

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées  
Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Machines électriques

Présenté par :

MARAF HALLA      NECIB ZAINEB

**Thème :**

**Analyse de L'énergie Dissipative Dans Les Limiteurs de  
Courant Inductif Pour Les Systèmes D'énergie**

Soutenu publiquement

Le :26/06/2018

Devant le jury :

NACEUR Sonia

MCA

Président

UKM Ouargla

BEN ALIA Khaled

MCB

Encadreur/rapporteur

UKM Ouargla

BOUCHALA Tarik

MCA

Examineur

UKM Ouargla


**Année universitaire 2017/2018**

الله أكبر



## *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire*



*À mes chers parents ma mère et mon père*

*Pour leur patience, leur amour, leur soutien*




*et leurs encouragements*

*À Toute la famille et la famille*

*universitaire*



*À mes amis*



*Necib Zineb*



## *Dédicace*

*Avec grand plaisir, je dédie ce modeste  
travail*

*Pour le plus beau et le plus grand être  
humain de l'univers à ma mère bien-aimée*

*"Mon mari et mes copines Moustafa  
Pour ma belle-mère, la source de la  
miséricorde et de la tendresse*

*Et toute la famille de mon mari  
A mes frères Aïda, Hayat, Latifa et  
Mohammed*

*Pour Abdullah, Anas, Lina, Eyad  
À ma famille, Ben Hania et Mallwah  
Pour mes camarades de classe chers amis  
À tous les enseignants et enseignants depuis  
le début de la première*

*La fin de la phase universitaire*

***HALA. Maraf***



## *Remerciements*

Nous remercions le bon dieu de nous avoir donné la volonté et la patience qui nous ont permis de mener à bien ce travail.

Nous remercions vivement notre encadreur : **Dr. Khaled BEN ALIA** qui a Un rôle important dans le déroulement de cette étude. Pour son aide, ainsi que pour la confiance qu'il nous a prodiguée durant la réalisation de ce travail. Nos plus vifs remerciements s'adressent également aux membres de jury qui nous ont honorés en acceptant d'évaluer ce travail :

1- NACEUR Sonia

2-. BEN ALIA Khaled

3- BOUCHALA Tarik En fin, nous aimerions adresser nos plus fervents remerciements à nos parents, car nul autre qu'eux se sont plus ne sacrifie pour votre bien et l'accomplissement de nos projets.



*Maraf Hala*

*Necib Zineb*

# Sommaire

Liste des figures.....	IV
Liste des tableaux .....	V
Liste des symboles .....	VI
Liste des abréviations .....	VI
Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I : les supraconducteurs</b>	
<b>I.1</b> Introduction.....	3
<b>I.2</b> Historique de la supraconductivité.....	3
<b>I.3</b> Les grandeurs critiques (Surface critique).....	5
<b>I.4</b> Classification des supraconducteurs.....	6
<b>I.4.1</b> Supraconducteur de type I.....	6
<b>I.4.2</b> Supraconducteur de type II.....	8
<b>I.5</b> Modèle des matériaux supraconducteurs.....	9
<b>I.5.1</b> Modèle de Bean.....	9
<b>I.5.2</b> Modèle de loi de puissance.....	10
<b>I.5.3</b> Modèle de KIM.....	10
<b>I.6</b> Applications des supraconducteurs.....	10
<b>I.6.1</b> Application médicale.....	10
<b>I.6.2</b> Conservation de l'énergie.....	11
<b>I.6.3</b> Les câbles supraconducteurs.....	11
<b>I.6.4</b> Machines tournant.....	12
<b>I.6.5</b> Les lignes de transport.....	12

<b>I.6.6</b>	Moyens de transports.....	12
<b>I.6.7</b>	Les limiteurs du courant.....	13
<b>I.7</b>	Conclusion.....	13
<b>Chapitre II : Les limiteurs de courant</b>		
<b>II.1</b>	Introduction.....	14
<b>II.2</b>	Limitation du courant .....	14
<b>II. 2.1</b>	Défauts.....	14
<b>II.2.2</b>	Le courant de défaut.....	14
<b>II.3</b>	Fonctionnement d'un limiteur de courant.....	15
<b>II.3.1</b>	principe général de la limiteur de courant.....	15
<b>II.3.2</b>	Limiteurs de courant classique.....	15
<b>II.3.2.a</b>	Arc électrique.....	15
<b>II.3.2.b</b>	Réactance série.....	15
<b>II.3.2.c</b>	Limiteur commandé.....	15
<b>II.3.2.d</b>	Condensateur.....	16
<b>II.3.2.e</b>	Inductance.....	16
<b>II.3.2.f</b>	Résistance.....	16
<b>II.3.2.g</b>	Résistance variable.....	16
<b>II.4</b>	Limiteur de courant à base de supraconducteur.....	17
<b>II.4.1</b>	Limiteur résistif.....	17
<b>II.4.2</b>	Limiteur inductif.....	17
<b>II.5</b>	les modèles électriques et thermiques d'un limiteur de courant inductif.....	18
<b>II.5.1</b>	Modèles électriques.....	20
<b>II.5.2</b>	Modèles thermiques.....	21

<b>II.6</b>	Conclusion.....	22
<b>Chapitre. III : résultats et simulation</b>		
<b>III.1</b>	Introduction.....	23
<b>III.2</b>	Première partie.....	23
<b>III.2.1</b>	Description de réseau étudié.....	23
<b>III.2.2</b>	cas d'un court-circuit.....	24
<b>III.3</b>	Deuxième partie partie.....	25
<b>III.3.1</b>	le cas d'insertion d'un limiteur inductif.....	25
<b>III.3.1.a</b>	Description de réseau étudié.....	25
<b>III.3.1.b</b>	Les résultats et simulation.....	28
<b>III.3.2</b>	Influence de la durée défaut.....	30
<b>III.3.3</b>	Influence de la charge .....	32
<b>III.3.4</b>	Influence de la Température.....	32
<b>III.3.5</b>	Etude de L'énergie dissipé dans le limiteur.....	33
<b>III.4</b>	Conclusion.....	35
	Conclusion générale.....	36
	Références Bibliographiques.....	37



# Liste des figures

<b>Chapitre I : les supraconducteurs</b>	
<b>Fig.I.1</b>	Illustration de la dépendance fonctionnelle de l'état supraconducteur en ce qui concerne le champ magnétique, la température et la densité de courant.....5
<b>Fig.I.2</b>	Variation du champ en fonction de la température.....6
<b>Fig.I.3</b>	Diagramme de phases d'un supraconducteur de type I.....7
<b>Fig.I.4</b>	Diagramme de phases d'un supraconducteur de type II.....8
<b>Fig.I.5</b>	Caractéristique $E(j)$ d'un supraconducteur, modèle de l'état critique...9
<b>Fig.I.6</b>	Coupe du câble supraconducteur de projet Long Island (USA) (photo Nexans).....11
<b>Fig.I.7</b>	Le Transrapide allemand.....12
<b>Fig.I.8</b>	Le Maglev japonais.....13
<b>Chapitre II : Les limiteurs de courant</b>	
<b>Fig.II.1</b>	Principe du limiteur de courant résistif.....17
<b>Fig. II.2</b>	Principe du limiteur de courant inductif.....18
<b>Fig. II.3</b>	type de blindage (bouclier) magnétique limiteur de courant supraconducteur.....19
<b>Fig.II.4</b>	Schéma d'un transformateur.....20
<b>Fig.II.5</b>	Schéma équivalent d'un transformateur ramené au primaire.....20
<b>Fig.II.6</b>	Caractéristique $E(J)$ réel d'un SFCL.....20
<b>Fig. II.7</b>	Schéma équivalent thermique d'un supraconducteur.....22
<b>Chapitre.III : Résultats de simulation</b>	
<b>Fig.III.1</b>	Allure de courant pendant le fonctionnement normal.....23
<b>Fig.III.2</b>	Allure de tension composée pendant le fonctionnement normal.....24

<b>Fig.III.3</b>	Allure de courant pendant un défaut.....	24
<b>Fig.III.4</b>	Allure de tension composée pendant un défaut.....	25
<b>Fig.III.5</b>	Schéma unifilaire d'un réseau étudié.....	26
<b>Fig.III.6</b>	variation de tension en fonction de temps dans le cas défaut avec SFCL.....	28
<b>Fig.III.7</b>	variation de courant en fonction de temps dans le cas défaut avec SFCL.....	29
<b>Fig.III.8</b>	variation de la résistance en fonction de temps dans le cas défaut avec SFCL.....	29
<b>Fig.III.9</b>	variation de température en fonction de temps dans le cas défaut avec SFCL.....	30
<b>Fig.III.10</b>	variation de température pour différents durées de défaut.....	31
<b>Fig.III.11</b>	variation de la résistance pour différents durées de défaut.....	31
<b>Fig.III.12</b>	variation de la résistance pour différents charges.....	32
<b>Fig.III.13</b>	variation de la température pour différents charges.....	32
<b>Fig.III.14</b>	variation de la température pour différents température ambiante.....	33
<b>Fig.III.15</b>	variation de la résistance de limiteur pour différents température ambiante.....	33
<b>Fig.III.16</b>	variation de l'énergie et la résistance en fonction du temps.....	34
<b>Fig.III.17</b>	variation de l'énergie et la résistance en fonction du temps.....	35

## Liste des tableaux

<b>Tableau. I.1</b>	Liste de quelques matériaux supraconducteurs de type I.....	7
<b>Le Tableau.III.1</b>	Montre les grandeurs géométriques et magnétiques du transformateur.....	26
<b>Tableau.III.2</b>	Paramètres de supraconducteur.....	27

# Liste Des Symboles

Température de transition critique.	
$T_a$ [K]	La température ambiante
$T$ [K]	Température.
$H_c$ [A /m]	Champ critique thermodynamique.
$H_{c1}$ [A/m]	Premier champ magnétique critique.
$H_{c2}$ [A/m]	Deuxième champ magnétique critique.
$J_c$ [A /m <sup>2</sup> ]	Densité de courant critique.
$S_n$ [VA]	La puissance nominale.
$I_n$ [A]	Le courant nominal.
$I_{cc}$ [A]	Courant de court-circuit.
$U_n$ [V]	niveau de tension phase- neut.
$P_n$ [W]	La puissance de court-circuit.
$Q_{sc}$ [J]	La chaleur a dissipé dans le supraconducteur.
$Q_{\text{évacuées}}$ [J]	Chaleur évacuée par le système de refroidissement.
$\mu_r$ [H/m]	Perméabilité magnétique.
$\mu_0$ [H/m]	Perméabilité magnétique du vide.
$h$ (m)	Hauteur de noyau de fer.
$r_c$ (m)	Rayon de noyau de fer.
$r_s$ (m)	Rayon of cylinder HTS.
$r_p$ (m)	Rayon de bobine de cuivre.
$E$ [V/m]	Le champ électrique.

