

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE 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 : DJAKDALI AHMED SALAH EDDINE

HAFANI WALID

THEME

**ÉTUDE D'UN LIMITEUR INDUCTIF DE  
COURANT DE DÉFAUT**

Soutenu devant le jury composé de :

Dr. DEFDAF Mabrouk  
Pr. BELKHIRI Salah  
Pr. GHEMARI ZINE

Université Mohamed Boudiaf de M'Sila  
Université Mohamed Boudiaf de M'Sila  
Université Mohamed Boudiaf de M'Sila

Président  
Rapporteur  
Examineur

Année universitaire : 2024 / 2025

# *Remerciements*

Nous exprimons avant tout notre profonde gratitude envers **ALLAH**, le Tout-Puissant, pour nous avoir accordé la force, la persévérance et la volonté nécessaires à l'accomplissement de ce travail.

Nous adressons nos sincères remerciements à notre encadreur, **Pr. BELKHIRI Salah**, pour sa patience, sa disponibilité et la pertinence de ses conseils, qui ont grandement enrichi notre réflexion et orienté notre travail.

À travers ce mémoire, nous tenons également à exprimer notre reconnaissance à l'ensemble de nos enseignants, dont l'engagement et le dévouement ont marqué notre parcours et contribué à notre formation.

Enfin, nous remercions chaleureusement toutes les personnes qui, de près ou de loin, nous ont apporté leur aide et leur soutien tout au long de l'élaboration de ce mémoire.

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*À Ma mère et Mon père*

*À mes frères*

*À toute ma famille*

*À tous mes amis*

*À tous les membres d'Elec club*

*À toute la promotion de génie électrique 2024-2025*

*Salah*

# *Dedications*

*I dedicate this humble work to:*

*My mother and father Those who got tired for me*

*My uncle Nadji May God have mercy on him*

*My brothers*

*All my family*

*All my friends*

*The entire Class of Electrical Engineering 2024–2025*

*Walid*

## ملخص:

إن إدماج المواد فائقة التوصيل ذات درجة الحرارة العالية، مثل YBCO و BSCCO، في شبكات الطاقة الكهربائية، يفتح آفاقًا جديدة للحماية من التيارات القصيرة. وبشكل خاص، فإن استخدام المحددات التحريضية للتيار المعطل (SFCL) يسمح بتجاوز قيود الأجهزة التقليدية من خلال تقديم استجابة سريعة، وتبديد منخفض للطاقة، واستقرار انتقالي أفضل للشبكة. تهدف هذه الدراسة إلى نمذجة وتحليل سلوك محدد تيار فائق التوصيل من النوع التحريضي. والهدف منها هو إظهار، من خلال المحاكاة الرقمية باستخدام برنامج PSIM، المزايا التي توفرها الموصلية الفائقة من حيث تقليل تيار القصر وتحسين موثوقية النظام.

## Résumé

L'intégration des matériaux supraconducteurs à haute température, tels que l'YBCO et le BSCCO, dans les réseaux électriques ouvre de nouvelles perspectives pour la protection contre les courts-circuits. En particulier, l'utilisation de limiteurs inductifs de courant de défaut (SFCL) permet de surmonter les limitations des dispositifs classiques en offrant une réponse rapide, une faible dissipation d'énergie, et une meilleure stabilité transitoire du réseau. Ce travail vise à modéliser et analyser le comportement d'un limiteur de courant supraconducteur de type inductif. L'objectif est de démontrer, à travers des simulations numériques réalisées sous le logiciel PSIM, les avantages qu'apporte la supraconductivité en termes de réduction du courant de défaut et d'amélioration de la fiabilité du système.

## Abstract

The integration of high-temperature superconducting materials, such as YBCO and BSCCO, into electrical power networks opens new perspectives for short-circuit protection. In particular, the use of inductive superconducting fault current limiters (SFCL) helps overcome the limitations of conventional devices by providing fast response, low energy dissipation, and improved transient stability of the network.

This work aims to model and analyze the behavior of an inductive-type superconducting fault current limiter. The objective is to demonstrate, through numerical simulations using PSIM software, the advantages of superconductivity in reducing fault current and enhancing system reliability.

# 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

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

## **CHAPITRE II : Modélisation des matériaux supraconducteurs**

<b>II.1. Introduction :.....</b>	<b>28</b>
<b>II.2. Etat de l'art :.....</b>	<b>28</b>
<b>II.3. Equations mathématiques régissent le phénomène physique :.....</b>	<b>29</b>
<b>II.3.1 Relation B(H) :.....</b>	<b>29</b>
<b>II.3.2. Relation E (J).....</b>	<b>29</b>
<b>II.4. Les Modèles de comportement.....</b>	<b>30</b>
<b>II.4.1. Modèle de l'état critique ou le modèle de Bean.....</b>	<b>30</b>
<b>II.4.2. Le modèle de la loi de puissance .....</b>	<b>30</b>
<b>II.4.3. Modèle de KIM.....</b>	<b>32</b>
<b>II.4.4. Le modèle exponentiel.....</b>	<b>32</b>
<b>II.4.5. Modèle de Flux Flow et Flux Creep.....</b>	<b>32</b>
<b>II. 5. Formulation des Équations Électromagnétiques.....</b>	<b>34</b>
<b>II. 5.1 : Modèle électrostatique [33].....</b>	<b>34</b>
<b>II. 5. 2 Modèle magnétostatique.....</b>	<b>34</b>
<b>II. 5. 2.1 Modèle magnétostatique scalaire : [33].....</b>	<b>35</b>
<b>II. 5. 2.2 Modèle magnétostatique vectorielle :.....</b>	<b>35</b>
<b>II. 5.3 Modèle magnétodynamique [33].....</b>	<b>36</b>
<b>II.6. Conclusion.....</b>	<b>38</b>

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

<b>III.1. Introduction.....</b>	<b>39</b>
<b>III.2. Définition de courant de court-circuit.....</b>	<b>39</b>

<b>III.3. Origines d'un courant de court-circuit.....</b>	<b>40</b>
<b>III.4. Effets et conséquences d'un courant de court-circuit.....</b>	<b>40</b>
<b>III.5. Type de défauts.....</b>	<b>40</b>
<b>III.6. Conséquences des courants de court-circuit.....</b>	<b>41</b>
<b>III.7. Simulation et interprétation des résultats :.....</b>	<b>42</b>
<b>III.7.1. Pour récepteur monophasé :.....</b>	<b>42</b>
<b>III.7.1.1. Circuit sans défaut et sans limiteur.....</b>	<b>42</b>
<b>III.7.1.2. Circuit sans défaut et avec limiteur.....</b>	<b>44</b>
<b>III.7.1.3. Circuit avec défaut et sans limiteur.....</b>	<b>45</b>
<b>III.7.1.4. Circuit avec défaut et avec limiteur.....</b>	<b>46</b>
<b>III.7.2 Pour un récepteur triphasé.....</b>	<b>48</b>
<b>III.7.3 Cas d'un court-circuit biphasé.....</b>	<b>48</b>
<b>III.7.3.1. Circuit sans défaut et sans limiteur.....</b>	<b>48</b>
<b>III.7.3.2. Circuit sans défaut et avec limiteur.....</b>	<b>49</b>
<b>III.7.3.3. Circuit avec défaut et sans limiteur.....</b>	<b>50</b>
<b>III.7.3.4. Circuit avec défaut et avec limiteur.....</b>	<b>51</b>
<b>III.7.4 Cas d'un court-circuit triphasé.....</b>	<b>52</b>
<b>III.7.4.1. Circuit sans défaut et sans limiteur.....</b>	<b>52</b>
<b>III.7.4.2. Circuit sans défaut et avec limiteur.....</b>	<b>53</b>
<b>III.7.4.3. Circuit avec défaut et sans limiteur.....</b>	<b>54</b>
<b>III.7.4.4. Circuit avec défaut et avec limiteur.....</b>	<b>55</b>
<b>III.8 Conclusion.....</b>	<b>58</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>59</b>

# 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 <sub>3</sub> Sn avant traitement thermique.....	16
Figure I.13: Fils supraconducteurs HTC.....	17
Figure I.14: Cellule unitaire de Bi <sub>2</sub> Sr <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>x</sub> 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 <sub>2</sub> Sr <sub>2</sub> CaCu <sub>2</sub> O <sub>8</sub> .....	21
Figure I.16: Variation de la température critique en fonction de $d$ dans Bi <sub>2</sub> Sr <sub>2</sub> CaCu <sub>2</sub> O <sub>7+d</sub> .....	21
Figure I.17: Structure cristallographique d'YBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>y</sub> .....	22
Figure I.18: Variation de la température critique en fonction de $(7-d)$ dans YBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7-d</sub> .....	23
Figure I.19: Représentation schématique d'un câble triphasé en supraconducteur à haute Température critique (SHTC) refroidi à l'azote liquide (LN <sub>2</sub> ) .....	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.1.2 : La variation du champ magnétique extérieur en fonction de $r = x$ . Pénétration du champ magnétique à l'intérieur du supraconducteur .....	30
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 $I_a(t)$ .....	42
Figure III.5 : Allure de tension $V_a(t)$ .....	42
Figure III.6: Schéma de simulation.....	43
Figure III.7: Allure de courant $I_a(t)$ .....	43
Figure III.8 : Allure de tension $V_a(t)$ .....	43
Figure III.9 : Schéma de simulation.....	44
Figure III.10: Allure de courant $I_a(t)$ .....	44
Figure III.11: Allure de tension $V_a(t)$ .....	45
Figure III.12: Schéma de simulation.....	45
Figure III.13: Allure de courant $I_a(t)$ .....	46
Figure III.14 : Allure de tension $V_a(t)$ .....	46
Figure III.15: Superposition d'Allure des courants avant défaut, en défaut sans limiteur et avec défaut avec limiteur.....	47
Figure III.16: Schéma de simulation .....	47
Figure III.17: Allure des courants dans les trois phases I1, I2, I3.....	47
Figure III.18: Schéma de simulation.....	48
Figure III.19 : Allure des courants dans les trois phases I1, I2, I3.....	48
Figure III.20: Schéma de simulation.....	49
Figure III.21: Allure des courants I1, I2, I3.....	49
Figure III.22: Schéma de simulation.....	50
Figure III.23: Allure des courants I1, I2, I3 .....	50
Figure III.24: Schéma de simulation.....	51
Figure III.25: Allure des courants dans les trois phases I1, I2, I3.....	51
Figure III.26: Schéma de simulation.....	52

<b>Figure III. 27: Allure des courants dans les trois phases I1, I2 , I3.....</b>	<b>52</b>
<b>Figure III. 28: Schéma de simulation.....</b>	<b>52</b>
<b>Figure III. 29: Allure des courants I1,I2,I3.....</b>	<b>53</b>
<b>Figure III. 30 : Allure de courant I1.....</b>	<b>53</b>
<b>Figure III. 31 : Allure de courant I2.....</b>	<b>54</b>
<b>Figure III.32 : Allure de courant I3.....</b>	<b>54</b>
<b>Figure III. 33 : Schéma de simulation 32.....</b>	<b>55</b>
<b>Figure III. 34 : Allure les trois courants.....</b>	<b>55</b>
<b>Figure III. 35 : Allure de courant I1.....</b>	<b>55</b>
<b>Figure III. 36 : Allure de courant I2.....</b>	<b>56</b>
<b>Figure III.37 : Allure de courant I3.....</b>	<b>56</b>

## Liste des tableaux

### Chapitre I

<b>Tableau I.1</b> : Supraconducteurs à Basse Température (SBTC) .....	<b>16</b>
<b>Tableau I.2</b> : Supraconducteurs à Haute Température critique (HTC) .....	<b>17</b>
<b>Tableau 1.3</b> : Paramètres critiques des supraconducteurs HTS pour les applications de puissance .....	<b>18</b>

## Liste des symboles et abréviations

<b>J<sub>c</sub></b>	<b>Densité de courant critique</b>	<b>[A/m<sup>2</sup>]</b>
<b>T<sub>c</sub></b>	<b>Température critique</b>	<b>[K]</b>
<b>H<sub>c</sub></b>	<b>Champ magnétique critique</b>	<b>[A/m]</b>
<b>B</b>	<b>Induction magnétique</b>	<b>[T]</b>
<b>μ<sub>0</sub></b>	<b>Perméabilité magnétique a vide</b>	<b>[H/m]</b>
<b>H</b>	<b>Champ magnétique</b>	<b>[A/m]</b>
<b>E</b>	<b>Champ électrique</b>	<b>[V/m]</b>
<b>B</b>	<b>Induction magnétique</b>	<b>[T]</b>
<b>D</b>	<b>Induction électrique</b>	<b>[C/m<sup>2</sup>]</b>
<b>ρ</b>	<b>Densité volumique des charges électriques</b>	<b>[C/m<sup>3</sup>]</b>
<b>LTS</b>	<b>Low Temperature Superconductors</b>	
<b>SMES</b>	<b>Superconducting Magnetic Energy Storage</b>	
<b>BTC</b>	<b>Base température critique</b>	
<b>HTC</b>	<b>Haute température critique</b>	
<b>TAFF</b>	<b>Le thermally activated flux-flow</b>	
<b>K</b>	<b>Constant de Boltzmann</b>	
<b>θ</b>	<b>Température</b>	
<b>ρ<sub>c</sub></b>	<b>Résistivité de Flux Creep</b>	
<b>U<sub>0</sub></b>	<b>Potentiel de profondeur</b>	
<b>ρ<sub>f</sub></b>	<b>Résistivité de Flux Flow</b>	
<b>M</b>	<b>l'aimantation</b>	
<b>I<sub>cc</sub></b>	<b>Courant de court-circuit</b>	
<b>I<sub>lim</sub></b>	<b>Courant après limitation</b>	





# Introduction Générale

# Introduction générale

Les matériaux supraconducteurs, en raison de leurs propriétés exceptionnelles, jouent un rôle de plus en plus important dans le domaine de l'électrotechnique. Depuis leur découverte, ces matériaux ont suscité un intérêt croissant pour leurs applications dans divers secteurs, notamment la production, le transport et la distribution d'énergie. Parmi les applications les plus prometteuses, on trouve l'utilisation des supraconducteurs dans les moteurs et générateurs, ainsi que dans les dispositifs de limitation de courant de défaut, tels que les Limiteurs de Courant Supraconducteur (SFCL), qui sont essentiels pour la protection des réseaux électriques) [1-3].

Les recherches sur les propriétés des matériaux supraconducteurs ont permis d'identifier leurs avantages pour la gestion de l'énergie, notamment leur capacité à fonctionner sans résistance en conditions normales et à offrir une résistance extrêmement élevée en cas de défaut, permettant ainsi de limiter efficacement les courants de court-circuit [4]. De plus, des études comparatives sur les différents types des limiteurs de courant supraconducteurs ont démontré leur efficacité à améliorer la stabilité transitoire des réseaux électriques [5].

Les défis techniques restent nombreux, notamment en ce qui concerne la modélisation et l'optimisation des dispositifs supraconducteurs pour des applications à grande échelle, comme l'utilisation des supraconducteurs dans les moteurs électriques ou dans les systèmes de stockage d'énergie [7][10]. Cependant, les progrès continus dans la recherche et le développement, notamment la caractérisation des matériaux et l'optimisation des designs, ouvrent de nouvelles perspectives pour une intégration plus large de ces technologies dans les infrastructures énergétiques modernes [11][8].

Ce mémoire vise à modéliser le comportement électrique et thermique du limiteur de courant inductif. Le modèle élaboré devra refléter fidèlement le fonctionnement réel du limiteur tout en restant suffisamment simple pour être intégré à tout réseau électrique, qu'il soit monophasé ou triphasé. Le travail est structuré comme suit :

- Dans le premier chapitre, nous donnerons des informations complètes et détaillées sur les supraconducteurs pour mieux connaître le matériau avec lequel nous travaillons. Nous exposerons un bref contexte historique, issue historique de ces matériaux, les

caractéristiques principales. Particulièrement, le type HTC, YBCO, et BSCCO, ainsi que diverses applications industrielles.

- Dans le deuxième chapitre, il s'agira de la modélisation des supraconducteurs. Les équations mathématiques qui décrivent un tel phénomène de la physique comme supraconductivité. Les modèles basés sur des équations électromagnétiques seront utilisés pour l'étude et l'analyse des phénomènes décrits précédemment à l'aide du logiciel de simulation
- Le dernier chapitre, sera bien évidemment réservé pour aborder la modélisation du limiteur inductif de courant de défaut et la simulation de son fonctionnement à l'aide du logiciel PSIM. Plus précisément, nous expliquerons les principes physiques et les équations mathématiques du fonctionnement de tels dispositifs sous des conditions de court-circuit.
- Nous terminerons par une conclusion générale qui englobera l'ensemble des travaux effectués et les perspectives à envisager.

CHAPITRE I  
Généralités  
Sur  
Les  
Matériaux  
Supraconducteurs

## I.1 Introduction

Le terme "supraconductivité" fait référence à la capacité de certains matériaux à présenter une résistivité électrique extrêmement faible, voire nulle, en dessous d'une certaine température critique. Plus précisément, cette résistivité est inférieure à  $10^{-25} \Omega \cdot m$ . Ce concept a été introduit par Heike Kamerlingh Onnes en 1911 lorsqu'il observa que, pour certains matériaux, la résistance électrique ne se contentait pas de diminuer avec la température, mais s'effondrait soudainement à une température critique spécifique, notée  $T_c$ . Il qualifia cet état de supraconducteur, Il a qualifié cet état de supraconducteur, contrairement à l'état normal, et a nommé les matériaux présentant ce comportement comme supraconducteurs.

Les supraconducteurs sont des matériaux qui permettent le passage du courant électrique sans résistance et qui excluent les champs magnétiques de leur volume interne, un phénomène connu sous le nom d'effet Meissner. Tout matériau présentant ces propriétés est ainsi qualifié de supraconducteur. Contrairement aux conducteurs conventionnels tels que le cuivre ou l'aluminium, un supraconducteur peut transporter un courant électrique indéfiniment sans dissipation d'énergie.

Dans le domaine de l'électrotechnique, les supraconducteurs occupent une place fondamentale en raison de leurs propriétés exceptionnelles. Leur comportement diamagnétique et leur capacité à transporter des courants électriques élevés sous l'influence de champs magnétiques intenses ouvrent des perspectives d'innovation majeures, suscitant un intérêt croissant au sein de la communauté scientifique.

Ce chapitre est consacré à l'étude des matériaux supraconducteurs, en mettant en avant leur histoire, leur découverte ainsi que leurs principales propriétés. Nous examinerons également les différentes catégories de supraconducteurs, leurs formes industrielles et leurs applications technologiques.

