22
Figure I.18: Variation de la température critique en fonction de (7-d) dans YBa ₂ Cu ₃ O _{7-d}	23
Figure I.19: Représentation schématique d'un câble triphasé en supraconducteur à haute Température critique (SHTC) refroidi à l'azote liquide (LN ₂)	25
Figure I.20: Schéma de principe d'une bobine supraconductrice couplée à un réseau électrique par l'intermédiaire d'un convertisseur ; R _{sh} est la résistance de protection ; R _{ch} et V _{ch} forment le circuit de chauffage du shunt supraconducteur.....	26
Figure I.21: Conducteur formé de 4 rubans supraconducteurs isolés les uns des autres.....	26

Chapitre II :

Figure II. 1 : Caractéristique B(H) d'un supraconducteur.....	29
Figure II. 2 : Caractéristique E (J) d'un supraconducteur.....	30
Figure II. 3 : Caractéristique E(J) basée sur le Modèle de Bean.....	31
Figure II. 4 : Modèle de Flux Flow et Creep.....	33

Chapitre III

Figure III.1 : Différent type de défaut	40
Figure III. 2: Circuit de simulation de modèle électrique de limiteur.....	41
Figure III.3: Schéma électrique de modèle étudié.....	41
Figure III.4: Allure de courant Ia(t).....	42
Figure III.5 : Allure de tension Va(t).....	42
Figure III.6: Schéma de simulation.....	43
Figure III.7: Allure de courant Ia(t).....	43
Figure III.8 : Allure de tension Va(t).....	43
Figure III.9 : Schéma de simulation.....	44
Figure III.10: Allure de courant Ia(t).....	44
FigureIII.11:Allure de tension Va(t).....	45
Figure III.12: Schéma de simulation.....	45
Figure III.13: Allure de courant Ia(t).....	46
Figure III.14 : Allure de tension Va(t).....	46
Figure III.15: Schéma de simulation.....	47
Figure III.16: Allure des courants dans les trois phases I1, I2, I3.....	47
Figure III.17: Schéma de simulation.....	48
Figure III.18 : Allure des courants dans les trois phases I1, I2, I3.....	48
Figure III.19: Schéma de simulation.....	49
Figure III.20:Allure des courants I1,I2,I3.....	49
Figure III.21: Schéma de simulation.....	50
Figure III.22: Allure des courants I1, I2 , I3	50
Figure III.23: Schéma de simulation.....	51
Figure III.24: Allure des courants dans les trois phases I1,I2,I3.....	51
Figure III.25: Schéma de simulation.....	52
Figure III. 26: Allure des courants dans les trois phases I1, I2 , I3.....	52
Figure III. 27: Schéma de simulation.....	52
Figure III. 28: Allure des courants I1,I2,I3.....	53

Figure III. 29 : Allure de courant I1.....	53
Figure III. 30 : Allure de courant I2.....	54
Figure III.31 : Allure de courant I3.....	54
Figure III. 32 : Schéma de simulation 32.....	55
Figure III. 33 : Allure les trois courants.....	55
Figure III. 34 : Allure de courant I1.....	55
Figure III. 35 : Allure de courant I2.....	56
Figure III.36 : Allure de courant I3.....	56

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Supraconducteurs à Basse Température (SBTC)	16
Tableau I.2 : Supraconducteurs à Haute Température critique (HTC)	18
Tableau 1.3 : Paramètres critiques des supraconducteurs HTS pour les applications de puissance	18

Liste des symboles et abréviations

J_c	Densité de courant critique	[A/m²]
T_c	Température critique	[K]
H_c	Champ magnétique critique	[A/m]
B	Induction magnétique	[T]
μ₀	Perméabilité magnétique a vide	[H/m]
H	Champ magnétique	[A/m]
E	Champ électrique	[V/m]
B	Induction magnétique	[T]
D	Induction électrique	[C/m²]
ρ	Densité volumique des charges électriques	[C/m³]
LTS	Low Temperature Superconductors	
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage	
BTC	Base température critique	
HTC	Haute température critique	
TAFF	Le thermally activated flux-flow	
K	Constant de Boltzmann	
θ	Température	
ρ_c	Résistivité de Flux Creep	
U₀	Potentiel de profondeur	
ρ_f	Résistivité de Flux Flow	
M	l'aimantation	
I_{cc}	Courant de court-circuit	

Introduction Générale

Introduction générale

Dans les années 1960, l'histoire des applications supraconductrices a débuté, avec la fabrication en 1967 du premier générateur électrique supraconducteur utilisant exclusivement des fils de NbTi. La découverte des supraconducteurs à haute température (HTS) a ensuite ouvert la voie à de nouvelles études et recherches sur ces dernières [1].

Les dispositifs électriques classiques utilisent du cuivre, du fer et des aimants permanents comme matériaux composites, offrant ainsi un rendement élevé et une compacité remarquable. Elles sont optimisées pour fournir des performances maximales. Cependant, les nouvelles applications embarquées exigent une compacité accrue et des performances supplémentaires au-delà des limites technologiques des applications conventionnelles. Les avantages potentiels des supraconducteurs peuvent être démontrés en théorie en comparant un disjoncteur classique avec un disjoncteur similaire utilisant des supraconducteurs (limiteurs de courants de défauts) [2].

La supraconductivité est définie par trois paramètres qui délimitent une surface critique caractérisée par l'émergence d'un champ électrique, la température critique (T_c), la densité de courant critique (J_c) et le champ magnétique irréversible (H), qui sont des propriétés intrinsèques d'un matériau. Les matériaux supraconducteurs à haute température présentent d'excellentes propriétés critiques en termes de courant et de résistance mécanique, ce qui les rend adaptés aux applications nécessitant des champs magnétiques élevés. Par conséquent, de nombreuses recherches sont menées pour l'utilisation de bobines à haute température constituées de fils supraconducteurs à haute température (HTC) dans les dispositifs électriques telles que les moteurs et les générateurs, ainsi que dans les équipements d'analyse [2-6]. Les applications de la supraconductivité sont variées, comprenant notamment les aimants supraconducteurs, les moteurs et générateurs supraconducteurs, les câbles de transport, le stockage d'énergie, les limiteurs de courant de défaut et les transformateurs.

Le principal objectif de ce mémoire consistera à étudier et à modéliser un disjoncteur supraconducteur à l'aide d'un logiciel de simulation, puis à comparer et analyser les résultats obtenus avec ceux du disjoncteur conventionnel. Nous procéderons en remplaçant les matériaux classiques par des matériaux supraconducteurs, puis discuterons des résultats obtenus. Pour ce faire, notre travail sera organisé comme suit :

- ✚ Dans le premier chapitre, nous proposerons une présentation complète et détaillée des matériaux supraconducteurs, afin de fournir une compréhension approfondie du matériau utilisé dans notre étude. Nous aborderons également un bref historique ainsi que les propriétés les plus significatives caractérisant certains types de supraconducteurs, notamment le HTC YBCO, le BSCCO, et mettrons en lumière quelques-unes de leurs applications dans le domaine industriel.
 - ✚ Dans le deuxième chapitre, nous aborderons la modélisation des matériaux supraconducteurs et les équations mathématiques qui régissent ce phénomène physique. Nous explorerons les modèles de comportement qui reposent sur des formulations basées sur les équations électromagnétiques. Ces modèles sont utilisés pour étudier et analyser les divers phénomènes à travers l'utilisation de logiciels de simulation.
 - ✚ L'objectif du dernier chapitre sera de modéliser un disjoncteur supraconducteur à l'aide d'un logiciel de simulation PSIM, où nous allons d'abord traiter le disjoncteur classique puis on a remplacé le matériau classique par un matériau supraconducteur, en utilisant des matériaux supraconducteurs de haute température HTC, Afin d'étudier et d'analyser la différence entre les deux structures proposées au terme des performances. Pour montrer l'importance de l'introduction des matériaux HTC sur les limiteurs conventionnels, plus particulièrement sur ses fonctionnalités qu'ils ajoutent et l'étendue de leurs possibilités d'application.
- Enfin, nous clôturerons notre travail par une conclusion générale résumant le contenu de cette approche à travers ce mémoire et on terminera enfin, par quelques perspectives envisagées.

CHAPITRE I
Généralités
Sur
Les
Matériaux
Supraconducteurs

I.1 Introduction

Le terme "supraconductivité" dérive de la caractéristique de certains matériaux à présenter une résistivité extrêmement faible ($<10^{-25} \Omega.m$). Cette appellation a été proposée par Kamerlingh Onnes en 1911 lorsqu'il constata que la résistance de certains matériaux non seulement diminuait avec la température, mais chutait brusquement à une température critique spécifique, notée T_c . Il désigna cet état comme étant supraconducteur par opposition à un état normal, et les matériaux qui manifestent ce comportement sont par conséquent appelés supraconducteurs.

Les supraconducteurs sont des matériaux qui permettent le passage du courant électrique sans aucune résistance et qui expulsent les champs magnétiques du matériau. Tout matériau possédant ces caractéristiques est considéré comme un supraconducteur. En d'autres termes, contrairement aux conducteurs conventionnels comme le cuivre ou l'acier, un supraconducteur peut transporter le courant de manière continue et illimitée sans aucune perte d'énergie.

Les supraconducteurs occupent une place centrale dans la recherche actuelle en électrotechnique, offrant des perspectives extraordinaires que la communauté scientifique s'efforce d'exploiter. Deux propriétés remarquables de ces matériaux, le diamagnétisme et leur capacité à transporter des courants élevés en présence de champs magnétiques intenses, ouvrent la voie à une véritable révolution dans les systèmes électrotechniques.

Ce chapitre est dédié à l'exposition de l'histoire et de la découverte des matériaux supraconducteurs. Nous aborderons également les propriétés et les différentes catégories de supraconducteurs. Enfin, nous examinerons les diverses formes industrielles ainsi que les applications des matériaux supraconducteurs.

I.2. Histoire

L'histoire de la supraconductivité trouve ses origines en 1911 dans les laboratoires de l'Université de Leiden aux Pays-Bas. C'est là que le physicien néerlandais Kamerlingh Onnes, parvenant à abaisser les températures en dessous de 4 Kelvin grâce à l'utilisation d'hélium liquide, entreprit d'explorer le comportement de différents conducteurs électriques à ces températures extrêmement basses. Avec l'aide de G. Holtz, il constata que la résistance du mercure devenait brusquement négligeable lorsque la température chutait en dessous de 4 K,

seuil au-delà duquel le matériau retrouvait un comportement normal.

En 1933, Walter Meissner et Robert Ochsenfeld ont fait une découverte capitale concernant les supraconducteurs : le diamagnétisme. Ils ont observé que tant que le champ magnétique reste en dessous d'une valeur critique, le matériau supraconducteur expulse complètement le champ magnétique. Toutefois, ce phénomène ne peut être observé qu'à des valeurs de champ magnétique très faibles.

En 1950, la théorie de Ginzburg-Landau a été proposée pour expliquer les propriétés macroscopiques des supraconducteurs. Cette théorie, avancée par les physiciens russes Vitaly L. Ginzburg et Lev Davidovitch Landau, a établi deux types de supraconducteurs.

En 1957, John Bardeen, Leon N. Cooper et John Schrieffer ont développé une théorie microscopique, connue sous le nom de théorie BCS, pour expliquer le phénomène de supraconductivité. Selon cette théorie, à des températures très basses, les électrons se regroupent en paires de Cooper, ce qui conduit à la supraconductivité. Cependant, cette théorie prédit que la température critique ne peut pas dépasser environ 30 Kelvin, au-delà de laquelle les perturbations thermiques détruisent les paires de Cooper.

En 1986, Johannes Georg Bednorz et Karl Alexander Müller ont fait une découverte révolutionnaire en trouvant des oxydes synthétiques de cuivre, de lanthane et de baryum qui présentaient une supraconductivité à une température critique de 35 K, surpassant ainsi toutes les températures critiques connues jusqu'alors. Cette découverte a suscité un regain d'intérêt pour la recherche dans ce domaine, et en 1998, le phénomène a été observé jusqu'à 164 K.

Depuis lors, les recherches sur les supraconducteurs céramiques, tels que le BSCCO ou le YBCO avec une température critique avoisinant les 115K, se sont poursuivies, permettant des applications pratiques grâce à l'utilisation de l'azote liquide.

En 2001, un nouveau supraconducteur, le diborure de magnésium (MgB_2), a attiré l'attention en raison de ses propriétés intéressantes, notamment sa fabrication relativement aisée et ses applications potentielles dans des domaines tels que la médecine, les moteurs électriques et les transformateurs, les disjoncteurs à des températures d'environ 20K.

Malgré un siècle de découvertes majeures dans le domaine de la supraconductivité, de nombreuses questions demeurent concernant les mécanismes sous-jacents, en particulier dans le cas des matériaux présentant des températures critiques élevées [7-11].

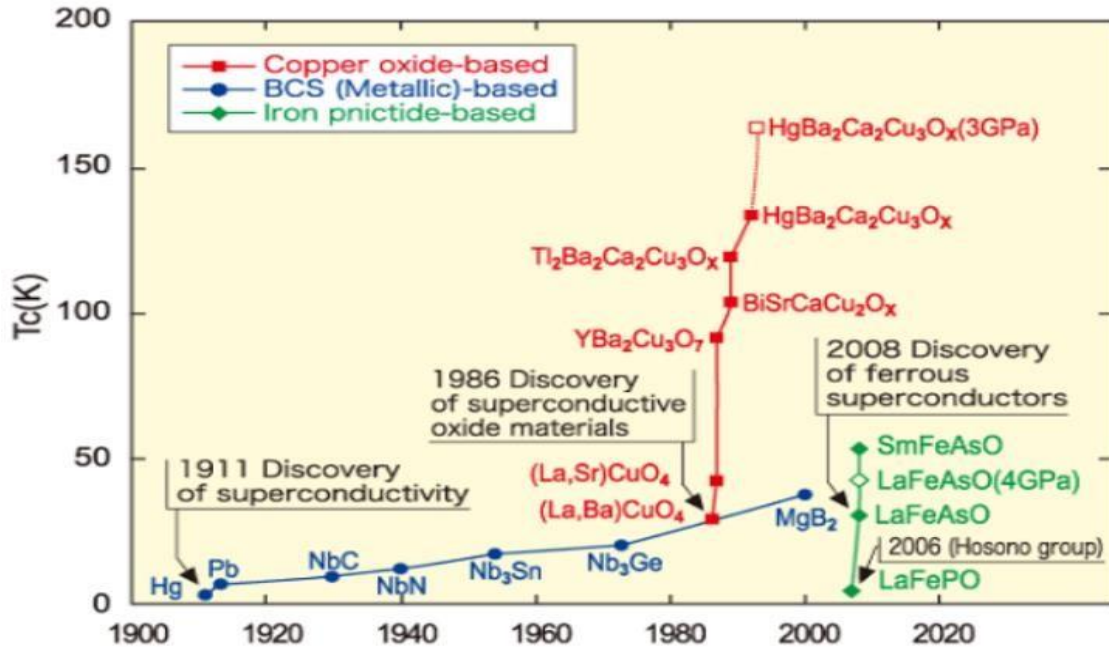
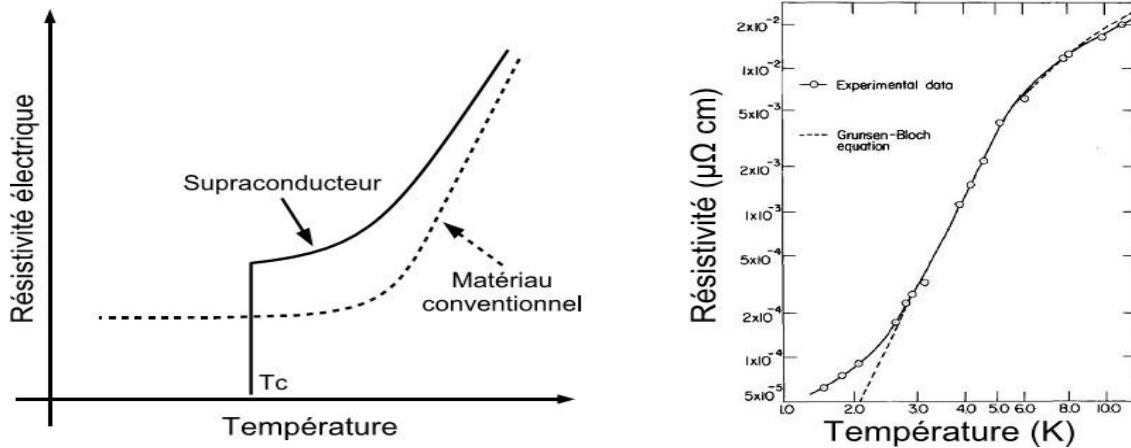


Figure I.1: Température critique de certains matériaux supraconducteurs en fonction de leur année de découverte [6].

I.3. Propriétés des supraconducteurs

I.3.1. Résistivité électrique nulle

La supraconductivité se caractérise par deux propriétés distinctives : l'absence totale de résistance électrique et l'effet Meissner. La caractéristique principale d'un matériau supraconducteur est sa résistance électrique nulle, qui se manifeste sous une température spécifique appelée température critique (T_c). Ainsi, cette température critique détermine la transition entre le comportement normal de la matière et l'état supraconducteur. Cette transition marque l'émergence d'un nouvel état de la matière, où le système électronique adopte une configuration spécifique. Par conséquent, le passage à la température critique peut être considéré comme une transition de phase.



a) Pour un matériau conventionnel et supra [11]
($T_c = 4.2 \text{ K}$)

b) Pour un fil de mercure [11]

Figure I.2: Évolution de la résistivité en fonction de la température

I.3.2. Effet Meissner

Dans le cas d'un conducteur idéal, où la résistance électrique est nulle ($R = 0$), cela signifie que l'induction magnétique à l'intérieur du matériau ne peut pas changer ($dB/dt = 0$). Lorsqu'un conducteur idéal est refroidi en dessous de sa température critique (T_c) en l'absence de champ magnétique à température ambiante, puis soumis à un champ magnétique, un courant de blindage est induit à l'intérieur du matériau pour maintenir l'induction magnétique à zéro ($B = 0$). En revanche, le champ magnétique externe subi par un conducteur idéal est réduit à zéro. Ainsi, dB/dt doit être conservé, ce qui induira un courant de capture pour annuler l'induction magnétique à l'intérieur du matériau (voir Figure I.3).

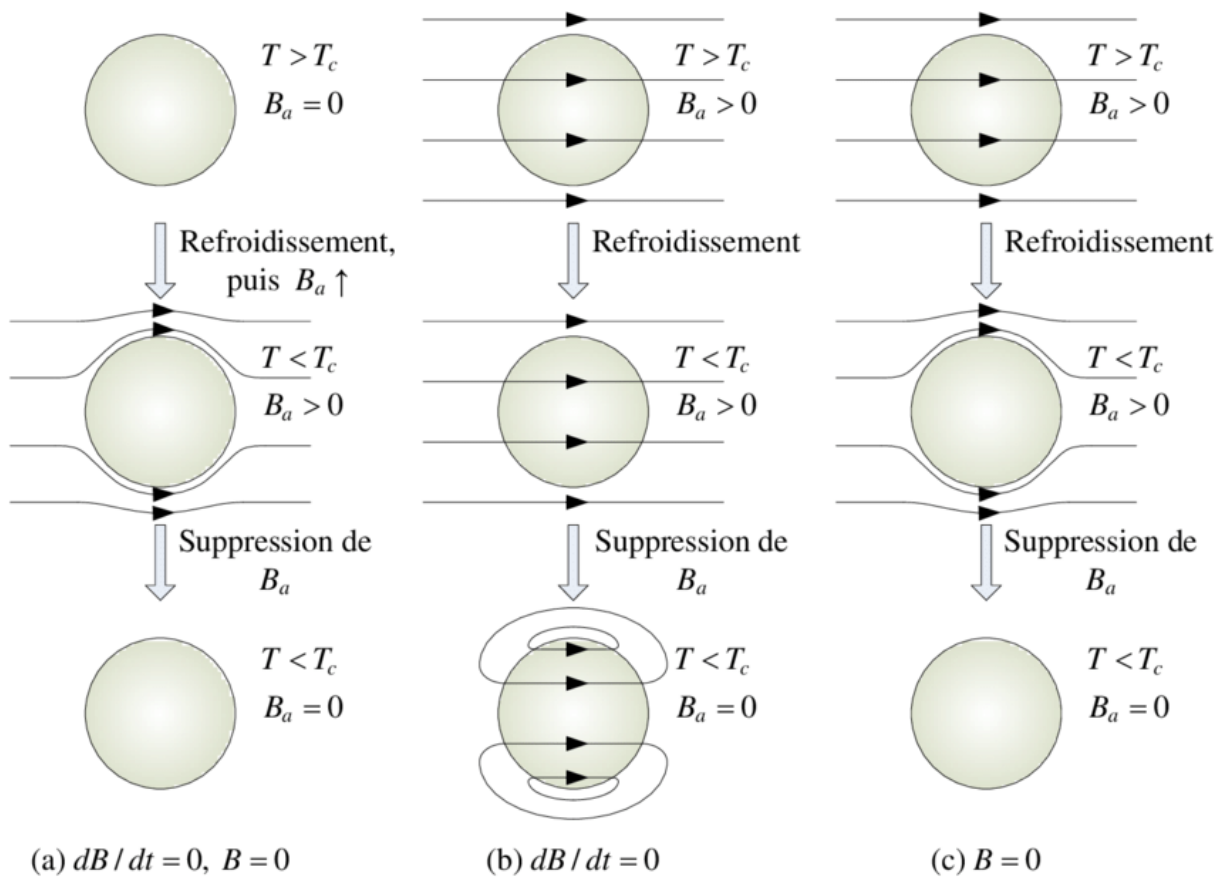


Figure I.3 : Illustrant l'effet de Meissner et la différence entre un supraconducteur et un conducteur parfait.

1. Lorsque le champ magnétique externe est supprimé, l'induction magnétique demeure nulle à l'intérieur du supraconducteur. Si aucun champ magnétique extérieur ($B_a = 0$) n'est présent avant que le matériau ne soit refroidi en dessous de sa température critique (T_c), cela signifie que chaque matériau possède un flux magnétique interne nul en dessous de sa température critique.