# Liste Des Abréviations

Les Abréviations	
<b>BCS</b>	La théorie Bardeen Cooper et Schrieffer
<b>DC</b>	Courant continu
<b>AC</b>	Courant alternatif
<b>CTP</b>	Coefficient Thermique Positif
<b>SFCL</b>	Limiteur de courant à base du supraconducteur
<b>HTC</b>	Haut température critique
<b>SMES</b>	Magnétique Supraconducteur Stockage Energie.
<b>IRM</b>	Imagerie par Résonance Magnétique
<b>SHT<sub>c</sub></b>	Supraconducteurs à haute température critique

*INTRODUCTION*  
*GENERALE*

## **Introduction générale**

Les besoins en énergie électrique accroissent largement en quantité qu'en qualité. Cela entraîne une croissance de la puissance des appareillages installés dans les réseaux.

Cette tendance implique une augmentation importante de la puissance de court-circuit qui rend plus difficile le contrôle des moyens de coupure des courants en cas de défaut.

Elle impose, d'autre part, d'introduire une meilleure sélectivité de façon à n'isoler que les zones de défaut sans perturber le fonctionnement des zones restées saines.

La limitation rapide des courants de défaut reste un problème mal résolu dans les réseaux électriques dus aux limites mécaniques encore inévitables. Les dégâts thermiques sont en général limités par l'action des disjoncteurs après quelques demi-périodes. Mais, il est trop tard pour les effets électrodynamiques avec tous ses progrès réalisés dans le domaine des commutateurs.

Au présent, le développement des supraconducteurs à haute température critique permet la réalisation des dispositifs supraconducteurs ultrarapides (SFCL) pour la limitation des courants de défaut dans les réseaux électriques. Les limiteurs de courant de défaut supraconducteurs sont les seuls capables d'assurer une protection contre ces dégâts par un grand pouvoir de coupure due à la très grande différence entre l'état supraconducteur et l'état résistif.

Les limiteurs de courant de défaut (FCL) à base de supraconducteur (SFCL) montrant des caractéristiques très proches du FCL idéal, sont considérés comme des candidats sérieux à insérer dans les réseaux électriques afin d'éviter les dommages de court-circuit et la mise à niveau inévitable de l'équipement système. Jusqu'à présent, différents types de SFCL, notamment résistif normal, débit de flux résistif, blindage magnétique inductif, transformateur inductif, réacteur à courant continu, et noyau saturé, sont proposés en fonction des différentes propriétés des supraconducteurs [1].

Le limiteur inductif à blindage magnétique présente les avantages généraux de tous les types inductifs, notamment une grande flexibilité de conception et son avantage essentiel du courant sans fil, isolant ainsi entre SFCL et ligne de transmission d'énergie [2], [3].

Dans cette configuration, le supraconducteur est fixé entre la bobine de cuivre et le noyau magnétique. En cas de défaut, une transition supraconductrice à l'état normale

## *Introduction générale*

---

(S / N) se produit dans le SFCL, et une impédance de limitation réfléchie apparaît dans le côté primaire [3]. La transition S / N dans les supraconducteurs à haute température (HTS) et le fonctionnement SFCL dépend des effets d'interaction multilatéraux entre les trois paramètres critiques de supraconducteur : le courant, la température et le champ magnétique.

L'objet de ce travail consiste à mener une étude sur les supraconducteurs à haute température critique, ainsi qu'à modéliser le comportement électrothermique de limiteur inductif de courant conçu à partir d'un supraconducteur  $HT_C$  durant le processus de la limitation du courant de défaut de court-circuit. Le modèle développé doit décrire le comportement réel du limiteur supraconducteur. L'étude basée sur la résolution des équations thermiques globales (équation de Fourier) et le modèle en puissance (champ électrique en fonction de la densité de courant). La représentation de ces résultats sera réalisée au moyen du logiciel MATLAB/SIMULINK.

Vous trouverez dans cette étude l'organisation suivante :

Dans le premier chapitre, on donne un aperçu historique sur la supraconductivité. Ensuite nous décrivons les propriétés physiques intéressantes. Après cela nous verrons les différents types ainsi que les modèles de supraconducteurs. Puis, nous donnerons les différentes applications industrielles des supraconducteurs dans différents domaines.

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

Le troisième chapitre présentera les résultats des simulations des comportements électrique et thermique d'un limiteur de courant supraconducteur obtenus à partir d'un code de calcul développé et implémenté sous l'environnement MATLAB pour visualiser les différentes grandeurs électriques et thermiques. Le code est fait en se basant sur les modèles de **Steven M. Blair** (pour le supraconducteur) étude **Hossein Heydari** (pour le transformateur).

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

# Chapitre I :

---

## LES SUPRACONDUCTEURS

---

- ❖ INTRODUCTION
- ❖ HISTORIQUE DE SUPRACONDUCTEURS
- ❖ LES GRANDEURS CRITIQUES (SURFACE CRITIQUES)
- ❖ CLASSIFICATION DES SUPRACONDUCTEURS
- ❖ MODELES DES MATERIAUX SUPRACONDUCTEURS
- ❖ APLICATION DES SUPRACONDUCTEURS
- ❖ CONCLUSION

## **I.1.Introduction**

La supraconductivité est la propriété que possèdent certains matériaux de conduire le courant électrique sans résistance à condition que leur température soit inférieure à une certaine valeur appelée température critique ( $T_C$ ) . Ces matériaux supraconducteurs s'opposent également à tout champ magnétique externe ; [4] .

Ce chapitre est consacré à la présentation de généralités sur les matériaux supraconducteurs et les grandeurs critiques, et les espèces de supraconducteurs de type-I et de type-II .Puis, quelques modèles des supraconducteurs, Enfin, nous présenterons les principales applications des supraconducteurs en électrotechnique.

## **I.2.Historique du supraconducteur**

« Le hasard fait bien les choses », comme on le dit souvent et ceci l'est d'autant plus vrai quand il s'agit de parler de supraconductivité, puisqu'en 1911, au cours de l'étude de la résistivité du mercure à la température de liquéfaction de l'hélium liquide, un étudiant du futur prix Nobel de physique, l'Hollandais Kamerling Onnes ; [5] . Ce qui semblait être, au premier abord, juste une trouvaille anodine, va être à l'origine d'un boom en physique de la matière condensée. Cette découverte qui intervient juste trois ans après qu'on ait liquéfié, pour la première fois de l'hélium, a permis au fil des ans la découverte d'autres métaux supraconducteurs tels que le plomb, l'étain, le vanadium, le cadmium, le molybdène, puis des alliages métalliques avec des température de plus en plus élevées. Au début des années 70, la limite semblait être presque atteinte avec l'alliage  $Nb_3Ge$  qui plafonnait à 23,3 K. Paradoxalement, des métaux, considérés comme bon conducteur tels que l'or, l'argent ou le cuivre, ne sont pourtant pas supraconducteurs.

Jusqu'en 1933, on a bien cru que les supraconducteurs se différenciaient des métaux normaux par le fait que leur résistivité devenait nulle en dessous de  $T_C$  .Cependant Meissner et Ochsenfeld ; [6] . ont montré que, refroidi à des températures inférieures à sa température critique, un supraconducteur plongé dans un champ magnétique expulse le flux magnétique de l'intérieur de son volume.

En 1935 ; [7]. développèrent, en s'appuyant sur ces différentes observations, la première théorie phénoménologique satisfaisante de la supraconductivité, en ajoutant aux équations de Maxwell de l'électromagnétisme des équations constitutives prenant en compte les résultats expérimentaux concernant la résistance nulle et l'effet Meissner. Ils déduisirent ainsi que le champ extérieur appliqué



$h_{ext}$  ne disparaissait pas brutalement à la surface du supraconducteur, mais diminuait progressivement dans la profondeur des matériaux.

Quelques années plus tard, c'est-à-dire en 1950, la théorie générale des transitions de phases du deuxième ordre, publiée par V. L. Ginzburg et L. D. Landau ; [8] .permet de mieux comprendre la supraconductivité. Ils introduisirent pour cela la notion de paramètre d'ordre supraconducteur qui est une fonction complexe dont l'amplitude donne la probabilité de présence des électrons supraconducteurs, et dont la phase conditionne la circulation du courant. Mais pour eux, seuls des matériaux purs étaient identifiés comme supraconducteurs présentant un « diamagnétisme parfait » en dessous d'une valeur critique du champ magnétique. Mais déjà ;[9] .observait que certains alliages présentaient d'abord un diamagnétisme parfait jusqu'à une valeur  $H_{c1}$  et ensuite un diamagnétisme partiel jusqu'à une valeur  $H_{c2}$  du champ magnétique, nettement plus élevé. Il a fallu attendre les travaux de A. A. Abrikosov ; [10].pour comprendre qu'il existe deux types de supraconducteurs : les supraconducteurs de types I, ne présentant qu'un seul champ critique ; les supraconducteurs de types II, pour lesquels on peut observer deux champs critiques. La théorie de Ginzburg-Landau, qui fut à l'origine de la découverte de A. A. Abrikosov (prix Nobel 2003), avait alors un domaine de validité limité aux environs de la température critique à champ magnétique nul, ce qui motiva, par la suite, la publication de nouvelles théories. Des développements théoriques et expérimentaux considérables furent obtenus.