## 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.

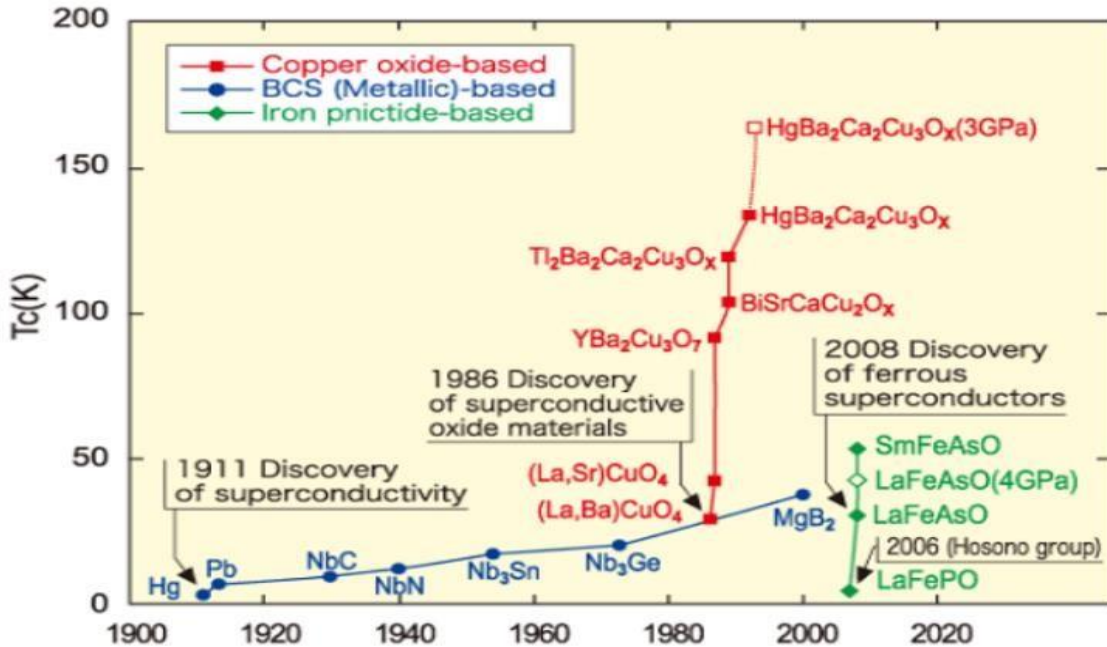
En 1957, John Bardeen, Leon N. Cooper et John Schrieffer ont développé une théorie microscopique, connue sous le nom de théorie BCS, pour expliquer le phénomène de supraconductivité. Selon cette théorie, à des températures très basses, les électrons se regroupent en paires de Cooper, ce qui conduit à 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].

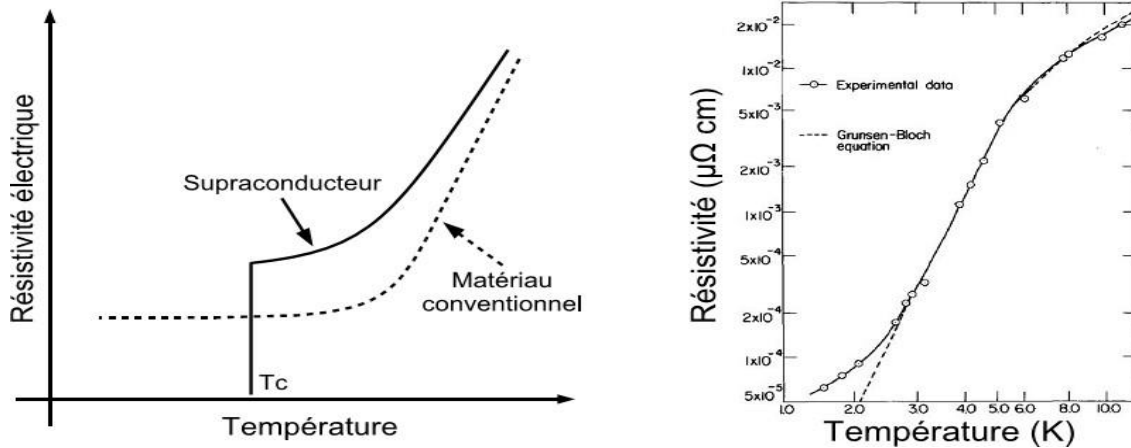


**Figure I.1:** Température critique de certains matériaux supraconducteurs en fonction de leur année de découverte [6-7].

### 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.



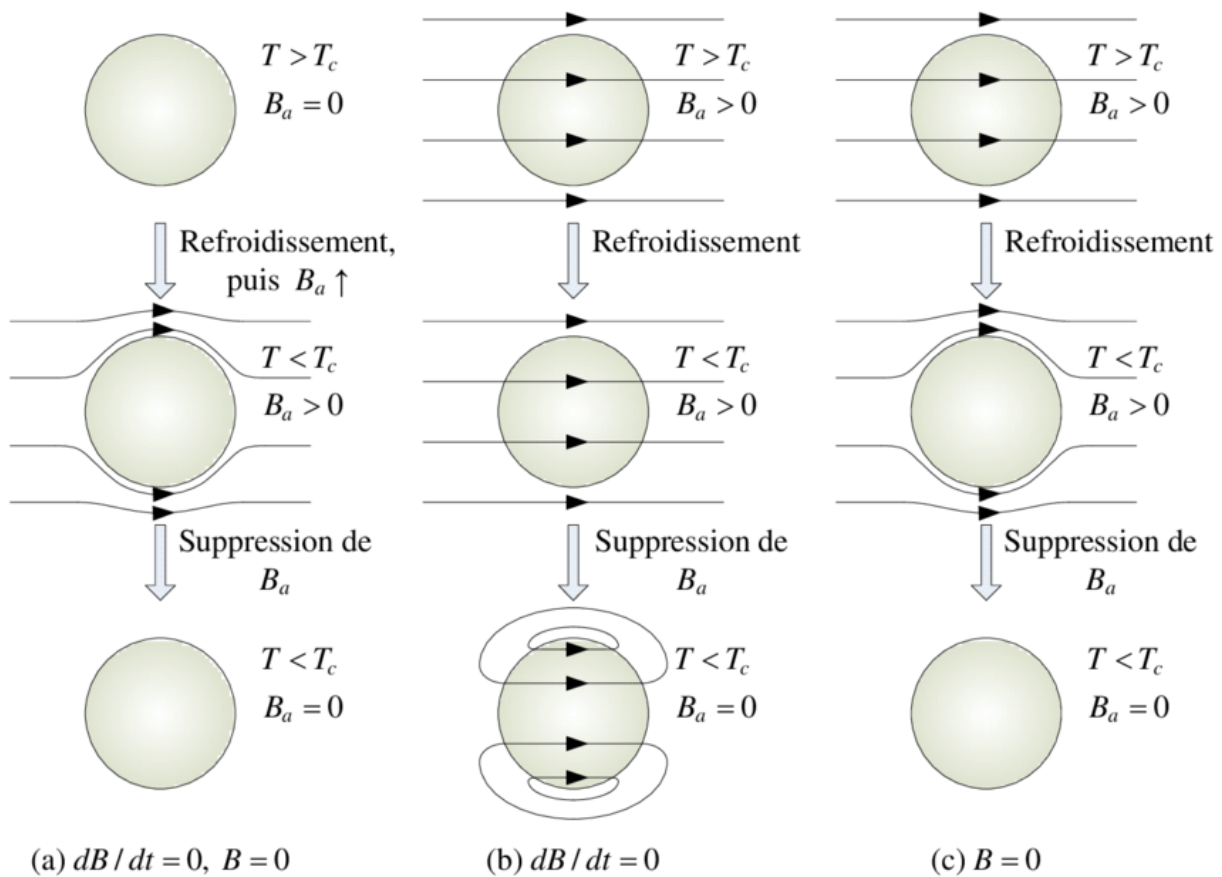
a) Pour un matériau conventionnel et supra [11]  
( $T_c = 4.2 \text{ K}$ )

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, lorsqu'un champ magnétique est appliqué après le refroidissement du matériau, les conducteurs idéaux et les supraconducteurs présentent un comportement similaire, l'induction magnétique à l'intérieur du matériau demeurant nulle. (voir Fig. I.3(a)).
- Dans le deuxième cas, lorsque le supraconducteur est refroidi en dessous de sa température critique et 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, appelé **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.

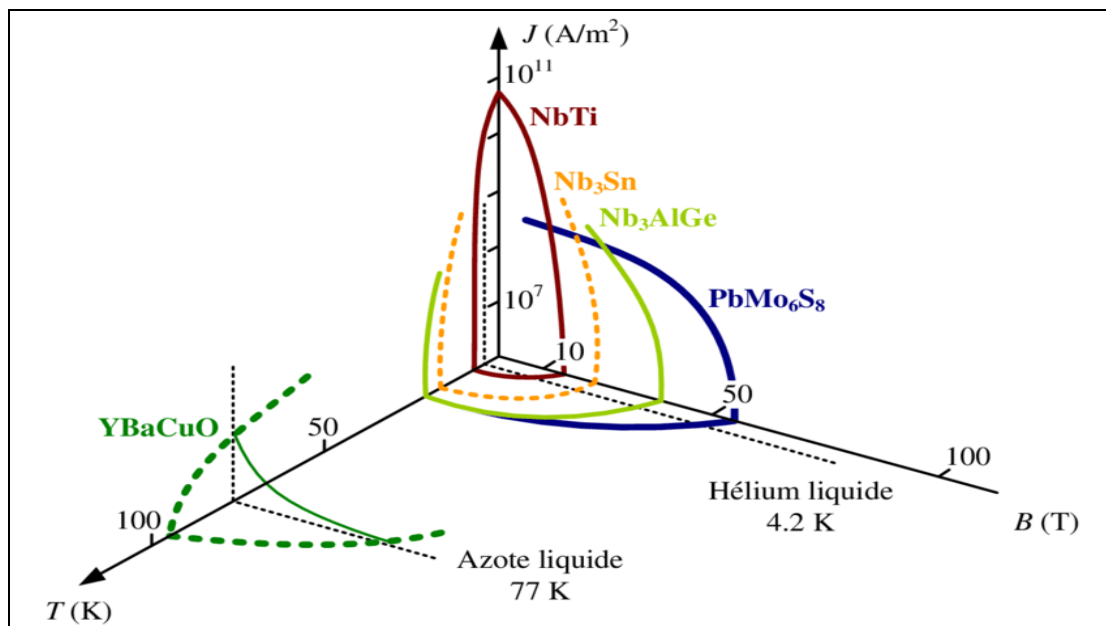
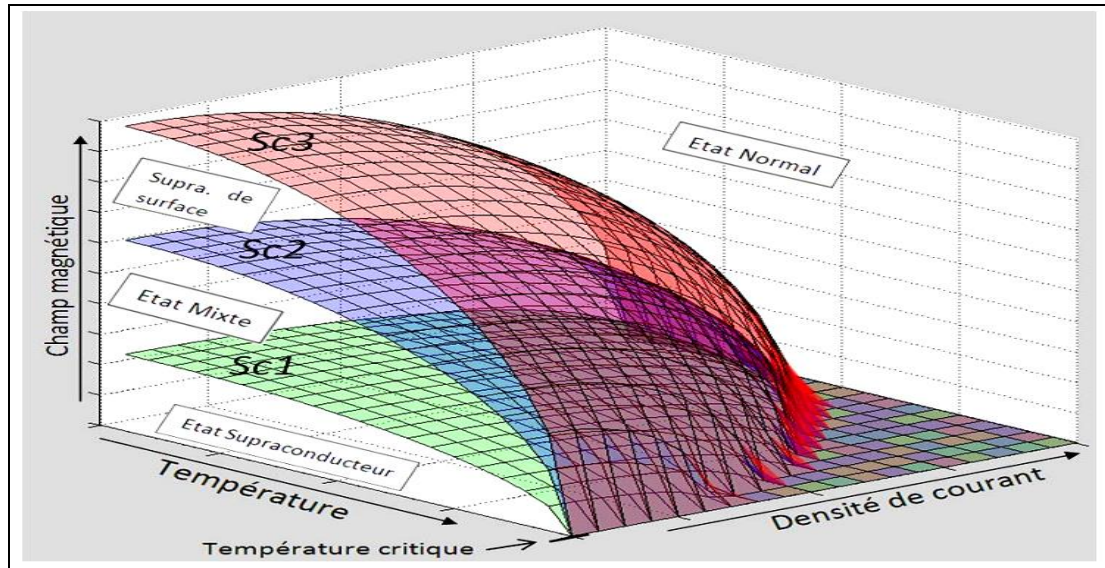


Figure I.4: Surface critique des matériaux supraconducteurs[12].



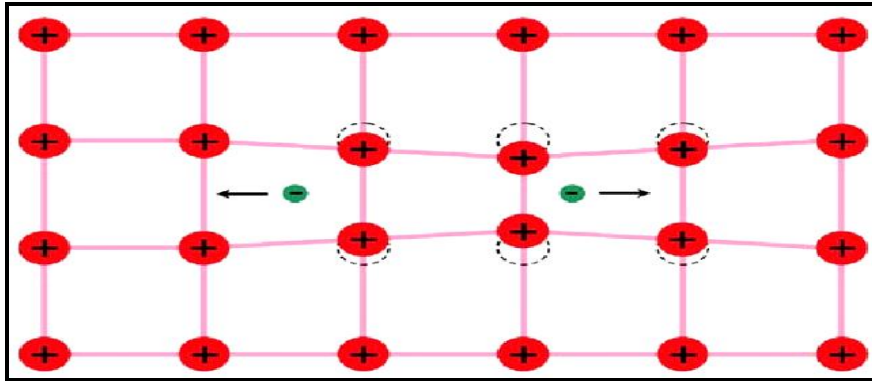
**Figure I.5:** 3 surfaces critiques d'un supraconducteur ( $Sc1$ ,  $Sc2$  et  $Sc3$ ). Entre ces surfaces, la supraconductivité apparaît sous différentes formes [10].

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.

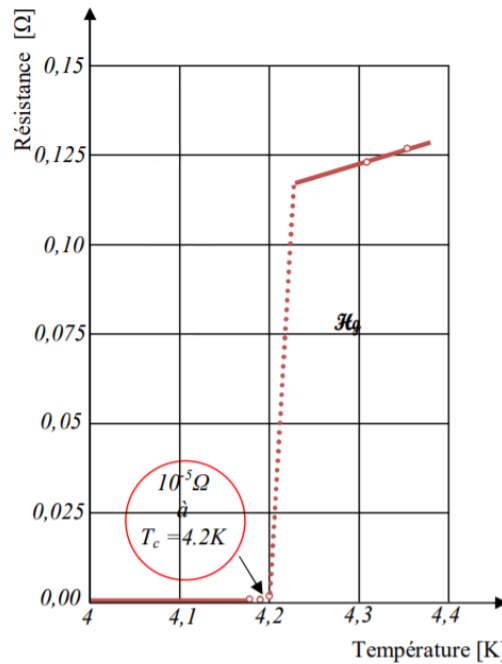


**Figure I.6:** La formation d'une paire de cuivre : un électron qui passe attire les ions chargés positivement du treillis, provoquant une légère ondulation dans son sillage. Un autre électron passant à l'opposé direction est attiré par ce déplacement [13].

**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  $H_{c2}$ .

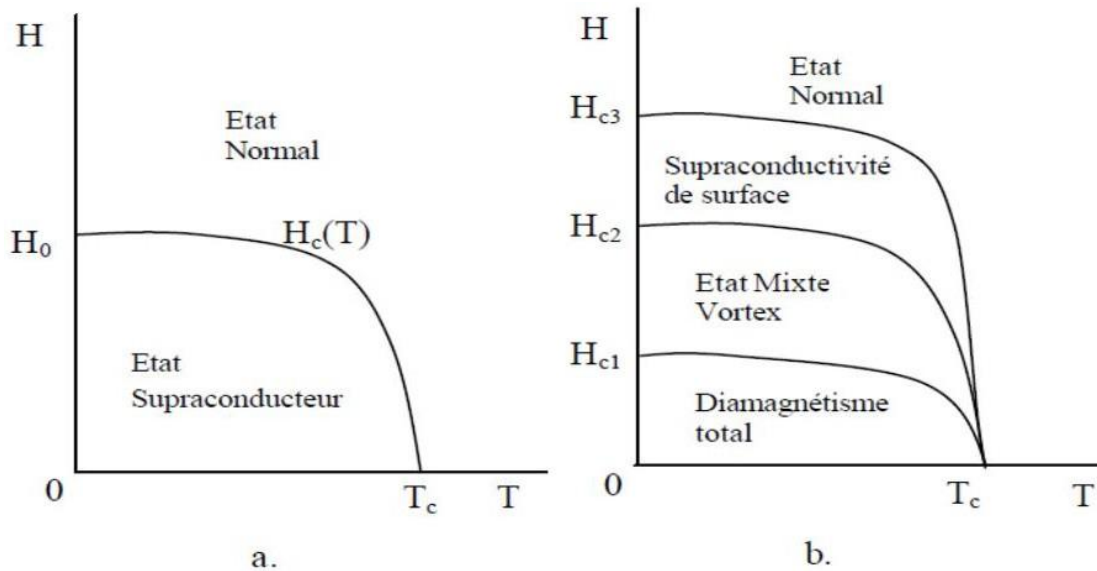
L'induction magnétique à l'intérieur du matériau peut être exprimée par la relation suivante :

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

$\mu_0$  : 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.