2. Un conducteur parfait piège le flux magnétique appliqué avant refroidissement

$$B = \text{cte} \Rightarrow dB/dt = 0 \tag{I.1}$$

3. Le flux magnétique est toujours exclu par les supraconducteurs en dessous de T_c , qu'un champ magnétique $B = 0$ soit appliqué ou non avant le refroidissement. Le cas des supraconducteurs est différent :

- Dans le premier cas, où un champ magnétique est appliqué après le refroidissement, les conducteurs idéaux et les supraconducteurs se comportent de manière similaire, car l'induction magnétique à l'intérieur du matériau reste nulle (voir Fig. I.3(a)).
- Dans le second cas, une fois que le supraconducteur refroidi en dessous de sa température critique atteint un état où $B = 0$, l'induction magnétique est expulsée de l'intérieur du matériau, comme illustré dans la Figure I.3(c). Ce phénomène est connu sous le nom d'effet Meissner, caractérisé par l'expulsion totale de tout flux magnétique à l'intérieur du supraconducteur. Le diamagnétisme parfait est une propriété inhérente aux supraconducteurs, mais il ne se manifeste que lorsque la température et le champ magnétique sont inférieurs à leurs valeurs critiques ($T < T_c$, H) en tout point.

I.3.3. La surface critique

La manifestation de la supraconductivité se produit uniquement lorsque les conditions suivantes sont satisfaites : $T < T_c$, $H < H_c$ et $J < J_c$. Ces valeurs critiques, à savoir T_c , H_c et J_c , dépendent toutes deux des autres paramètres. Par conséquent, il est nécessaire de définir une surface critique (voir Fig. I.4) qui sépare l'état supraconducteur de l'état normal du matériau. En dessous de cette surface critique, le matériau est dans l'état supraconducteur, tandis qu'au-dessus, il est dans l'état normal.

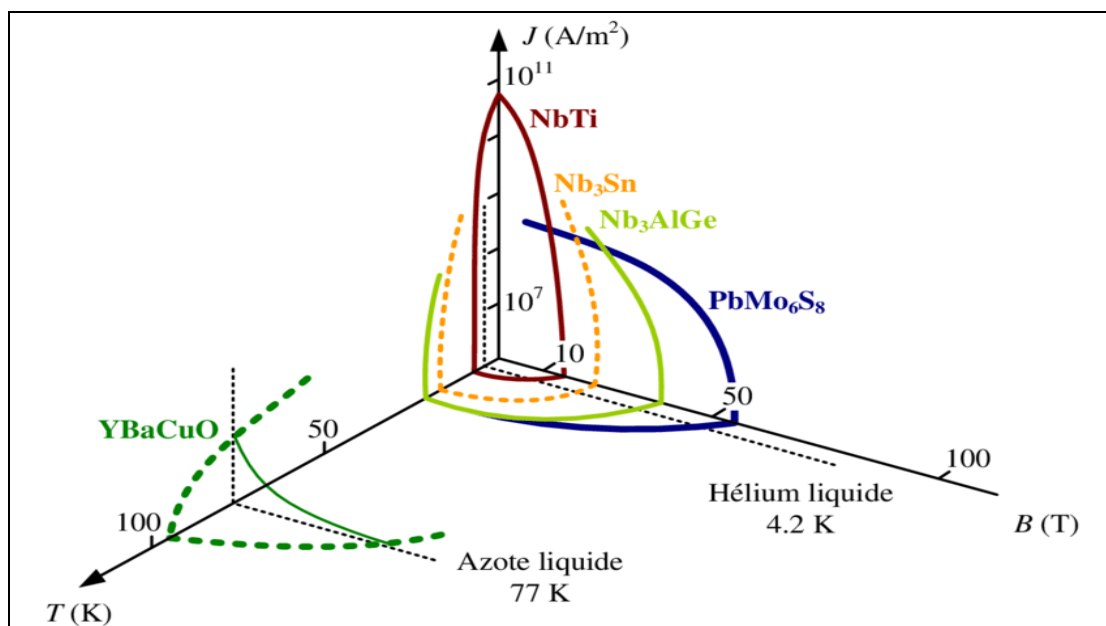


Figure I.4: Surface critique des matériaux supraconducteurs[12].

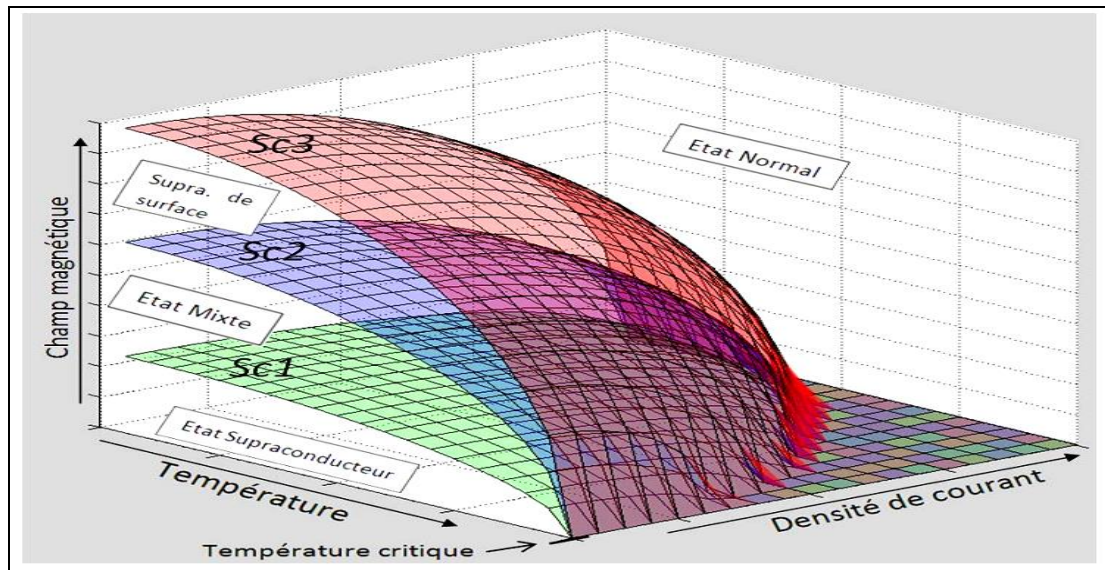


Figure I.5: Illustrant 3 surfaces critiques d'un supraconducteur ($Sc1$, $Sc2$ et $Sc3$). Entre ces surfaces, la supraconductivité apparaît sous différentes formes [10].

Les surfaces critiques ne sont que le prolongement dans la troisième dimension des lignes critiques. Ainsi, ils définissent les mêmes états de supraconductivité [10].

I.3.4. Théorie BCS

La première théorie microscopique de la supraconductivité, connue sous le nom de théorie BCS, a été développée en 1957 par John Bardeen, Leon Cooper et Robert Schrieffer. Un concept clé de cette théorie est que les électrons proches du niveau de Fermi s'associent en paires de Cooper qui interagissent avec le réseau cristallin. L'image conceptuelle de ce processus est illustrée dans la figure 1.6 : Lorsqu'un électron se déplace à travers un conducteur, il attire les charges positives du réseau environnant. Cette distorsion du réseau conduit un autre électron, avec un spin et une impulsion opposés, à se déplacer vers une région de densité de charge positive accrue. Il semble que l'électron en mouvement attire un autre électron via la vibration du réseau, surmontant ainsi la répulsion coulombienne, ce qui conduit à la formation de paires liées. Ces paires d'électrons ne restent pas stables indéfiniment. Elles se brisent et se reforment constamment. Étant donné qu'il n'est pas possible d'identifier les électrons individuels, ces paires sont considérées comme des appariements permanents plutôt que comme des paires dynamiques en constante évolution. Les paires d'électrons peuvent se comporter de manière très différente des électrons individuels, étant des fermions, elles doivent respecter le principe d'exclusion de Pauli.

Cependant, comme les bosons, elles peuvent se condenser au même niveau d'énergie. Dans un supraconducteur, où il y a de nombreuses paires d'électrons se chevauchant étroitement, elles forment un "condensat" très collectif. L'énergie de ce condensat est fortement séparée du premier état excité.

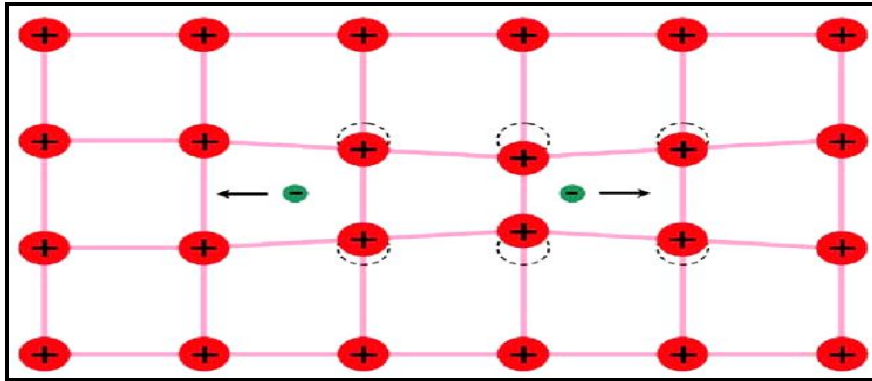


Figure I.6: La formation d'une paire de cuivre : un électron qui passe attire les ions chargés positivement du treillis, provoquant une légère ondulation dans son sillage. Un autre électron passant à l'opposé direction est attiré par ce déplacement [13].

Théorie BCS D'après l'effet isotopique que nous observons dans les matériaux supraconducteurs, la température critique est inversement proportionnelle à la masse de l'isotope utilisé dans le matériau, et l'effet isotopique a été observé dans un grand nombre de supraconducteurs. Les deux prédictions les plus importantes de la théorie BCS concernent la température de transition supraconductrice T_c et le gap : dans la limite de couplage faible [13].

I.3.5. Température critique

La température critique, notée T_c , représente la température à laquelle la résistance électrique commence à chuter vers zéro, marquant le début de la supraconductivité dans un matériau. La supraconductivité se caractérise par l'absence totale de résistance électrique en dessous de cette température critique. Autrement dit, les matériaux supraconducteurs perdent leur résistivité dans certaines conditions de température, de champ magnétique et de courant électrique. Ainsi, le courant électrique peut circuler à travers un matériau supraconducteur sans aucune perte d'énergie tant que sa température reste en dessous de sa température critique. L'image I.7 illustre la variation de la résistance d'un supraconducteur (mercure) en fonction de la température.

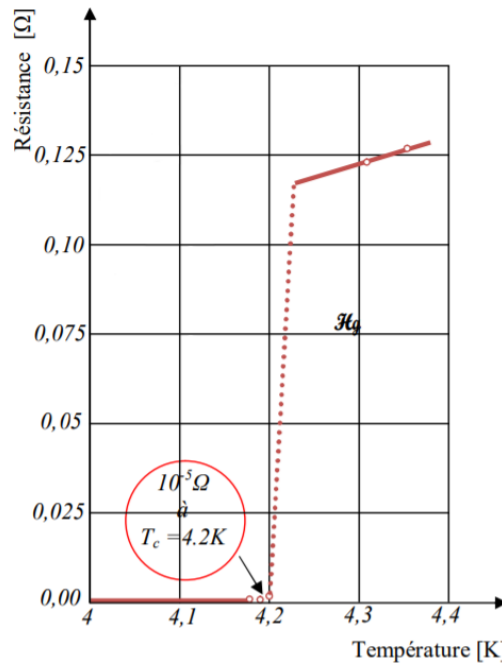


Figure I.7: Résistance du mercure en fonction de la température.

I.3.6. Champ magnétique critique

L'intensité du champ magnétique est également un facteur déterminant pour la supraconductivité. Au-delà d'une certaine valeur de champ magnétique, le matériau supraconducteur cesse d'être supraconducteur et perd ses propriétés supraconductrices. Il existe deux types principaux de supraconducteurs : les supraconducteurs de type I et de type II.

Les supraconducteurs de type I sont caractérisés par une valeur critique du champ magnétique, notée H_c , en dessous de laquelle ils deviennent supraconducteurs et expulsent complètement les champs magnétiques de l'intérieur du matériau (phénomène de diamagnétisme parfait, connu sous le nom d'effet Meissner). Au-delà de cette valeur critique, le matériau revient à un état normal.

En revanche, les supraconducteurs de type II possèdent deux valeurs critiques du champ magnétique, H_{c1} et H_{c2} .

L'induction magnétique à l'intérieur du matériau peut être exprimée par la relation suivante :

$$B = \mu_0(H + M) \quad (I.2)$$

μ_0 : La perméabilité magnétique du vide.

H : le champ magnétique à l'intérieur du matériau.

M : l'aimantation.

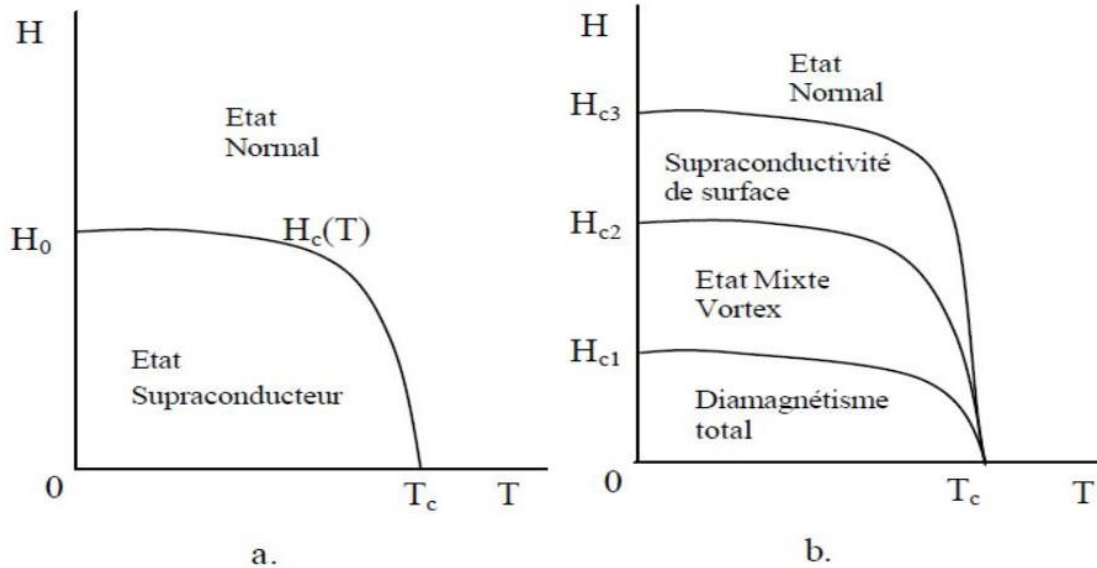


Figure I.8. Représentation des types de supraconductivité en fonction du champ.

I.3.7. Densité de courant critique $J_c(H, T)$

La densité de courant critique correspond à la valeur maximale au-delà de laquelle un champ électrique se manifeste.

Pour les supraconducteurs de type I, la répartition du courant n'est pas uniforme. Le courant de transport circule uniquement à la surface, à travers ce qu'on appelle l'épaisseur de pénétration de London.

Pour les supraconducteurs de type II, la densité de courant critique est fortement influencée par l'induction magnétique, et donc par la présence de vortex dans la structure du matériau. En présence d'une induction magnétique transversale, dans l'état mixte, un supraconducteur idéal présente une densité de courant nulle. Cependant, le courant de transport interagit avec les vortex, qui se déplacent lorsque la force de Lorentz créée (JcB) dépasse les forces d'ancrage (ou de pinning), entraînant une dissipation dans le matériau. Lorsque la densité de courant dépasse une valeur critique, notée J_c , les vortex sont arrachés, ce qui correspond au régime de flux-flow (voir Fig. I.9). Une fois libérés, les vortex se déplacent, créant un champ électrique proportionnel à la différence entre la densité de courant et la densité de courant critique ($J -$

Jc). Dans ce régime de flux-flow, une résistivité dépendante de l'induction magnétique apparaît. Pour obtenir de grandes densités de courant critique, il est nécessaire que les vortex soient solidement ancrés dans le matériau.

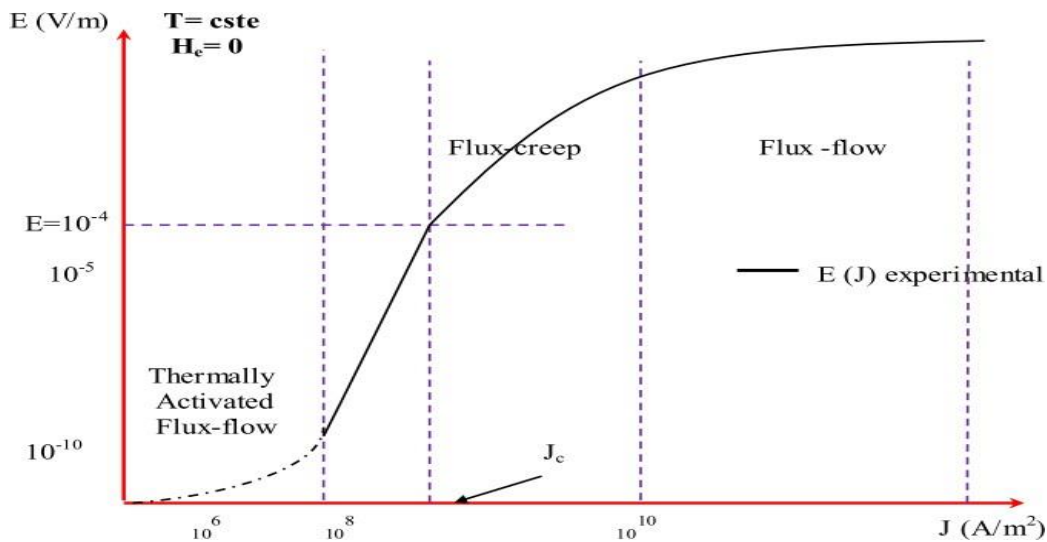


Figure I.9: Dépendance du champ magnétique en fonction de la température [14-16].

I.4. Types des supraconducteurs

Selon la valeur du champ magnétique critique H_c , on distingue deux types de matériau supraconducteur. Les matériaux supraconducteurs de type I et les matériaux supraconducteurs de type II.

I.4.1. Supraconducteurs de type I

Les supraconducteurs de type I ne possèdent qu'un seul champ critique, noté H_c . Dans ces supraconducteurs, le champ magnétique pénètre sur une certaine épaisseur, appelée longueur de pénétration de London, à l'intérieur de laquelle des super courants se développent. Le comportement de ce type de supraconducteurs est relativement simple car il n'existe que deux états distincts : l'état normal, caractérisé par une résistance élevée du matériau, et l'état supraconducteur, où l'on observe un diamagnétisme presque parfait.

Les supraconducteurs de type I sont principalement des corps purs, tels que le plomb (Pb), le mercure (Hg), l'indium (In) et l'étain (Sn). Les champs magnétiques critiques des corps

purs, qui sont des supraconducteurs de type I, sont relativement faibles et ne dépassent généralement pas 0,2 Tesla [17-18].

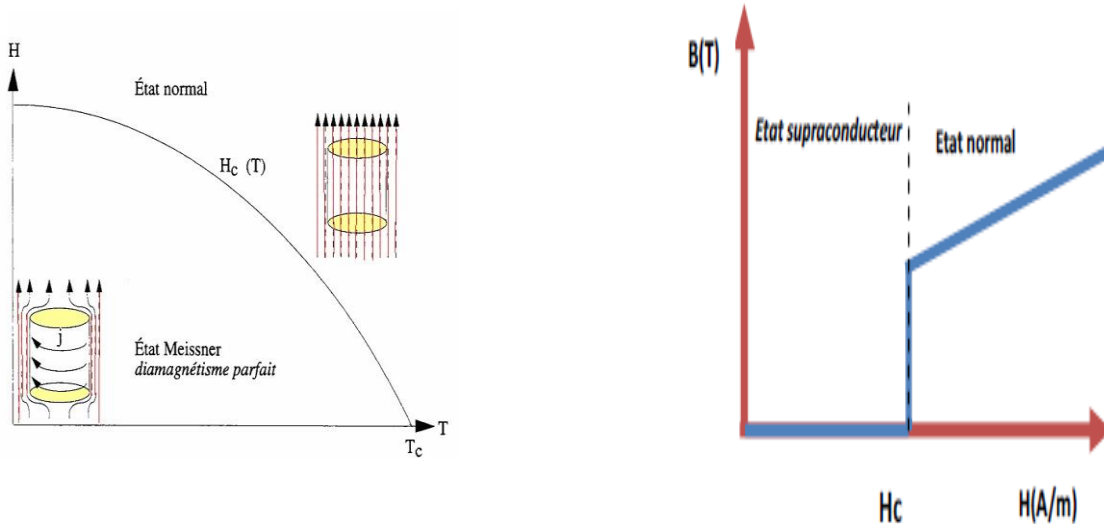


Figure I.10: a - Diagramme de phase d'un supraconducteur de type I. b - la caractéristique $B(H)$

I.4.2. Supraconducteurs de type II

Les supraconducteurs de type II se distinguent des supraconducteurs de type I par le fait qu'ils possèdent deux champs critiques au lieu d'un champ, contrairement aux supraconducteurs de type I qui ont un seul champ magnétique critique, H_c . À l'exception des éléments vanadium, technétium et niobium, la catégorie des supraconducteurs de type II est composée principalement de composés métalliques et d'alliages. La distinction entre les deux types de supraconducteurs a commencé dans les années 30, avec la découverte de la supraconductivité dans les alliages, où l'évolution de l'induction et de l'aimantation en dessous de la température critique diffère de celle observée dans les métaux purs.

Les supraconducteurs de type II présentent deux champs critiques, le second étant nettement plus élevé que le premier, pouvant atteindre des dizaines de teslas. De plus, ils ont des valeurs plus élevées de champ, de température et de courant critiques par rapport aux supraconducteurs de type I, ce qui les rend plus adaptés à des applications pratiques, notamment dans le domaine du génie électrique.

Le comportement d'un supraconducteur de type II en présence d'un champ magnétique est illustré sur la figure I.11. Trois zones distinctes sont identifiées :

Zone 1 : État supraconducteur, ou état Meissner, caractérisé par un diamagnétisme parfait, pour des valeurs de champ magnétique inférieures à H_{c1} (généralement petites).

Zone 2 : État mixte, avec un diamagnétisme partiel, pour des valeurs de champ magnétique comprises entre H_{c1} et H_{c2} . Bien que le matériau reste supraconducteur, il est partiellement pénétré par le champ magnétique extérieur sous forme de vortex.