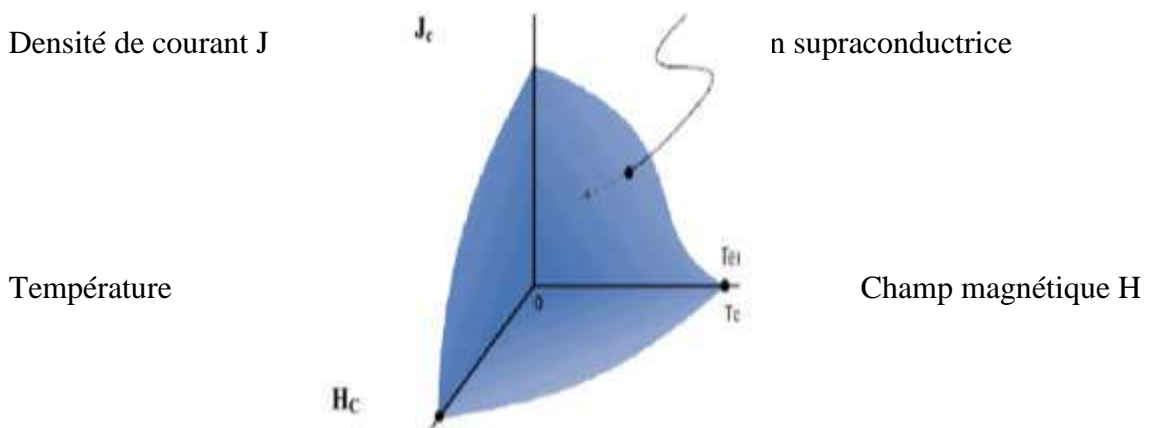
C'est ainsi que va être formulée en 1957 la description microscopique de l'état supraconducteur par Bardeen ; [11]. La base de la théorie BCS est de décrire l'interaction d'un gaz d'électrons de conduction, c'est-à-dire un liquide de Fermi, avec les vibrations élastiques du réseau cristallin qui sont les phonons. De nombreuses prédictions de la théorie BCS ont été vérifiées depuis sa formulation qui prévoyait, par exemple, une température critique maximale de 25K . Depuis, il a été découvert, expérimentalement, que dans certaines conditions, cette température critique pouvait atteindre 40 K pour le composé  $MgB_2$  . Ce couplage entre les électrons et les phonons mène à une interaction attractive entre électrons qui rend la surface de Fermi instable en dessous de  $T_c$  . Il y a alors une transition de phase du deuxième ordre vers un état supraconducteur dans lequel les électrons de la surface de Fermi sont liés en paires de Cooper qui sont toutes décrites par la même fonction d'onde.

En 1962, le physicien britannique Brian Josephson [12].a montré que des paires de Cooper peuvent franchir, par effet tunnel, une fine couche d'isolant séparant deux

supraconducteurs. Cet effet, spécifiquement quantique, appelé effet Josephson, constitue le point de départ d'une technologie des supraconducteurs hautement prometteuse notamment dans le domaine de l'électronique. Mais, c'est surtout la découverte en 1986 par Bednorz et Muller [13] de la supraconductivité dans les céramiques  $L_{a1.85}B_{a0.15}CuO_4$  avec une  $T_C = 30K$  qui va relancer une recherche que l'on croyait vaine pour obtenir des supraconducteurs avec des températures critiques de plus en plus élevées.

### I.3. Les grandeurs critiques (Surface critique)

La température de transition critique  $T_C$  le champ critique thermodynamique  $H_C$  et la densité de courant critique  $J_C$  permettent de définir un domaine supraconducteur au-delà duquel le matériau retrouve son état normal comme l'illustre la **Fig. I.1** [14].



**Fig.I.1:** Illustration de la dépendance fonctionnelle de l'état supraconducteur en ce qui concerne le champ magnétique, la température et la densité de courant [4].

Autrement dit, ces trois paramètres critiques forment une surface critique délimitant un volume dans l'espace ( $J_C, T_C, H_C$ ) au-delà duquel le matériau cesse d'être non dissipatif et retrouve un comportement normal, et à l'intérieur de la surface, le matériau est supraconducteur. On dit qu'il se trouve dans un état supraconducteur non dissipatif.

Nous avons déjà défini la température critique qui caractérise la transition de phase d'un état normal à un état supraconducteur, en dessous de laquelle le matériau perd toute résistance à l'écoulement de courant électrique continu. De même, nous

pouvons dire que le champ critique thermodynamique  $H_C(T)$  est le champ pour lequel la supraconductivité est détruite même si la température est en dessous de sa température critique  $T_C$ , pour peu que ce champ soit important. Ce comportement est lié à la

pénétration du champ dans ce supraconducteur (Effet Meissner). Ce champ critique va dépendre de la température et s'annule à  $T_c$  [4]. En cela, il suit approximativement une

$$H_c(T) = H_c(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^2\right] \quad (I.1)$$

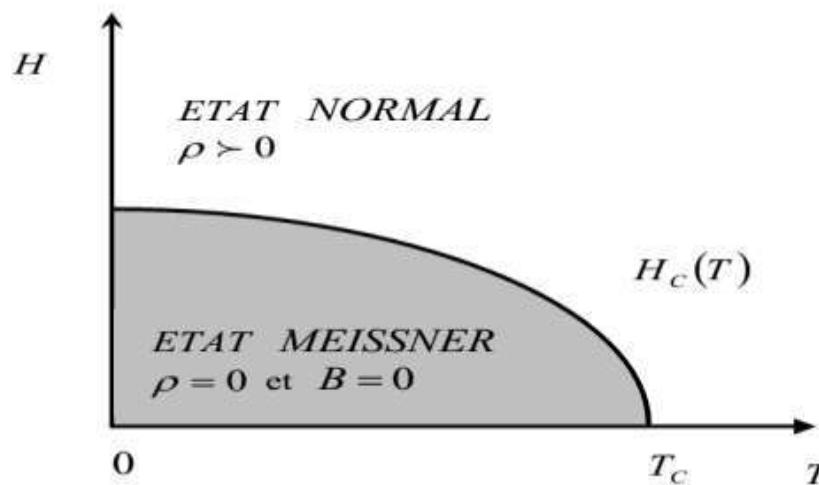


Fig.I.2: Variation du champ en fonction de la température [4].

La variation de  $H_c(T)$  en fonction de la température est donnée sur la (Fig. I.2) Enfin, la densité de courant critique  $J_c$ , est la limite supérieure au-delà de laquelle le matériau oppose une résistance non nulle au passage du courant. Autrement dit, un matériau supraconducteur ne peut pas supporter des densités de courant très élevées. Cette limitation en courant va conditionner l'utilisation des matériaux supraconducteurs en tant que conducteurs de courant.

#### I.4. Classification des supraconducteurs

Il existe deux types de supraconducteurs. Les supraconducteurs de type I, et Les supraconducteurs de type II. Chaque espèce est en réalité un regroupement de différents matériaux présentant les mêmes aspects généraux bien qu'ils soient tous différents.

##### I.4.1. Supraconducteurs de type I

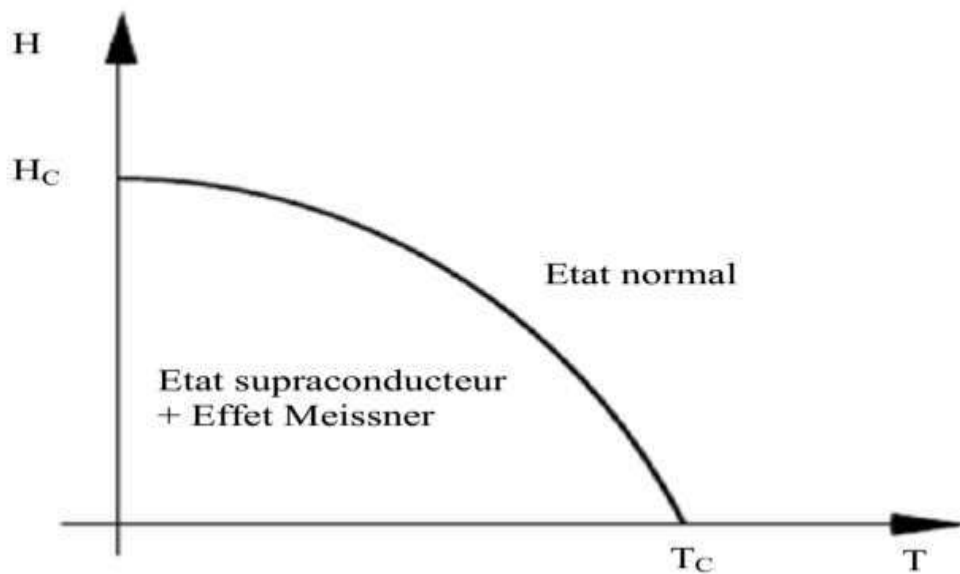
Les supraconducteurs de type I ont été découverts en premier et requièrent une très basse température pour obtenir la supraconductivité. Ces types de matériaux sont caractérisés par une transition brutale vers un état de supraconductivité et un parfait diamagnétisme (capacité de repousser un champ magnétique). Le tableau I.1 présente

un ensemble de matériaux supraconducteurs de type I et leurs températures critiques de transition [15].

**Tableau I.1.** Liste de quelques matériaux supraconducteurs de type I [15].

Eléments	Température critique
Carbon (C)	15K
Lead (Pb)	7.2K
Lanthanum (La)	4.9K
Mercury (Hg)	4.15K
Aluminum (Al)	1.175K
Zinc (Zn)	0.85K
Uranium (U)	0.20K
Rhodium (Rh)	0.000325K

Les supraconducteurs de type I sont caractérisés par un seul champ critique  $H_c$ . Lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique extérieur  $H$  l'induction magnétique  $B$  est nulle à l'intérieur tant que  $H < H_c$  et l'aimantation  $\vec{M} = -\vec{H}$ . Par contre à la surface du matériau dans une épaisseur de l'ordre de  $\lambda_L$  appelée longueur de London [17], l'induction pénètre le matériau et des courants supraconducteurs d'écrantage se développent.



**Fig. I.3 :** Diagramme de phases d'un supraconducteur de type I [17].

### I.4.2. Supraconducteurs de type II

Les supraconducteurs type II possèdent deux champs critiques, le deuxième nettement plus grand que le premier ( $H_{C2} \gg H_{C1}$ ), puisqu'il peut atteindre plusieurs dizaines de Tesla [18]. En plus de cela la densité de courant critique peut atteindre des valeurs élevées. Ces deux caractéristiques favorisent l'utilisation de ces matériaux dans le domaine de l'électrotechnique.

Le diagramme de phases d'un supraconducteur de type II est plus complexe que celui d'un supraconducteur de type I. Même si l'état Meissner existe aussi, il est séparé de l'état normal par une zone supplémentaire, souvent appelée état mixte. On se trouve donc en présence de deux champs critiques différents, notés  $H_{C1}$  et  $H_{C2}$  :

Dans l'état mixte, le champ magnétique pénètre l'échantillon localement, sous la forme de "lignes de flux" isolées. Ces lignes sont entourées de courants circulaires locaux, d'où leur nom de vortex (par analogie avec les tourbillons que l'on trouve dans les fluides). A l'intérieur de ces vortex, l'échantillon est dans l'état normal (c'est-à-dire non supraconducteur). Ces petits "tubes" de champ magnétique ont la propriété de tous contenir exactement le même flux ; les vortex ont une importance fondamentale dans le comportement des supraconducteurs de type II, aussi bien sur le plan des propriétés magnétiques qu'électriques.