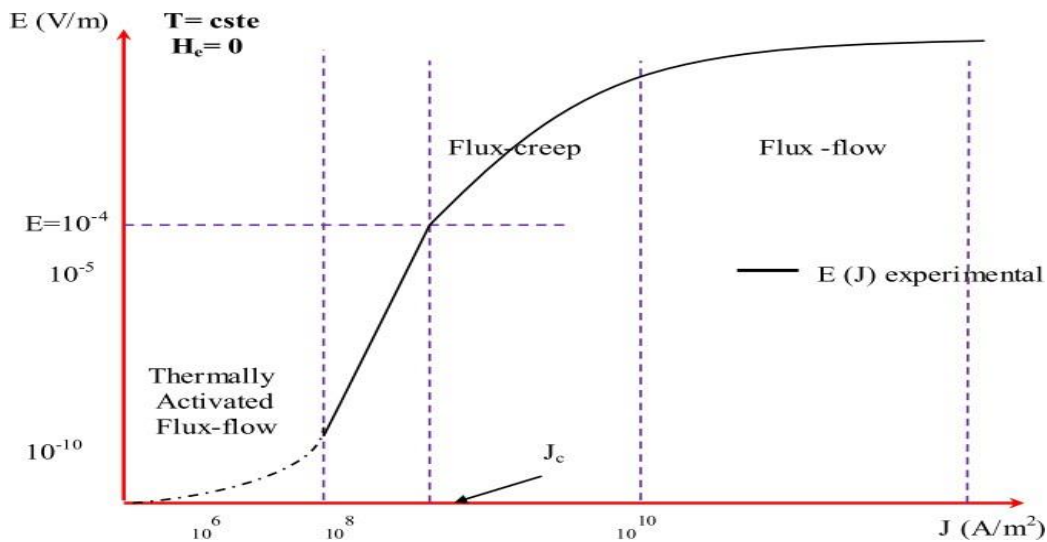
### I.3.7. Densité de courant critique $J_c$ (H, T)

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

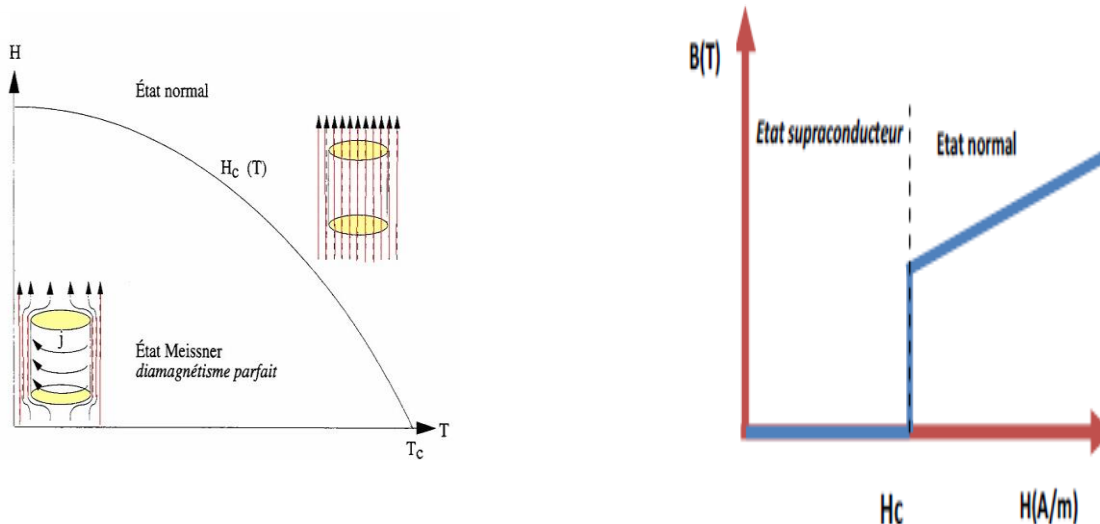
Selon la valeur du champ magnétique critique  $H_c$ , on distingue deux types de matériau supraconducteur. Les matériaux supraconducteurs de type I et les matériaux supraconducteurs de type II.

### 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  $H_{c2}$ .

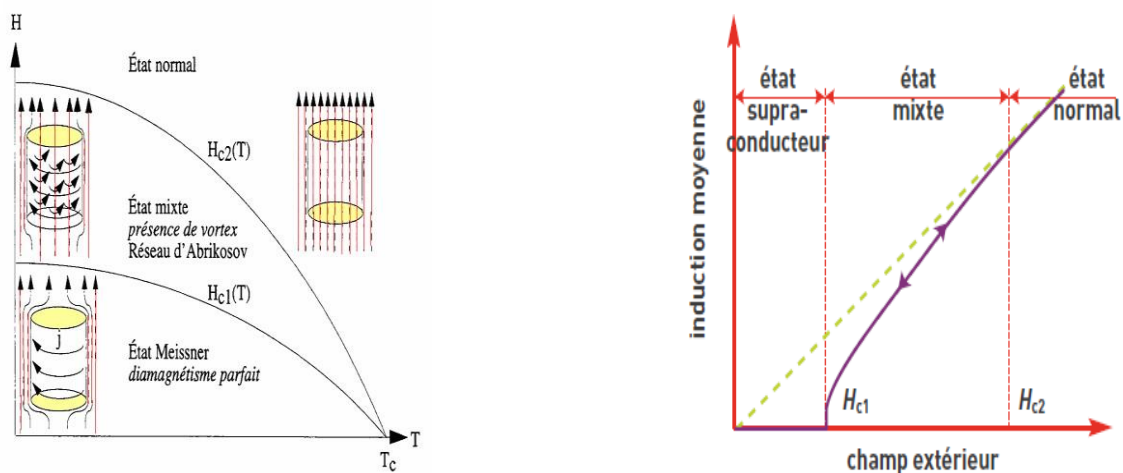


Figure I.11: a - Diagramme de phase d'un supraconducteur de type II. b - la caractéristique  $B(H)$ .

## I.5. Matériaux supraconducteurs selon leur température

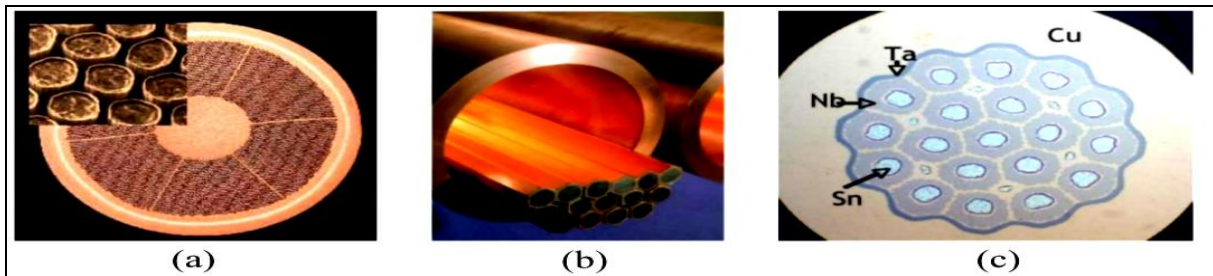
### I.5.1. Supraconducteurs à basse température critique (SBTC)

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 Nb<sub>3</sub>Sn 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<sub>c</sub>(K)</i>
Nb-Ti	9
Nb <sub>3</sub> Sn	18
Nb <sub>3</sub> Al	19
Nb <sub>3</sub> Ga	20
Nb <sub>3</sub> 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].

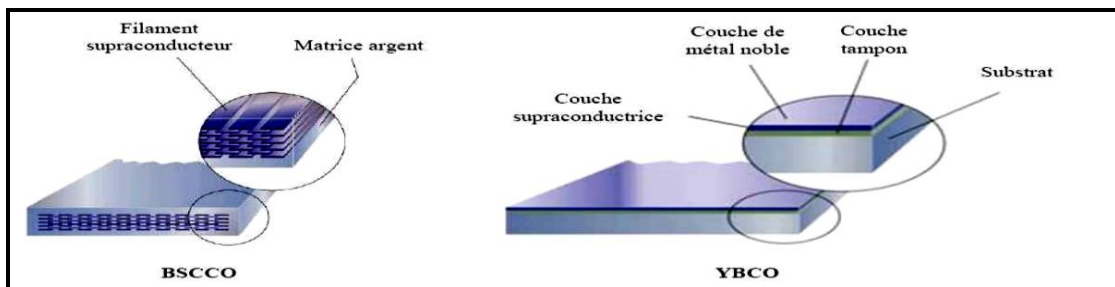


Figure I.13: Fils supraconducteurs HTC [9].

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

<i>Supraconducteur</i>	<i>T<sub>c</sub>(K)</i>
La <sub>1.85</sub> Ba <sub>0.15</sub> Cu O <sub>4</sub>	35
La <sub>1.85</sub> Sr <sub>0.5</sub> Cu O <sub>4</sub>	40
YBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7</sub>	95
Bi <sub>2</sub> Sr <sub>2</sub> Ca Cu <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	85
Bi <sub>2</sub> Sr <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>10</sub>	110
Tl <sub>2</sub> Ba <sub>2</sub> Ca Cu <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	108
Tl <sub>2</sub> Ba <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Cu <sub>2</sub> O <sub>10</sub>	125
HgBa <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>6+5</sub>	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-Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub>- 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].

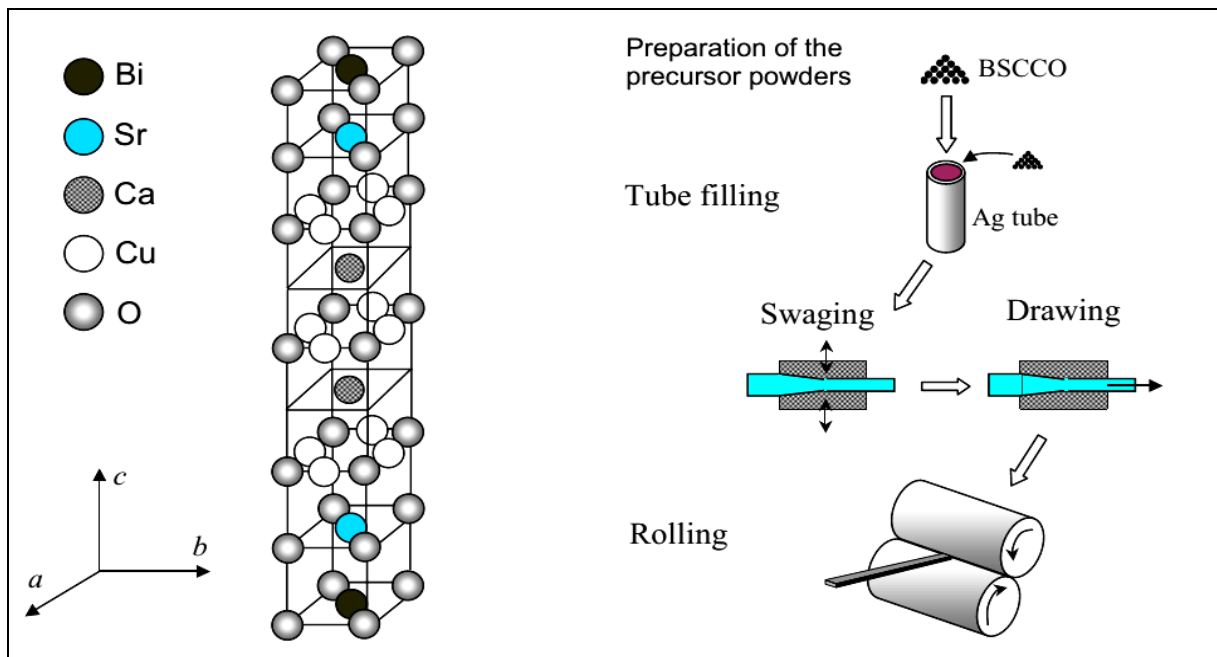
	<b>YBCO</b>	<b>Bi-2212</b>	<b>Bi-2223</b>
<b>T<sub>c</sub>(K)</b>	93	78	110
<b>B<sub>irr</sub> 4.7 K (T)</b>	>30	>30	>30
<b>B<sub>irr</sub> 77 K (T)</b>	>5	0.005	0.5
<b>J<sub>c</sub> 4.7 K (A/mm<sup>2</sup>)</b>	>100,000	5,000	3,000
<b>J<sub>c</sub> 77 K (A/mm<sup>2</sup>)</b>	>10,000	100	500

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

La découverte du premier supraconducteur à haute température critique (T<sub>c</sub>) a été réalisée par Bednorz et Müller avec l'oxyde de cuivre de lanthane (La, Ba)  $2\text{CuO}_4$ , présentant un T<sub>c</sub> légèrement supérieur à 30 K. À ce jour, le supraconducteur à haute température le plus élevé est HgBa<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>8</sub>, avec un T<sub>c</sub> de 134 K. Le premier supraconducteur avec un T<sub>c</sub> supérieur à 77 K était l'oxyde de cuivre baryum yttrium YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub>, également connu sous le nom de YBCO ou Y-123. Les oxydes de bismuth Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>x</sub> et Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub>, 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].

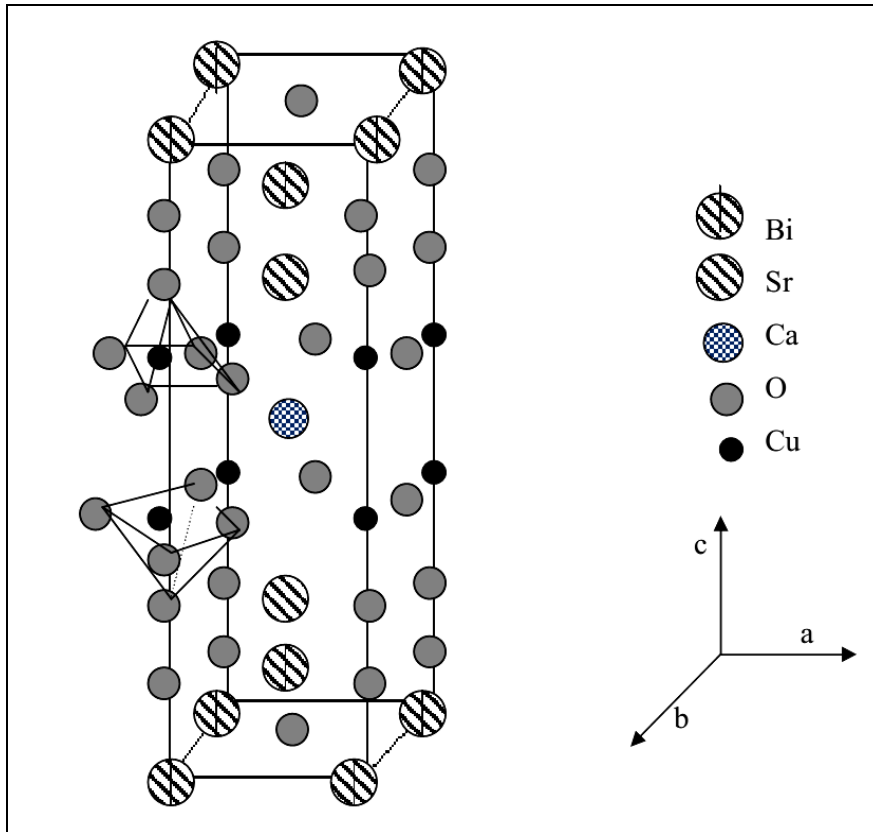


**Figure I.14:** Cellule unitaire de  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  et présentation schématique de la Technique OPIT. Chaleur intermédiaire et finale le traitement n'est pas indiqué [23].

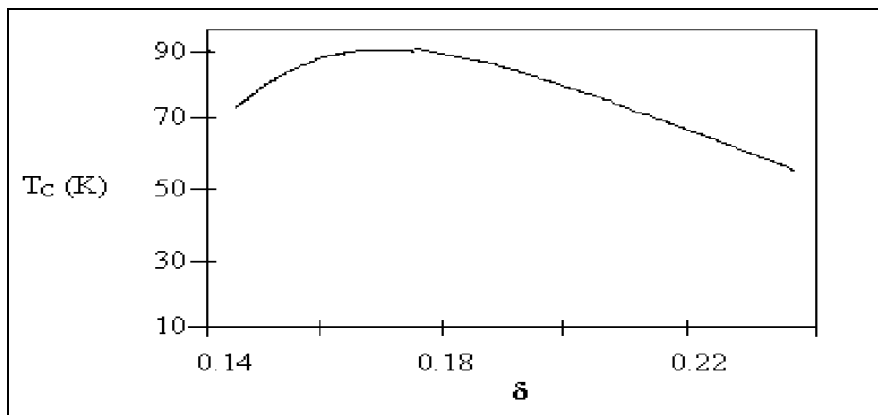
Le BSCCO se distingue par la variabilité intrinsèque de sa structure multicouche le long des plans a, b et c de son cristal, ainsi que par les propriétés anisotropes des bandes résultantes dues à la stratification pendant la fabrication. Une caractéristique cruciale des matériaux BSCCO est leur contraste 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/mm<sup>2</sup> 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  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$  [24].

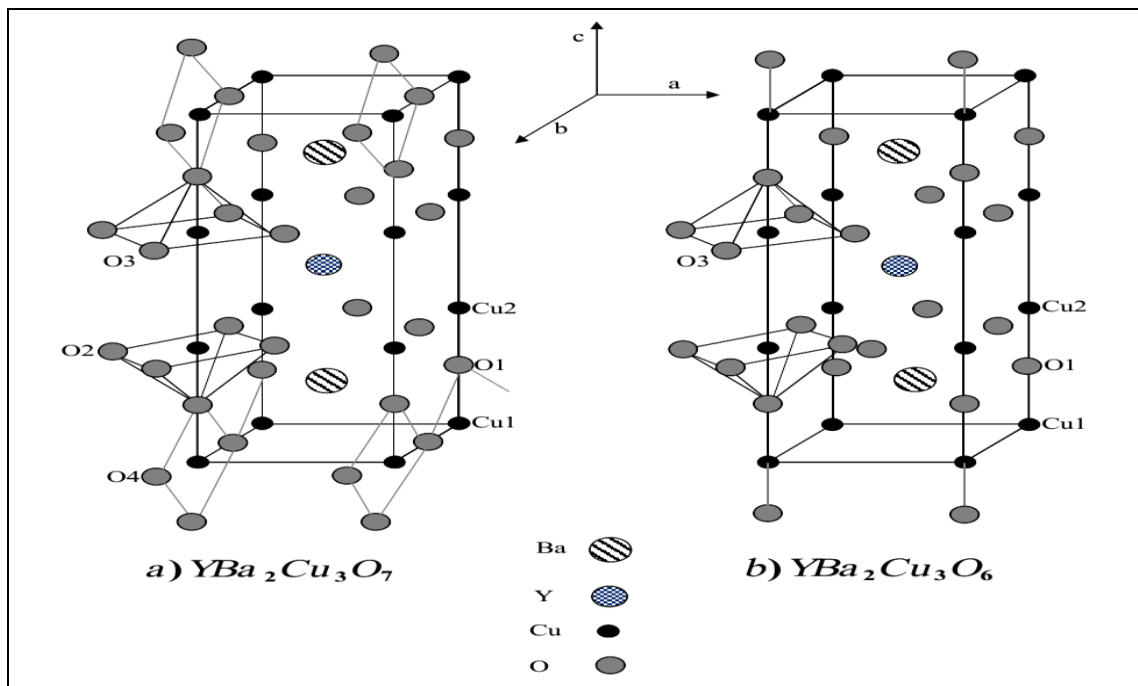


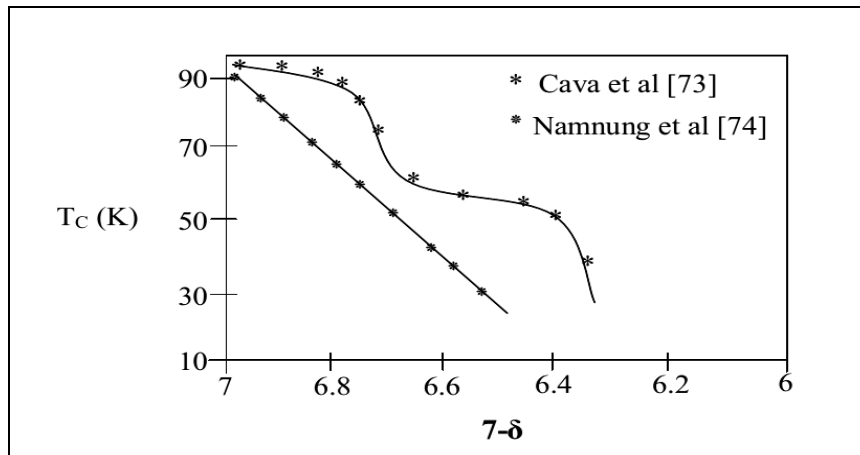
**Figure I.16:** Variation de la température critique en fonction de  $\delta$  dans  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{7+d}$ . [24].