Zone 3 : État normal, où le matériau présente une résistance électrique élevée, pour des valeurs de champ magnétique supérieures à H_{c2} .

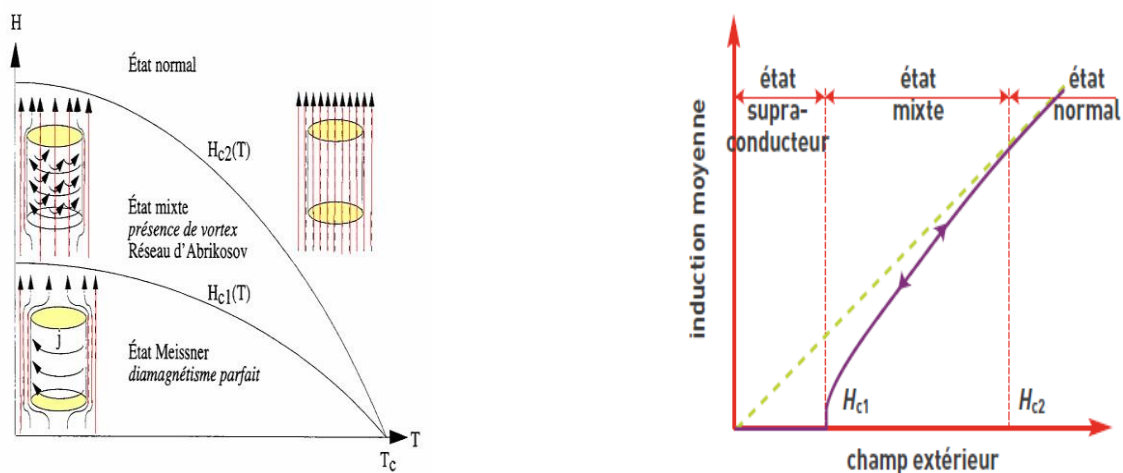


Figure I.11: a - Diagramme de phase d'un supraconducteur de type II. b - la caractéristique $B(H)$.

I.5. Matériaux supraconducteurs selon leur température

I.5.1. Supraconducteurs à basse température critique (SBTC)

Il s'agit des premiers supraconducteurs utilisés dans des applications pratiques, appartenant à la classe des supraconducteurs de premier type. Leur température critique est généralement inférieure à 20 K, ce qui les rend compatibles avec l'utilisation d'hélium liquide comme agent de refroidissement.

Des matériaux tels que le NbTi ou le Nb₃Sn sont largement utilisés dans ce contexte. Ils se caractérisent par leur grande facilité de mise en forme, ce qui permet de les utiliser dans la fabrication de bobines produisant des champs magnétiques élevés. Ces supraconducteurs sont

couramment utilisés dans les équipements d'imagerie médicale, par exemple. Les fils supraconducteurs de ces matériaux peuvent atteindre des longueurs de plusieurs kilomètres.

En outre, les alliages métalliques sont suffisamment robustes pour être manipulés et présentent un rayon de courbure intéressant, ce qui les rend adaptés à une gamme d'applications pratiques.

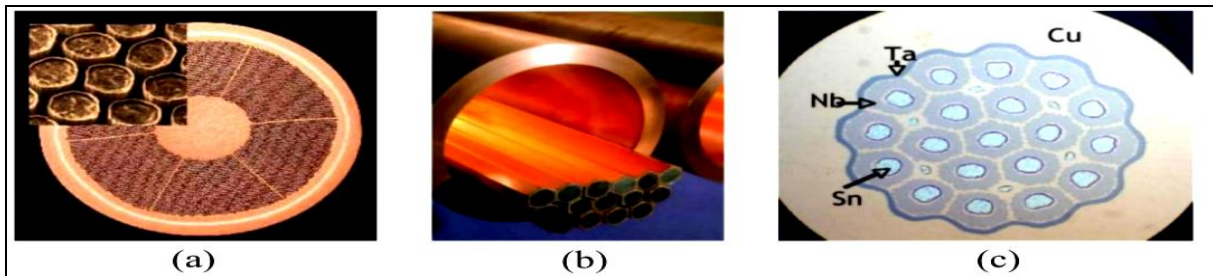


Figure I.12: (a) fil de NbTi finalisé, (b) montage des barreaux avant tréfilage, (c) fil Nb₃Sn avant traitement thermique [19-20].

Le tableau I.1 donne quelques exemples des matériaux supraconducteurs à basse température critique, ainsi que leur température critique.

<i>Supraconducteur</i>	<i>T_c(K)</i>
Nb-Ti	9
Nb ₃ Sn	18
Nb ₃ Al	19
Nb ₃ Ga	20
Nb ₃ Ge	22

Tableau I. 1 : Supraconducteurs à Basse Température (SBTC).

I.5.2. Supraconducteurs à haute température critique (SHTC)

En 1986, la découverte des supraconducteurs à haute température critique a ouvert de nouvelles perspectives, notamment avec l'utilisation de matériaux céramiques tels que le baryum et l'yttrium. Parmi ces matériaux, deux catégories se distinguent : les BSCCO et les YBCO. Les BSCCO, caractérisés par une structure de type PIT (Powder In Tube), offrent des fils robustes idéaux pour la fabrication de bobines, notamment pour les moteurs électriques. Actuellement, des câbles atteignant une longueur maximale de 1000 mètres sont disponibles.

Les YBCO, quant à eux, sont constitués d'une structure multicouche de matériaux cuits et recuits, leur conférant des propriétés adaptées à des densités de courant et des champs magnétiques plus élevés. Actuellement, ils peuvent atteindre une longueur maximale d'environ 500 mètres, ce qui les rend particulièrement avantageux dans le domaine des lignes de transport d'électricité.

Le fil supraconducteur est au cœur des discussions, avec un accent sur les longueurs maximales disponibles et la possibilité de les transformer en bobines. Les recherches actuelles se concentrent principalement sur l'YBCO. De plus, il convient de considérer les matériaux massifs fabriqués à partir de mono-domaines, qui peuvent résister à des flux magnétiques extrêmement élevés, ce qui les rend utiles pour la création d'écrans magnétiques ou d'aimants supraconducteurs. Actuellement, les pastilles réalisées peuvent atteindre des diamètres allant jusqu'à 50 mm et présentent diverses formes, telles que rectangulaires ou même hexagonales [21] [12].

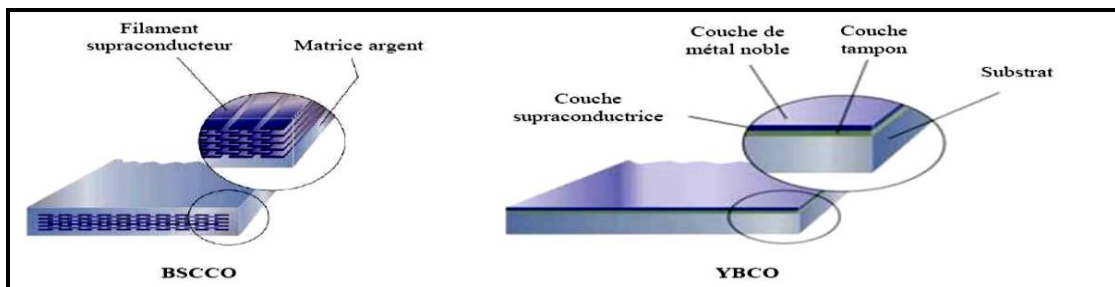


Figure I.13: Fils supraconducteurs HTC [9].

Le tableau I.2 donne quelques exemples des matériaux supraconducteurs à haute température critique, ainsi que leur température critique.

<i>Supraconducteur</i>	<i>T_c(K)</i>
La _{1.85} Ba _{0.15} Cu O ₄	35
La _{1.85} Sr _{0.5} Cu O ₄	40
YBa ₂ Cu ₃ O ₇	95
Bi ₂ Sr ₂ Ca Cu ₂ O ₈	85
Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	110
Tl ₂ Ba ₂ Ca Cu ₂ O ₈	108
Tl ₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₂ O ₁₀	125
HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₆₊₅	133.5

Tableau I. 2 : Supraconducteurs à Haute Température critique (SHTC) .

I.6. Types des Supraconducteurs à haute température critique

Les supraconducteurs à haute température sont des composés constitués de motifs répétés contenant de nombreux atomes et éléments différents, formant ce qu'on appelle une cellule unitaire. La cellule unitaire du supraconducteur HTS-Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_x- est représentée. Ces matériaux se présentent sous forme de minuscules cristaux composés de trillions de ces cellules unitaires, souvent comparés à des perles. La fabrication d'échantillons à l'échelle macroscopique nécessite l'assemblage de millions de particules individuelles. Les supraconducteurs à haute température sont des matériaux céramiques cassants, principalement constitués d'oxydes. Leur résistance est environ 100 fois supérieure à celle du cuivre à température ambiante. [21] [22].

	YBCO	Bi-2212	Bi-2223
T_c(K)	93	78	110
B_{irr} 4.7 K (T)	>30	>30	>30
B_{irr} 77 K (T)	>5	0.005	0.5
J_c 4.7 K (A/mm²)	>100,000	5,000	3,000
J_c 77 K (A/mm²)	>10,000	100	500

Tableau I.3: Paramètres critiques des supraconducteurs HTS pour les applications de puissance [23].

La découverte du premier supraconducteur à haute température critique (T_c) a été réalisée par Bednorz et Müller avec l'oxyde de cuivre de lanthane (La, Ba) 2CuO_4 , présentant un T_c légèrement supérieur à 30 K. À ce jour, le supraconducteur à haute température le plus élevé est HgBa₂Ca₂Cu₃O₈, avec un T_c de 134 K. Le premier supraconducteur avec un T_c supérieur à 77 K était l'oxyde de cuivre baryum yttrium YBa₂Cu₃O_x, également connu sous le nom de YBCO ou Y-123. Les oxydes de bismuth Bi₂Sr₂CaCu₂O_x et Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_x, appelés respectivement Bi-2212 et Bi-2223, sont également des matériaux avancés dans ce domaine. Ces deux derniers composés sont également désignés sous le nom de BSCCO, pour strontium bismuth et cuivre oxyde de calcium. Les tableaux 1 à 3 fournissent les paramètres clés de YBCO, Bi-2212 et Bi-2223, qui sont les supraconducteurs à haute température les plus largement utilisés [23].

I.6.1. Supraconducteur BSCCO

Les connecteurs BSCCO constituent la base de toutes les grandes applications HTS existantes. Ils sont connus comme la première génération de pilotes. Les connecteurs BSCCO et commerciaux sont disponibles en plus grandes longueurs (jusqu'à 1 km). Les connecteurs BSCCO sont utilisés dans les applications de transmission d'aujourd'hui. Ils sont produits par le procédé OPIT (poudre d'oxyde en tube), dont un schéma simple est illustré à la figure 1. I-14. Le courant dans un conducteur BSCCO doit traverser les joints de grains, qui bloquent le flux de courant à tous les angles sauf les petits, donc une texture solide est nécessaire, mieux les grains sont alignés, plus la densité de courant critique du conducteur est élevée. Pour obtenir la texture et l'alignement des grains initialement orientés de manière aléatoire dans les poudres d'oxyde, un laminage est nécessaire dans le processus de fabrication et les supraconducteurs sont formés en fines bandes ; Généralement 2-4 mm de large et 0,2-0,4 mm d'épaisseur. Les composés HTS sont des matériaux très fragiles. Pour améliorer significativement les propriétés mécaniques des rubans, le matériau supraconducteur est placé dans un tube en Ag, qui a été choisi pour ses bonnes propriétés mécaniques et de diffusion de l'oxygène. Les bandes peuvent avoir un noyau BSCCO simple ou multi filament [23].

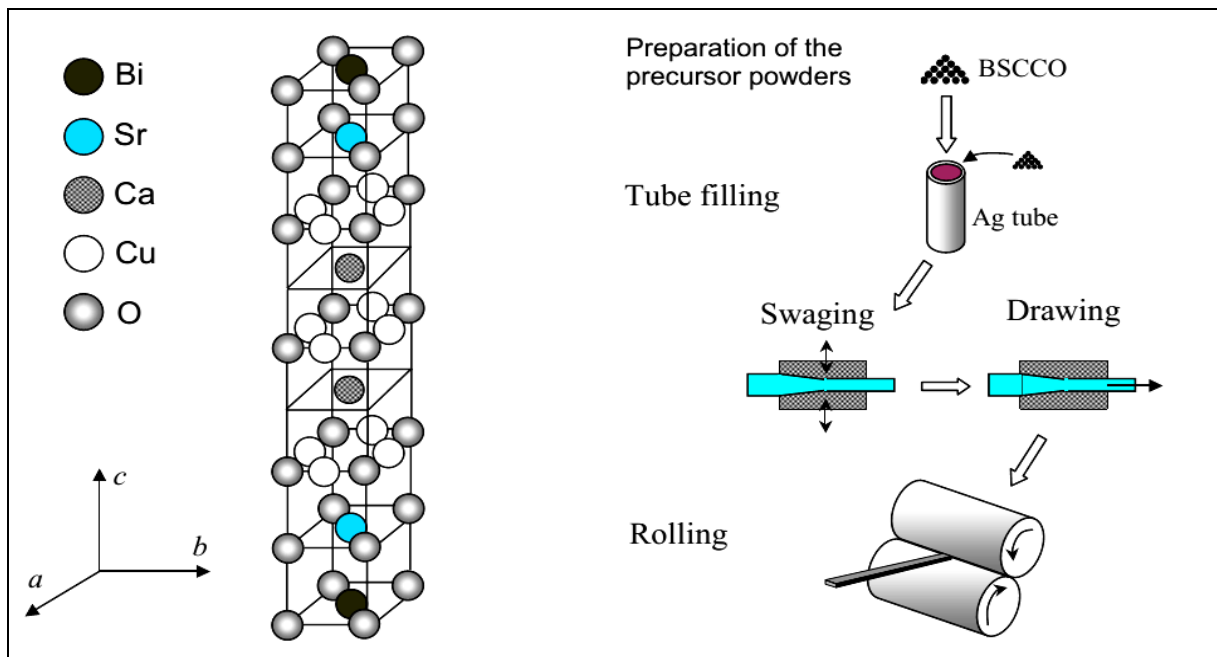


Figure I.14: Cellule unitaire de $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ et présentation schématique de la Technique OPIT. Chaleur intermédiaire et finale le traitement n'est pas indiqué [23].

Le BSCCO se distingue par la variabilité intrinsèque de sa structure multicouche le long des plans a, b et c de son cristal, ainsi que par les propriétés anisotropes des bandes résultantes dues à la stratification pendant la fabrication. Une caractéristique cruciale des matériaux BSCCO est leur contraste élevé de densité de courant critique : lorsqu'un champ magnétique est appliqué perpendiculairement au plan de la bande (B//c), J_c diminue rapidement, tandis que cette diminution est plus graduelle lorsque le champ magnétique est parallèle (B//a, b). L'anisotropie de J_c dans les bandes Bi-2223 est abordée dans un contexte de modélisation.

Le BSCCO présente une bicouche Bi-O qui est pratiquement isolante, ce qui en fait un empilement idéal pour des applications électroniques, alliant supraconductivité et isolation. Le champ irréversible à 4,2 K revêt une grande importance pour le Bi-2212 et le Bi-2223. Toutefois, la densité de courant du Bi-2223 diminue plus rapidement que celle du Bi-2212 sous l'effet d'un champ magnétique appliqué. À 4,2 K, le Bi-2212 peut supporter des courants allant jusqu'à 1000 A/mm² dans un champ de 26 T, tandis que le Bi-2223 a une densité de courant proportionnellement plus faible. C'est pourquoi le Bi-2212 est privilégié pour les applications d'aimants supraconducteurs à haute température (4,2 K et plus) ; cependant, ses performances sont sévèrement affectées par un fluage extrême et son champ magnétique irréversible à 77 K n'est que de 0,005 T.

D'autre part, à 77 K, le Bi-2223 présente un champ magnétique irréversible de 0,5 T, ce qui n'est pas critique pour la conception de l'aimant mais est très utile pour les applications en courant continu. Ainsi, le Bi-2223 est actuellement le matériau de fil et de câble le plus largement utilisé, avec une température de fonctionnement de 77 K [24].

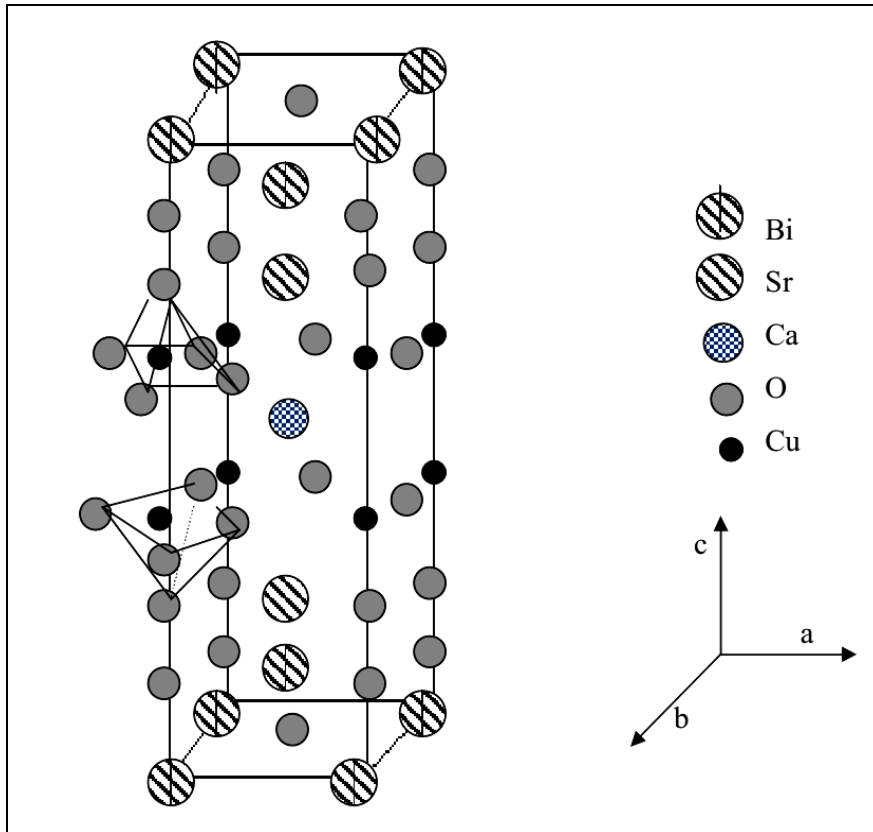


Figure I.15: Structure cristallographique de Bi₂Sr₂CaCu₂O₈ [24].

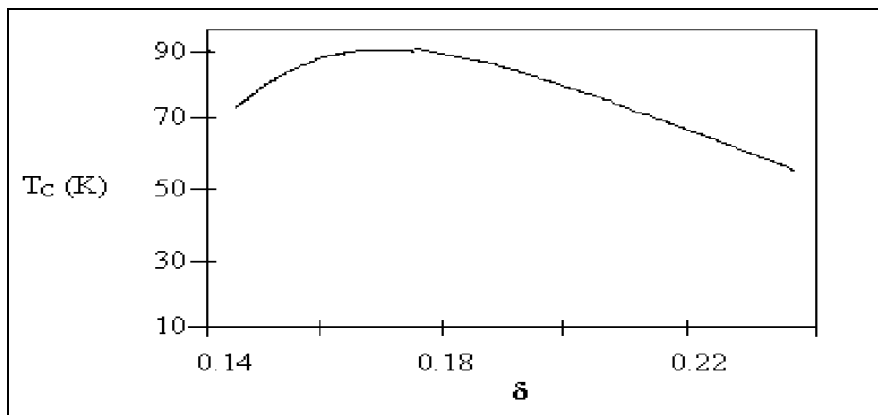


Figure I.16: Variation de la température critique en fonction de δ dans Bi₂Sr₂CaCu₂O_{7+d}. [24].

I.6.2. Supraconducteur YBCO

Parmi les principales différences entre BSCCO et YBCO en termes de structure principale réside dans le remplissage de la couche de réservoir. Dans le cas d'YBCO, cette couche est métallique, tandis que pour BSCCO, elle est isolante. Cela signifie qu'YBCO

présente moins de variance. De plus, YBCO atteint des densités de courant très élevées, dépassant les 10 000 A/mm² à 77 K. La difficulté d'obtenir de longs conducteurs en YBCO est due à sa technologie de fabrication, qui diffère considérablement de celle de BSCCO. Alors que le BSCCO est un conducteur enrobé, constitué d'un film mince de quelques micromètres de HTS déposé sur un substrat souple, le processus pour YBCO est plus complexe. Une méthode utilisée est le dépôt assisté par faisceau d'ions (IBAD), qui vise à améliorer l'alignement des fils HTS pour améliorer leurs performances électriques. D'autres défis incluent l'utilisation de substrats composites renforcés (RABiTS) et le dépôt de substrats inclinés (ISD). Bien qu'YBCO soit considéré comme le matériau le plus approprié pour les conducteurs de deuxième génération, la fabrication de longs conducteurs reste actuellement un défi majeur pour les chercheurs [23].