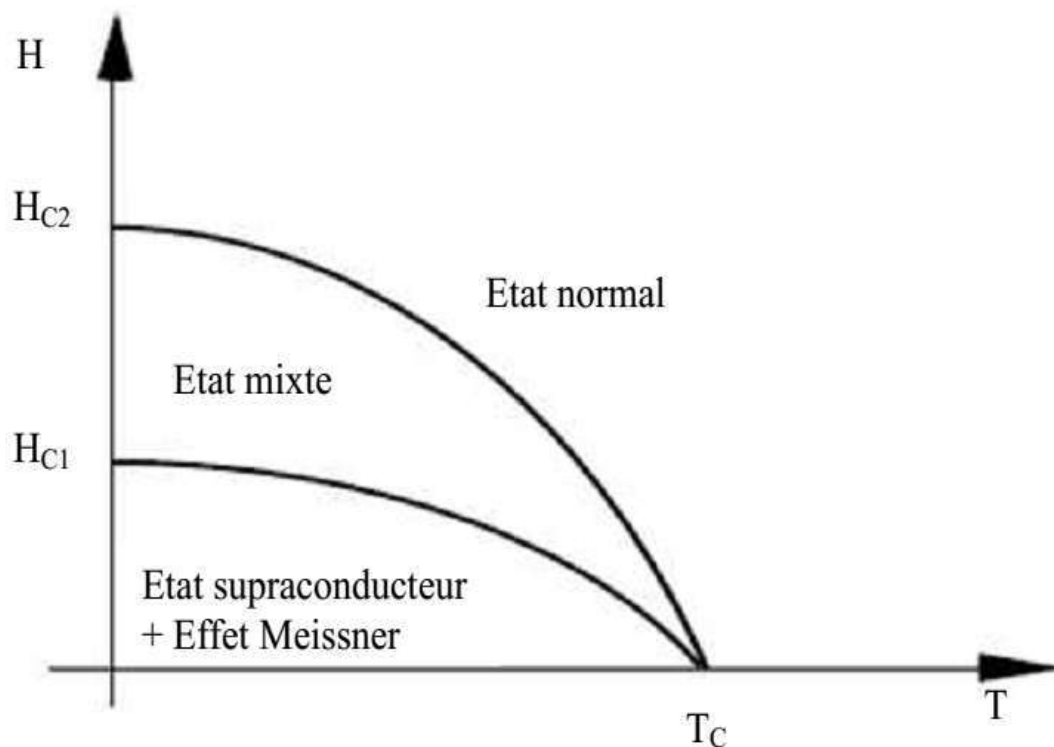


Fig. I.4 : Diagramme de phases d'un supraconducteur de type II [19].

## I.5. Modèles des matériaux supraconducteurs

Le modèle de l'état critique stipule qu'à température donnée la densité de courant dans un supraconducteur est, soit nulle, soit égale à la densité de courant critique  $J_c$  [15]. D'un point de vue mathématique, dans les équations de Maxwell, cela se traduit par :

$$\text{rot} \vec{B} = \pm \mu_0 \vec{J}_c \quad (\text{I.2})$$

Ou

$$\text{rot} \vec{B} = 0 \quad (\text{I.3})$$

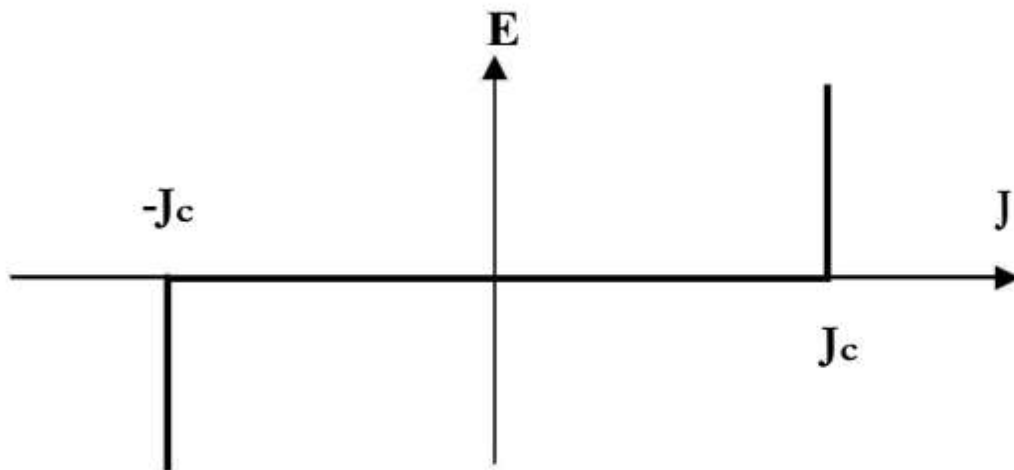
$$\|\text{rot} \vec{H}\| = \|\vec{J}\| = -J_c \quad (\text{I.4})$$

L'hypothèse de ce modèle est que le coefficient  $n$  est considéré comme infini. Ainsi, la caractéristique  $E(J)$ , se traduit mathématiquement par l'expression suivante :

$$J = J_c \frac{E}{\|E\|} \quad (\text{I.5})$$

### I.5.1. Modèle de Bean

Le modèle de Bean [20]-[21], suppose, en plus que la densité de courant critique est indépendante de la valeur de l'induction magnétique  $B$  (Fig. I.5)



**Fig. I.5** : Caractéristique  $E(j)$  d'un supraconducteur, modèle de l'état critique [15].

Ce modèle a l'avantage d'être assez simple mathématiquement et permet pour des géométries simples, d'avoir des expressions analytiques et d'étudier les grandeurs importantes pour les pertes A.C. par exemple. Cependant, la discontinuité de ce modèle le rend peu utilisable pour des développements numériques ; de plus, il ne reflète pas toujours de façon satisfaisante le comportement des supraconducteurs [15].

### I.5.2. Modèle de loi de puissance

C'est un modèle qui modélise bien le comportement des supraconducteurs à haute température critique (HTC) autour de  $J_c$  ; [22].

$$\vec{B}(\vec{J}) = \frac{E_c}{J_c} \left[ \frac{J}{J_c} \right]^{n-1} f \quad (I.6)$$

$$\vec{B}(\vec{H}) = \mu_0 \vec{H} \quad (I.7)$$

Les paramètres de variation de cette loi sont la densité de courant critique,  $J_c$  et l'exposant, « n ». Avec ce modèle on peut faire varier les courbes  $E(J)$  de sorte qu'on peut modéliser un conducteur normal pour  $n = 1$  (loi de comportement linéaire) jusqu'à l'obtention d'une courbe raide comme dans le cas du modèle de l'état critique pour un  $n > 100$  [23].

### I.5.3. Modèle de KIM

Le modèle de Bean ainsi que la loi en puissance considèrent le matériau supraconducteur isotrope et isotherme. Ils ne tiennent pas compte de l'échauffement éventuel du conducteur sous l'effet des pertes qui entraînerait une diminution du courant critique. Dans le modèle de Bean, la densité de courant critique est supposée constante quelque soit le champ magnétique extérieur. Dans la réalité la densité de courant dépend fortement de son orientation par rapport au champ et de l'induction magnétique,  $B$ . Une expression de  $J_c(B)$  dans le cas isotrope a été donnée par Kim et al [15].

$$J_c(|B|) = \frac{J_{c0} B_0}{|B| + B_0} \quad (I.8)$$

C'est le modèle le plus utilisé pour la modélisation de la dépendance de la densité de courant critique avec l'induction magnétique [24].

## I.6. Applications des supraconducteurs

De plus de leur intérêt scientifique, la recherche pour les applications a été toujours une force motrice pour la science des matériaux supraconducteurs [25]. La supraconductivité est utilisée dans de nombreux domaines, l'électronique, l'électrotechnique, le médical...

### I.6.1. Application médicale

Aujourd'hui l'IRM est le marché le plus important pour les supraconducteur, les supraconducteurs sont utilisés en médecine avec l'IRM (Imagerie par Résonance Magnétique). Qui repose sur le principe que les atomes d'hydrogène du corps réémettent l'énergie accumulée par l'induction d'un fort champ magnétique à une fréquence vibratoire pouvant être détectée. Les supraconducteurs apparaissent en deux points : tout d'abord dans l'électroaimant qui induit le fort champ magnétique nécessaire à l'accumulation d'énergie par les atomes, ensuite dans le détecteur d'ondes électromagnétiques, qui fournit l'image magnétique du cerveau [25].

### I.6.2. Conservation de l'énergie

Le système de conservation le plus utilisé est le SMES (Magnétique Supraconducteur Stockage Energie) qui est constitué d'un anneau supraconducteur refroidi sous sa température critique et dans lequel on injecte le courant. Son point faible est le comportement du cryostat : celui-ci doit en effet compenser les variations de température de la bobine correspondant aux cycles de charge et de décharge en courant. Dans les SMES l'énergie peut être libérée très rapidement [25].

### I.6.3. Les câbles supraconducteurs

L'une des applications la plus prometteuse des matériaux supraconducteurs est la fabrication des câbles supraconducteurs pour le transport d'énergie. Ils sont aussi appelés câbles de forte puissance à diélectrique froid. Avec les progrès réalisés avec cryogénie le développement de ce système de câble est un enjeu à la fois technique et économique. Les premiers résultats techniques et les perspectives économiques sont encourageants. Ces câbles d'énergie constituent, avec les limiteurs de courant et les moteurs, une des utilisations des supraconducteurs à haute température critique les plus susceptibles de déboucher à court terme ou moyen terme sur une application industrielle[25].



**Fig. I.6 :** Coupe du câble supraconducteur de projet Long Island (USA) (photo Nexans)[26].



#### **I.6.4.Machines tournant**

L'utilisation des supraconducteurs dans les cryoalternateurs est à l'origine de nombreux prototypes. Le remplacement des bobinages en cuivre par des enroulements supraconducteurs permet un gain de masse grâce aux grandes densités de courant du fil et à la disparition du circuit magnétique. Le fort couple massique de ces machines en fait une application intéressante pour les systèmes embarqués [27].

#### **I.6.5.Les lignes de transport**

L'utilisation des supraconducteurs à haute température critique (SHT<sub>C</sub>) pour le transport du courant électrique alternatif est maintenant une réalité et l'évaluation des pertes en champ propre est nécessaire. Bien que ces pertes soient faibles, il convient de les évaluer avec précision. En effet, elles ont lieu à basse température, elles sont donc coûteuses à évaluer [25].