## 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/mm<sup>2</sup> 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.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, (HP).[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 MgB<sub>2</sub> à 24 K.

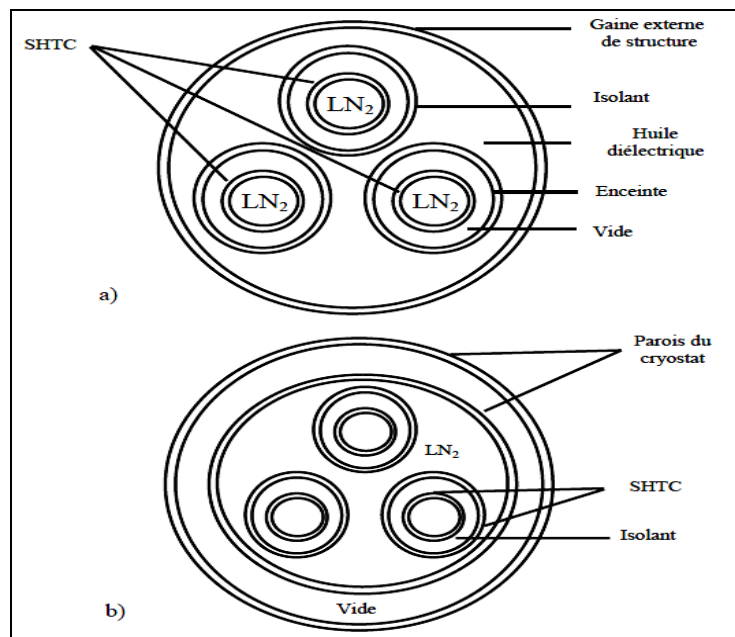
### **I.7.4. Limitation de courant**

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]

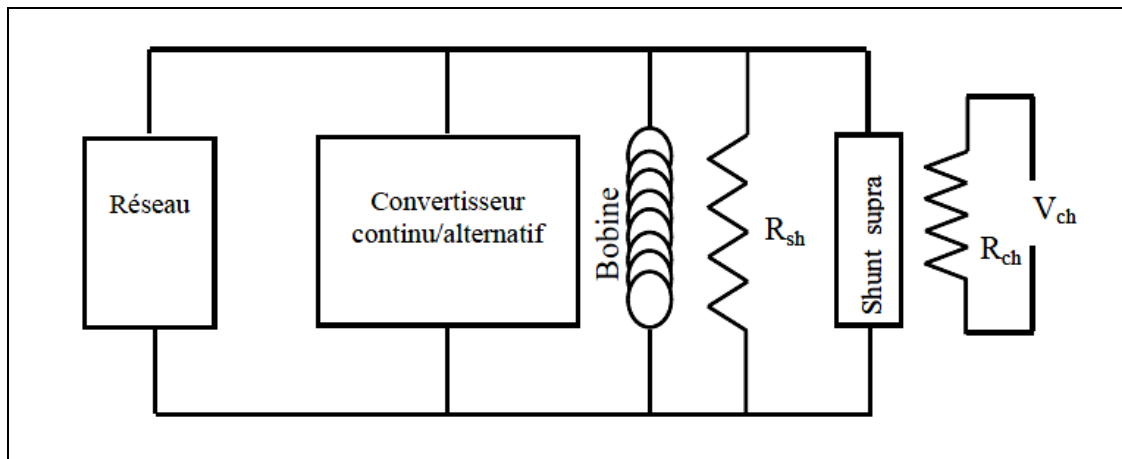


**Figure I.19:** Représentation schématique d'un câble triphasé en supraconducteur à haute Température critique (SHTC) refroidi à l'azote liquide (LN<sub>2</sub>) :

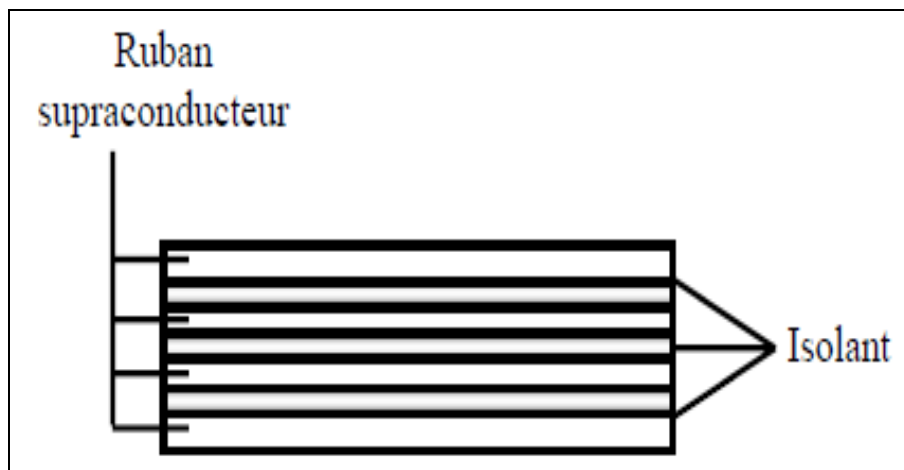
- a) Chaque phase est dans une enceinte cryogénique et l'isolant est à température ambiante ;
- b) une seule enceinte cryogénique contient les trois phases ; chaque phase est formée de deux conducteurs concentriques, l'isolant se trouve à basse température.

### 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 ; R<sub>sh</sub> est la résistance de protection ; R<sub>ch</sub> et V<sub>ch</sub> 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 :**

Ce chapitre a été consacré à l'étude des matériaux supraconducteurs. Ceux-ci se déclinent en deux catégories : les supraconducteurs de type I et de type II, chacun étant caractérisé par des grandeurs critiques définies par des paramètres magnétiques et thermiques, notamment la température critique ( $T_c$ ), le champ magnétique critique ( $H_c$ ) et la densité de courant critique ( $J_c$ ).

Les supraconducteurs, en particulier ceux à haute température critique, possèdent des propriétés exceptionnelles qui leur confèrent un fort potentiel d'application dans divers secteurs industriels. Ils suscitent un intérêt croissant pour des usages en génie électrique et en électronique, notamment dans le domaine de l'électromagnétisme. L'optimisation des dispositifs supraconducteurs repose sur une compréhension approfondie de leur comportement électromagnétique.

Dans ce chapitre, nous avons également présenté les applications les plus courantes et les plus prometteuses des matériaux supraconducteurs en génie électrique. Le chapitre suivant sera dédié à la modélisation de ces matériaux afin d'approfondir leur étude et leur mise en œuvre dans des systèmes technologiques avancés.



CHAPITRE II

Modélisation

Des

Matériaux

Supraconducteurs

## II.1. Introduction :

Dans le cadre du modèle électromagnétique, les phénomènes physiques sont décrits le plus souvent à l'aide d'équations aux dérivées partielles. D'un autre côté, on sait que ces dernières, en particulier celles à coefficients variables, peuvent être non linéaires et difficiles à résoudre en raison du grand nombre d'inconnues. Le modèle qui est construit à l'aide d'une description mathématique de l'évolution de la température des pales est basé sur l'équation de transfert de la chaleur. De plus, on ne peut pas négliger les conditions d'échange de la température avec l'environnement extérieur. Ces tâches sont formulées pour les systèmes extérieurs. Fait intéressant : sous certaines hypothèses simplificatrices, on devrait répondre à l'équation différentielle ordinaire causale, ce qui permet d'utiliser des bonnes solutions analytiques.

Pour des problèmes plus réalistes, comme ceux traités dans cette étude, concernant les conditions aux limites spécifiques, les géométries complexes ou des hypothèses moins restrictives, ces équations ne peuvent pas être résolues de manière analytique. Par conséquent, dans certains cas, nous utilisons des méthodes d'approximation numérique pour convertir les équations aux dérivées partielles en un système d'équations algébriques, qui peuvent ensuite être résolues à l'aide d'outils informatiques.

De plus, nous présenterons dans ce chapitre les équations mathématiques régissant l'évolution spatio-temporelle du champ électromagnétique dans le supraconducteur, ainsi que les lois du comportement.

## II.2. Etat de l'art :

Nous avons exploré le comportement général des supraconducteurs à haute température critique dans le chapitre précédent. Il a ensuite été mentionné que les différentes caractéristiques des SHTc présentent de fortes corrélations. Les SHTc opèrent dans différents régimes, de sorte qu'un modèle analytique unique capable de tous les décrire n'est pas toujours accessible, surtout en configuration bidimensionnelle ou tridimensionnelle. Cependant, des modèles simplificateurs ont été créés qui sont applicables en supposition de conditions spécifiques pour le fonctionnement supraconducteur.

## 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  $\mu_0$ . Par conséquent, à l'échelle macroscopique, il peut être considéré comme non magnétique.

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

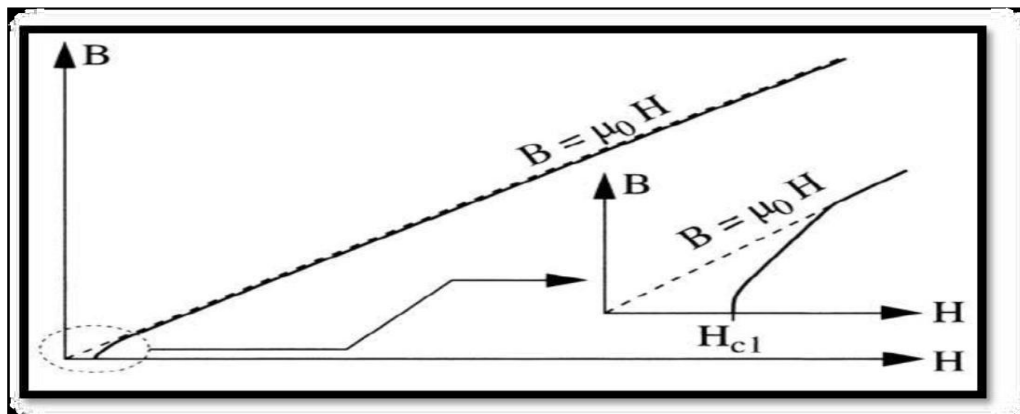


Figure II. 1 : Caractéristique B(H) d'un supraconducteur [32].

### 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.

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

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].

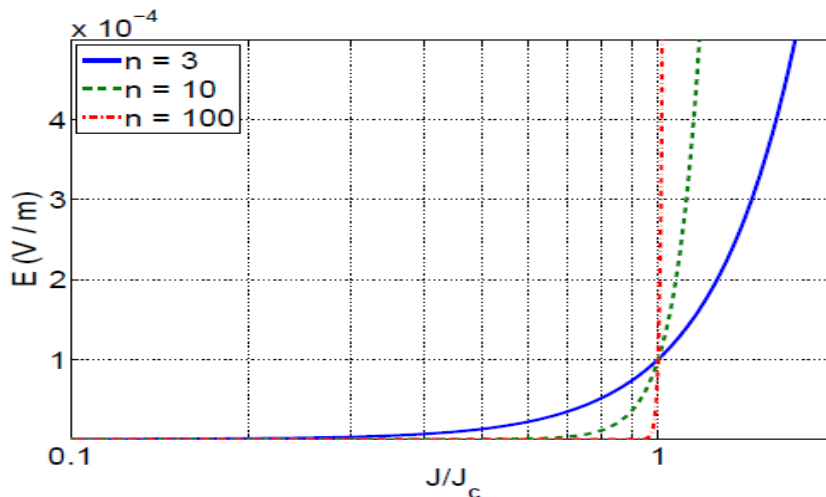


Figure II. 2 : Caractéristique  $E(J)$  d'un supraconducteur [29].

## 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.

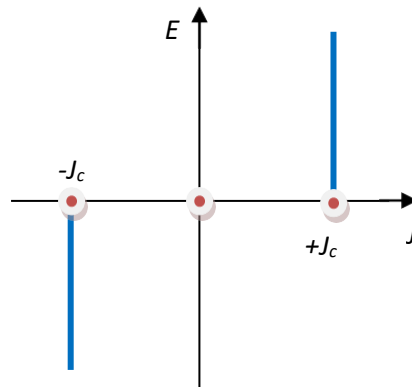
$$J = J_c(|B|) \frac{E}{|E|} \tag{II.3}$$

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

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

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

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]

$$J_c(|B|) = J_{c0} \exp\left(-\frac{|B|}{B_0}\right) \quad (\text{II.6})$$

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".

$$E = 2\rho_c J_c \sinh\left(\frac{U_0 J}{K\theta J_c}\right) \exp\left(-\frac{U_0}{K\theta}\right) \quad (\text{II.7})$$

$K$  : Constant de Boltzmann.

$\theta$  : Température.

$\rho_c$  : 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".

$$E = \pm \left( E_c + \rho_f J_c \left( \frac{|J|}{J_c} - 1 \right) \right) \rho_f \quad (\text{II.8})$$

$\rho_f$  : 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]

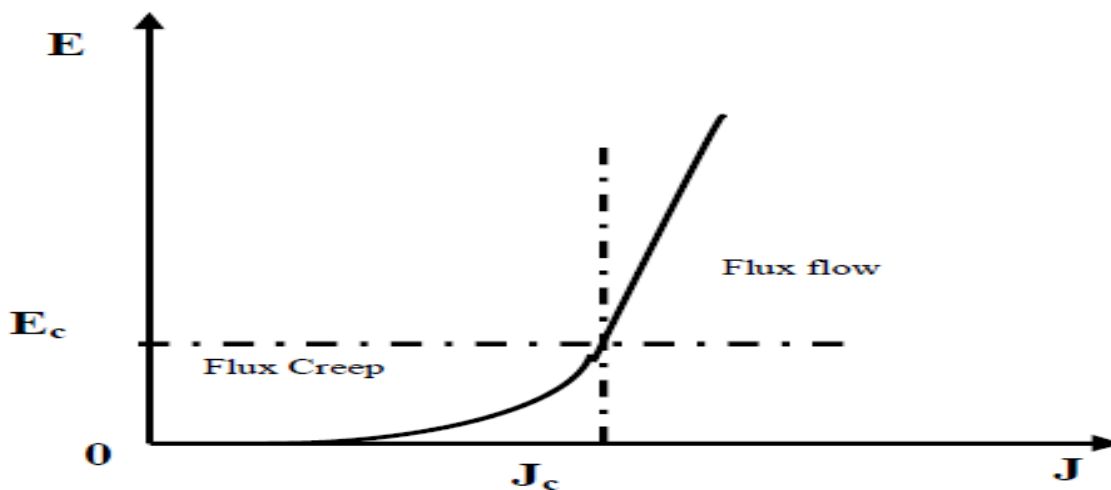


Figure II. 4 : Modèle de Flux Flow et Creep [32].

## 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, magnéto-statique 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.

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \vec{0} \quad (\text{II.9})$$

Les équations de ce modèle se simplifient comme suit :

$$\text{div} \vec{D} = \rho \quad (\text{II.10})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = \vec{0} \quad (\text{II.11})$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (\text{II.12})$$

On a :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V \quad (\text{II.13})$$

Le modèle se ramène alors à l'équation

$$\text{div} (\epsilon \overrightarrow{\text{grad}} V) + \rho = 0 \quad (\text{II.14})$$

## II. 5. 2 Modèle magnéto-statique

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 magnéto-statique scalaire : [33]

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

$$\overrightarrow{rot} \vec{H} = \vec{0} \quad (II.15)$$

$$div \vec{B} = 0 \quad (II.16)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (II.17)$$

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

Le modèle se ramène alors à l'équation :

$$Div (\mu \overrightarrow{grad} \Phi) = 0 \quad (II.18)$$

### II. 5. 2.2 Modèle magnétostatique vectorielle :

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

$$\overrightarrow{rot} \vec{H} = \vec{j} \quad (II.19)$$

$$div \vec{B} = 0 \quad (II.20)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (II.21)$$

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

$$\vec{B} = \overrightarrow{rot} \vec{A} \quad (II.22)$$

D'où le système d'équation :

$$\overrightarrow{rot} (\nu \overrightarrow{rot} \vec{A}) = \vec{j} \quad (II.23)$$

### 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 :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.24})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}}\vec{H} = \vec{j} \quad (\text{II.25})$$

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

$$\vec{B} = \mu\vec{H} \quad (\text{II.26})$$

$$\vec{D} = \epsilon\vec{E} \quad (\text{II.27})$$

En prenant le rotationnel :

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

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

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

On considère  $\mu$  constante dans le temps, d'où l'équation précédente devient :

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

Finalement on obtient :

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

Avec :

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

On a:

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

Où :

$$(\text{divgrad})\vec{E}=\mu\frac{\partial\vec{j}}{\partial t} \quad (\text{II.33})$$

## 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. Le modèle magnétodynamique en milieu supraconducteur qui sera principalement traité, s'illustre dans la formulation en potentiel vecteur magnétique. Sa mise en œuvre numérique du comportement électromagnétique des supraconducteurs se révèle plus difficile à réaliser.

La méthode de modélisation numérique des matériaux supraconducteurs a été mise en œuvre, reposant sur la résolution des équations de Maxwell de nature fortement non linéaire. La synthèse de ces matériaux (SHTC), pour voir comment mettre en évidence le phénomène de limitation des courants de défaut dans les circuits électriques, dont le but est de limiter les appels de courant importants, fera l'objet du prochain chapitre.