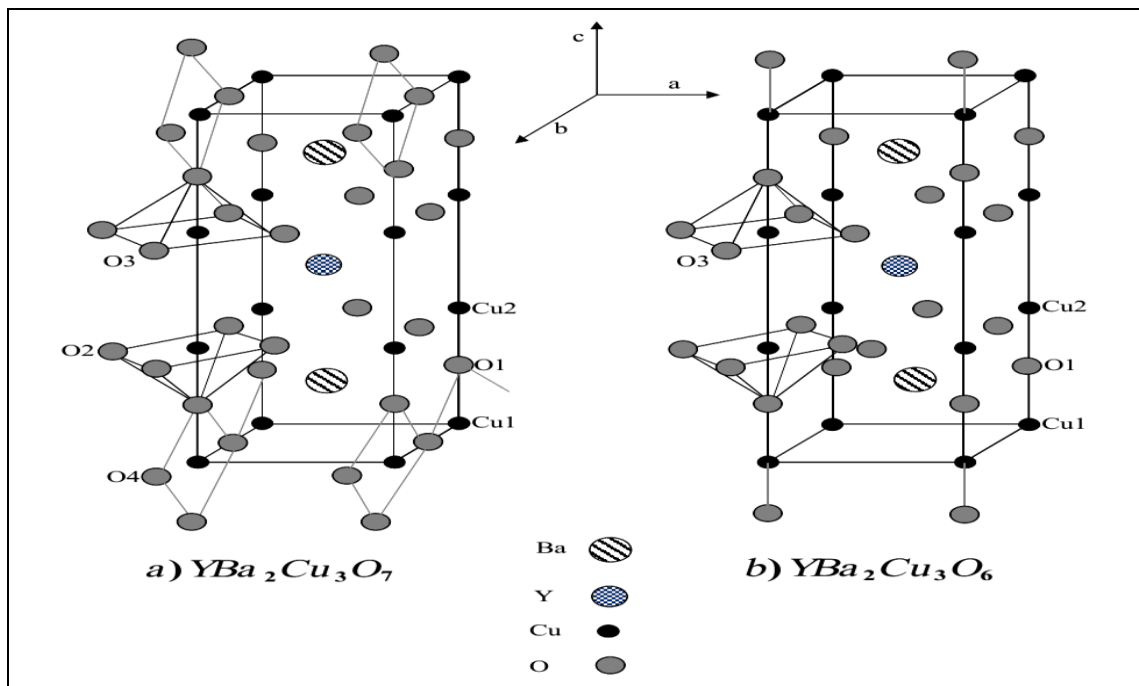


Figure I.17: Structure cristalline de $YBa_2Cu_3O_y$ [24].

a) Structure orthorhombique. b) Structure tétragonale.

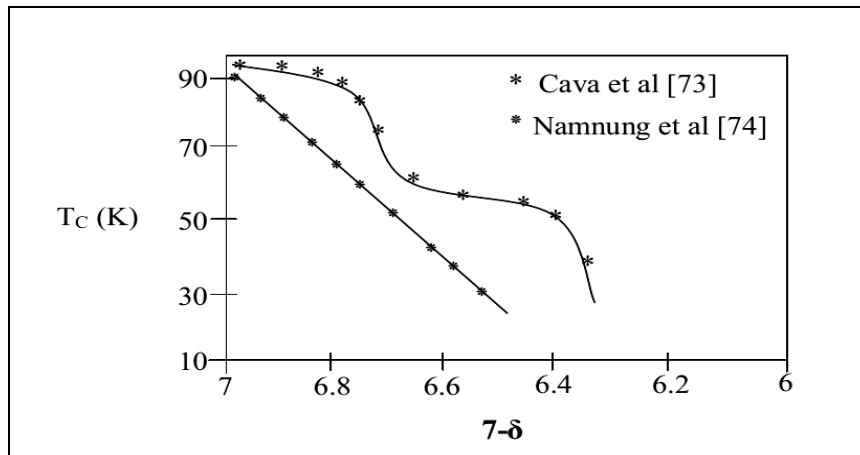


Figure I.18: Variation de la température critique en fonction de $(7-d)$ dans $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$ [24].

I.7. Principales applications des supraconducteurs

Il existe trois catégories d'applications des supraconducteurs en électrotechnique selon la valeur utile de l'induction magnétique produite par un supraconducteur :

- ✚ -Champs magnétiques extrêmement puissants : Cette catégorie concerne les bobines de champ et les systèmes de stockage d'énergie.
- ✚ -Champs magnétiques puissants : cette catégorie concerne les moteurs, les générateurs, les transformateurs et les systèmes de stockage d'énergie.
- ✚ -Champ magnétique faible : Cette catégorie concerne les lignes de transport d'énergie, les transformateurs et les limiteurs de courant [25].

I.7.1. Machines tournantes

Les supraconducteurs sont largement utilisés dans les machines tournantes à diverses fins en raison de leur efficacité en termes de performances. L'utilisation des supraconducteurs dans les refroidisseurs a conduit à de nombreux prototypes. Remplacer les enroulements en cuivre par des enroulements supraconducteurs permet d'augmenter la masse grâce aux densités de courant élevées du fil et à l'élimination du circuit magnétique. Le couple massique élevé de ces machines en fait une application intéressante pour les systèmes embarqués [26].

I.7.2. Les Aimants permanents supraconducteurs

Un supraconducteur massif peut également servir d'aimant permanent. En refroidissant un supraconducteur à haute température critique jusqu'à un champ magnétique nul, puis en le soumettant à une variation rapide du champ magnétique, il va emprisonner ce champ magnétique. Le champ magnétique capturé dans le supraconducteur est lié à des courants induits par la loi de Lenz. Ces courants circulent comme dans un matériau normal, en partant de la surface extérieure, mais contrairement aux matériaux résistifs, ils ne s'affaiblissent pas en raison de l'absence de résistivité. Lorsque le champ magnétique externe diminue, la distribution des courants change pour s'opposer à cette nouvelle variation et tend à retenir l'induction. Pour que le supraconducteur capture efficacement le champ magnétique, le champ externe doit atteindre une valeur appelée champ de pénétration, H_P [27].

I.7.3. Les transformateurs

Les enroulements dans les transformateurs représentent le point de base, et donc toute amélioration à ce niveau est bénéfique pour le transformateur dans son ensemble. En raison de la chaleur émise par les bobines dans les transformateurs, sous forme d'effet joule, ceux-ci restent contraints par divers facteurs, mais le domaine de la supraconductivité est sur le point de repousser ces limites. Le remplacement des enroulements classiques par des enroulements supraconducteurs permet d'obtenir des transformateurs très performants. Selon les études, une comparaison a été faite entre les transformateurs conventionnels et les nouvelles générations (dans les mêmes conditions), comme suit : les pertes peuvent diminuer de 30 %, le volume de 50 % et le poids de 70 %. La société SIEMENS a réalisé et testé avec succès un transformateur de 1 MVA. De même, la société US Navy a fabriqué un transformateur de 40 MVA 13,8 kV – 3 kV ; 60 Hz avec des enroulements en YBaCuO à 74 K et en MgB₂ à 24 K.

I.7.4. Limitation de courant

Les dispositifs de limitation du courant sont des composants de circuit non linéaires utilisés pour protéger les réseaux en cas de dysfonctionnement. Cependant, une nouvelle génération de limiteurs supraconducteurs a émergé. Tout système supraconducteur nécessite un environnement cryogénique comprenant un cryostat et un fluide cryogénique ou un cryogénérateur. Le principe des limiteurs de courant supraconducteurs repose sur le passage de l'état supraconducteur à l'état normal lorsque la valeur du courant électrique dépasse la valeur critique (I_c). Cette transition doit se produire généralement très rapidement afin de

limiter le premier pic de courant à une valeur seuil ne dépassant pas trois à cinq fois le courant nominal [28].

I.7.5. Câbles de transport

Les pertes dans les supraconducteurs sont nettement inférieures à celles des câbles conventionnels, ce qui les rend très utiles pour les applications de transmission de puissance. Cependant, la question de la cryogénie présente des défis à long terme. Une solution consiste à faire circuler le liquide de refroidissement à travers un tube au centre du câble et à enrouler le fil supraconducteur autour de ce dernier. Alors que la demande en énergie augmente, certaines lignes électriques doivent être renforcées, mais l'espace disponible pour l'installation de nouveaux câbles n'est pas toujours adéquat. Par conséquent, l'utilisation de supraconducteurs comme solution alternative permet de résoudre ce problème. [26]

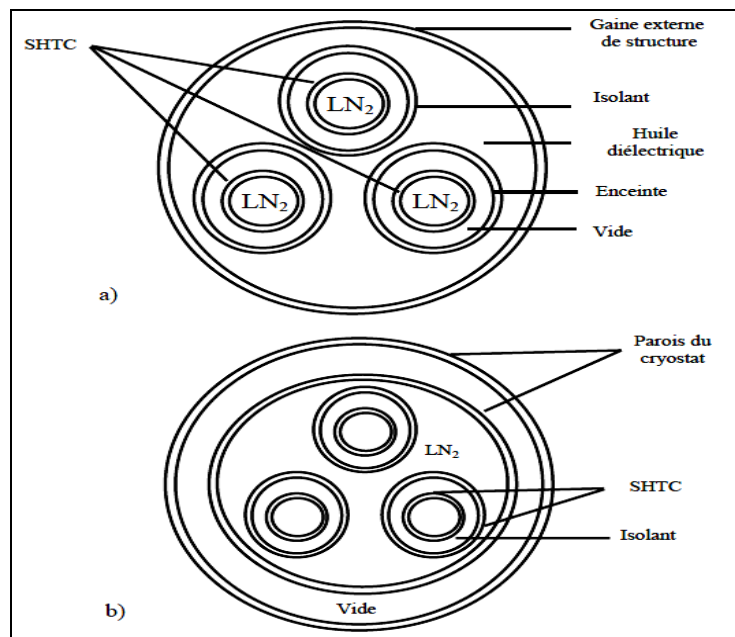


Figure I.19: Représentation schématique d'un câble triphasé en supraconducteur à haute Température critique (SHTC) refroidi à l'azote liquide (LN₂) :

- a) Chaque phase est dans une enceinte cryogénique et l'isolant est à température ambiante ;
- b) une seule enceinte cryogénique contient les trois phases ; chaque phase est formée de deux conducteurs concentriques, l'isolant se trouve à basse température.

I.7.6. Stockage d'énergie

Cette technologie repose sur le stockage de l'énergie sous forme d'un champ magnétique généré par le passage d'un courant électrique à travers une bobine supraconductrice court-circuitée et refroidie en dessous de sa température critique. Ces bobines sont appelées SMES, pour « Superconducting Magnetic Energy Storage ». Ainsi, le courant circule sans aucune perte dans ces bobines, ce qui permet de stocker une quantité d'énergie pour une durée théoriquement illimitée. [26]

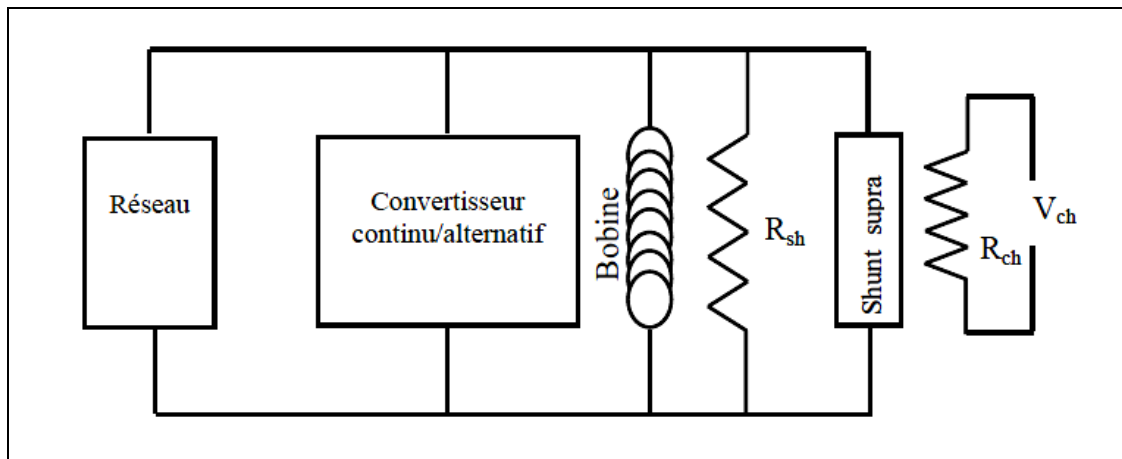


Figure I.20: Schéma de principe d'une bobine supraconductrice couplée à un réseau électrique par l'intermédiaire d'un convertisseur ; Rsh est la résistance de protection ; Rch et Vch forment le circuit de chauffage du shunt supraconducteur. [30-31]

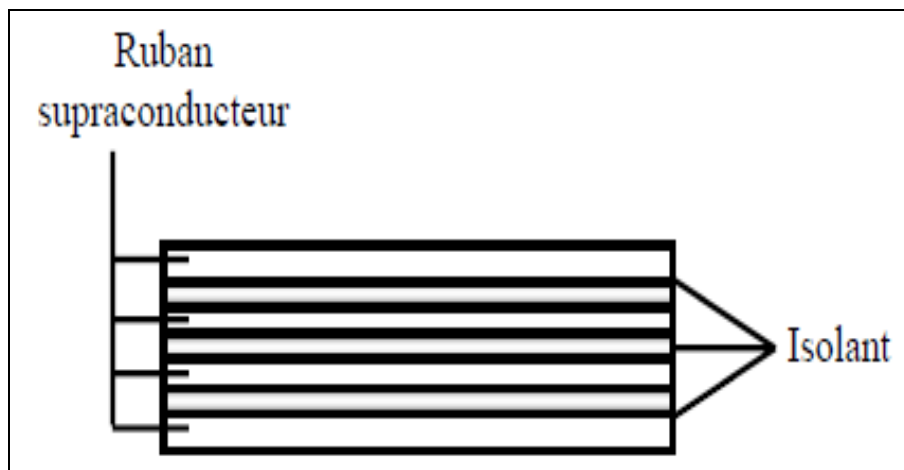


Figure I.21: Conducteur formé de 4 rubans supraconducteurs isolés les uns des autres.

[30-31].

I.8. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons abordé une étude sur les matériaux supraconducteurs. Il existe deux types de matériaux supraconducteurs : le type I et le type II, chacun étant délimité par des grandeurs magnétiques et thermiques appelées grandeurs critiques, notamment la température critique (TC), le champ magnétique critique (HC) et la densité de courant critique (JC). Les supraconducteurs, en particulier ceux à haute température critique, présentent des propriétés remarquables qui les rendent utilisables dans divers domaines industriels. Ils sont sérieusement considérés pour des applications liées à l'électromagnétisme en génie électrique et en électronique. L'optimisation de ces dispositifs nécessite une compréhension approfondie de leur comportement électromagnétique. Les matériaux supraconducteurs ont de nombreuses applications dans le domaine du génie électrique. Parmi ces applications, nous avons présenté les plus utilisées et les plus prometteuses. La modélisation de ces matériaux sera abordée dans le chapitre suivant.



CHAPITRE II

Modélisation

Des

Matériaux

Supraconducteurs

II.1. Introduction :

Dans le modèle électromagnétique, les phénomènes physiques sont souvent décrits par des équations aux dérivées partielles (EDP), qui peuvent parfois être non linéaires et complexes à résoudre. Le modèle thermique est issu de l'équation du transfert thermique, à laquelle il faut ajouter les conditions d'échange avec le milieu extérieur.

Sous certaines hypothèses simplificatrices, ces équations peuvent être transformées en équations différentielles ordinaires. Des solutions analytiques peuvent alors être utilisées. Cependant, pour des problèmes plus réalistes comme ceux de notre étude (conditions aux limites, géométries complexes et hypothèses plus faibles), ces équations ne peuvent plus être résolues analytiquement.

Nous employons ensuite des méthodes d'approximation (numériques) pour transformer les équations aux dérivées partielles établies en un système d'équations algébriques pouvant être résolues par ordinateur. Dans ce chapitre, nous présenterons les équations mathématiques caractérisant l'évolution spatio-temporelle du champ électromagnétique dans un matériau supraconducteur, ainsi que les lois de comportement.

II.2. Etat de l'art :

Dans le chapitre précédent, nous avons examiné de manière générale le comportement des supraconducteurs à haute température critique (SHTc), mettant en évidence une forte corrélation entre les différentes caractéristiques. Les SHTc fonctionnent selon plusieurs régimes différents, pour lesquels il est difficile de trouver un modèle analytique capable de les caractériser tous, en particulier dans le cas de problèmes bidimensionnels ou tridimensionnels. Malgré cela, certains modèles ont été développés pour représenter l'état supraconducteur dans certaines conditions et en se basant sur certaines hypothèses. Le modèle macroscopique le plus couramment utilisé est le modèle de l'état critique, également connu sous le nom de modèle de Bean, dans sa version simplifiée.

Ces modèles sont assez fidèles à la réalité physique et permettent de mener à bien les calculs analytiques pour des géométries simples. En ce qui concerne la dépendance de J_c par rapport à l'induction magnétique, les modèles de Kim ou exponentiel peuvent être utilisés si le supraconducteur fonctionne autour de sa densité de courant critique.

II.3. Equations mathématiques régissent le phénomène physique :

II.3.1. Relation B(H) :

L'expression suivante donne l'induction magnétique B à l'intérieur du matériau en fonction du champ extérieur H et de l'aimantation M :

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M = (1+x) \mu_0 H = \mu_0 \mu_r H + \mu_0 M \quad (\text{II.1})$$

Nous avons observé que les supraconducteurs sont diamagnétiques, ce qui signifie que lorsque $H < H_{c1}$, B à l'intérieur du matériau est nul. En d'autres termes, $M = -H$ et $x = -1$. Cependant, lorsque le champ magnétique H_{c1} dépasse H, le matériau supraconducteur perd son caractère diamagnétique. En raison de la faible valeur du champ critique H_{c1} des supraconducteurs de type II, l'induction B qu'ils reçoivent lors de leur utilisation est généralement supérieure à μ_0 . Par conséquent, à l'échelle macroscopique, il peut être considéré comme non magnétique.

Alors on peut écrire $(B) \vec{=} \mu_0 (H) \vec{}$ (Fig. II.1), [32]

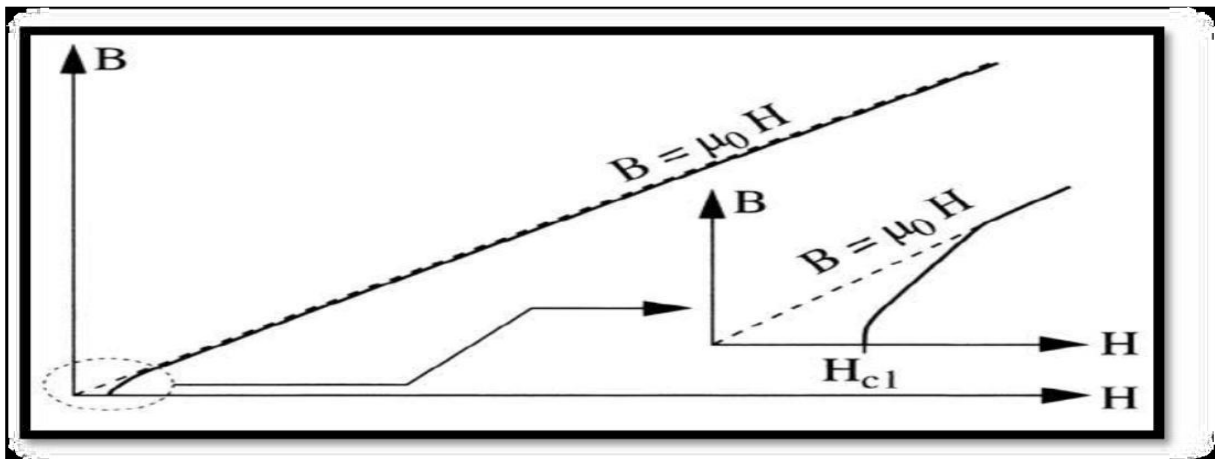


Figure II. 1 : Caractéristique B(H) d'un supraconducteur [32].

II.3.2. Relation E (J)

À partir des mesures de courant-tension de l'échantillon, les propriétés expérimentales $V(I)$ peuvent être déduites, souvent sous la forme d'une loi de puissance. En supposant que cette propriété est toujours valable pour la densité de courant, la relation $E(J)$ peut être exprimée.

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

Dans l'équation (II.2), L'exposant "n" varie en fonction du matériau, de la température et de l'induction magnétique. Une transition plus rapide est observée lorsque l'indice n est plus élevé voir (Figure II.2).

Parfois, le paramètre n est considéré comme un indicateur de la qualité de la bande supraconductrice. Plus sa valeur est élevée, meilleure est la qualité du matériau. En effet, dans ce cas, il est possible de déterminer le courant critique de manière précise dès qu'une tension se manifeste aux bornes de l'échantillon.

La résolution de la relation (II.2) peut être effectuée à l'aide d'un logiciel informatique pour déterminer les grandeurs électromagnétiques. Cependant, d'un point de vue analytique, elle devient difficile à utiliser, sauf lorsque la valeur de "n" est élevée. [29].

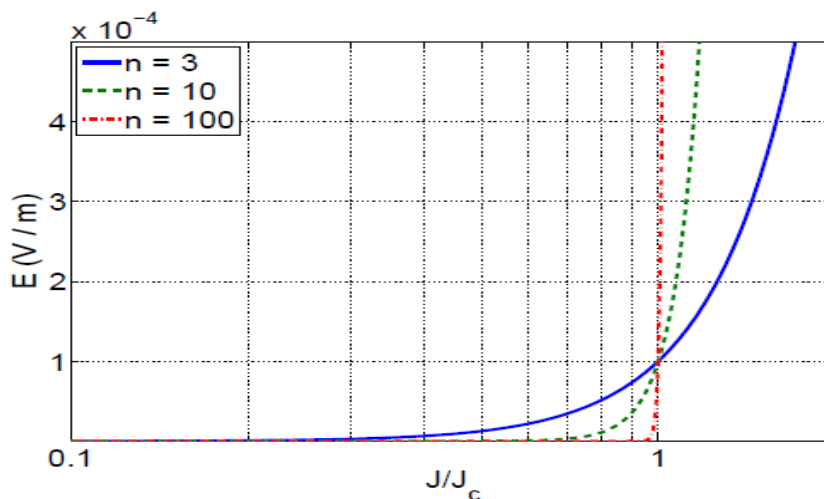


Figure II. 2 : Caractéristique $E(J)$ d'un supraconducteur [29].

II.4. Les Modèles de comportement

II.4.1. Modèle de l'état critique ou le modèle de Bean

Le modèle de l'état critique stipule que, à une température donnée, la densité de courant dans un supraconducteur est soit nulle, soit égale à la densité de courant critique J_c , ce qui en fait le modèle le plus.

$$J = J_c(|B|) \frac{E}{|E|} \quad (\text{II.3})$$

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

D'un point de vue mathématique plus précis, ces expressions sont traduites en utilisant les équations de Maxwell :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{B} = \pm \mu_0 \vec{c} \quad \text{ou} \quad \overrightarrow{\text{rot}} \vec{B} = \vec{0} \quad (\text{II.4})$$

Selon Bean (1962), le modèle suppose également que la densité de courant critique est constante et ne dépend pas de l'induction magnétique B [8].