#### **I.6.6.Moyens de transports**

Le premier train à lévitation magnétique commercial se trouve à Shanghai, en République Populaire de Chine. Ces trains sont construits de telle sorte qu'il n'y a aucun contact entre la voie et le train (lévitation de 10 cm au dessus de la voie dans le meilleurs cas), ce qui supprime toute trace de friction. La voie est constituée d'aimants permanents qui repoussent le champ magnétique émis par de forts aimants supraconducteurs placés sous le train. C'est un train écologique [25].



**Fig. I.7:**Le Transrapide allemand[29].



**Fig. I.8 :**Le Maglev japonais [29].

### **I.6.7.Les limiteurs du courant**

Le fonctionnement des limiteurs supraconducteurs est basé sur la transition de l'état supraconducteur vers l'état normal de ces matériaux. Cette transition en un temps très bref fait des supraconducteurs de bons limiteurs. En présence d'un court-circuit dans le réseau électrique ;[30].

Ce dernier en transitant à l'état normal voit sa résistance augmenter ce qui entraîne une limitation du courant du court-circuit. La puissance dissipée dans le matériau supraconducteur juste après la transition est considérable et qui entraîne la destruction du dispositif ; [31].

### **I.7.Conclusion**

Dans ce premier chapitre on a exposé un bref historique de la supraconductivité, les principaux phénomènes caractérisant les matériaux supraconducteurs ainsi que modèle d'état critique, et le modèle de Bean. Et leurs applications qui ont été brièvement exposées à la fin de ce chapitre.

# Chapitre II :

---

## LES LIMITEURS DE COURANT

---

- ❖ INTRODUCTION
- ❖ LES LIMITEURS DE COURANT TRADITIONNEL
- ❖ FONCTIONNEMENT D'UN LIMITEUR DE COURANT
- ❖ LIMITEURS DE COURANT A BASE DE SUPRACONDUCTEURS
- ❖ LES MODELES ELECTRIQUES ET THERMIQUES D'UN LIMITEUR DE COURANT INDUCTIF
- ❖ CONCLUSION

## **II.1.Introduction**

Nous présentons dans ce chapitre les différents types des limiteurs de courants de défaut traditionnels et les limiteurs à base de supraconducteur, et puisque notre travail est basé sur les limiteurs inductifs, nous présentons leurs modèles électrique et thermique.

## **II.2.limitation du courant**

Les solutions utilisées actuellement pour limiter le courant seront exposées, après une rapide présentation des réseaux et de leurs défauts.

De nombreux types de défauts existent selon le réseau de distribution, selon le lieu du défaut, selon les phases touchées, selon la durée du défaut.

### **II.2.1.défauts**

Lorsque deux fils se touchent, par exemple à cause du vent, (défaut fugitif car le contact entre les deux fils est inférieur à 0,3 s), il y a création d'un arc électrique entre les conducteurs. Il faut alors couper le courant pour éteindre l'arc et attendre quelques centaines de millisecondes afin de permettre à l'air de se d'ioniser sinon l'arc réapparaîtra lors de la remise sous tension du réseau. Ainsi, de manière générale, l'exploitant utilise des cycles d'Ouverture-Fermeture (cycles OF) des protections (disjoncteurs) afin de tenter de perturber le moins possible la distribution tout en favorisant l'auto-extinction du défaut avant d'être obligé d'ouvrir définitivement la ligne si celui-ci persiste [15].

### **II.2.2.Le courant de défaut**

Le courant nominal  $I_n$  (ou courant assigné) est le courant maximal autorisé en régime permanent dans la ligne électrique alors que le courant de ligne  $I_1$  est le courant circulant réellement dans celle-ci. En revanche, le courant d'utilisation de la ligne est la valeur moyenne du courant de ligne. [15].

$$S_n = \sqrt{3} \times I_n \times U_n \quad (\text{II.1})$$

$S_n$  : La puissance nominale.

$U_n$  : Tension entre phase- neutre.

$$P_n = \sqrt{3} \times I_{CC} \times U_n \quad (\text{II.2})$$

$P_n$  : La puissance de court-circuit.

$I_{CC}$  : Courant de court-circuit.

## **II.3.Fonctionnement d'un limiteur de courant**

### **II.3.1.principe général de la limitation de courant**

La limitation de courant utilise le principe d'une impédance variable en série avec le réseau. Celle-ci pouvant être purement résistive dans le cas des réseaux DC mais également inductive dans le cas des réseaux AC. Le courant est limité par une augmentation brutale de l'impédance, devant être suffisamment rapide ( $< 1\text{ms}$ ) pour limiter le premier pic de courant à une valeur seuil, nettement inférieure à la valeur théorique de court-circuit. Lors d'un défaut le limiteur est pratiquement soumis à la pleine tension du réseau. La puissance dissipée est donc très importante [15].

### **II.3.2.Limiteurs de courant classiques**

Peu de solutions classiques permettent de limiter naturellement un courant de défaut. Le fusible est la solution la plus utilisée en basse et moyenne tension, mais ils présentent l'inconvénient majeur de ne pas être réutilisables et de nécessiter une intervention humaine pour la remise sous tension du système. Par contre, l'utilisation de circuits auxiliaires commandés permet d'augmenter l'impédance apparente d'un système lors d'une montée de courant [15].

#### ***II.3.2.a. Arc électrique***

Cette solution s'adapte aux disjoncteurs lorsqu'ils s'ouvrent sur courant de défaut pour isoler une ligne. La résistance électrique d'un arc est fortement non linéaire avec le courant : les faibles courants mènent à une forte résistance qui diminuera d'autant plus le courant. Il est possible d'augmenter la puissance perdue par l'arc en favorisant les processus de convection et de rayonnement qui augmentent encore la résistance de l'arc (en imposant un certain cheminement) [32].

#### ***II.3.2.b. Réactance série***

L'insertion permanente de réactances en série dans les réseaux permet de limiter les courants de défauts mais introduisent des surtensions transitoires durant les séquences de reconnections des disjoncteurs. Cette solution n'est pas utilisée pour tous les réseaux parce que, les chutes de tensions en régime nominal et l'encombrement n'étant pas négligeable [15].

#### ***II.3.2.c. Limiteur commandé***

Pour parer aux inconvénients ci-dessus, il a été opté pour le transformateur série court-circuit par des thyristors. Lorsque les thyristors sont passants le transformateur est en court-circuit, l'impédance série est négligeable devant la charge [33].

**II.3.2.d. Condensateur**

On obtient une tension qui limite bien le courant, en commutant le courant à limiter dans un condensateur. Malheureusement on distingue que la valeur de capacité nécessaire est importante et le courant limité reste significatif. Ce procédé reste pourtant exploitable en basse tension. Un autre problème est que la commutation doit se faire en quelques micros secondes. Pour cela il est possible d'utiliser des disjoncteurs statiques [15].

**II.3.2.e. Inductance**

On distingue également le procédé d'une inductance insérée en série dans le réseau que limite le courant de court-circuit mais dégrade la stabilité transitoire si l'inductance est à proximité des générateurs, et introduit des surtensions transitoires durant les séquences de reconnections désappareillages de coupure. Cependant la chute de tension, les pertes en régime nominal et l'encombrement sont loin d'être négligeables sauf pour de très faibles courants nominaux. De fait, cette solution introduit une composante inductive qui peut être gênante pour certains types de réseau [32].

**II.3.2.f. Résistance**

Il s'agit de réduire, à l'aide d'une simple résistance, le courant de court-circuit lorsque le rapport  $I_{cc}/I_n$  est très élevé. L'utilisation d'un tel système doit être en compte sur la chute de tension engendrée et sur la dissipation locale qui s'ensuit. Une autre solution est d'ajouter, comme dans le cas de l'utilisation de capacités, des disjoncteurs statiques afin de commuter le courant dans une branche plus résistive. Les inconvénients décrits ci-dessus, propres à ce système, persistent [32].

**II.3.2.g. Résistance variable**

Une des solutions les plus efficaces consiste à utiliser une résistance variable en série avec la charge. Cette variation doit provenir d'un changement de phase ou de l'état du matériau. Le phénomène physique responsable du changement peut être (thermique, mécanique, magnétique...) ou autre, mais il est toujours lié au courant. Cependant ce système présente deux problèmes, d'une part les variations par changement de phase nécessitent une énergie qui tend à diminuer la vitesse de transition. D'autre part les variations par changement d'état soulèvent le problème de l'inhomogénéité qui tend à concentrer la puissance localement et ainsi affaiblir le matériau. Les matériaux à Coefficient Thermique Positif (CTP) ayant une résistance contrôlée thermiquement sont des candidats potentiels pour la limitation de courant. Il existe deux familles de CTP, d'une part les résistances homogènes métalliques (Fer, Tungstène...) pour lesquelles la

résistivité augmente d'un facteur 7 à 17 entre la température ambiante et la température du point de fusion. D'autre part les polymères chargés (carbone ou céramiques conductrices) qui offrent des facteurs de résistivité supérieurs à 100. Ces matériaux sont principalement utilisés en basse tension pour limiter les arcs électriques à l'ouverture des disjoncteurs [34].

## II.4. Les limiteurs de courant à base de supraconducteur

### II.4.1. Limiteur résistif

Le principe du limiteur de courant résistif est simple, s'agissant d'insérer dans la ligne à protéger un élément supraconducteur en série, qui transite naturellement par dépassement de son courant critique lors d'un court-circuit (Fig.II.1). Le courant est ainsi limité par la transition brutale de l'état supraconducteur à l'état normal [35][36][37].