# CHAPITRE III

Application sur le calcul  
des courants

De Court-circuit

### III.1. Introduction

La bonne maîtrise de la construction et du dimensionnement des réseaux d'énergie électrique passe par une connaissance du comportement du réseau face à des courts-circuits. Il s'agit de faire la vérification des contraintes thermiques et mécaniques subies par les conducteurs tant sous courant nominal de service que lors d'un court-circuit où le courant peut atteindre plusieurs kiloampères dans les réseaux de moyenne tension.

Concernant la protection et l'exploitation fiable des réseaux électriques, le disjoncteur est l'élément de protection incontournable. Il doit garantir un fonctionnement optimal. Son pouvoir de coupure doit être supérieur au courant maximum de court-circuit :

$$pdc > I_{CC \text{ triphasé}} [22].$$

Le chapitre présent fait état des principales fonctionnalités de simulation du court-circuit que propose le logiciel PSIM, dédié à l'électrotechnique et permettant la modélisation des phénomènes électromécaniques.

### III.2. Définition de courant de court-circuit

La situation d'un court-circuit se retrouve essentiellement quand un circuit électrique quelconque ou un équipement est mis en contact sur impédance nulle ou faible à un neutre de réseau, ou à la terre, comme dans le cas d'une mise à la terre accidentelle d'une ou plusieurs phases d'un réseau ou d'un matériel électrique, ou d'une connexion accidentelle entre phases avec impédance très faible pour la limitation de court-circuit. On parle aussi de courants de défaut quand cet état de fait représente un fonctionnement anormal du système et de l'équipement, qui se caractérise par des valeurs très élevées. [35]

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

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

- **Défauts d'isolement:**

- Vieillesse des câbles ou des isolants.
- Humidité, poussière ou contaminants sur les équipements électriques.
- Dommages mécaniques (câbles écrasés, coupés, ou percés).

- **Erreurs humaines:**

- Mauvaise manipulation lors d'une intervention (court-circuit accidentel avec un outil).

- Mauvais raccordement ou câblage incorrect.

- **Defiance de matériel:**

- Panne d'un disjoncteur, contacteur ou transformateur.

- Surtensions qui détériorent les équipements (foudre, coupure brutale suivie de réenclenchement).

- **Faute de conception ou de maintenance :**

- Matériel sous-dimensionné pour la puissance du réseau.

- Absence de protections adaptées.

- Défaut de serrage des connexions, créant des arcs électriques.

- **Causes extérieures:**

- Chute d'un arbre sur une ligne aérienne.

- Intrusion d'animaux ou objets métalliques dans les installations (exemple : oiseau ou rongeur provoquant un court-circuit).

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

Les courants de court-circuit exercent des effets particulièrement nuisibles sur les équipements des réseaux électriques. En effet, ces équipements ne sont généralement pas conçus pour supporter des intensités de courant aussi élevées. Une telle sollicitation entraîne un échauffement excessif des composants, pouvant aller jusqu'à leur détérioration ou destruction. De plus, divers dysfonctionnements peuvent apparaître, notamment au niveau des instruments de mesure, des transformateurs de courant et des systèmes de télécommunication. Il est donc essentiel de mettre en place des dispositifs de protection adaptés contre ces phénomènes. Cette protection est assurée, dans la plupart des cas, par des disjoncteurs capables d'interrompre des courants de forte intensité. [36]

### **III.5. Type de défauts de court-circuit**

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

a) Triphasé.

- b) Biphasé isolé.
- c) Biphasé à la terre.
- d) Monophasé sans impédance de court-circuit.
- e) Monophasé avec impédance de court-circuit.

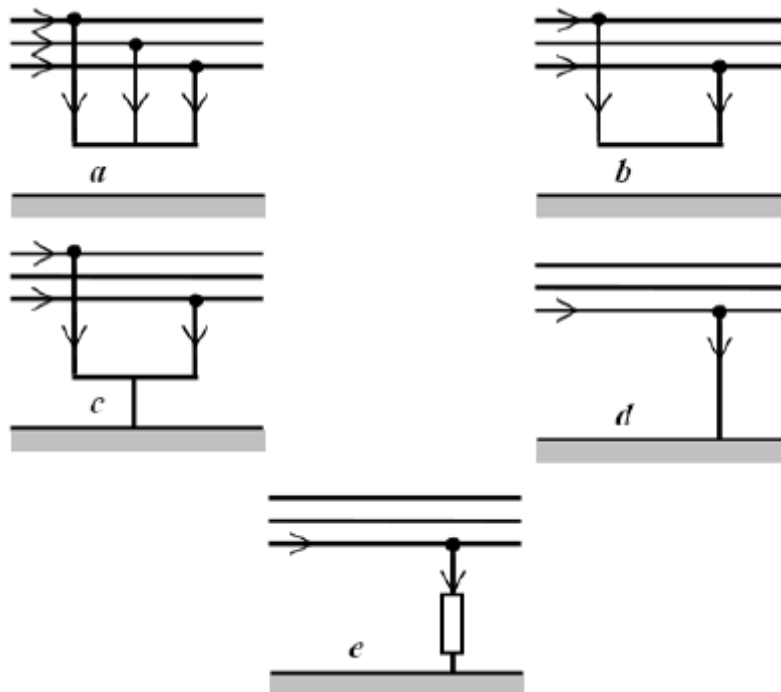


Figure III.1 : Différent type de défaut [23] .

### III.6. Conséquences des courants de court-circuit

Les effets des courants de court-circuit dépendent de leur nature et de leur durée, du point du réseau concerné et de leur intensité.

Ainsi, en sortie de défaut, la présence d'un arc de défaut peut occasionner la dégradation des isolants, la fusion des conducteurs, des incendies et des victimes. Les circuits en défaut peuvent subir une déformation des jeux de barres, l'arrachement des câbles. Les autres circuits peuvent connaître des dépressions de tension, pendant ou après la durée d'effacement du défaut, l'arrêt d'une partie plus ou moins grande du réseau selon son schéma et la

sélectivité de la protection, l'instabilité et/ou la perte de synchronisme des machines perturbées par le court-circuit.[22]

Le logiciel de simulation de circuits PSIM est utilisé pour étudier les ondes et les amplitudes des courants au court-circuit à la sortie des récepteurs monophasés, biphasés et triphasés alimentés par un réseau basse tension.

Le modèle qui recourt aux propriétés de supraconducteurs pour effectuer la simulation d'un limiteur de courant de défaut est présenté sur la figure III. 2.

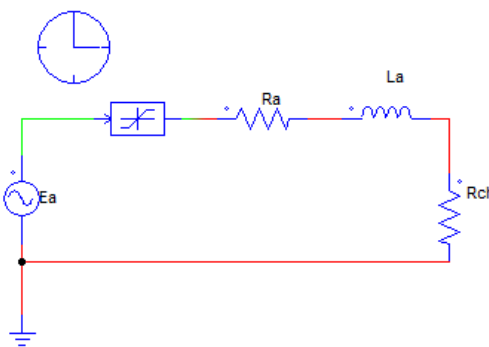


Figure III. 2: Circuit de simulation de modèle électrique de limiteur.

### III.7. Simulation et interprétation des résultats :

#### III.7.1. Pour récepteur monophasé :

##### III.7.1.1. Circuit sans défaut et sans limiteur :

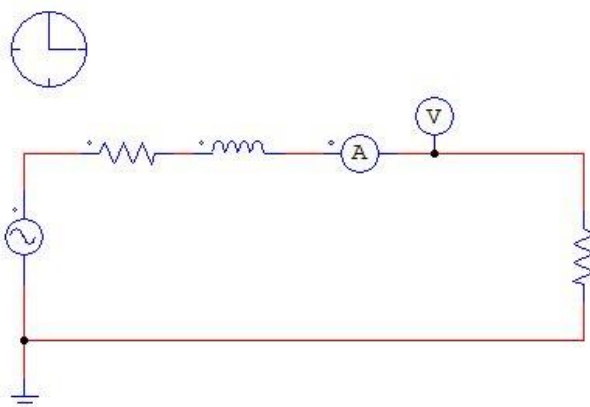
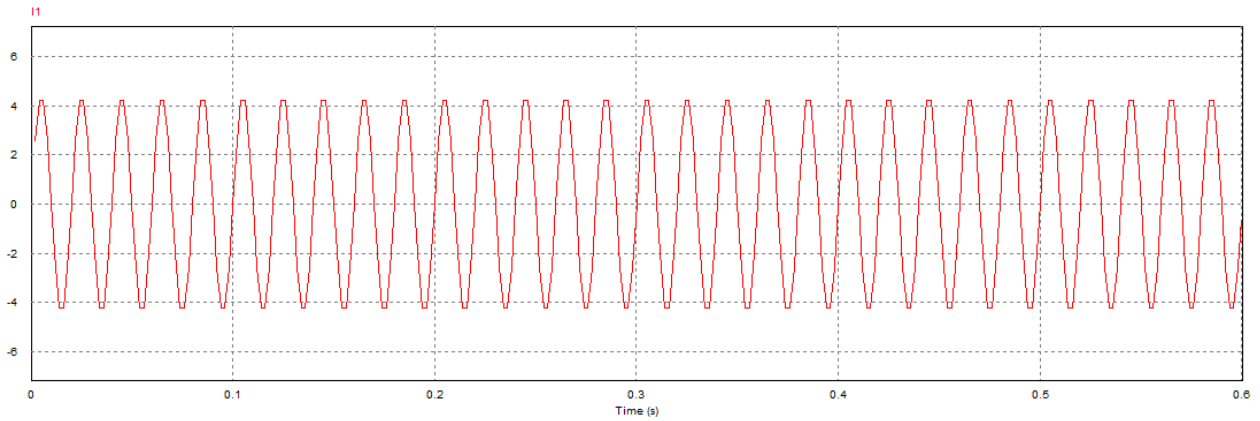


Figure III.3: Schéma électrique de modèle étudié.

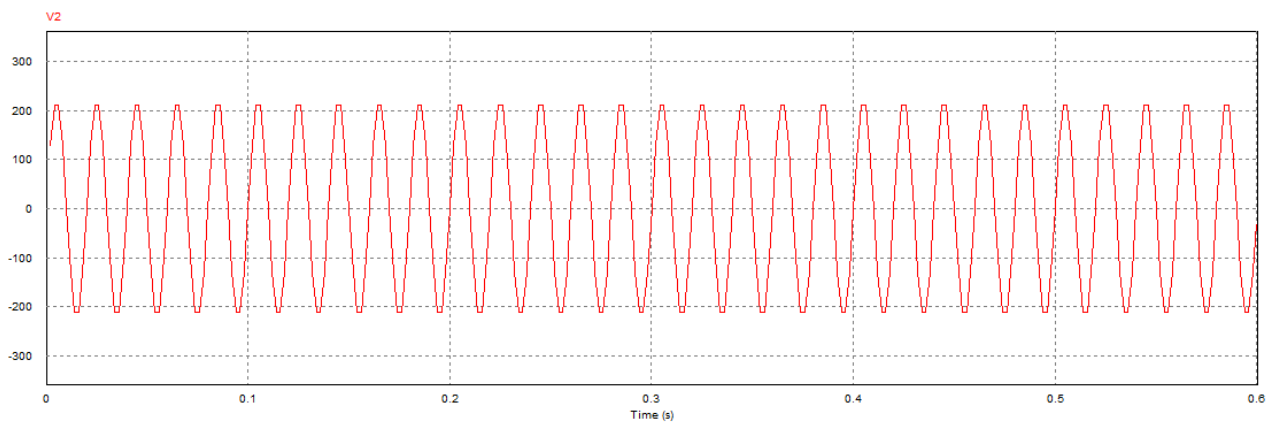
Les différents paramètres de simulation :

$$E_a = 230 V, f = 50H_z, R_a = 2\Omega, L_a = 70\mu H; R_{ch} = 50\Omega;$$

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  $I_a(t): I_a(t) = \frac{E_a}{\Sigma R} = \frac{230}{52} = 4.42A$

La tension nominale  $V_a(t) = 210.35 V$

III.7.1.2. Circuit sans défaut et avec limiteur

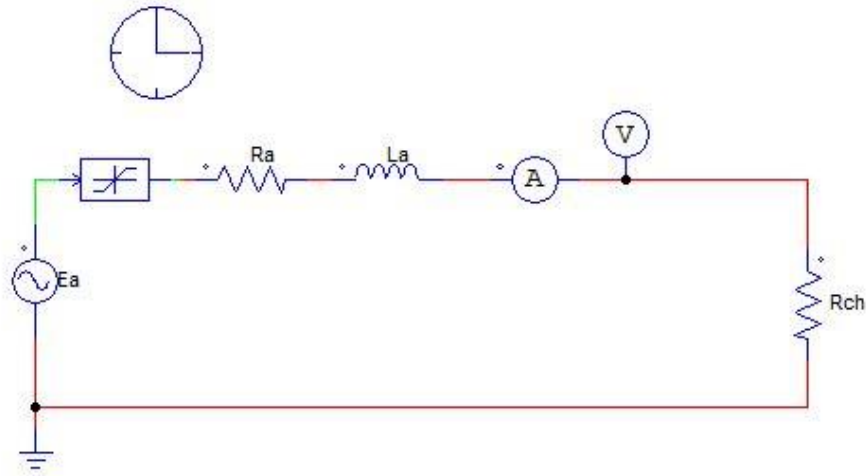


Figure III.6: Schéma de simulation.

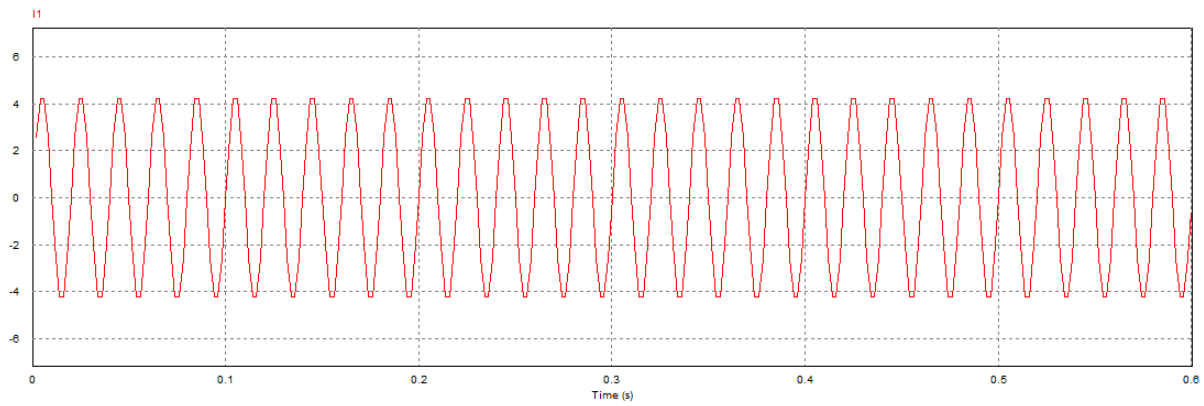


Figure III.7: Allure de courant  $I_a(t)$ .

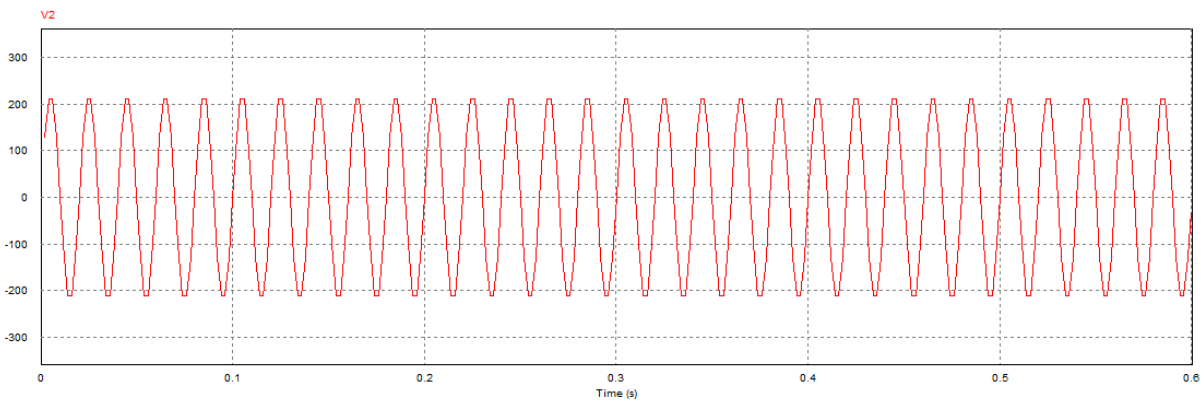


Figure III.8: Allure de tension  $V_a(t)$ .

On constate que les valeurs de  $V_{\alpha} = 210.35 V$  et  $I_{\alpha} = 4.45A$  sont identiques à celles obtenues dans le circuit sans défaut et sans limiteur, ce qui s'explique par le fait que le limiteur se comporte ici comme un élément à résistance négligeable. étant donné que  $I < I_c$  (absence de défaut).

### III.7.1.3 Circuit avec défaut et sans limiteur

À l'instant  $t = 0.2 s$ , un court-circuit est appliqué aux bornes de la charge. La simulation est réalisée sur une durée de  $0.6 s$  pour une meilleure lisibilité.

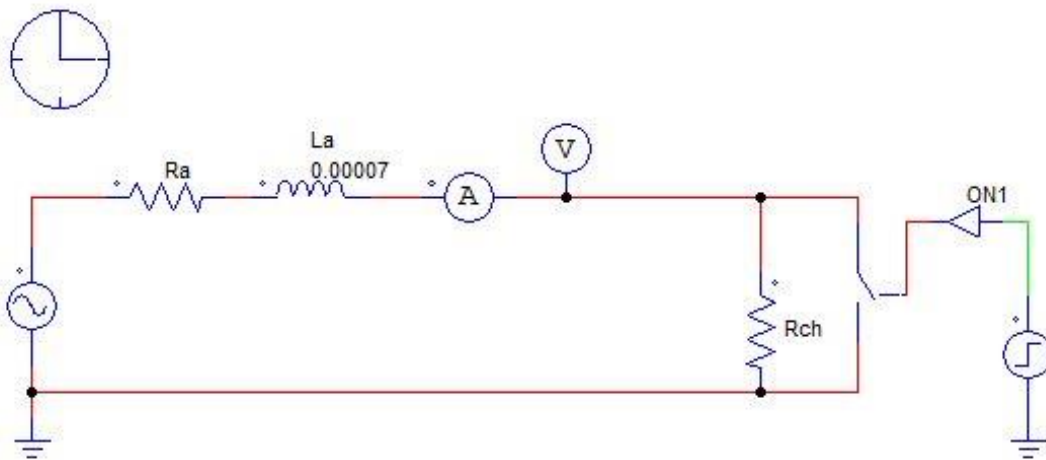


Figure III.9:Schéma de simulation.