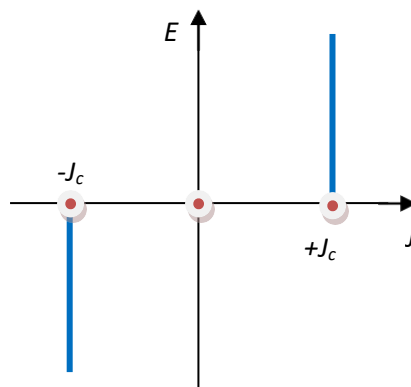


Figure II. 3 : Caractéristique E(J) basée sur le Modèle de Bean [8].

Il existe plusieurs modèles pour calculer les distributions de courant, de champ et évaluer les pertes AC des supraconducteurs sous différentes conditions. Le plus célèbre est sans aucun doute le modèle de l'état critique, également connu sous le nom de modèle de Bean.

II.4.2. Le modèle de la loi de puissance

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

L'expression mathématique de ce modèle est donnée comme suit :

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

Les paramètres qui influent sur cette loi sont la densité de courant critique J_c et l'exposant "n". En utilisant ce modèle, il est possible de modifier les courbes $E(J)$ de manière à modéliser un conducteur normal pour $n = 1$ (loi de comportement linéaire) jusqu'à obtenir une courbe abrupte comme dans le cas du modèle de l'état critique pour un $n > 100$.

II.4.3. Modèle de KIM

Le modèle de Bean et la loi en puissance considèrent le matériau supraconducteur comme isotrope et isotherme. Cependant, ils 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 supposée constante indépendamment du champ magnétique extérieur. En réalité, cette densité de courant dépend fortement de son orientation par rapport au champ magnétique induit, B . Une expression de $J_c(B)$ pour le cas isotrope a été proposée par Kim.

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

C'est le modèle le plus couramment utilisé pour modéliser la dépendance de la densité de courant critique par rapport à l'induction magnétique [33].

II.4.4. Le modèle exponentiel

Le modèle de dépendance $J_c(B)$ est un autre modèle utilisé dans les développements numériques : [3]

$$J_c(|B|) = J_{c0} \exp\left(-\frac{|B|}{B_0}\right)$$

Les modèles de Kim et exponentiel sont utilisés pour les développements numériques. En outre, le modèle de Kim est largement utilisé pour la modélisation de $J_c(B)$.

II.4.5. Modèle de Flux Flow et Flux Creep

Il existe deux modes de fonctionnement pour le supraconducteur, en fonction de la valeur de la densité de courant critique J_c :

• Si $|J| \leq J_c$, le réseau de vortex est ancré, cependant, les vortex peuvent se déplacer d'un site d'ancrage à un autre en raison de l'agitation thermique. Ce phénomène dissipatif est connu sous le nom de régime de "flux Creep".

$$E = 2\rho_c J_c \sinh\left(\frac{U_0 J}{K\theta J_c}\right) \exp\left(-\frac{U_0}{K\theta}\right) \quad (\text{II.6})$$

K : Constant de Boltzmann.

θ : Température.

ρ_c : Résistivité de Flux Creep.

U_0 : Potentiel de profondeur.

• Lorsque $|J| > J_c$, le réseau de vortex se déplace, entraînant des pertes qui se traduisent par l'apparition d'une résistance électrique dans le matériau supraconducteur. Ce phénomène est connu sous le nom de régime de "flux flow".

$$E = \pm (E_c + \rho_f J_c \left(\frac{|J|}{J_c} - 1\right)) \rho_f \quad (\text{II.7})$$

ρ_f : Résistivité de Flux Flow

La densité critique de courant peut être définie comme la limite entre le régime de fluage du flux et le régime d'écoulement du flux. Étant donné que cette limite est floue, elle est souvent déterminée par la valeur d'un champ électrique critique E_c . [32]

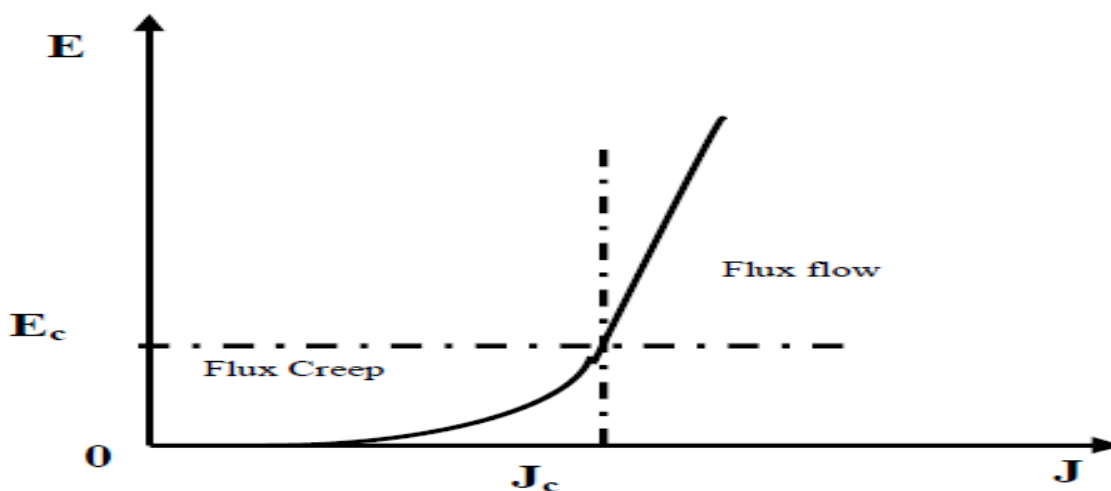


Figure II. 4 : Modèle de Flux Flow et Creep [32].

II. 5. Formulation des Équations Électromagnétiques

Les différents modèles de J. C. Maxwell englobent tous les phénomènes électromagnétiques, mais selon les dispositifs étudiés, certains phénomènes deviennent insignifiants [35]. Les équations se séparent alors, donnant naissance à des modèles plus simples. Parmi ces modèles, on peut citer le modèle électrostatique, électrocinétique, magnétostatique et magnétodynamique.

II. 5.1 : Modèle électrostatique [33]

Dans ce modèle, la répartition des charges électriques ne dépend pas du temps (état stable : état DC), ce qui signifie que le champ magnétique généré ne change pas avec le temps.

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \vec{0} \quad (\text{II.8})$$

Les équations de ce modèle se simplifient comme suit :

$$\text{div} \vec{D} = \rho \quad (\text{II.9})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = \vec{0} \quad (\text{II.10})$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (\text{II.11})$$

On a :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V$$

(II.12)

Le modèle se ramène alors à l'équation

$$\text{div} (\epsilon \overrightarrow{\text{grad}} V) + \rho = 0 \quad (\text{II.13})$$

II. 5. 2 Modèle magnétostatique

Dans ce modèle, le terme $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ est nul. Ceci s'explique par le fait que le champ magnétique est produit par des sources indépendantes du temps. Deux modèles existent [34] :

II. 5. 2.1 Modèle magnétostatique scalaire : [33]

Lorsque les courants électriques sont inexistant, les champs ne varient pas dans le temps, ce qui entraîne :

$$\overline{\text{rot}}\vec{H} = \vec{0} \quad (\text{II.14})$$

$$\text{div}\vec{B}=0 \quad (\text{II.15})$$

$$\vec{B}=\mu\vec{H} \quad (\text{II.16})$$

\vec{H} la dérive d'un potentiel scalaire magnétique Φ , ce qui explique la désignation du modèle magnétostatique scalaire, tel que : $\vec{H} = -\text{grad}\Phi$

Le modèle se ramène alors à l'équation :

$$\text{Div}(\mu\overline{\text{grad}}\Phi)=0 \quad (\text{II.17})$$

II. 5. 2.2 Modèle magnétostatique vectorielle :

Dans ce modèle, les courants électriques ne sont pas nuls. Il vient alors que :

$$\overline{\text{rot}}\vec{H}=\vec{j} \quad (\text{II.18})$$

$$\text{div}\vec{B}=0 \quad (\text{II.19})$$

$$\vec{B} = \mu\vec{H} \quad (\text{II.20})$$

La relation $\text{div}\vec{B}=0$, permet de définir une fonction vectorielle \vec{A} appelée potentiel vecteur magnétique, tel que :

$$\vec{B}=\overline{\text{rot}}\vec{A} \quad (\text{II.21})$$

D'où le système d'équation :

$$\overline{\text{rot}}(\nu\overline{\text{rot}}\vec{A})=\vec{j} \quad (\text{II.22})$$

II. 5.3 Modèle magnétodynamique [33]

Ce modèle convient aux appareils électromagnétiques dans lesquels le courant ou la tension source change avec le temps. Autrement dit, lorsque la variation du vecteur champ magnétique avec le temps est non nulle, les champs électrique et magnétique sont connectés du fait de la présence de courants de Foucault.

Ce modèle est largement utilisé dans la recherche des machines électriques, des appareils de chauffage par induction, etc.

En se basant sur les équations de JC Maxwell, il est possible de formuler des équations qui décrivent l'évolution spatio-temporelle des phénomènes électromagnétiques.

Il y a plusieurs formulations en électromagnétisme. Parmi celles-ci, on opte pour la formulation en champ électrique. \vec{E} . [33]

En termes d'équations, nous avons :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.23})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}}\vec{H} = \vec{j} \quad (\text{II.24})$$

A ces équations, nous ajoutons les lois caractéristiques du milieu :

$$\vec{B} = \mu\vec{H} \quad (\text{II.25})$$

$$\vec{D} = \epsilon\vec{E} \quad (\text{II.26})$$

En prenant le rotationnel :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\overrightarrow{\text{rot}}\vec{E} = -\overrightarrow{\text{rot}}\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.27})$$

Remplaçant l'équation (II.25) dans (II.27), on obtient :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\overrightarrow{\text{rot}}\vec{E} = -\overrightarrow{\text{rot}}\frac{\partial \mu\vec{H}}{\partial t} = -\frac{\partial \overrightarrow{\text{rot}}\mu\vec{H}}{\partial t} \quad (\text{II.28})$$

On considère μ constante dans le temps, d'où l'équation précédente devient :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\overrightarrow{\text{rot}}\vec{E} = -\mu\frac{\partial \overrightarrow{\text{rot}}\vec{H}}{\partial t} \quad (\text{II.29})$$

Finalement on obtient :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\overrightarrow{\text{rot}}\vec{E} = -\mu\frac{\partial \vec{j}}{\partial t} \quad (\text{II.30})$$

Avec :

$\text{div}\vec{E}=0$ (pas de charge)

On a:

$$\Delta\vec{E}=\mu\frac{\partial\vec{j}}{\partial t} \quad (\text{II.31})$$

Où :

$$(\text{div}\overrightarrow{\text{grad}})\vec{E}=\mu\frac{\partial\vec{j}}{\partial t} \quad (\text{II.32})$$

II.6. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes formulations du problème électromagnétique ainsi que les outils mathématiques pour la modélisation des matériaux SH Tc. Nous nous intéressons particulièrement au modèle magnétodynamique dans un milieu supraconducteur, la formulation en potentiel vecteur magnétique \vec{A} a été également retenue.

La modélisation du comportement électromagnétique des supraconducteurs, réalisée par une approche numérique, se heurte à plusieurs difficultés. Une approche numérique de modélisation des matériaux supraconducteurs a été développée à l'aide du logiciel PSIM. Elle repose sur la résolution des équations de Maxwell, qui sont fortement non linéaires. L'étude des disjoncteurs supraconducteurs et leur effet sur les structures de protection - disjoncteurs supraconducteurs, ainsi que la simulation d'un disjoncteur supraconducteur, feront l'objet du troisième chapitre.

CHAPITRE III

Application sur le calcul
des courants
de Court-circuit

III.1. Introduction

Le savoir-faire en matière de construction et de dimensionnement des réseaux d'énergie électrique exige la connaissance du comportement lors d'un court-circuit. Les contraintes thermique et mécanique des conducteurs doivent être vérifiées non seulement avec le courant maximal d'emploi mais, le conducteur doit supporter un courant de court-circuit qui peut atteindre plusieurs kilo ampères dans les réseaux moyens tension.

En matière de protection et de bon fonctionnement des réseaux électriques, l'élément de base chargé de cette fonction est le disjoncteur. Pour qu'un disjoncteur fonctionne correctement, il faut que son pouvoir de coupure doive être supérieur au courant maximum d'un court-circuit $pdc > I_{CC\ triphasé}$ [22].

Nous exposons dans ce chapitre les principales possibilités du court-circuit sous logiciel PSIM qui destiné à l'électrotechnique et permettant de modéliser des phénomènes électromécaniques.

III.2. Définition de courant de court-circuit

Un courant de court-circuit se produit généralement lors de la fermeture d'un circuit électrique quelconque sur impédance nulle ou de faible valeur. C'est le cas d'une mise à la terre accidentelle d'une ou plusieurs phases d'un réseau ou d'un matériel électrique. C'est le cas également d'une connexion accidentelle entre phases ayant une impédance négligeable pour la limitation du courant de court-circuit.

On dit aussi que c'est un courant de défaut dès lors que cela représente un fonctionnement anormal du système et de cet équipement. Les courants de défaut sont caractérisés par des valeurs très élevées. [35]

III.3. Origines d'un courant de court-circuit

Les causes d'un court-circuit peuvent être diverses :

- **Conditions atmosphériques** : coup de foudre, vent, tempête, ... etc. dans ces conditions climatiques sévères, des claquages diélectriques ou la destruction partielle de matériel.
- **Viellissement du matériel** : ce phénomène engendre des ruptures ou défaillances locales pouvant engendrer des courts-circuits.

- **Défaut d'isolation** : ce défaut est souvent l'origine des courts-circuits. Dans ce cas l'isolant n'est plus en mesure d'assurer sa fonction d'isolation conduisant à un contact entre phases ou entre spires d'un transformateur par exemple.
- **Défaut de manœuvre et erreurs humaines.**
- **Animaux** : les oiseaux sont souvent à l'origine de court-circuit. Le cas de la cigogne du Portugal est célèbre. En effet, en mai 2000, une des ailes d'une cigogne s'est coincée entre deux phases d'une ligne aérienne du réseau électrique portugais. Une réaction inappropriée des protections a conduit à une panne électrique englobant environ la moitié des réseaux portugais.

III.4. Effets et conséquences d'un courant de court-circuit

Les effets et conséquences d'un courant de court-circuit sont extrêmement néfastes pour le matériel et les équipements du réseau électrique. En effet, le matériel électrique installé sur les réseaux électriques n'étant pas dimensionnés pour supporter des valeurs de courant très élevées. Ces courants vont donc faire subir au matériel des contraintes d'échauffement excessives pouvant entraîner leur destruction. Des dysfonctionnements divers, notamment au niveau des matériels de mesure ou des transformateurs de courant ainsi que de télécommunication, peuvent aussi être observés. Il est donc indispensable de protéger ce matériel contre le court-circuit. Cette fonction est assurée généralement par un appareil pouvant couper des courants très élevées : les disjoncteurs.^[36]

III.5. Type de défauts

La figure III.1 expose les différents types de court-circuit, il s'agit :

- Triphasé.
- Biphasé isolé.
- Biphasé à la terre.
- Monophasé sans impédance de court-circuit.
- Monophasé avec impédance de court-circuit.

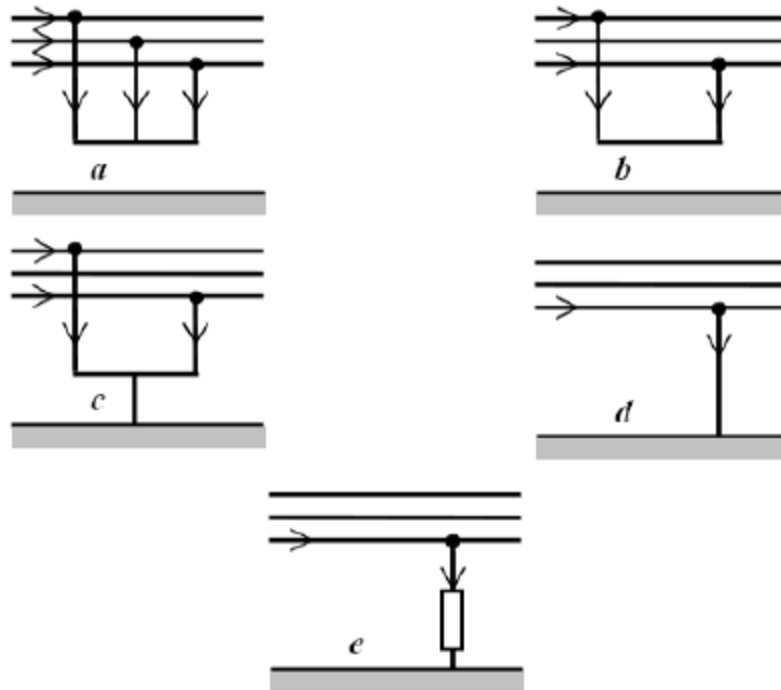


Figure III.1 : Différent type de défaut [23] .

III.6. Conséquences des courants de court-circuit

Les conséquences des courants de court-circuit varient en fonction du type et de la durée du court-circuit, du point concerné du réseau et de l'intensité.

Au point de défaut, la présence d'un arc de défaut peut entraîner la détérioration des isolants, la fusion des conducteurs, ainsi que des risques d'incendie et de danger pour les personnes.

Pour les circuits défectueux, cela peut provoquer la déformation des jeux de barres et l'arrachement des câbles.

En ce qui concerne les autres circuits électriques du réseau, on observe des creux de tension pendant et après la durée d'élimination du défaut, la mise hors service d'une partie plus ou moins grande du réseau suivant son schéma et la sélectivité des protections, ainsi que l'instabilité et/ou la perte de synchronisme des machines influencées par le court-circuit. [22]

Nous utilisons le logiciel de simulation de circuits PSIM pour analyser les formes d'onde et les amplitudes de courant lors de court-circuit aux bornes de récepteurs monophasés, biphasés et triphasés alimentés par un réseau basse tension.

Le modèle qui utilise les propriétés supraconductrices pour simuler un limiteur de courant de défaut est exposé sur la figure III.2.

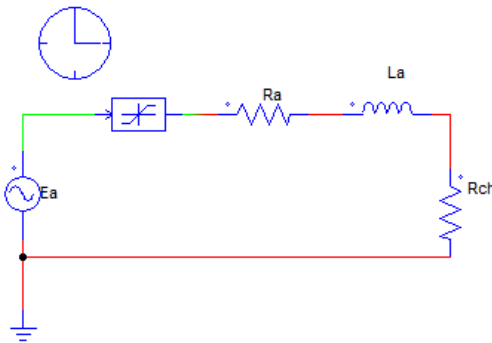


Figure III. 2: Circuit de simulation de modèle électrique de limiteur.

III.7. Simulation et interprétation des résultats :

III.7.1. Pour récepteur monophasé :

III.7.1.1. Circuit sans défaut et sans limiteur :

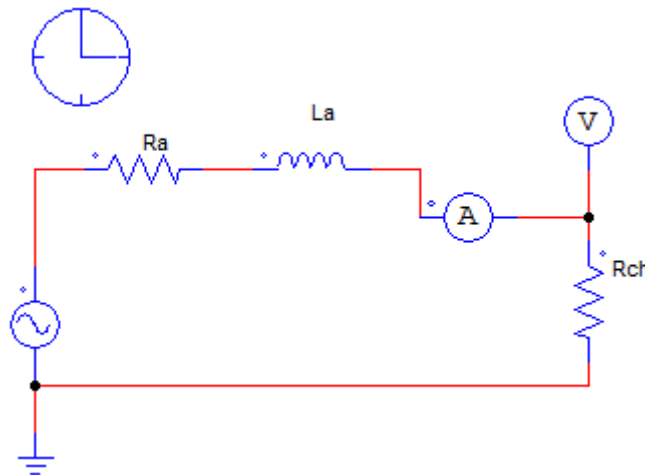


Figure III.3: Schéma électrique de modèle étudié.

Les différents paramètres de simulation :

$$E_a = 230 V, \quad f = 50Hz$$

$$R_a = 2\Omega, L_a = 70\mu H; R_{ch} = 40\Omega;$$

Graphes de $V_a(t)$ et $I_a(t)$:

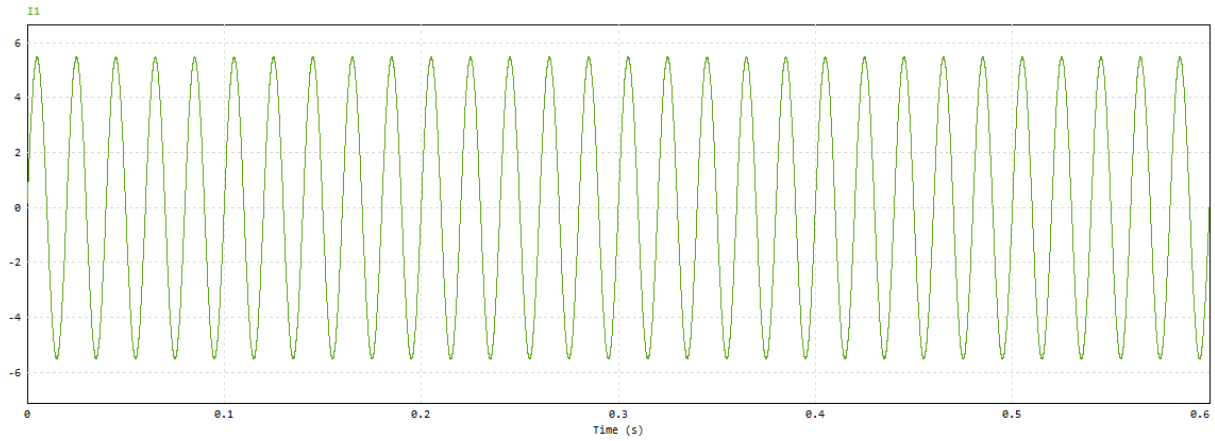


Figure III.4: Allure de courant $I_a(t)$.