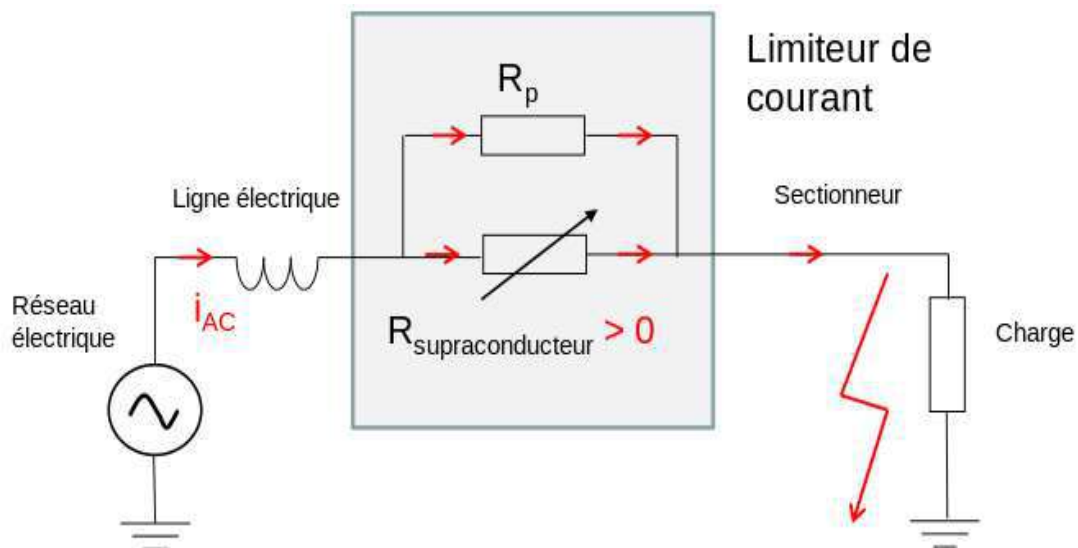
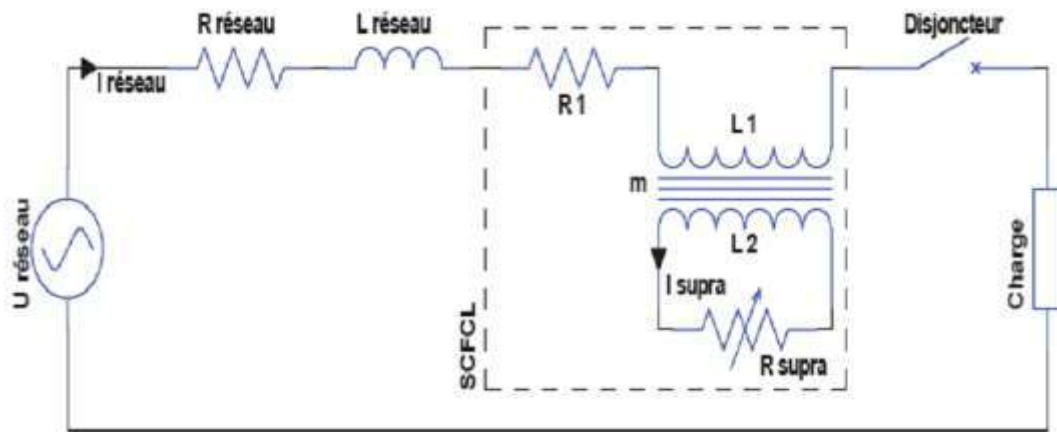


Fig.II.1 : Principe du limiteur de courant résistif.

### II.4.2. Limiteur inductif

La structure inductive met en jeu un transformateur dont les enroulements secondaires sont supraconducteurs (sauf dans le cas du limiteur hybride où le secondaire d'un transformateur est court-circuité par une résistance supraconductrice [38]). Le limiteur est placé en série dans le circuit à protéger. La (Fig.II.2) présente schématiquement le principe. En régime nominal, le secondaire étant dans son état supraconducteur, le transformateur est court-circuité, et seule l'impédance de fuite est vue par le système [39].

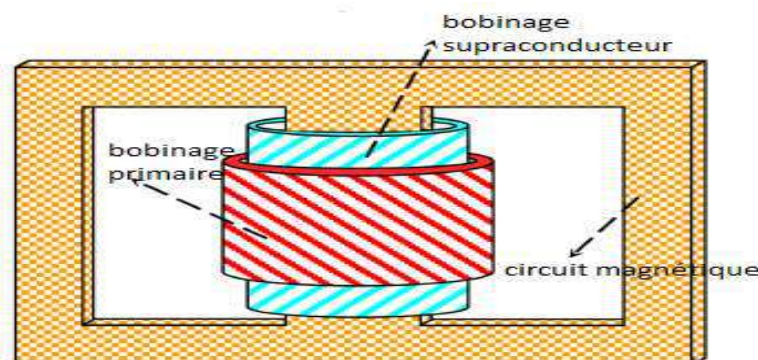


**Fig.II.2 :** Principe du limiteur de courant inductif [16].

Le fonctionnement du limiteur inductif supraconducteur (SFCL) est basé sur la nette augmentation de son impédance ramenée au primaire d'une valeur réduite en régime stationnaire et d'état supraconducteur du secondaire vers une valeur plus élevée de limitation et d'état conducteur normal du secondaire. En régime normal, le courant secondaire traverse l'élément supraconducteur avec de pertes minimales. Du point de vue du primaire, en régime normal, le limiteur est équivalent à l'inductance du transformateur en court-circuit. Lorsqu'un défaut surgit, le courant secondaire dépasse le courant critique du supraconducteur et le matériau transite vers l'état conducteur normal ce qui provoque une nette augmentation de l'impédance ramenée au primaire [40].

### II.5. Les modèles électriques et thermiques d'un limiteur de courant inductif

HAYDARI dans ces travaux proposé plusieurs dispositifs d'un limiteur inductive, il change seulement la forme du circuit magnétique,



**Fig.II.3:** type de blindage (bouclier) magnétique limiteur de courant supraconducteur[41].



## Chapitre II : Les Limiteurs de courant

Dans cette Figures,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $M$ ,  $L_s$ , et  $L_m$  sont les résistances d'un enroulement primaire et secondaire (pour type de bouclier magnétique  $R_2 = 0$ ), l'auto-inductance de primaire et secondaire enroulement l'inductance mutuelle entre enroulement primaire et secondaire, l'inductance parasite d'un enroulement primaire, et inductance magnétisante du transformateur, respectivement. Le rapport de transformation du transformateur est indiqué par  $n = (N_1 = N_2)$ .

En considérant  $h$ ,  $r_c$ ,  $r_p$ , et  $r_s$  comme le haut de enroulement, rayon de noyau, rayon primaire, et rayon de secondaire bobine/tube, respectivement l'inductance peut être calculé comme [41]:

$$L_1 = \frac{\pi\mu_0 n^2}{h} \{r_p^2 + (\mu_r - 1)r_c^2\} \quad (\text{II.3})$$

$$L_2 = \frac{\pi\mu_0}{h} \{r_s^2 + (\mu_r - 1)r_c^2\} = \frac{M}{n} \quad (\text{II.4})$$

$$M = \frac{\pi\mu_0 n}{h} \{r_s^2 + (\mu_r - 1)r_c^2\} \quad (\text{II.5})$$

$\mu_r$  Est perméabilité de lenoyau.si le modèle de transformateur LSFCL est simplifié par (Fig.II.5), inductance parasites et magnétisantes peuvent être écrit :

$$L_2 = (1 - K)L_1 = L_1 - n^2 L_2 = \frac{\pi\mu_0 n^2}{h} (r_p^2 - r_s^2) \quad (\text{II.6})$$

$$L_2 = KL_1 = nM = \frac{\pi\mu_0 n^2}{h} \{r_s^2 + (\mu_r - 1)r_c^2\} \quad (\text{II.7})$$

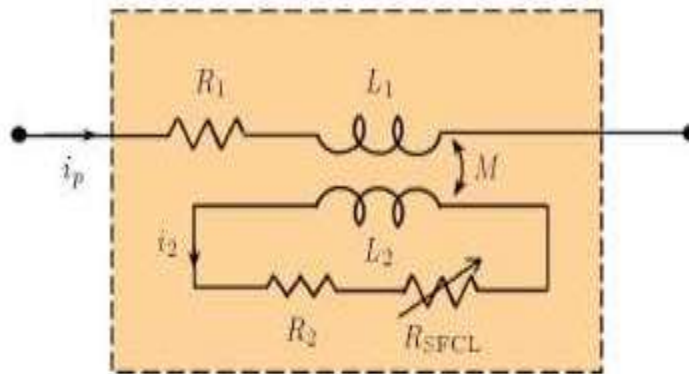
$$n = \frac{N_1}{N_2} .$$

$h$ : Hauteurde noyau de fer (m).

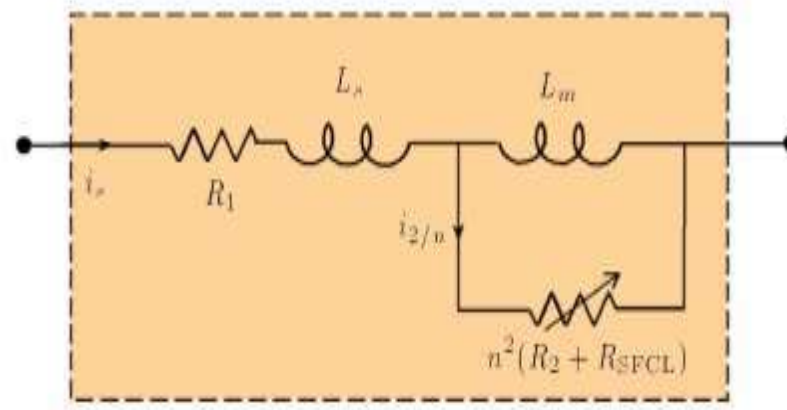
$r_c$ : Rayon de noyau de fer(m).

$r_s$ : Rayon of cylinder HTS (m).

$r_p$  : Rayon de bobine de cuivre (m).



**Fig. II.4:**Schéma équivalent d'un transformateur [41].



**Fig. II.5:**Schéma équivalent d'un transformateur ramené au primaire [41].

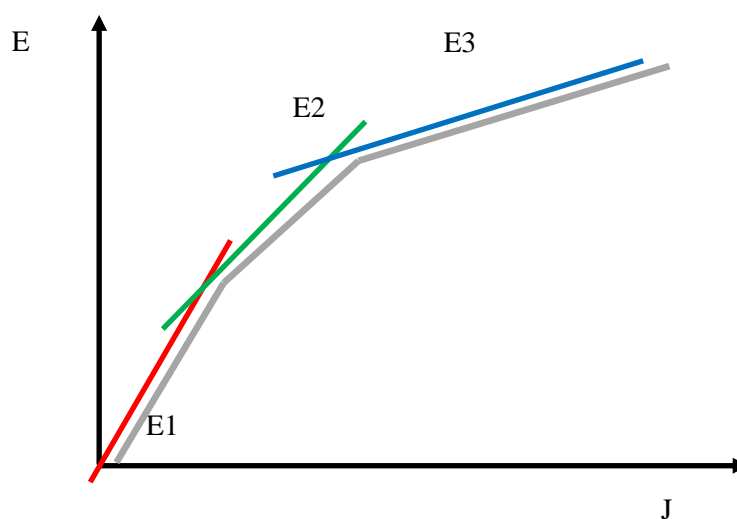
### II.5.1 Modèle électrique

Les propriétés électriques macroscopiques du matériau supraconducteur sont modélisées par la loi de puissance  $E(J)$ , le champ électrique dépend de la densité de courant et les deux paramètres dépendent de la température.