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

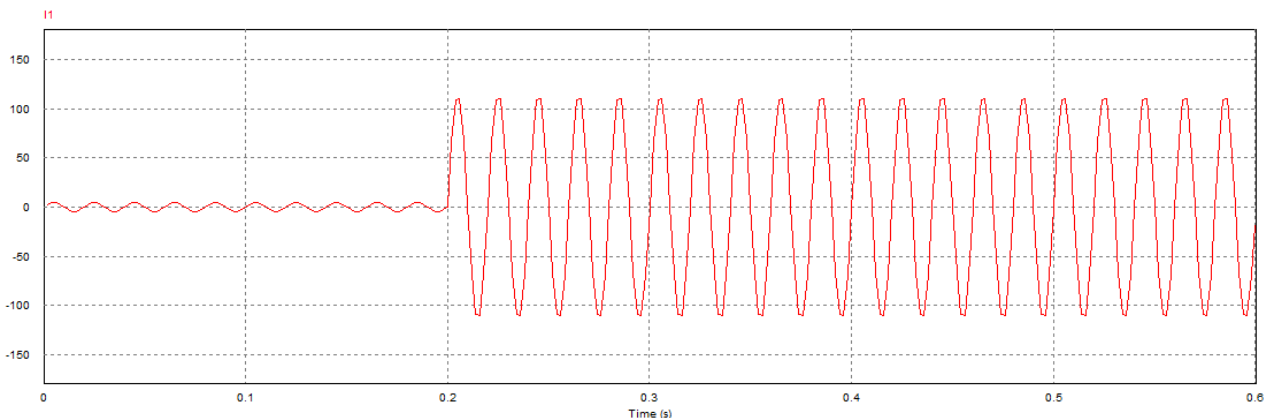
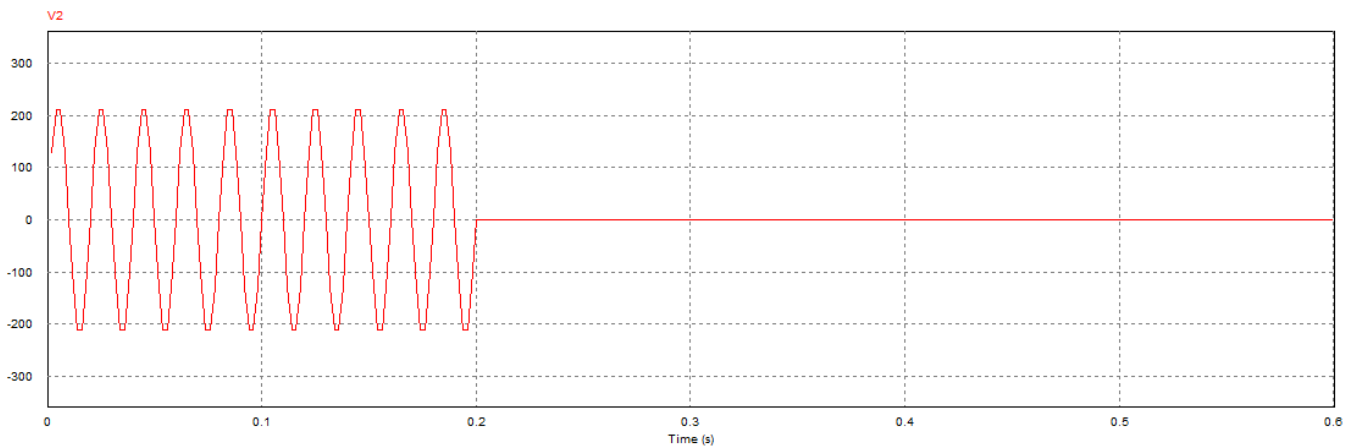


Figure III.10: Allure de courant  $I_a(t)$ .

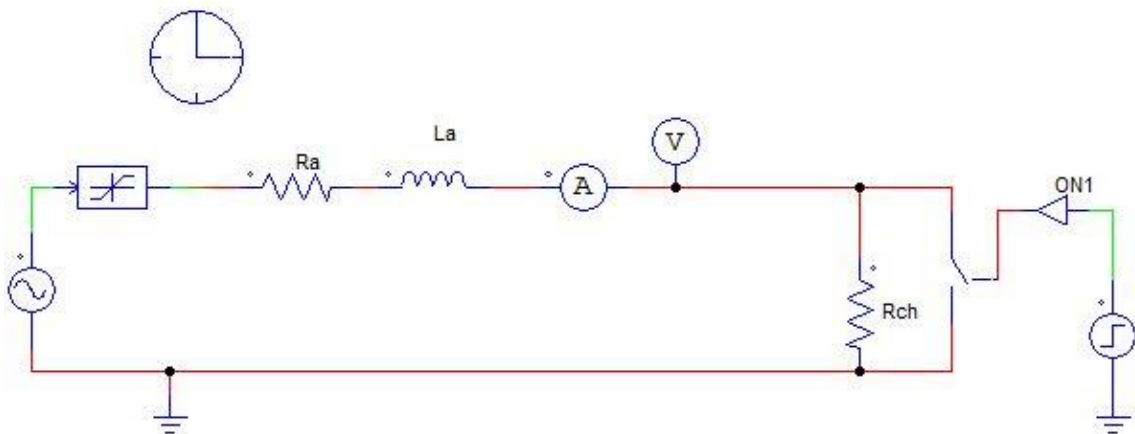
$$I_n = 4.45A \text{ et } I_{cc} = 109.77A \Rightarrow \text{donc } I_{cc} = 25 I_n$$



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

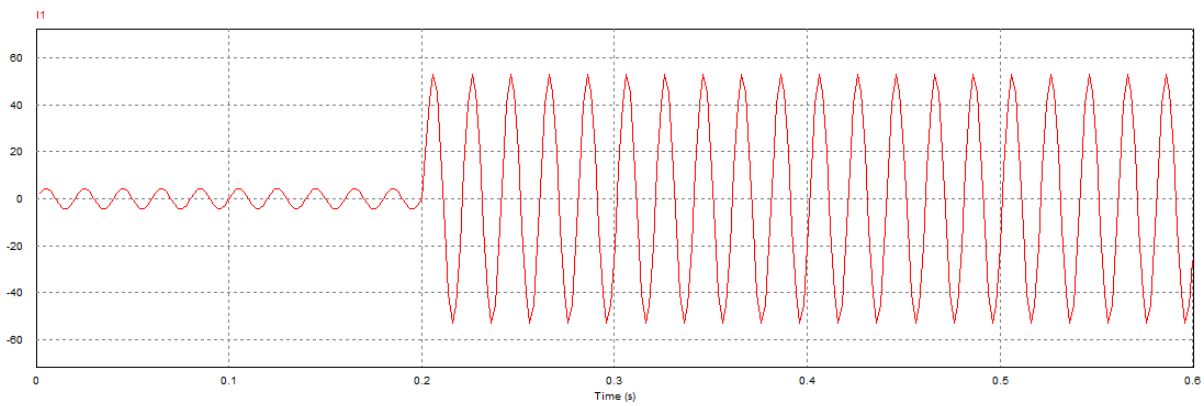
Après à l'apparition du court-circuit à l'instant  $t = 0,2$  s, la tension sur la ligne s'annule, ce qui se traduit par  $V_a = 0$ .

#### III.7.1.4 Circuit avec défaut et avec limiteur



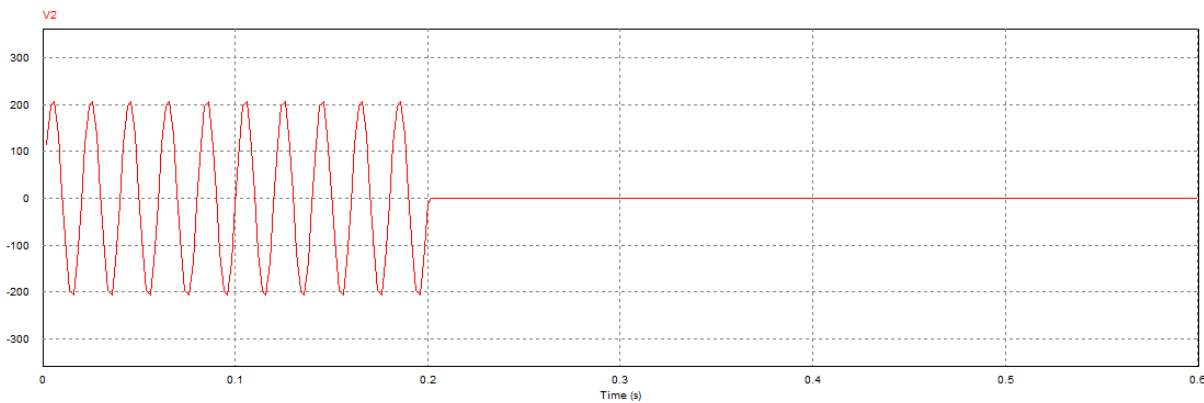
**Figure III.12:** Schéma de simulation.

L'insertion du limiteur dans le circuit permet de limiter efficacement le courant de court-circuit, lequel atteint une nouvelle valeur de 53,04 A.



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

Comme le montre la figure III.14, la tension mesurée aux bornes de la charge reste constamment nulle après l'apparition du défaut pour  $t \geq 0,2$  s, soit  $V = 0$  V.

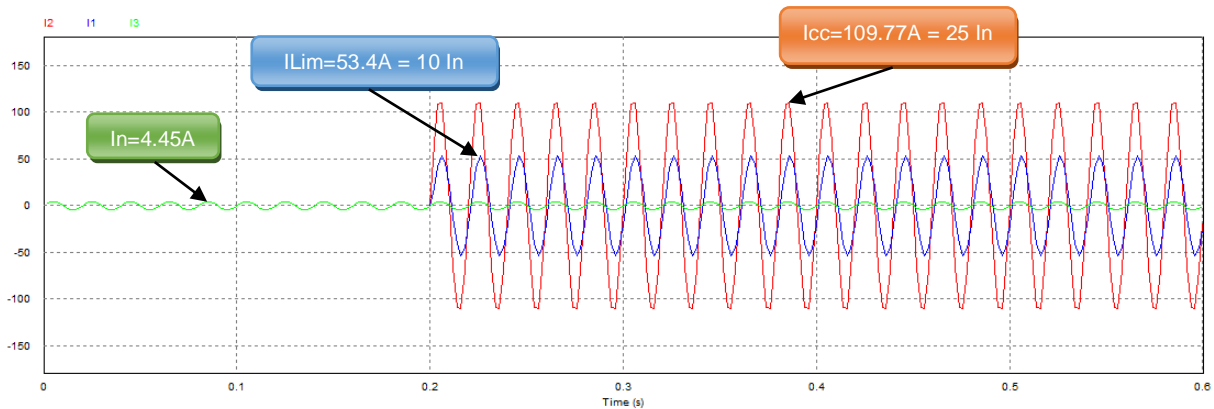


**Figure III.14 :**Allure de tension  $V_a(t)$ .

$$I_{cc}(\text{avant limitation}) : 109.77A = 25I_n$$

$$I_{cc}(\text{après limitation}) : 53.04A = 10I_n$$

Grâce à l'intégration du SFCL, le courant de court-circuit est limité de 109,77A à 53,04 A. Cette réduction, observée après l'apparition du défaut ( $t > 0,2$  s), correspond à une diminution d'environ 50 %, soulignant l'efficacité du dispositif en matière de protection du réseau.



**Figure III.15 :** Superposition d'Allure des courants avant défaut, en défaut sans limiteur et avec défaut avec limiteur.

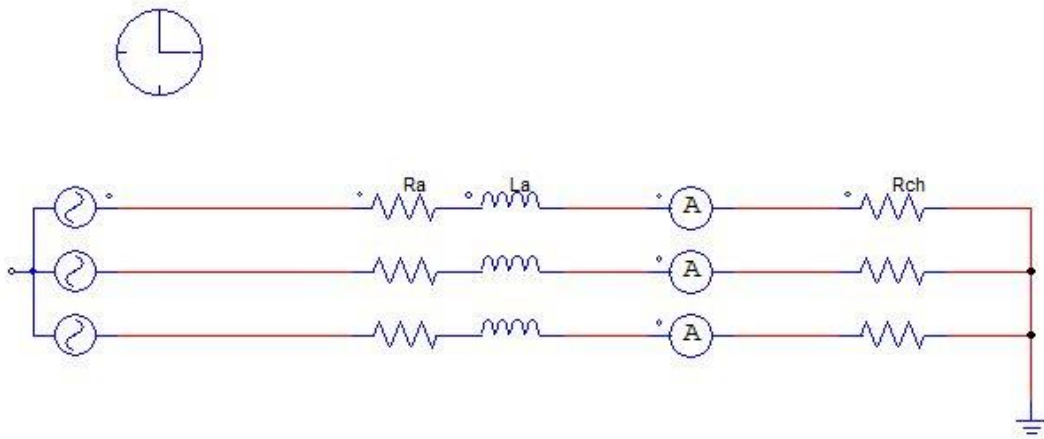
La figure III.15 illustre clairement l'efficacité du limiteur de courant, en montrant la superposition des courants avant défaut ( $I_n = 4,45\text{ A}$ ), en défaut sans limiteur où le courant de court-circuit atteint une valeur critique de  $109,77\text{ A}$  (soit  $25 I_n$ ), et en défaut avec limiteur où l'intensité est réduite à  $53,4\text{ A}$  (soit  $10 I_n$ ), ce qui confirme le rôle essentiel du limiteur dans la protection des équipements électriques contre les surintensités.

### III.7.2 Pour un récepteur triphasé

### III.7.3 Cas d'un court-circuit biphasé

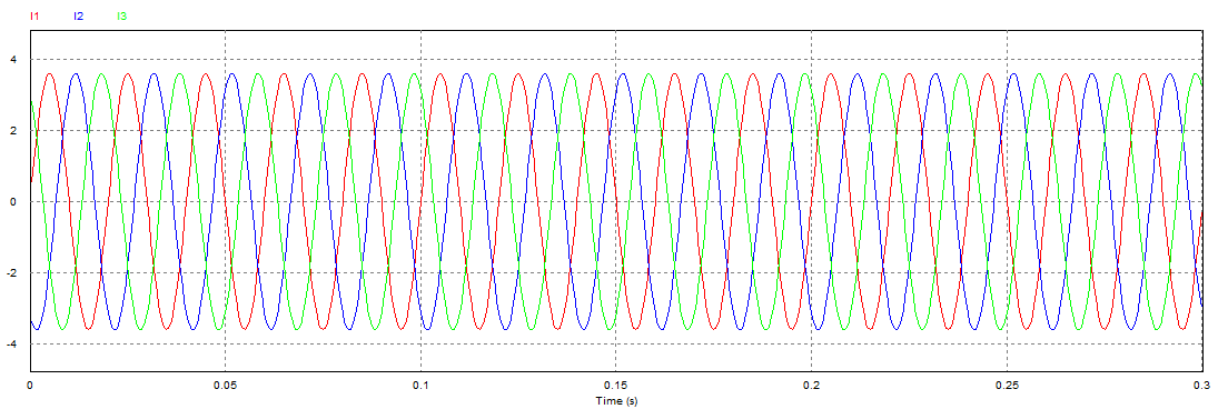
#### III.7.3.1 Circuit sans défaut et sans limiteur

Le circuit de simulation est alimenté par des sources de tension alternatives ( $E_1, E_2, E_3$ ) 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.15:** Schéma de simulation.

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



**Figure III.16:** Allure des courants dans les trois phases  $I_1, I_2, I_3$ .

Le courant nominal est égal 3.61 A donc :  $I_1 = I_2 = I_3 = I_n = 3.61A$

### III.7.3.2 Circuit sans défaut et avec limiteur

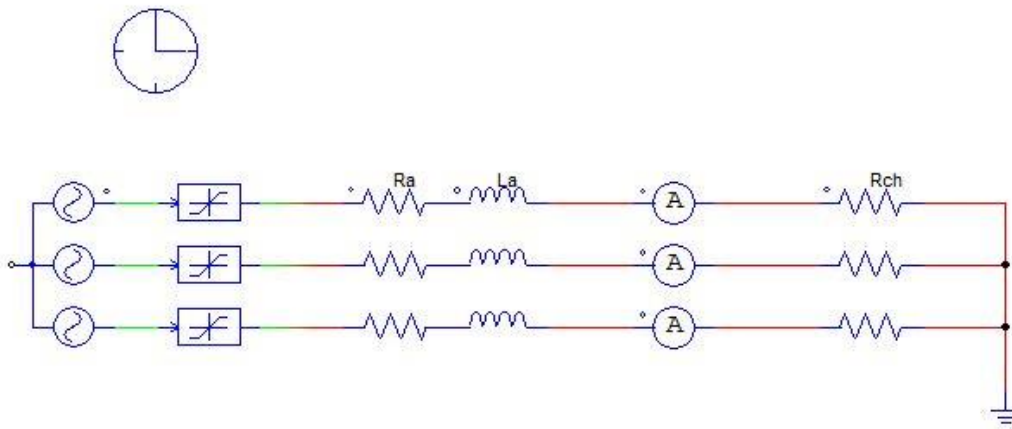
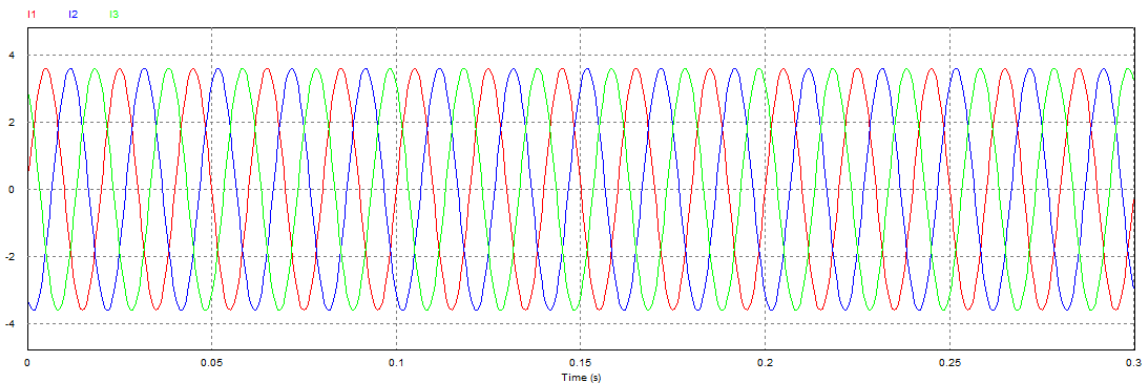


Figure III.17: Schéma de simulation.