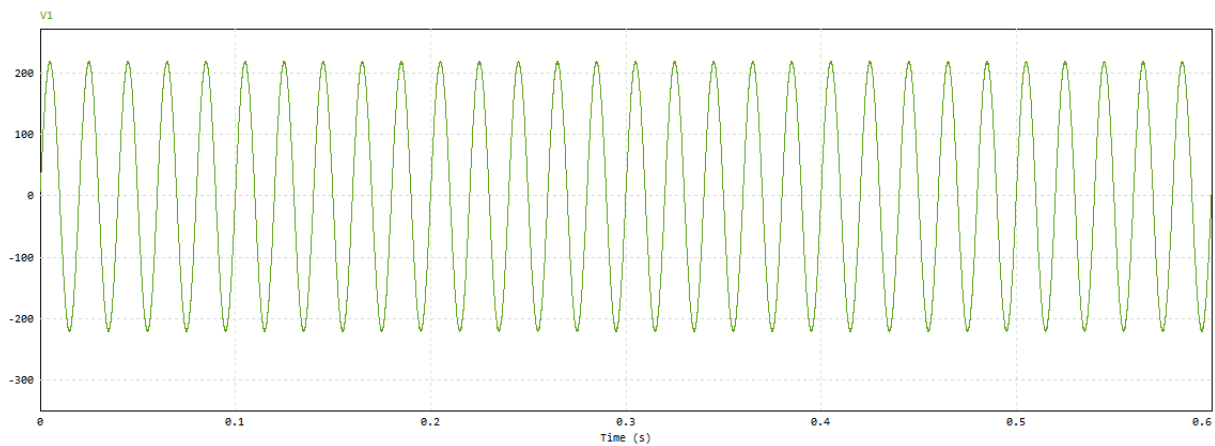


Figure III.5 : Allure de tension $V_a(t)$.

Courant de ligne $I_a(t): I_a(t) = \frac{E_a}{\Sigma R} = \frac{230}{42} = 5.47A$

La tension nominale $V_a(t) = 219V$

III.7.1.2. Circuit sans défaut et avec limiteur

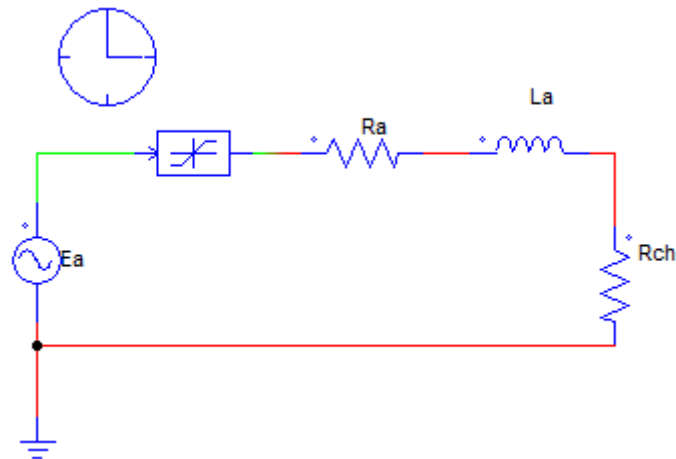


Figure III.6: Schéma de simulation.

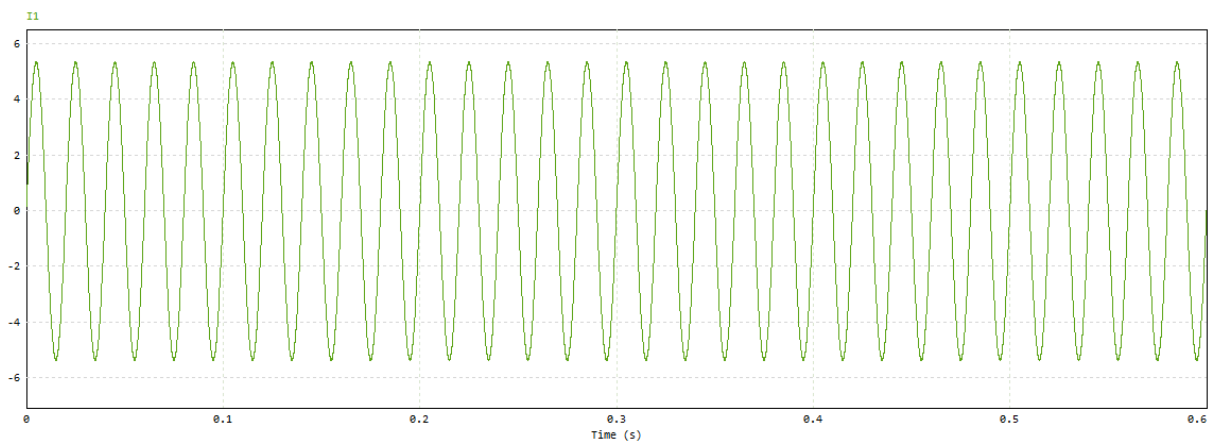


Figure III.7: Allure de courant $I_a(t)$.

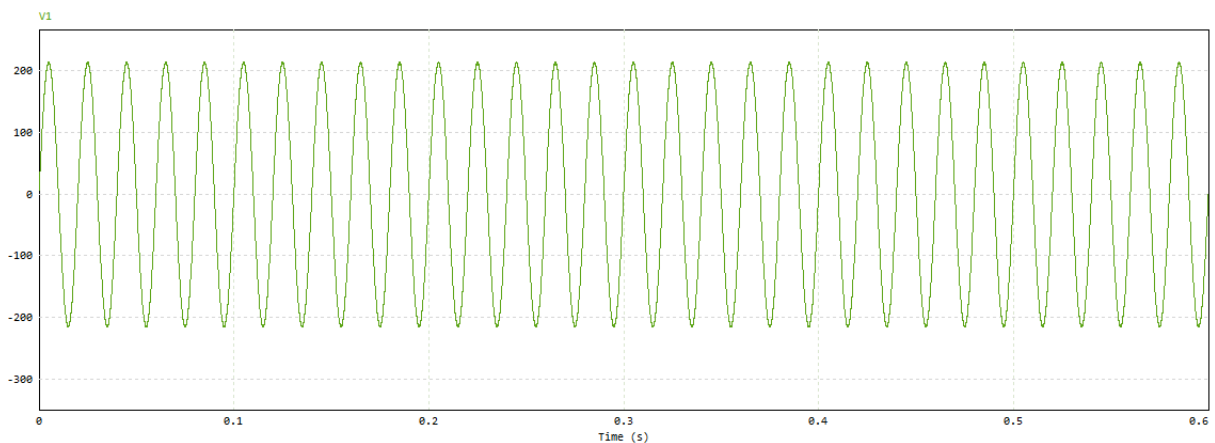


Figure III.8: Allure de tension $V_a(t)$.

On observe que $V_a = 219V$ et $I_a = 5.47A$ sont les mêmes valeurs trouvées dans le circuit sans défaut et sans limiteur, car le limiteur se comporte comme un élément de résistance négligeable dans le circuit étant donné que $J < J_c$ (absence de défaut).

III.7.1.3 Circuit avec défaut et sans limiteur

À l'instant $t = 55 \text{ ms}$, un court-circuit est appliqué aux bornes de la charge. La simulation est réalisée sur une durée de 60 ms pour une meilleure lisibilité.

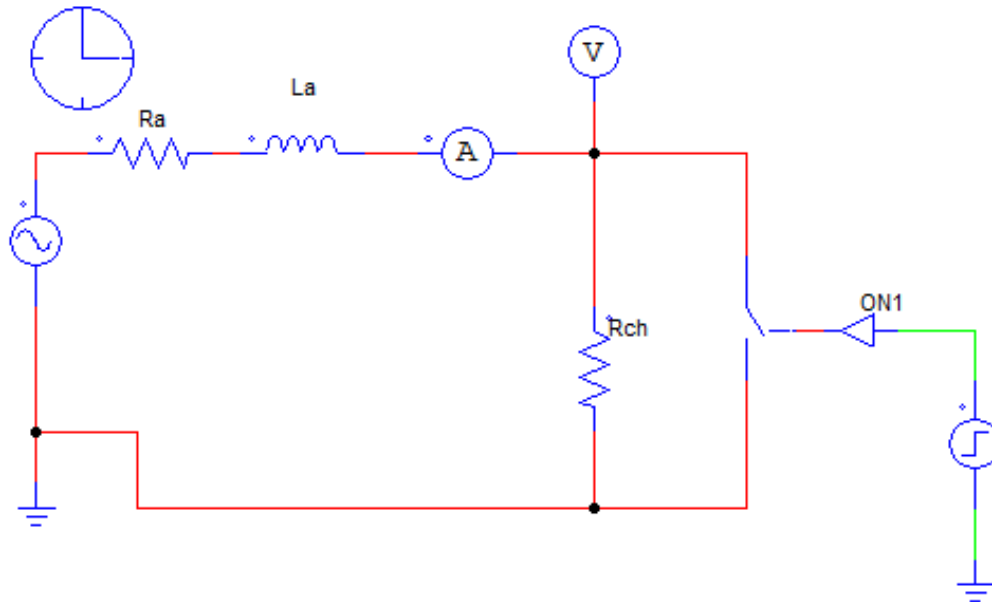


Figure III.9: Schéma de simulation.

Les graphiques ci-dessous, illustrent le courant (I_a) et (I_{cc}), ainsi que la tension dans la ligne.

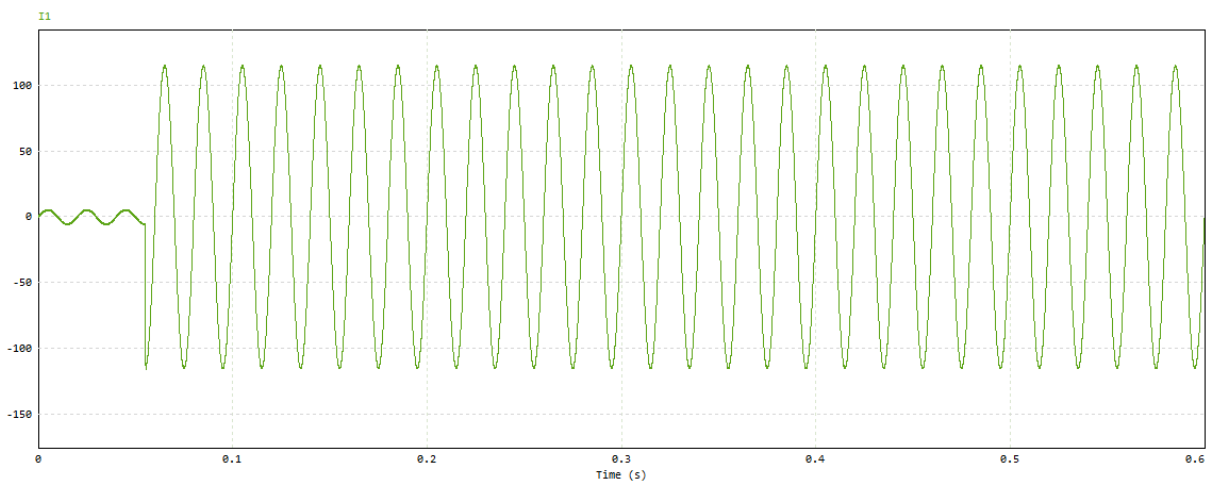


Figure III.10: Allure de courant $I_a(t)$.

$$I_n = 5.47A \text{ et } I_{cc} = 114.84A \Rightarrow \text{donc } I_{cc} = 20 I_n$$

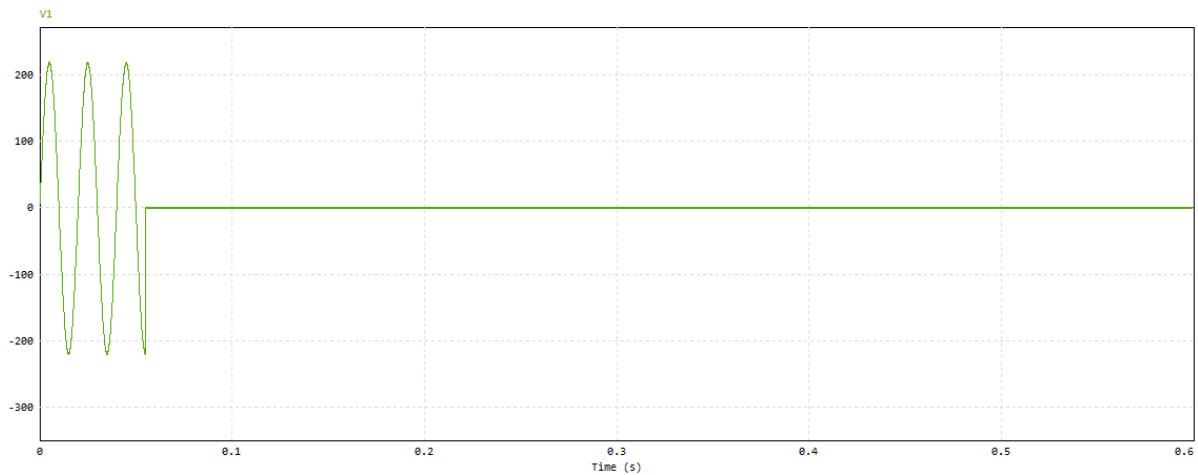


Figure III.11: Allure de tension $V_a(t)$.

Après l'apparition d'un court-circuit à l'instant $t=55$ ms, la tension dans la ligne est devenue nulle : $V_a=0$.

III.7.1.4 Circuit avec défaut et avec limiteur

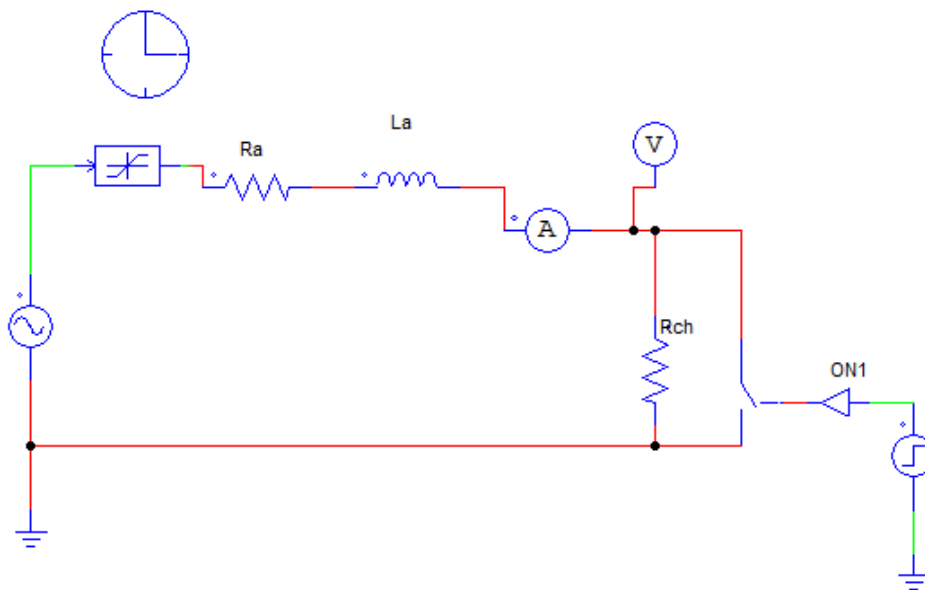


Figure III.12: Schéma de simulation.

Une fois le limiteur est inséré, on voit clairement que le courant de court-circuit est limité à une nouvelle valeur de 57.5 A.

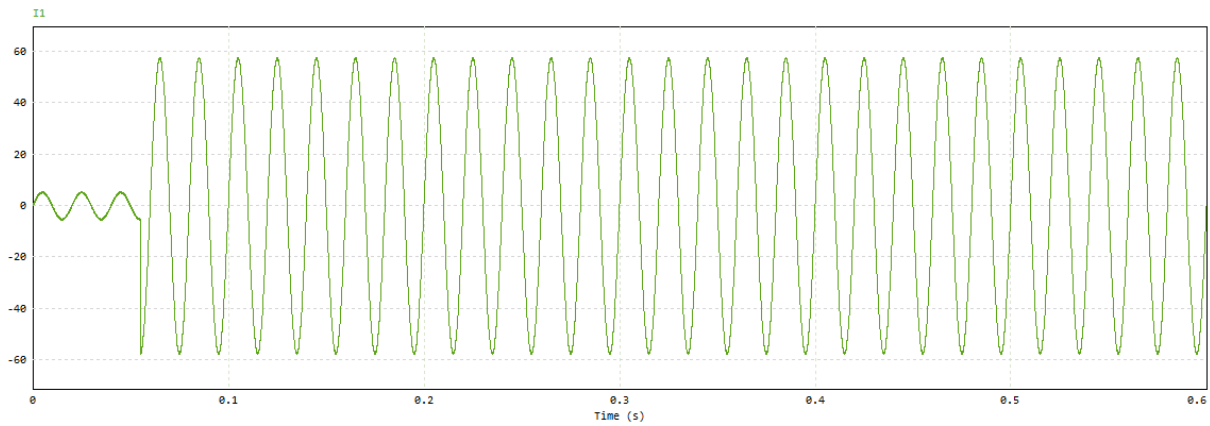


Figure III.13: Allure de courant $I_a(t)$.

Sur la figure III.14, la tension aux bornes de la charge est clairement représentée comme étant toujours nulle pour $t \geq 0,055$ s, soit $V = 0$ V.

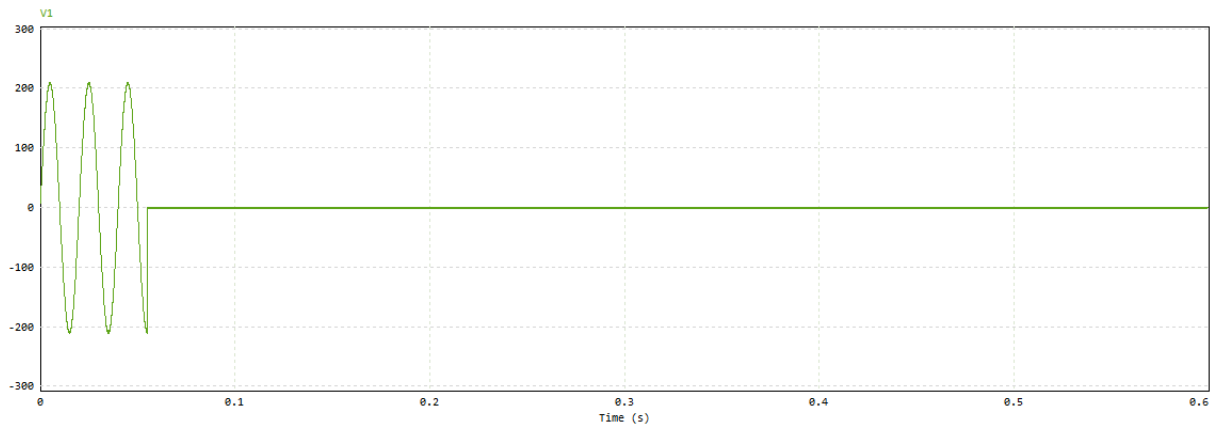


Figure III.15 :Allure de tension $V_a(t)$.

$$I_{cc}(\text{avant limitation}) : 114.84A = 20I_n$$

$$I_{cc}(\text{après limitation}): 57.5A = 10I_n$$

Le dispositif SFCL limite le courant de court-circuit de 114,84A à une nouvelle valeur de 57,5A. Lorsqu'un défaut se produit à $t > 0,055$ s, le courant de défaut est donc réduit de moitié par rapport au courant sans limitation, ce qui représente un écart significatif.

III.7.2 Pour un récepteur triphasé

III.7.3 Cas d'un court-circuit biphasé

III.7.3.1 Circuit sans défaut et sans limiteur

Le circuit de simulation est alimenté par des sources de tension alternatives (E1, E2, E3) connectées à des inductances et des résistances en série, ainsi qu'à des résistances de charge, comme indiqué sur la (Figure III.15).

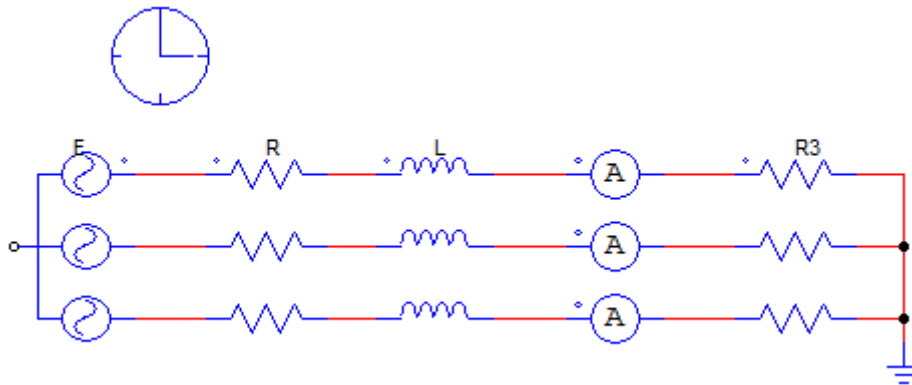


Figure III.16: Schéma de simulation.

Graphes de $V_a(t)$ et $I_a(t)$: pour les 3 Phases :

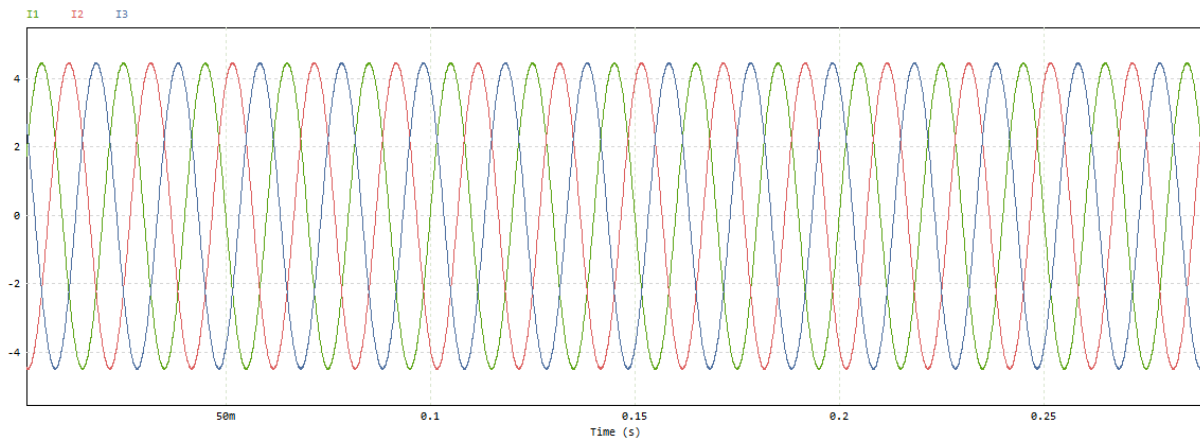


Figure III.17: Allure des courants dans les trois phases I_1, I_2, I_3 .