La plupart des références sont basées sur le modèle de **W. Paul et al.** Comme le montre la (Fig.II.6).

La caractéristique  $E(J)$  peut être divisée en trois régions limitées par les courbes  $E_1$ ,  $E_2$  et  $E_3$ .

La courbe  $E_1$  en rouge représente la courbe de la région supraconductrice,  $E_2$  en vert, la courbe de la zone de flux-flow et  $E_3$  en bleu, la courbe de la région de conduction normale. L'intersection des trois courbes constitue la courbe caractéristique réelle, La courbe en gris représentée la caractéristique  $E(J)$ .



**Fig. II.6:**Caractéristique  $E(J)$  réel d'un SFCL.

Par conséquent, quand le courant augmente pendant un défaut le limiteur passera par ces trois états. Chaque état est caractérisé par une loi de puissance (Equations (III.8) à (III.10)).

$$E_1 = E_c \cdot \left( \frac{J}{J_c(T)} \right)^{\alpha(T)} \quad (\text{II.8})$$

$$E_2 = \left( \frac{E_c}{E_0} \right)^{\beta/\alpha} \cdot \left( \frac{J_c(77K)}{J_c(T)} \right) \left( \frac{J}{J_c(77K)} \right)^{\beta} \quad (\text{II.9})$$

$$E_3 = \rho(T_c) \frac{T}{T_c} \cdot J \quad (\text{II.10})$$

Où  $J_c$  est le courant critique qui doit être adapté aux données expérimentales;  $\alpha$  et  $\beta$  dépendent des conditions de traitement des matériaux,  $\rho$  la résistivité normale et  $T_c$  la température critique.  $J_c(T)$  et  $\rho(T)$  peuvent être approximés en tant que fonctions linéaires de la température par les équations (III.11) et (III.12).

$$J_c(T) \approx J_c(77K) \cdot \left( \frac{T_c - T}{T_c - 77K} \right) \quad (\text{II.11})$$

$$\rho(T) \approx \rho_c(T_c) \cdot \left( \frac{T}{T_c} \right) \quad (\text{II.12})$$

Afin d'inclure l'effet du champ magnétique et en fonction des données expérimentales,  $\alpha = 10$  et  $\beta = 3$  sont considérés dans la littérature.

### **II.5.2. Modèle thermique**

Le phénomène thermique dans un limiteur a été modélisé comme suit :

$$T(t) = T_a + \frac{1}{C_{SC}} \int_0^t [Q_{SC}(t) - Q_{\text{évacuées}}(t)] dt \quad (\text{II.13})$$

$T_a$  : Température ambiante.

$Q$  : évacuées : Chaleur évacuée par le système de refroidissement.

$Q_{SC}$  : La chaleur a dissipé dans le supraconducteur.

$$Q_{SC}(t) = \int R_{sc} \cdot I_{sc}^2 \cdot dt \quad (\text{II.14})$$

$$Q_{\text{évacuées}} = \frac{T - T_a}{\theta_{sc}} \quad (\text{II.15})$$

$$R - \text{conv} = \theta_{sc} = \frac{1}{k \cdot V} \quad (\text{II.16})$$

$K$ : coefficient de transfert de la chaleur.

$V$  : volume d'échange.

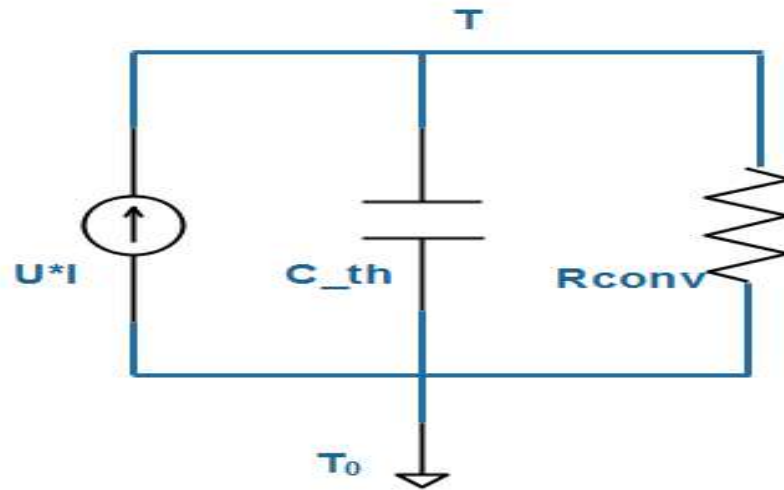


Fig. II.7 : Schéma équivalent thermique d'un supraconducteur.

## II.6.conclusion

Dans ce chapitre on a exposé les différents types des limiteurs de courants de défaut traditionnels et les fonctionnements d'un limiteur de courant ainsi les limiteurs de courant à base de supraconducteur, les modèles électriques et thermiques et Modèle magnétique d'un limiteur de courant inductif.

# Chapitre III :

---

## RESULTATS DE SIMULATION

---

- ❖ INTRODUCTION
- ❖ PREMIERE PARTIE
- ❖ DEUXIÈME PARTIE
- ❖ ETUDE DE LENERGIE DISSIPE DANS LIMITEUR
- ❖ CONCLUSION

### III.1.Introduction

Nous présentons dans ce chapitre les résultats de simulation des comportements électrique-thermique d'un limiteur de courant inductif obtenus à partir du code numérique développé et implémenter sous l'environnement MATLAB/SIMULINK.

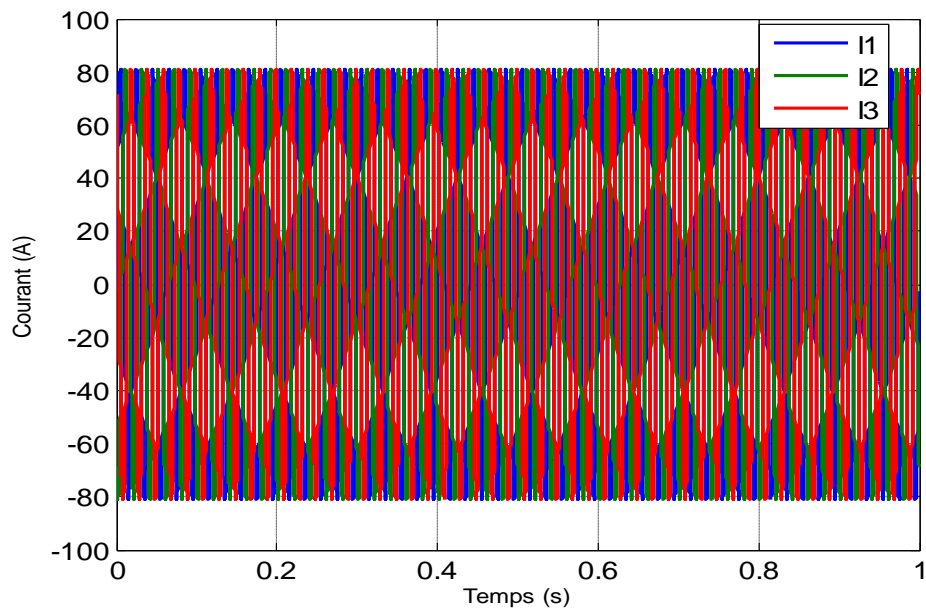
Ce travail est dédié principalement a simulé le comportement d'un SFCL durant un court-circuit triphasé, et de voir l'influence de la durée de défaut, température ambiante, et la valeur de la charge sur le temps de réponse. Et nous présentons une analyse de l'énergie dissipative dans les limiteurs de courant inductif.

### III.2.Première partie

#### III.2.1.Description de réseau étudié

Le réseau étudier fonctionne sous une tension simple de 11.5 KV, il comporte une charge résistive de 2MW alimenté par une source de tension à travers une ligne modélisée par une impédance  $0.5+0.005j$ .

La (Fig.III.1) présente l'allure des courants des phases ABC. Le courant de ligne pour le fonctionnement normale est de 80A, leur allure est sinusoïdale.



**Fig.III.1:** allure de courant pendant le fonctionnement normale.

Et la (Fig.III.2) présente l'allure des tensions des phases ABC. La tension entre phases pour le fonctionnement normale est de 1700V, leur allure est sinusoïdale aussi (régime normale sans défaut).

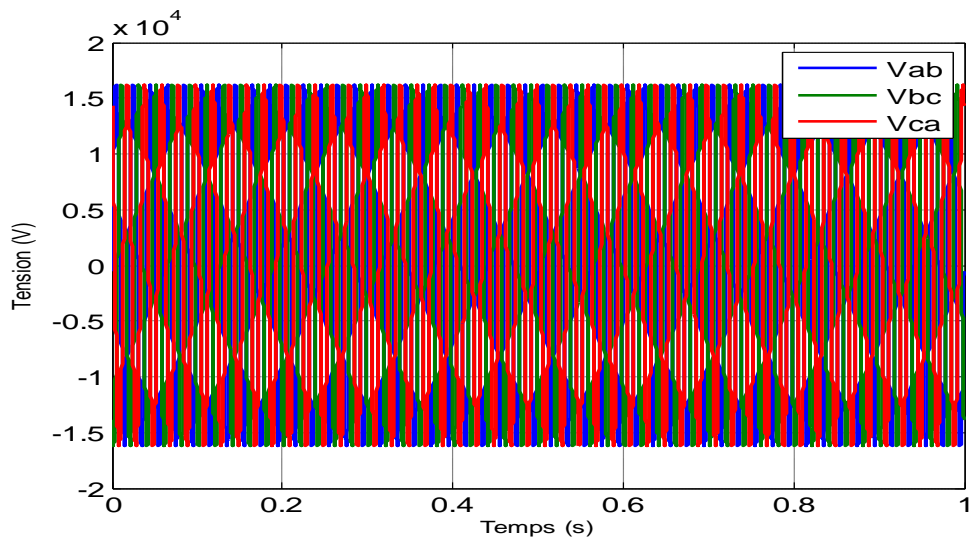


Fig.III.2 : allure de tension composée pendant le fonctionnement normale.

### III.2.2.Cas d'un court-circuit

Dans cette partie, nous provoquons un défaut de court-circuit à l'instant 0.1s jusqu'à 0.2s. Les (Fig.III.3) et 4 représentent les allures de courant et de tension.