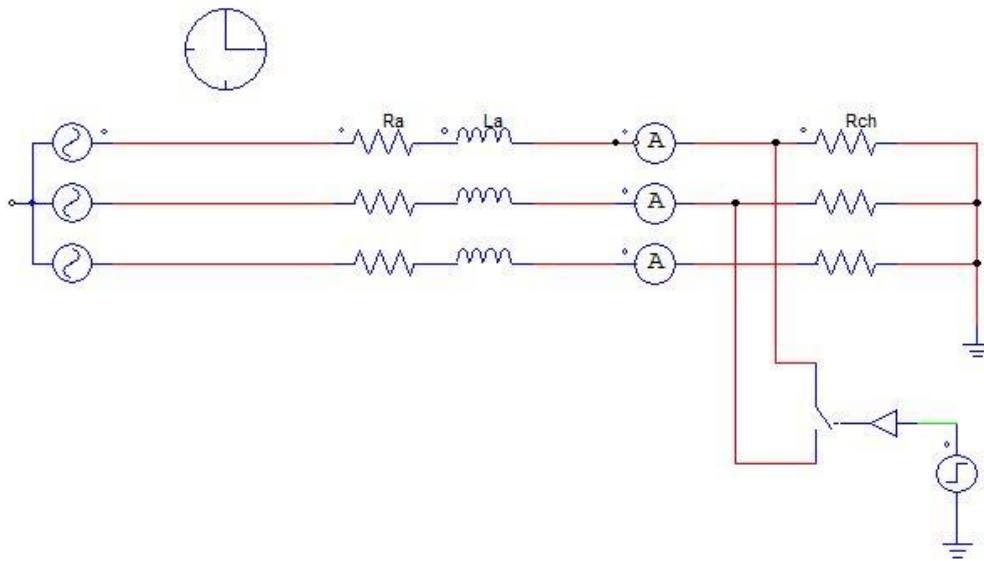
Fig

ure III.18 : Allure des courants dans les trois phases  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ .

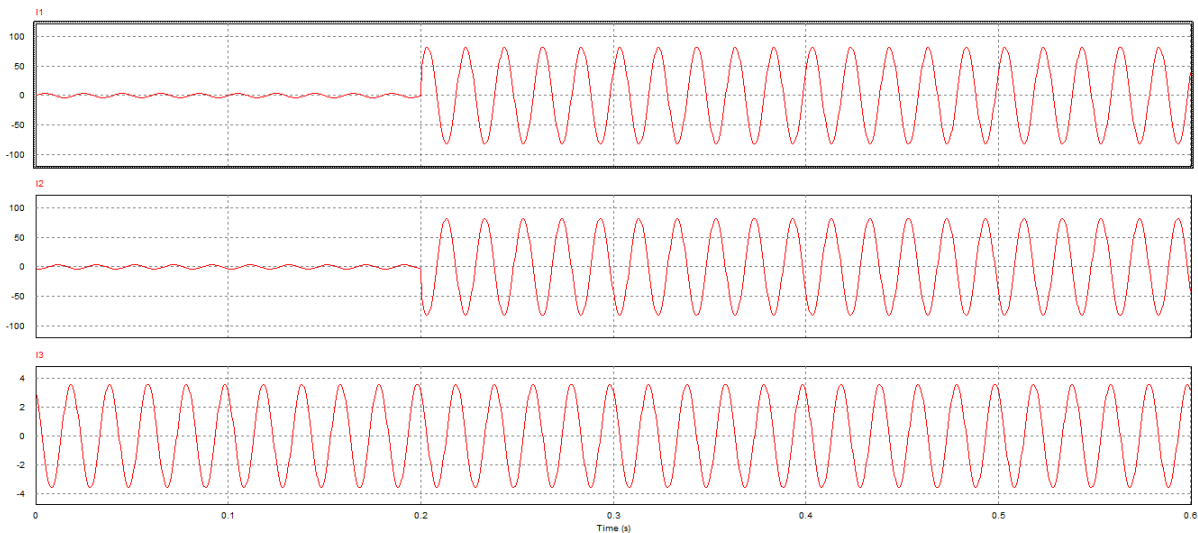
Interprétation : Tant que la densité de courant reste inférieure à la densité critique ( $J < J_c$ ), le limiteur présente une résistance négligeable, agissant ainsi comme un supraconducteur au sein du circuit.

### 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  $t=0.2$  s.



**Figure III.20:** Schéma de simulation.

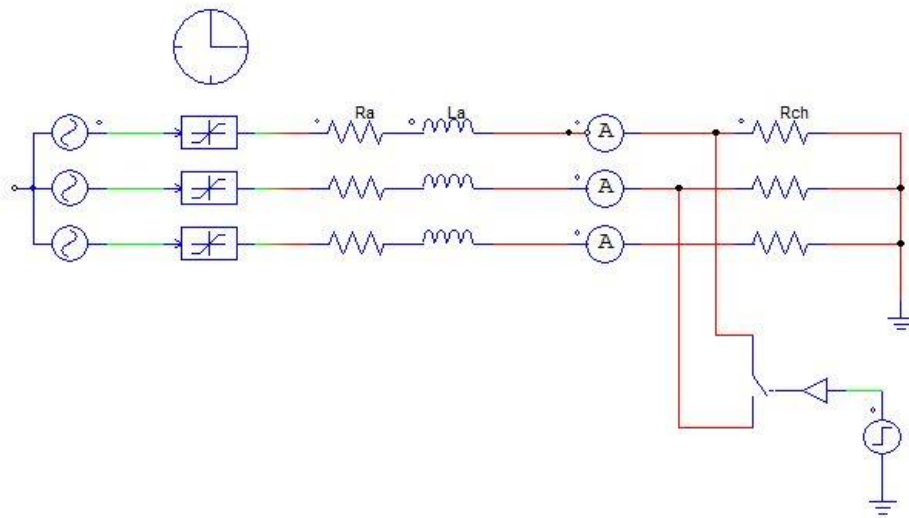


**Figure III.19:** Allure des courants  $I_1, I_2, I_3$ .

Selon les résultats de simulation, un court-circuit est survenu à  $t = 0,2$  s au niveau de la charge. En l'absence de limitation, les courants mesurés dans les lignes (1 et 2) étaient approximativement de 81,33 A, ce qui équivaut à près de 22 fois le courant nominal.

#### III.7.3.4 Circuit avec défaut et avec limiteur :

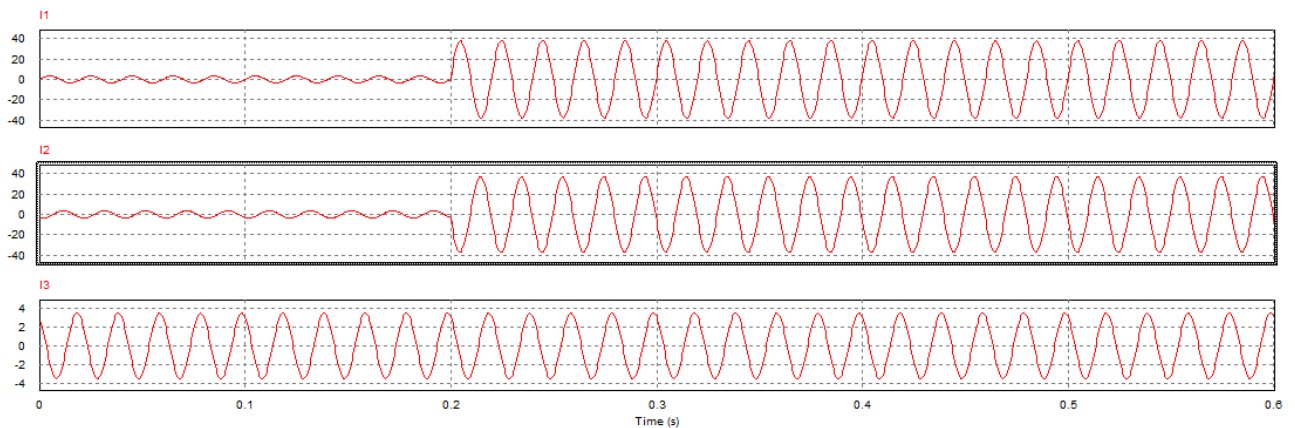
Le court-circuit est appliqué ou borne de la charge toujours à l'instant  $t=0.2s$  avec l'insertion d'un limiteur supraconducteur.



**Figure III.20:** Schéma de simulation.

Le court-circuit aux bornes de la charge se produit à l'instant  $t = 0,2$  s. Les courbes ci-dessous, Figure 3.22, illustrent les courants dans la ligne (1 et 2) après limitation, qui est d'environ :  $I_{cc1} = I_{cc2} = 38,2$  A (ce qui correspond à environ 10 fois  $I_n$ ).

**Après limitation :**  $I_{cc1}=I_{cc2}=38.2$  A =10  $I_n$

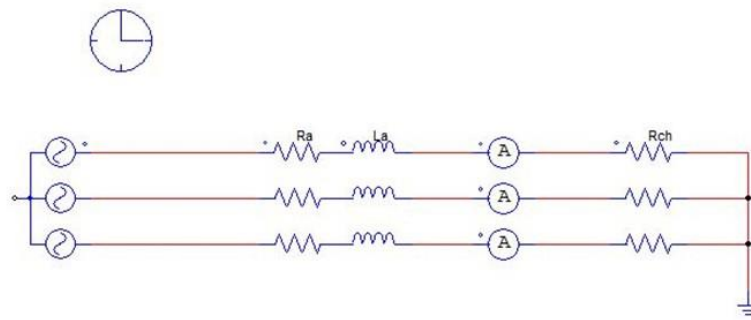


**Figure III.21:** Allure des courants  $I_1, I_2, I_3$ .

### III.7.4 Cas d'un court-circuit triphasé

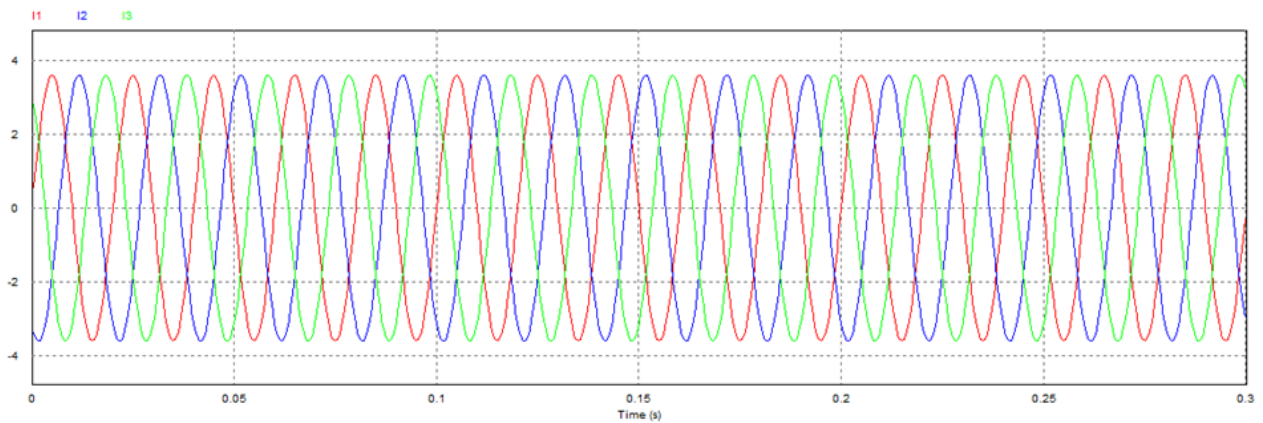
#### III.7.4.1 Circuit sans défaut et sans limiteur

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



**Figure III.22:** Schéma de simulation.

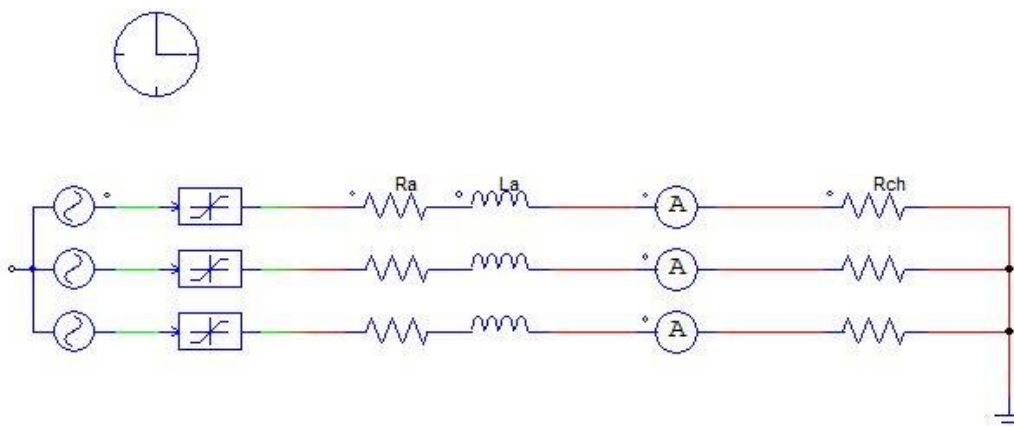
Graphes de  $V_a(t)$  et  $I_a(t)$  : pour les 3 Phases :



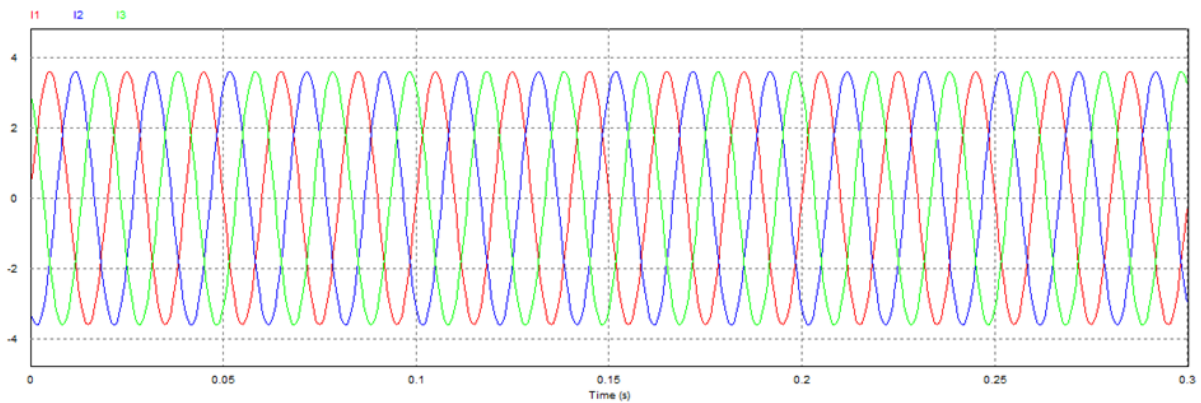
**Figure III.23:** Allure des courants dans les trois phases  $I_1, I_2, I_3$ .

Le courant nominal est égal 4.47A donc :  $I_1 = I_2 = I_3 = I_n = 3.61A$

### III.7.4.2 Circuit sans défaut et avec limiteur



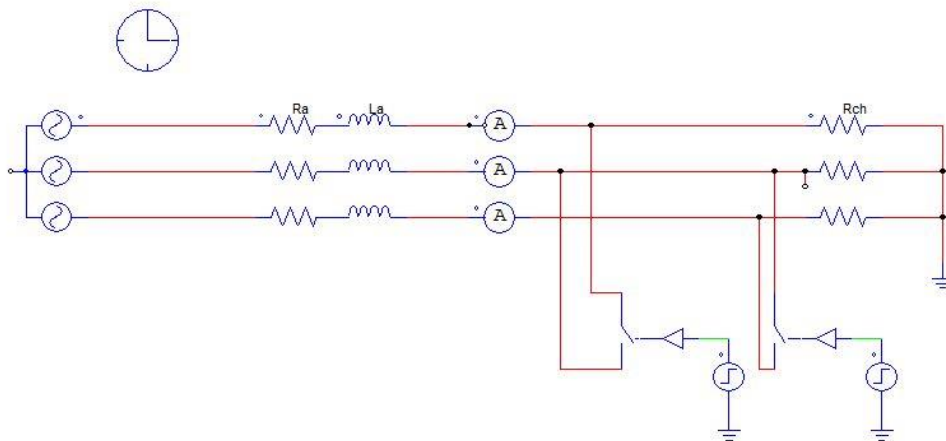
**Figure III.24:** Schéma de simulation.



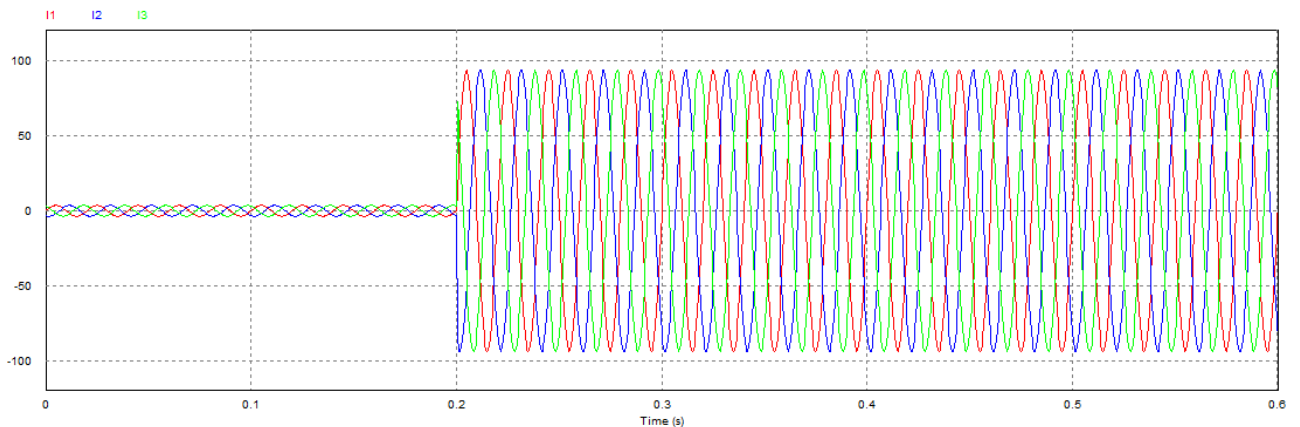
**Figure III.25:** Allure des courants dans les trois phases  $I_1, I_2, I_3$ .