Le courant nominal est égal 4.47A donc : $I_1 = I_2 = I_3 = I_n = 4.47A$

III.7.3.2 Circuit sans défaut et avec limiteur

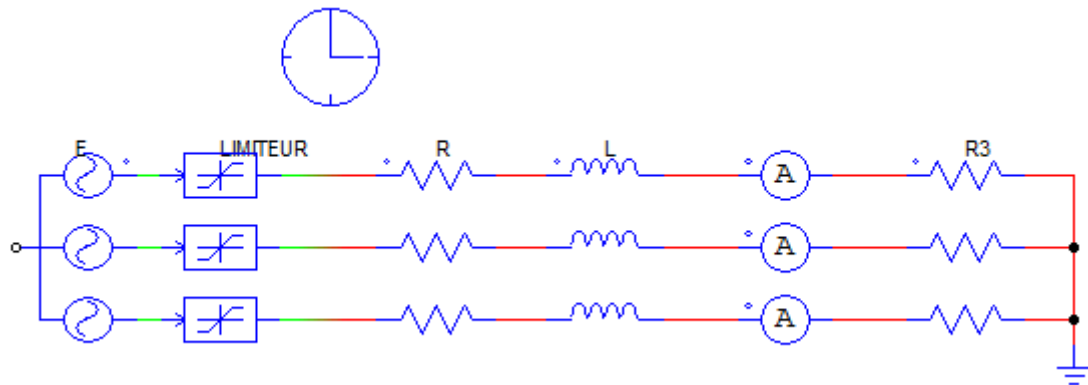


Figure III.18: Schéma de simulation.

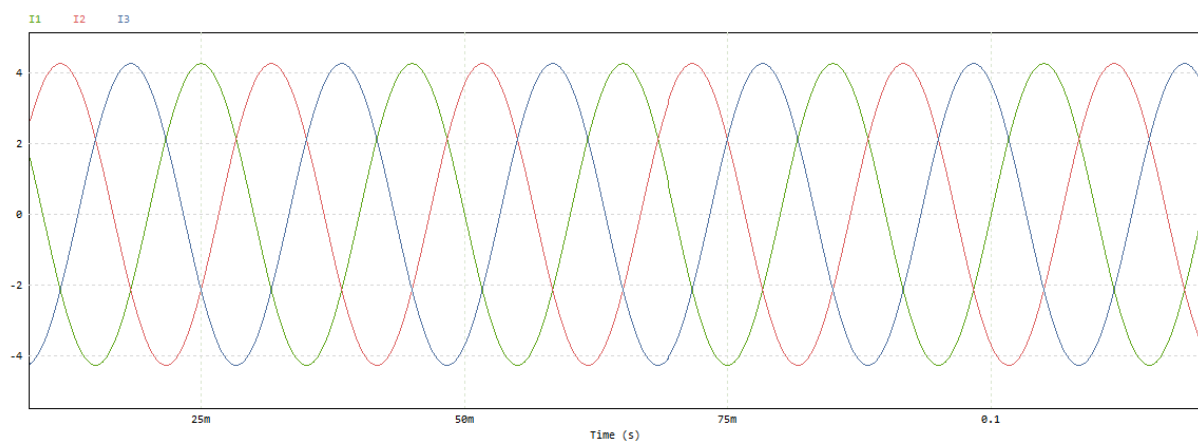


Figure III.19 : Allure des courants dans les trois phases I₁, I₂, I₃.

Interprétation : Les limiteurs agissent comme des éléments de résistance négligeable dans le circuit car $J < J_c$ (absence de défaut).

III.7.3.3 Circuit avec défaut et sans limiteur

Lors d'un court-circuit entre deux phases (phase 1 - phase 2), nous avons étudié I_{cc} à l'instant $t=55$ ms.

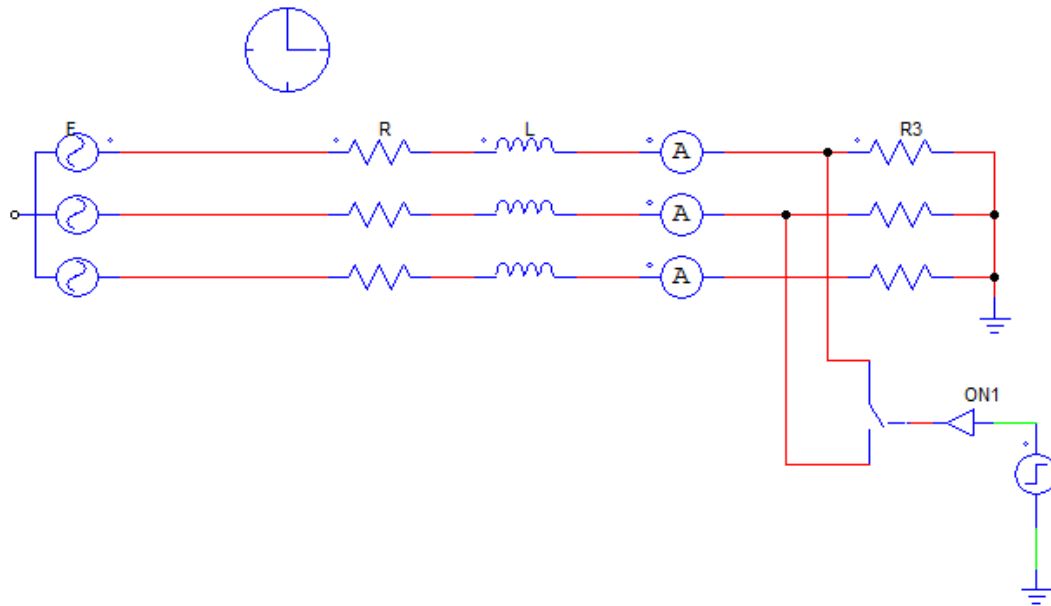


Figure III.20: Schéma de simulation.

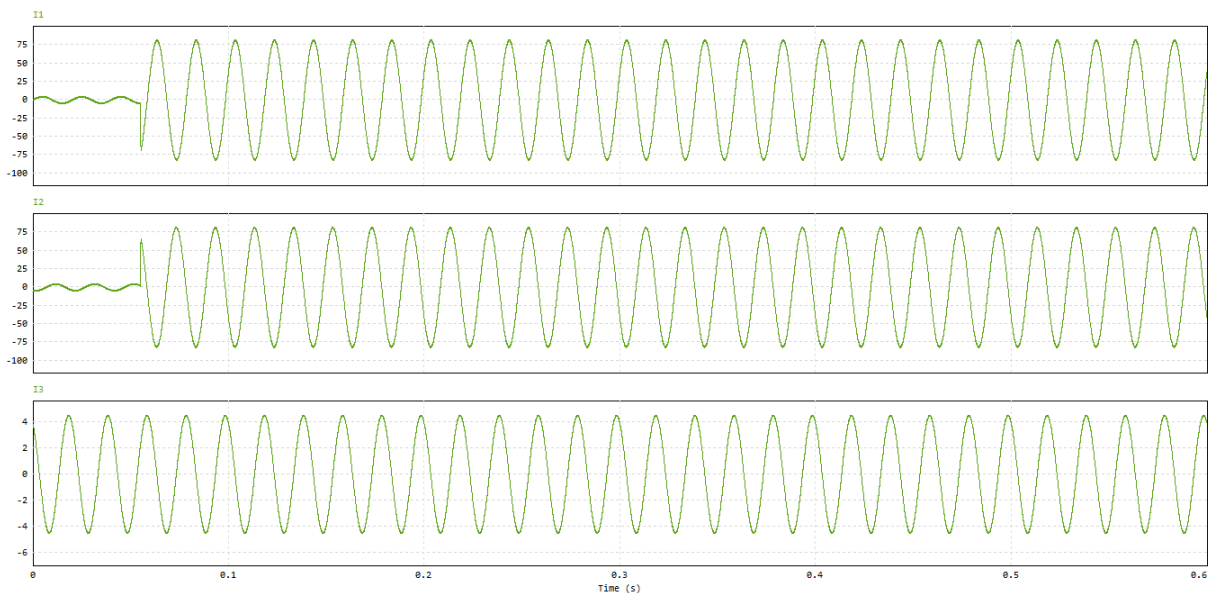


Figure III.21: Allure des courants I_1, I_2, I_3 .

Les résultats de simulations indiquent qu'un court-circuit s'est produit aux bornes de la charge à l'instant $t=55\text{ms}$. Les deux courants dans la ligne (1 et 2) avant limitation étaient d'environ $I_{cc1}=I_{cc2}=81.25\text{A}$, ce qui représente environ 18 fois I_n .

III.7.3.4 Circuit avec défaut et avec limiteur :

Le court-circuit est appliqué ou borne de la charge toujours à l'instant $t=55\text{ms}$ avec l'insertion d'un limiteur supraconducteur.

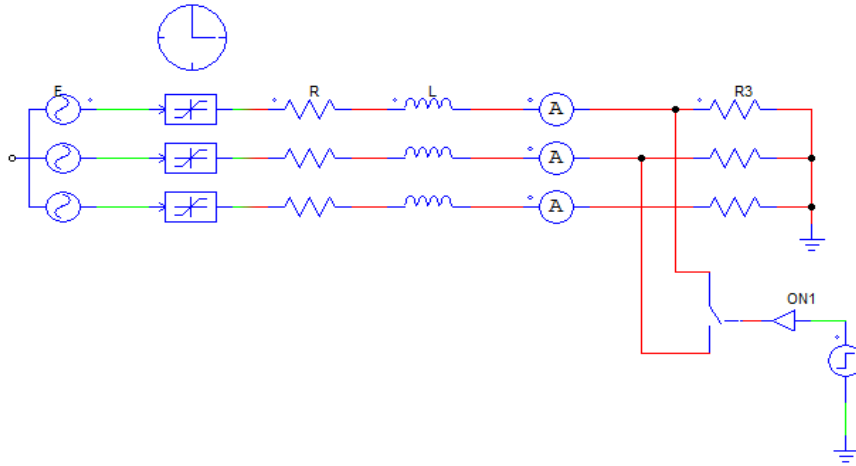


Figure III.22: Schéma de simulation.

Le court-circuit aux bornes de la charge est survenant à l'instant $t=55\text{ms}$. les courbes ci-dessous Figure 3.22 représentent les courants dans la ligne (1 et 2) après limitation qui vaut environ : $I_{cc1}=I_{cc2}=81.25\text{A}$ (ce qui représente environ 18 fois I_n).

Après limitation : $I_{cc1}=I_{cc2}=18I_n$

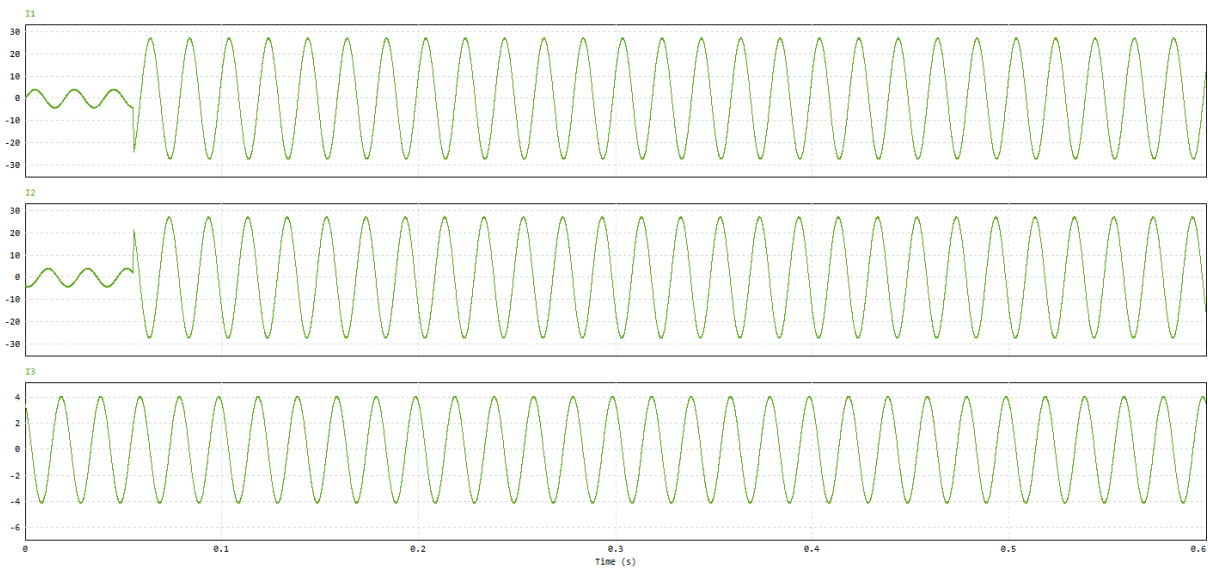


Figure III.23: Allure des courants I_1, I_2, I_3 .

III.7.4 Cas d'un court-circuit triphasé

III.7.4.1 Circuit sans défaut et sans limiteur

Dans ce cas l'élément de limitation de courant (limiteur supraconducteur), n'est pas inséré dans le circuit.

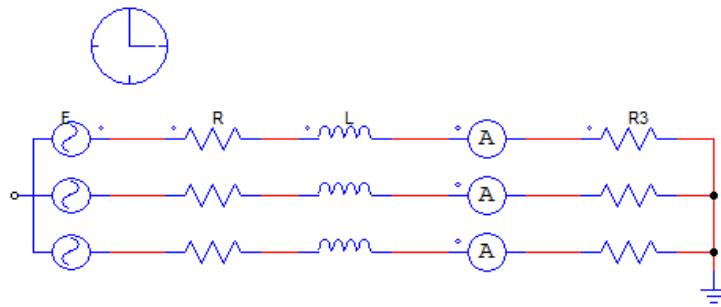


Figure III.24: Schéma de simulation.

Graphes de $V_a(t)$ et $I_a(t)$: pour les 3 Phases :

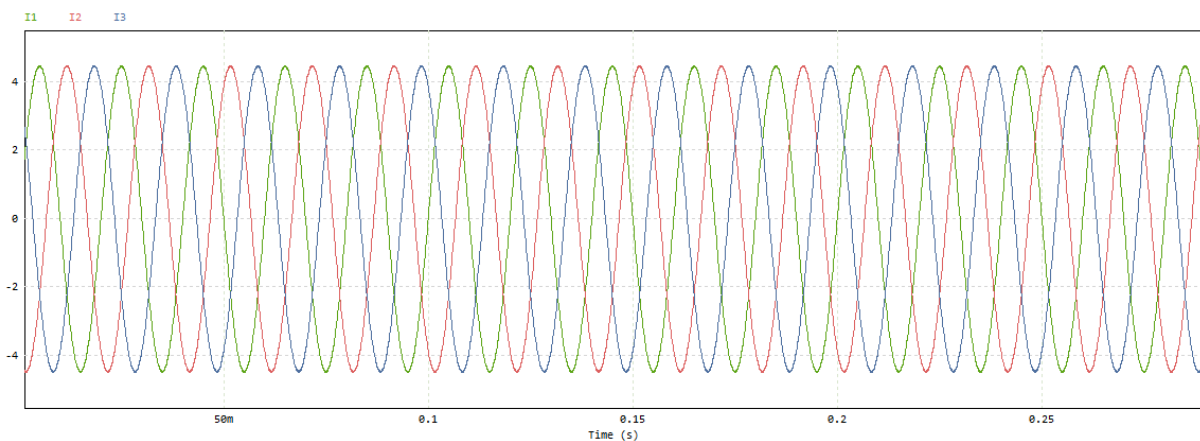


Figure III.25: Allure des courants dans les trois phases I_1, I_2, I_3 .

Le courant nominal est égal 4.47A donc : $I_1 = I_2 = I_3 = I_n = 4.47A$

III.7.4.2 Circuit sans défaut et avec limiteur

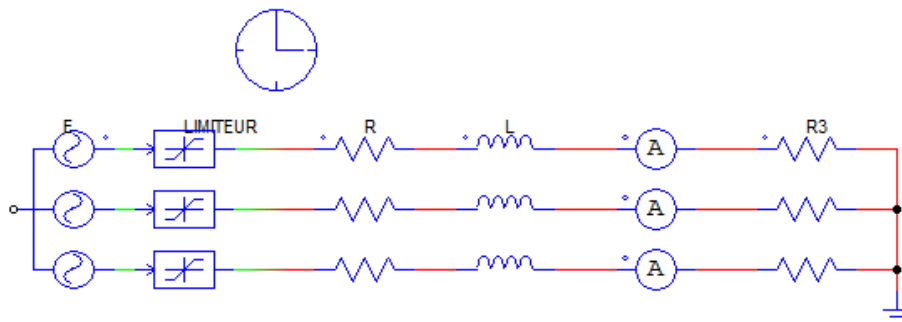


Figure III.26: Schéma de simulation.

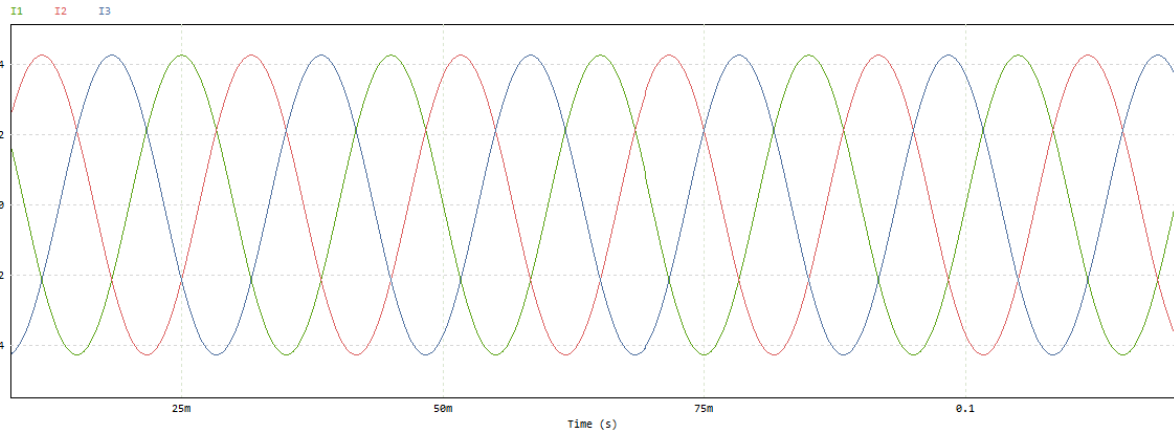


Figure III.27: Allure des courants dans les trois phases I_1, I_2, I_3 .

Les limiteurs se comportent comme des éléments de résistance négligeable dans le circuit car $J < J_c$ (pas de défaut).

III.7.4.3 Circuit avec défaut et sans limiteur

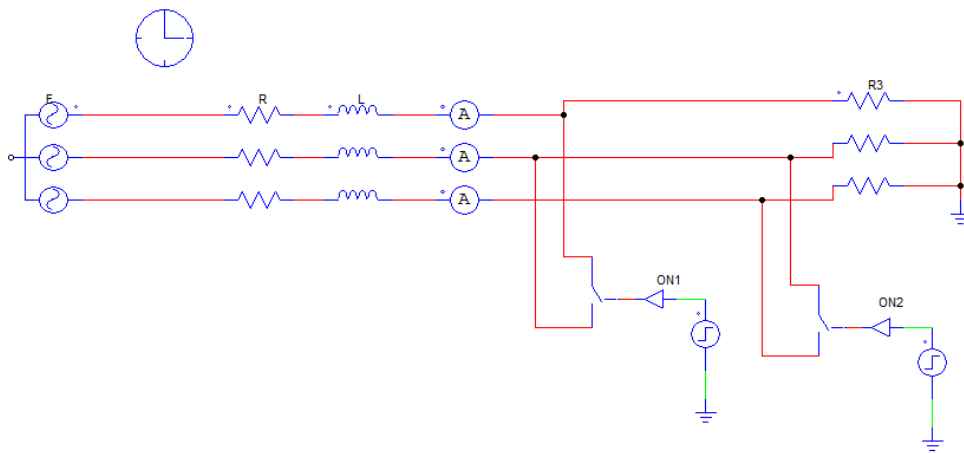


Figure III.28: Schéma de simulation.

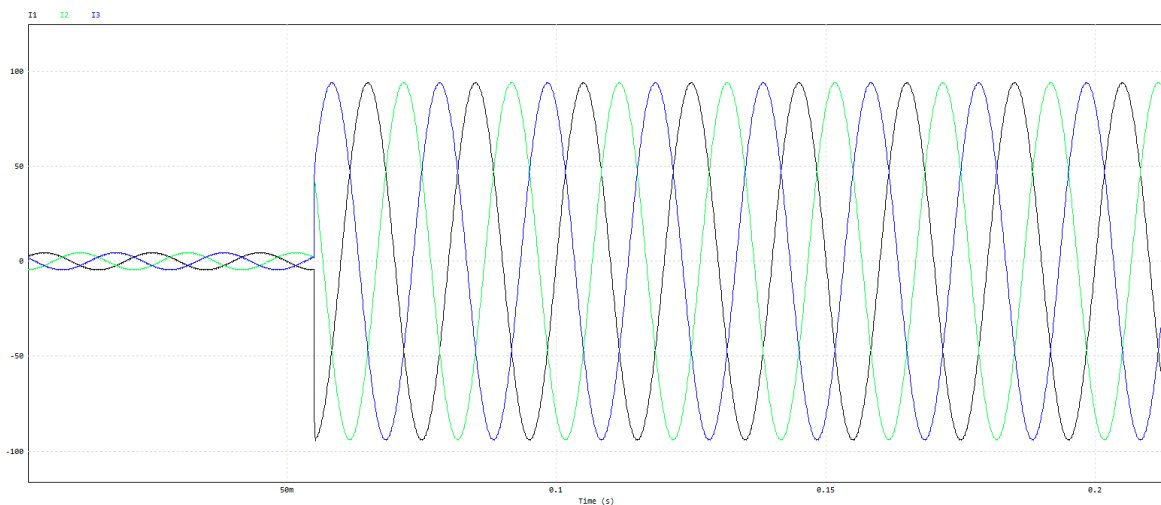


Figure III.29: Allure des courants I_1, I_2, I_3 .

On a appliqué un court-circuit à l'instant 55 ms, donc le court-circuit est produit aux bornes de la charge de valeur $I_{cc} = 93.75 \text{ A} = 20.97 \times I_n$ c'est une valeur très importante et par conséquent, ce courant de court-circuit est très dangereux sur l'installation et même l'élément de protection (disjoncteur) qui nécessite un pouvoir de coupure élevé, donc il faut limiter ce courant de court-circuit à une valeur acceptable pour que soit contrôlé par le disjoncteur.