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

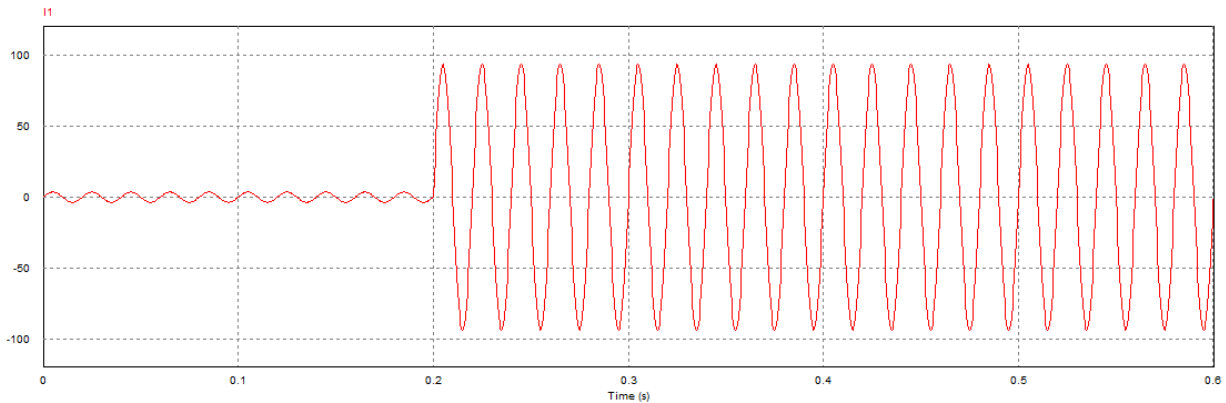


**Figure III.26:** Schéma de simulation.

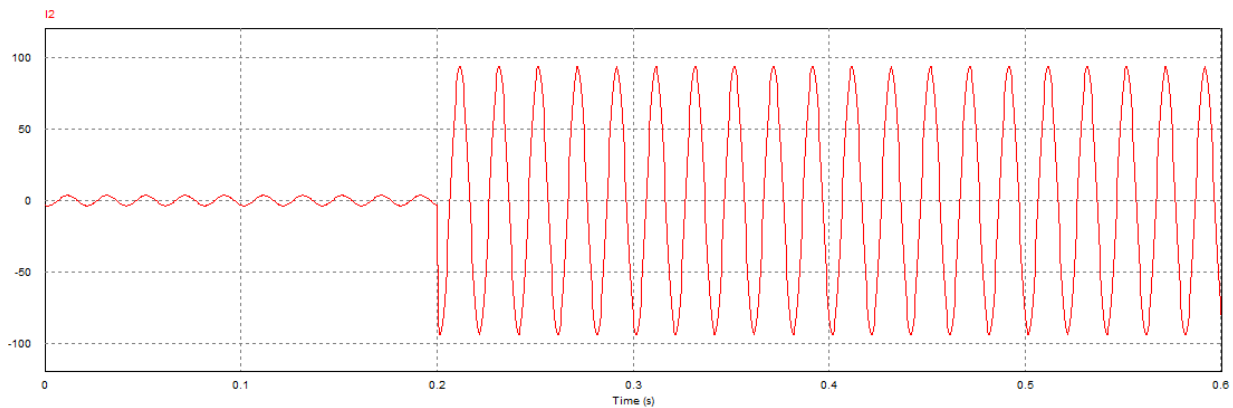


**Figure III.27:** Allure des courants  $I_1, I_2, I_3$ .

Un court-circuit a été appliqué à l'instant  $t = 0.2s$ , ce qui a entraîné un court-circuit aux bornes de la charge, avec une valeur de  $I_{cc} = 93,88 \text{ A} = 26 \times I_n$ . Cette valeur est très élevée et, par conséquent, le courant de court-circuit représente un risque considérable pour l'installation, ainsi que pour l'élément de protection (disjoncteur), qui doit disposer d'un pouvoir de coupure important. Il est donc essentiel de limiter ce courant de court-circuit à une valeur acceptable afin qu'il puisse être contrôlé efficacement par le disjoncteur.



**Figure III.30 :** Allure de courant  $I_1$ .



**Figure III.28 :** Allure de courant  $I_2$ .

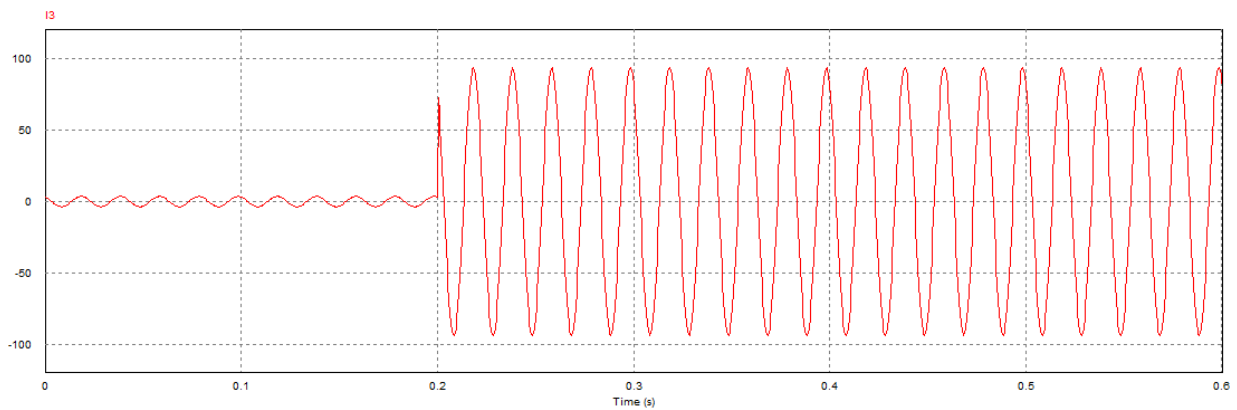


Figure III.29 : Allure de courant  $I_3$ .

### III.7.4.4 Circuit avec défaut et avec limiteur

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

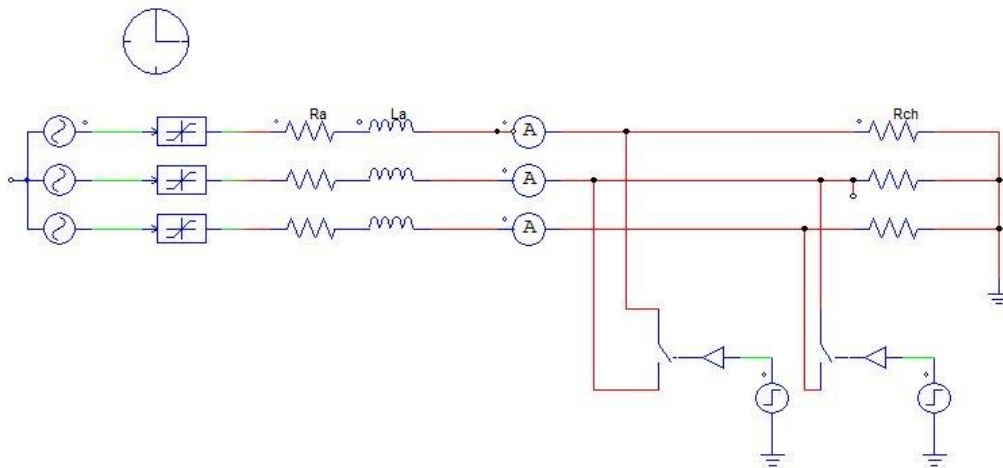


Figure III.30 : Schéma de simulation .

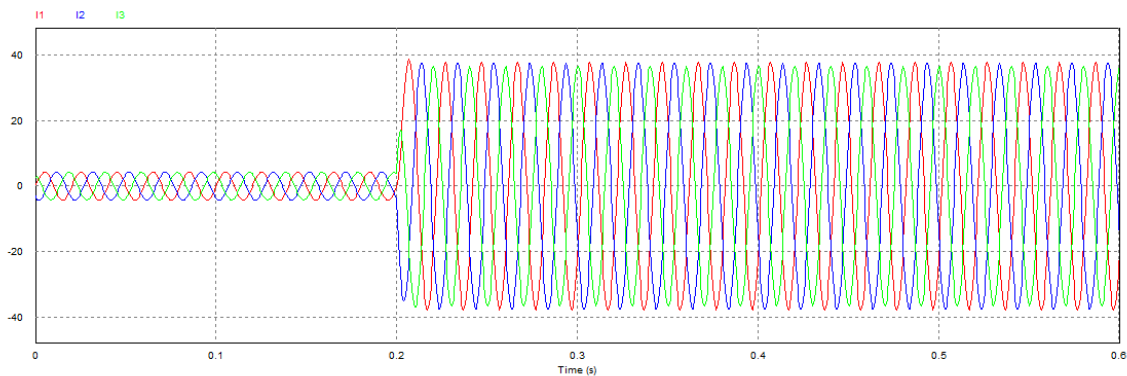


Figure III.31 : Allure les trois courants.

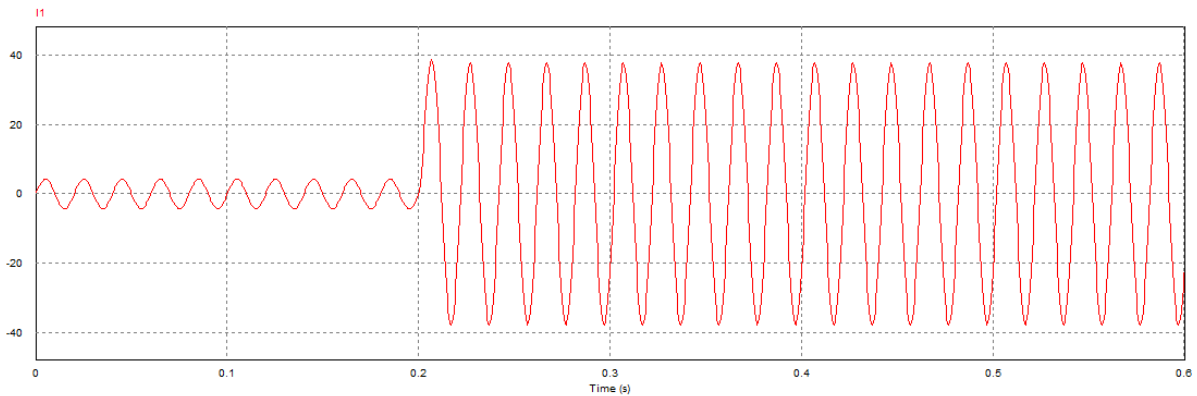
Sur les figures (III. 34, III. 35, III. 36) on constate clairement qu'après l'insertion des limiteurs, les courants pendant la période de défaut à  $t \leq 0,2$  s  $I_n = 3.61$ A. à  $t \geq 0,2$  s  $I_{cc1} = I_{cc2} = I_{cc3} = 38.89$ A les courants de court-circuit sont réduit d'un facteur important.

**Avant le défaut :**  $I_1 = I_2 = I_3 = 3.61$  A

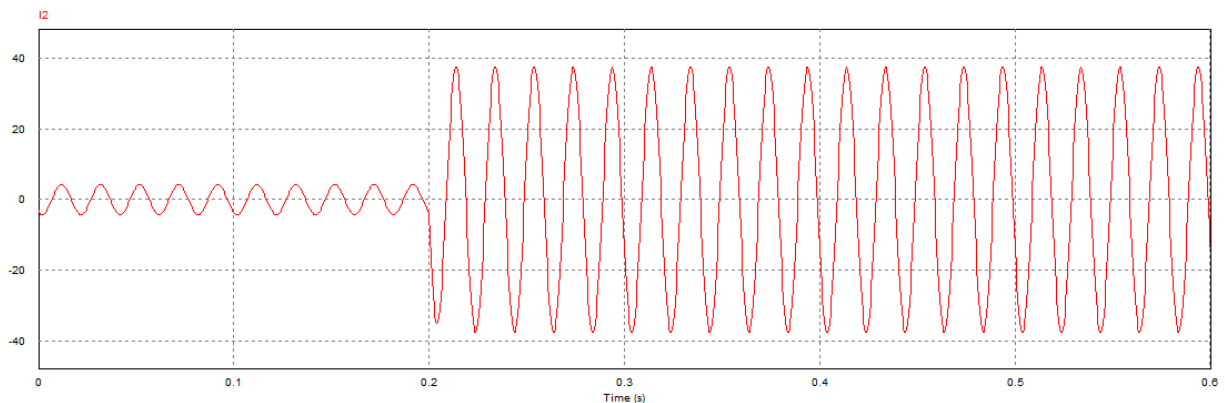
**Après le défaut :**

**Avant limitation :**  $I_{cc1} = I_{cc2} = I_{cc3} = 93.88$  A  $= 26 I_n$

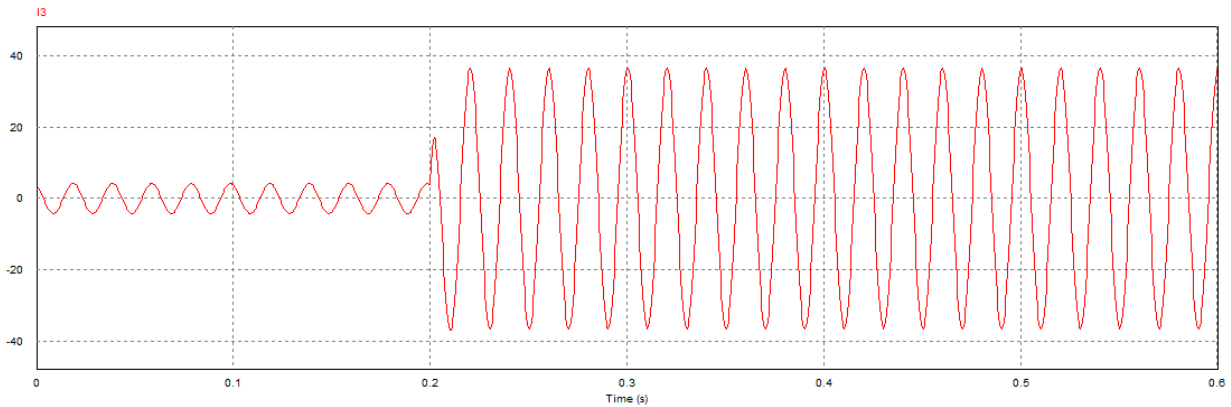
**Après limitation :**  $I_{cc1} = I_{cc2} = I_{cc3} = 38.89$  A  $= 10 I_n$



**Figure III.32 :** Allure de courant  $I_1$ .



**Figure III.33 :** Allure de courant  $I_2$ .



**Figure III.34 :** Allure de courant  $I_3$ .

### III.8 Conclusion :

Ce chapitre a permis d'analyser, à travers des simulations numériques sous PSIM, le comportement des courants de court-circuit dans différents scénarios (monophasé, biphasé et triphasé) en présence et en absence d'un limiteur de courant inductif supraconducteur (SFCL), et les résultats ont clairement démontré que l'ajout du limiteur permet une réduction significative de l'intensité des courants de défaut : dans le cas du récepteur monophasé, le courant de court-circuit est passé de 109,77 A (soit 25 fois le courant nominal  $I_n = 4,45$  A) à 53,4 A (10  $I_n$ ) avec limiteur ; pour le court-circuit biphasé, la valeur du courant a été limitée de 83,44 A (23  $I_n$ ) à 38,3 A (11  $I_n$ ) ; enfin, pour le cas le plus critique du court-circuit triphasé, le courant a été réduit de 93,88 A (26  $I_n$  pour  $I_n = 3,61$  A) à 38,89 A (10  $I_n$ ), ce qui illustre la capacité du SFCL à atténuer efficacement les pics de courant, à protéger les équipements sensibles tels que les disjoncteurs, et à améliorer la stabilité transitoire et la fiabilité globale du réseau électrique.

# Conclusion Générale

## **Conclusion générale**

Ce travail porte sur l'étude d'un limiteur inductif de courant de défaut en utilisant le logiciel de simulation PSIM. L'objectif principal était d'analyser le comportement du limiteur en présence de défauts électriques et d'évaluer son efficacité dans la protection des réseaux électriques.

Pour atteindre cet objectif, nous avons tout d'abord étudié les principes fondamentaux des limiteurs de courant ainsi que les matériaux supraconducteurs utilisés dans leur conception. Nous avons ensuite modélisé et simulé sur différents types de réseaux (monophasé, biphasé, triphasé) afin d'observer l'impact des paramètres clés, tels que le courant de ligne, la tension.

Les résultats obtenus à travers les simulations ont mis en évidence l'efficacité du limiteur inductif dans la réduction des courants de défaut, confirmant ainsi l'intérêt des matériaux supraconducteurs pour ce type d'application. De plus, la comparaison des performances a permis d'identifier les avantages et les limitations de la structure étudiée, ouvrant ainsi la voie à des améliorations futures.

Ainsi, ce travail constitue une contribution à la compréhension et à l'amélioration des limiteurs inductifs de courant de défaut, dont l'application pourrait s'avérer essentielle pour la protection et la fiabilité des réseaux électriques modernes.

## 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] **Bouchehou, 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.

## REFERENCES

- [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 électromécanique. » 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 entré/sortie de la MAS, mémoire de master, Université des Sciences et de la Technologie Mohamed El Bachir El Ibrahimi Bordj Bou arreridj.
- [34] **Samir, A., & Chafaa, A. L.** (2013). *Dimensionnement et calcul de courant de court-circuit d'un transformateur triphasé 100 KVA, 30KV/0.4 KV* (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).

[35] **Valentin Donnier-Valentin.** Contribution à l'étude des transformateurs supraconducteurs. Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2001. Français. ⟨NNT : ⟩. ⟨tel-00597717⟩

[36] **Moomou, J., & Luissint, C.** (2020). Fernando SANTOS-GRANERO, Slavery & Utopia. The Wars & Dreams of an Amazonian World Transformer. *Esclavages & Post-esclavages. Slaveries & Post-Slaveries*, (3).

[37] **Darkawi, A.** (2019). Transformateur monophasé.

[38] **Herrera, C. M.** (2021). Constitution et transformation, de Weimar à nos jours. *Revue française de droit constitutionnel*, 227-248.

[39] **Belkacemi, D.** (2012). Etude des caractéristiques des matériaux isolants pour transformateurs (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).

[40] **A. Masson et L. Breguet.** 1884.1840 Premier transformateur électrique,

[41] **Saber, N.** (2020). Protection et maintenance d'un transformateur industrielle.

[42] **Goodman, B. B.** (1964). Le transformateur supraconducteur. *Journal de Physique Appliquée*, 25(S11), 171-172.

[43] **Ferreira, L., Baazizi, Y., Meunier, S., Phulpin, T., Beljio, R., Trillaud, F., ... & Quéval, L.** (2023, July). Etude expérimentale de l'alimentation d'un dispositif supraconducteur à courant continu. In *Symposium de Genie Electrique (SGE 2023)*.