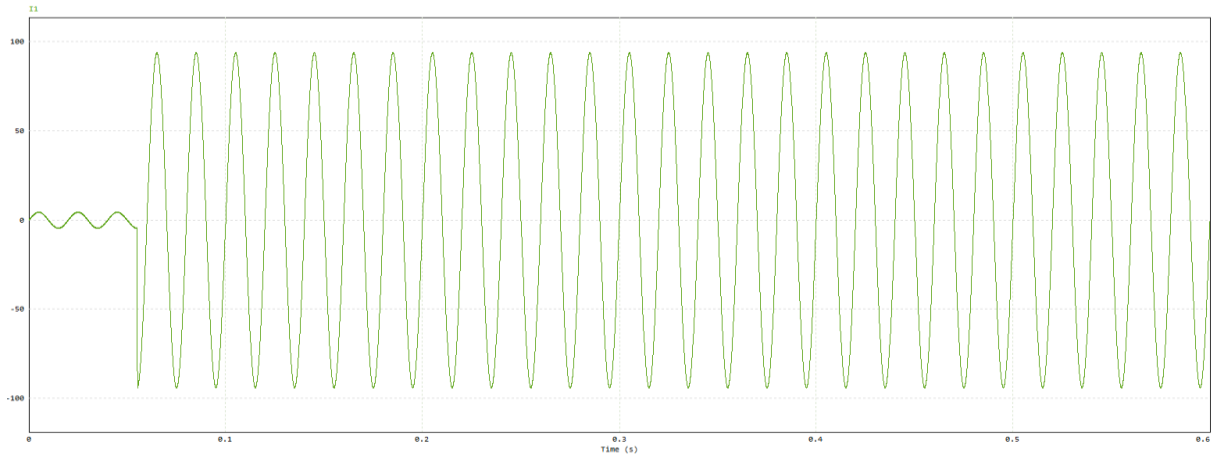


Figure III.30 : Allure de courant I_1 .

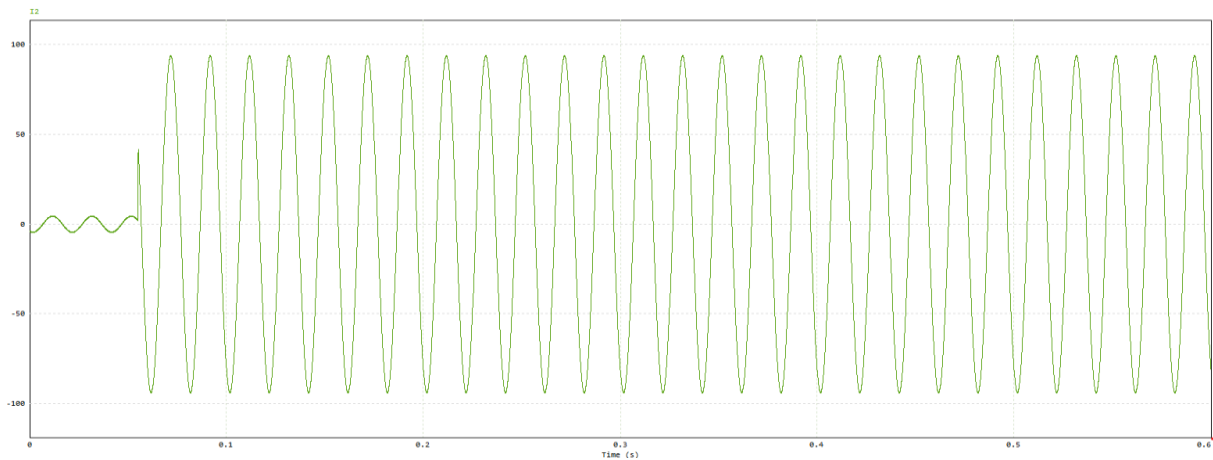


Figure III.31 : Allure de courant I_2 .

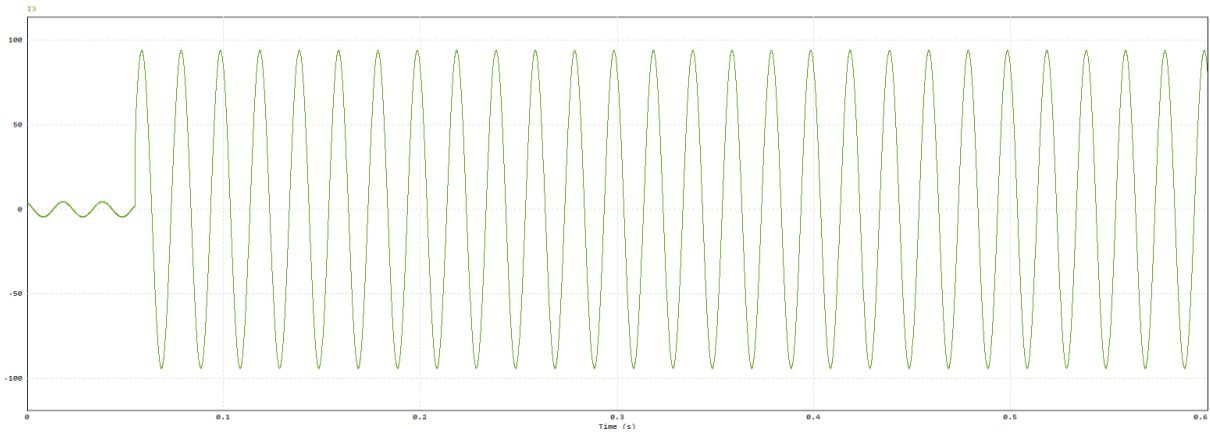


Figure III.32 : Allure de courant I_3 .

III.7.4.4 Circuit avec défaut et avec limiteur

Après avoir intégré un limiteur supraconducteur dans le circuit on a la figure suivante :

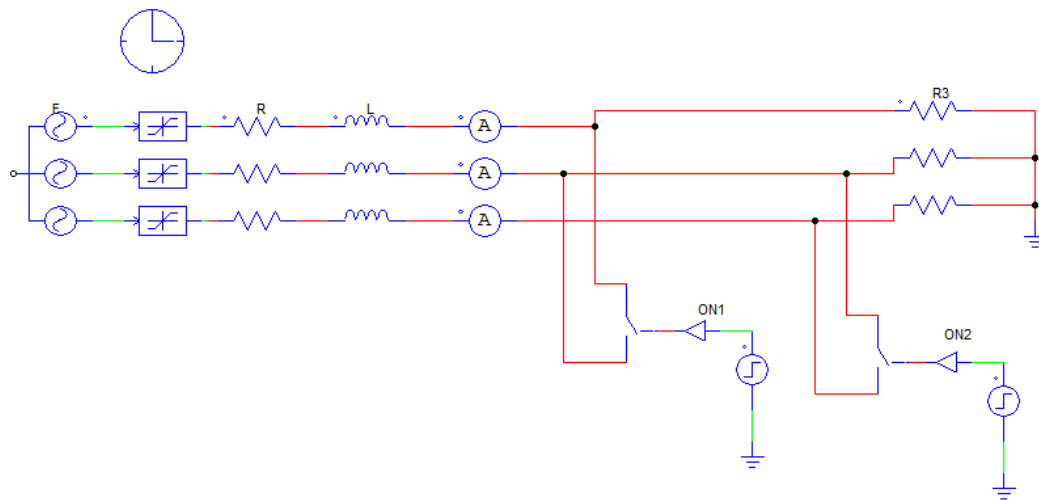


Figure III.33 : Schéma de simulation .

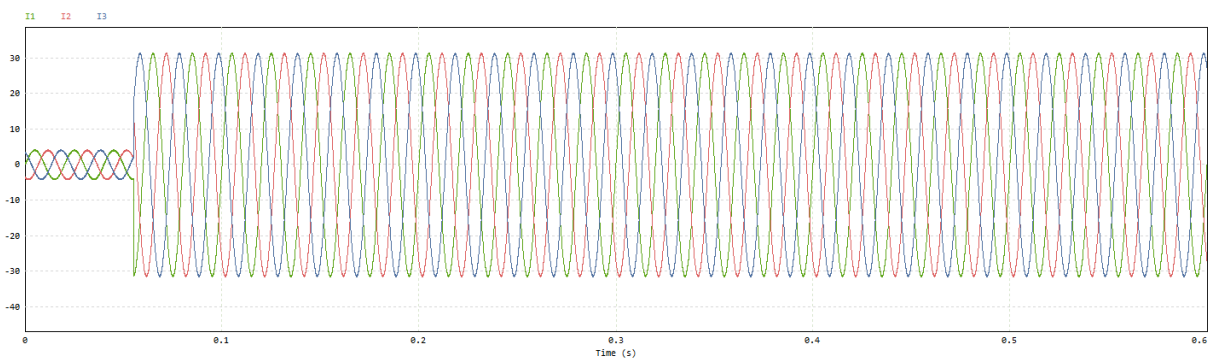


Figure III.34 : Allure les trois courants.

Sur les figures (III. 35 , III. 36, III. 37) on constate clairement que après l'insertion des limiteurs, les courants pendant la période de défaut à $t \leq 0,055$ s $I_n = 4.47A$. à $t \geq 0,055$ s $I_{cc1} = I_{cc2} = 31.25A$ les courants de court-circuit sont réduit d'un facteur important.

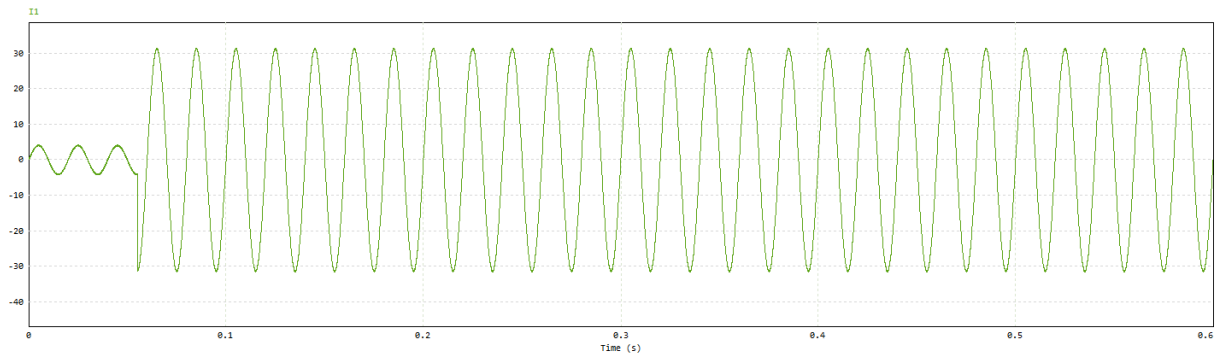


Figure III.38 : Allure de courant I_1 .

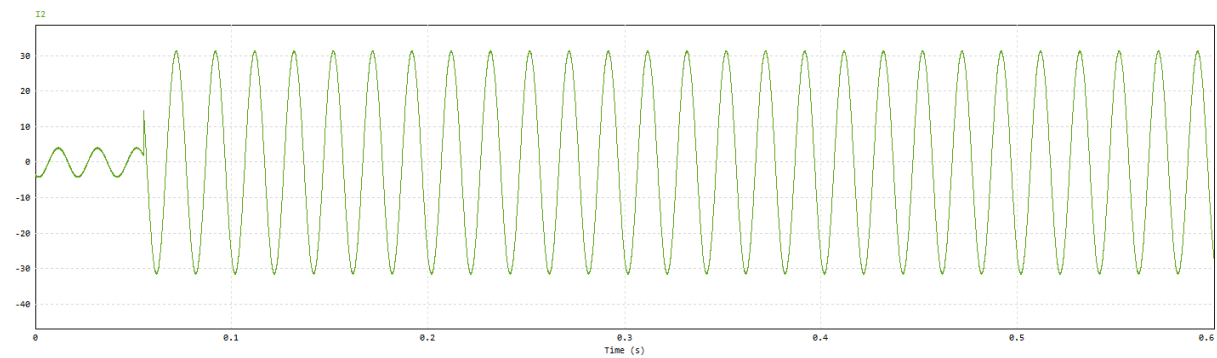


Figure III.39 : Allure de courant I_2 .

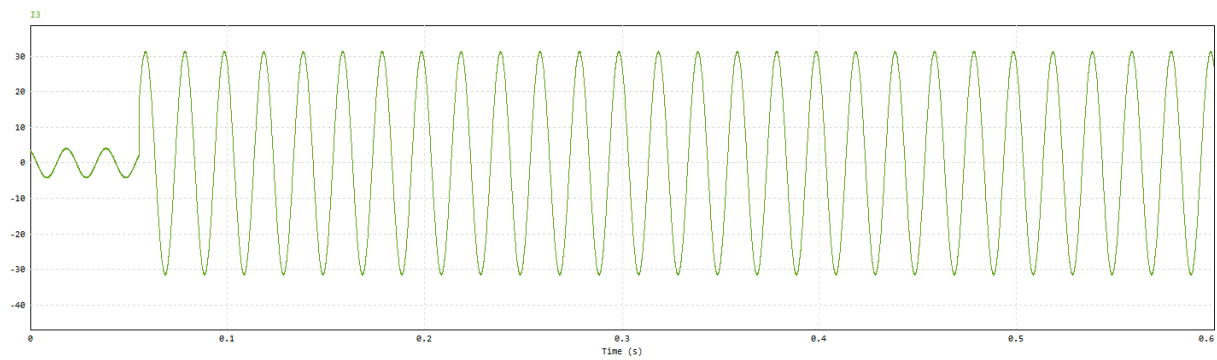


Figure III.40 : Allure de courant I_3 .

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulations de différents types de court-circuit sans et avec limiteur de courant. Pour calculer le courant de court-circuit, plusieurs méthodes ont été conçues pour que le courant de court-circuit puisse être calculé manuellement ou à l'aide de moyens informatiques. La méthode analytique est précise mais nécessite beaucoup de temps de calcul. L'utilisation de la simulation dans le logiciel PSIM présente l'avantage de pouvoir générer des défauts de court-circuit rapidement et sans restrictions. Les résultats de simulation montrent l'intérêt de concevoir un limiteur de courant supraconducteur pour limiter les courants de court-circuit.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Ce travail porte sur l'étude et la modélisation d'un disjoncteur supraconducteur. Notre objectif principal est de comparer les disjoncteurs conventionnels et supraconducteurs. Dans cette optique, nous avons procédé à une analyse indépendante des différents résultats obtenus à l'aide du logiciel approprié.

Les résultats de simulation confirment que les supraconducteurs présentent de nombreux avantages et peuvent être largement utilisés dans les disjoncteurs. Il réduit le courant qui atteint le disjoncteur afin que l'appareil fonctionne au mieux de ses performances et dure le plus longtemps possible.

Nous avons d'abord mené une étude approfondie sur les caractéristiques des matériaux supraconducteurs. Notre premier constat fut que ces matériaux sont largement utilisés dans l'industrie en raison de leur capacité à améliorer efficacement les performances des disjoncteurs, notamment les matériaux supraconducteurs HTC. Leur capacité à fonctionner à des températures élevées et à assurer une conduction électrique sans perte, tout en permettant un stockage d'énergie plus efficace, renforce leur attrait.

Dans notre deuxième chapitre, nous avons mis en évidence l'importance essentielle de la modélisation et de l'étude mathématique des matériaux, étape cruciale avant de les intégrer dans des programmes de simulation. Cette phase préliminaire a lancé les bases de nos analyses ultérieures.

En simulant un disjoncteur supraconducteur, nous avons obtenu des caractéristiques de performance distinctives et efficaces par rapport aux disjoncteurs traditionnels. Nous avons considérablement réduit le courant de court-circuit.

Pour la continuité de ce travail et afin de valider les résultats, on souhaiterait étendre l'insertion de limiteur de courant dans un réseau électrique réel, et comme on sait que toute modélisation n'est pas une fin en elle-même, donc belle et bien, la meilleure perspective comme solution est de réaliser un banc d'essai avec système d'acquisition numérique.

Références bibliographiques:

- [1] **Lévêque, J., Berger, K., Lubin, T., & Douine, B.** (2018). Moteurs et générateurs supraconducteurs. La Revue 3 E. I, 94, 34-35.
- [2] **Belkhiri, S.** (2004). Contribution à l'étude des frontières libres de conduction et des pertes dans les fils supraconducteurs de type II massifs avec la loi de conduction idéale de BEAN (Mémoire de magistère, Batna, Université El Hadj Lakhder. Faculté des sciences de l'ingénieur).
- [3] **Belkhiri, S., Alloui, L., & Mebarek, F. B.**(2019). The Influence of the Geometrical Properties of Bulk Superconductors on Limiting Fault Current in an Electrical Network. Advanced Electromagnetics, 8(4), 136-142.
- [4] **Belkhiri, S., Bouroubi, M., & Harrabi, A.**(2020). Improvement of the Transient Stability of a 14-bus Network Using a Superconducting Fault-Current Limiter SFCL. Advanced Electromagnetics, 9(2), 75-83.
- [5] **Belkhiri, S., Ghemari, Z.**(2022). Comparative Study of Solid and Thin - Layers Superconducting Fault Current Limiters SFCL for Electrical Network Transient Stability Improvement ». Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. vol. 35, n° 3, pp.679-688.
- [6] **Belkhiri, S., Ghemari, Z., Khene, M. L., Ben Mebarek, F. and Saad, S.**(2022). Implantation of Coated Superconducting Materials in the Synchronous Machine for Superconducting Energy Storage ,Journal of New Materials for Electrochemical Systems, vol. 25, n°. 4, pp. 277-285.
- [7] **Tnourji, A.**(2019). les caractéristiques des matériaux supraconducteurs (mémoire de magistère université chermout auverge).
- [8] **Mangin, Ph., KAHN, R.**(2017). Matériaux supraconducteurs. EDP Sciences.
- [9] **Wang, Z. S.** (2012). The superconducting properties research of iron based-122 by transport and scanning micro-squid measurements, Thèse de doctorat, Université de Grenoble ;Académie des sciences de l'Université de Chine.
- [10] **Bouckekhhou, H.**(2019). Étude d'une machine synchrone à base d'éléments supraconducteurs, Thèse de doctorat , Université Mohamed Seddik Benyahia - Jijel.

[11] **Leclerc, J.**(2013). Méthodes et outils de caractérisation électrique et magnétique des supraconducteurs, Thèse de doctorat, Université de Lorraine.

[12] **Tnourji, A.**(2019). Les caractéristiques des matériaux supraconducteurs» Article.

[13] **Elbaa, M.** (2020). Caractérisation et modélisation des matériaux supraconducteurs à haute température critique, Thèse de doctorat, Université de Lorraine; Université de Laghouat (Algérie).

[14] **ABDERREZAKK, A.** (2005). Etude des propriétés structurales, électriques et magnétiques de céramiques supraconductrices YBaCuO et BiSrCaCuO, Thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine.

[15] **BOUMARAF, R.** (2014).Modélisation par la méthode des volumes finis modifiés 3D d'une machine électrique supraconductrice, Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider–Biskra.

[16] **Alhasan, R.**(2015). Étude et Réalisation d'une Nouvelle Structure d'un Moteur synchrone supraconducteur. Thèse doctorat de l'université de Lorraine.

[17] **Mechekkef, Z., Ayadi, A.** (2020).Etude de comportement d'un matériau supraconducteur. Mémoire de Master, Université de Jijel.

[18] **Source :**<http://www.neel.cnrs.fr>.

[19] **Renaud M.**(2010). Dimensionnements et essais de moteurs supraconducteurs, Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy I.

[20] **Stavrev, S.**(2002).Modelling of high temperature superconductors for AC power applications, Thèse de doctorat, école polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL).

[21] **BEN ALIA, Kh.**(2013). ETUDE DES SYSTEMES DE GUIDAGE MAGNETIQUE A BASE DE SUPRACONDUCTEUR HTc, Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider de Biskra.

[22] **Yannick, C.**(2007). Limiteur Supraconducteur de Courant Continu. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 13 décembre.

[23] **BAIXIRAS, J.**(1998). Les Supraconducteurs Applications à l'électronique et à l'électrotechnique, CNRS EDITIONS France.

[24] **KEBBAB, N.** (2007). Les Supraconducteurs, Modèles et Applications, Mémoire de Magister, Université de Batna.

[25] **NEMDILI, S.** (2013). Modélisation et Simulation du Limiteur de Courant Supraconducteur, Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas Sétif-1.

[26] **DAHMANI, H., DOUMIR, S.** (2018). Modalisation des Matériaux Supraconducteurs Application à la Limitation de Courant de Défaut dans un Réseau Electrique à Neuf (9) Jeux de Barres, Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf M'sila.

[27] **KLUTSCH, I.**(2003). Modélisation des supraconducteurs et mesures, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble.

[28] **MARAF, H., NECIB, Zaineb.** (2018). Analyse de L'énergie Dissipative Dans Les Limiteurs de Courant Inductif Pour Les Systèmes D'énergie, Mémoire de Master, Université de Kasdi Merbah Ouargla.

[29] **Rouahna, F.** (2012). Calcul Analytique des Pertes dans les Matériaux Supraconducteurs à Haute Température Critique (SHTc), Mémoire de Master, Université de Biskra,

[30] **Source: B. Gamble, G. Snitchler, T. MacDonald.** Full Power Test of a 36.5 MW HTS Propulsion Motor.

[31] **BELHAMDI, S.**(2021). Modélisation et simulation des systèmes électromécaniques. » Cours M2/S3/EM, Université Mohamed Boudiaf M'sila.

[32] **ABDESSEMED, R.** (2011).Modélisation et simulation des machines électriques, Livre.

[33]**BLMILOUD, R.** (2022). Commande par linéarisation entrée/sortie de la MAS, mémoire de master, Université des Sciences et de la Technologie Mohamed El Bachir El Ibrahimi Bordj Bou Arreridj.

[34] **KHENE,M.L.** (2006). Modélisation des phénomènes électromagnétique dans les structures agéométries complexes par adaptation de la méthode des volumes finis (thèse de Magister,Université de Batna).

[35] : **Zaaboubi Khaled** Soutenu le : 04 Juin 2013 thème Pilotage sous LabVIEWd'un système de protection à max de courant

[36] **J.C.Sabonnadière, N.Hadjsaid**, « Lignes et réseaux électriques 2 », J.C.Sabonnadière, Hermes science, Paris, 2007.