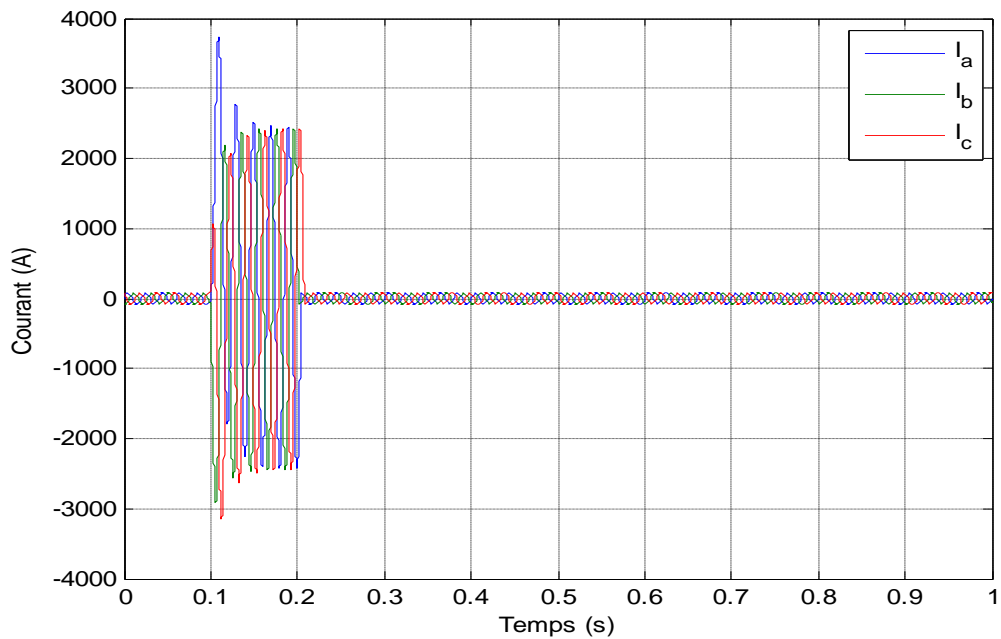
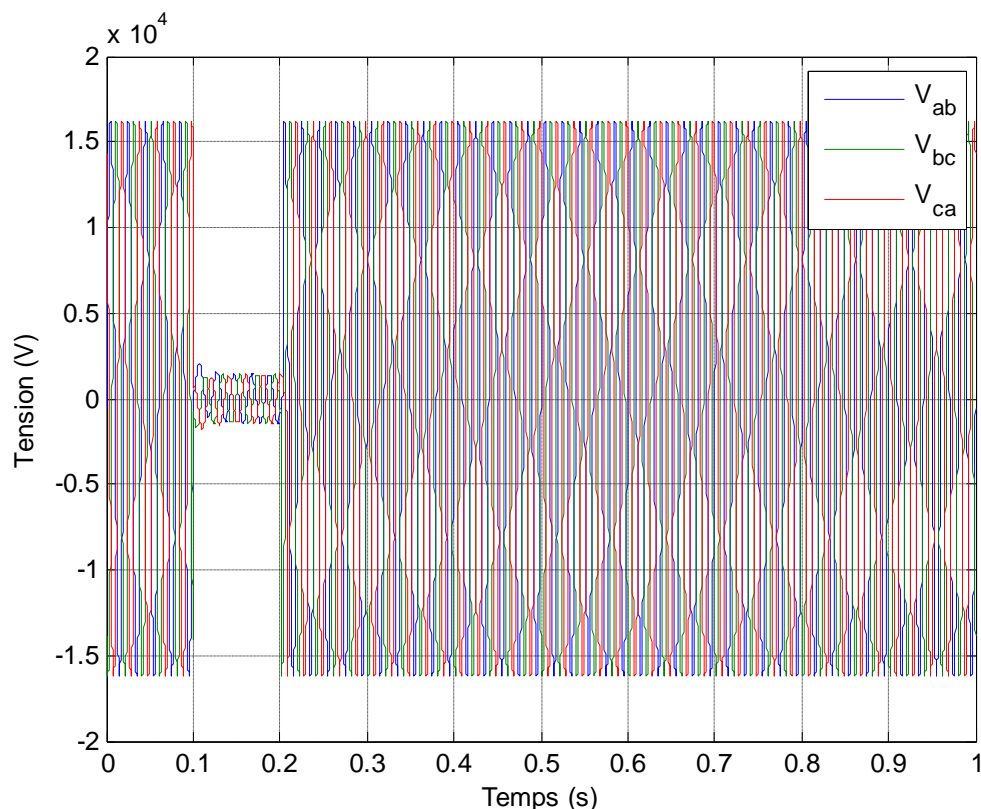


Fig.III.3 : allure de courant pendant un défaut.



**Fig.III.4 :** allure de tension composée pendant le défaut.

À travers les résultats obtenus, on remarque que le courant de court-circuit augmente plus de 30 fois le courant nominal (80A), et une chute de tension vers une valeur très basse (presque zéro). Cette transition ou augmentation de courant dégrade la qualité des appareillages de réseau électrique, comme nous avons cité dans le chapitre 2, l'une des solutions pour protéger notre réseau sont les limiteurs à base de supraconducteur.

### **III.3. Deuxième partie**

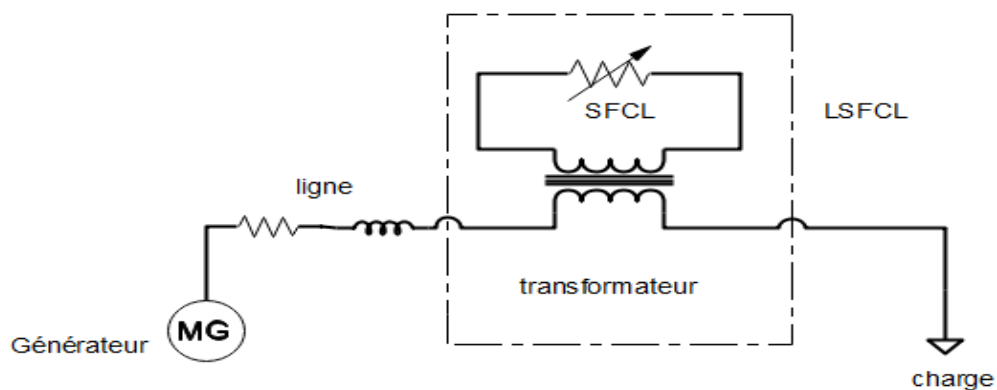
#### **III.3.1. Le cas d'insertion d'un limiteur inductif**

Avant d'analyser le comportement de réseau électrique contenant un limiteur inductif lors de court-circuit. Nous présentons une description sur le réseau.

##### **III.3.1.a. Description de réseau étudié**

Dans cet essai nous avons inséré un transformateur en série avec la charge, et le secondaire de transformateur qui est en supraconducteur est en court-circuit.





**Fig.III.5** : schéma unifilaire d'un réseau étudié.

Le transformateur que nous avons utilisé a été proposé par **HAYDARI**. Il comporte une résistance au primaire et deux inductances au primaire  $L_1$  et secondaire  $L_2$  et une inductance mutuelle  $M$ . les valeurs des inductances sont calculer à partir de géométrie du transformateur (voir chapitre II) Parmi les modèles simplifiés, le modèle de transformateur ramener au primaire a été utilisé.

**Tableau.III.1**:montre les grandeurs géométriques et magnétiques du transformateur.

Grandeur	Valeur
Hauteur de transformateur	1.5m
Rayon du circuit magnétique	0.4m
Rayon de bobinage supraconducteur de forme cylindrique (bobinage secondaire)	0.52m
Rayon de bobinage en cuivre de forme cylindrique (bobinage primaire)	0.7m
Perméabilité de circuit magnétique relative	65
Rapport de transformation ( $N_1/N_2$ )	120
Facteur de couplage $k$	0.97

D'après ces valeurs, les inductances prend les valeurs  $L_1=0.40H$ ,  $L_2=2.7e^{-5}H$ ,  $M=0.0033H$ .

Concernant les résistances, au primaire il y a une résistance de bobinage de cuivre et en secondaire, la résistance est nulle à cause de le bobinage en supraconducteur.

Dans le tableau ci-dessous, les différents paramètres de supraconducteur géométriques thermiques et électriques (Steven Blair).

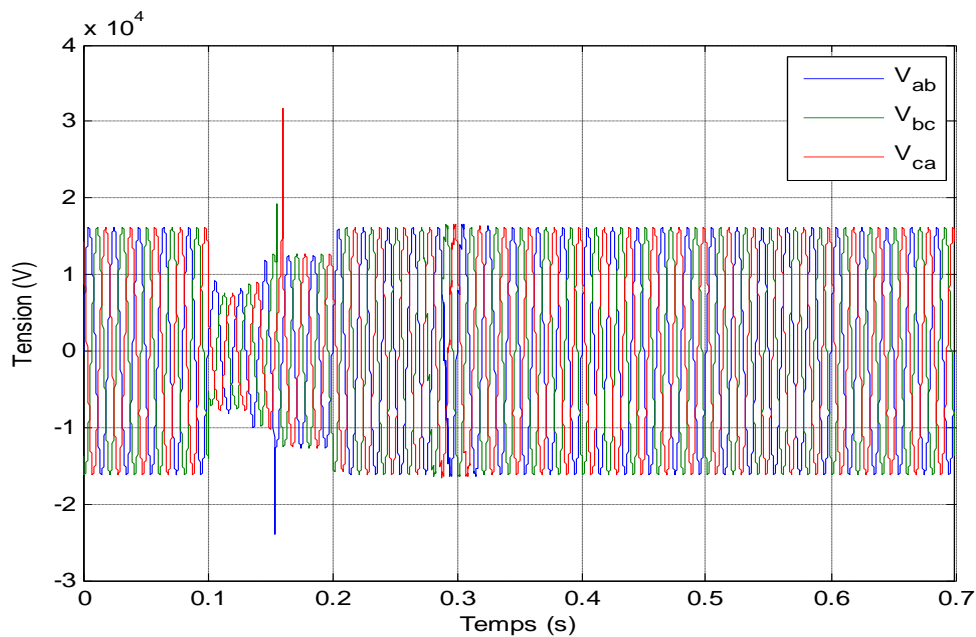
Tableau .III.2.Paramètres de supraconducteur.

Description des paramètres	Symbole	Valeur	Unité
Longueur du fil supraconducteur	$L_{SC}$	50	m
Diamètre du fil supraconducteur	$d_{sc}$	$4.0 \times 10^{-3}$	m
Zone transversale du fil supraconducteur	$a_{sc}$	$\pi\left(\frac{d_{sc}}{2}\right)^2$	$m^2$
Température de supraconducteur	$T(t)$	—	K
Courant de supraconducteur	$i_{sc}(t)$	—	A
Température ambiante du supraconducteur et réservoir de refroidissement	$T_a$	77	K
Température critique du supraconducteur	$T_C$	95	k
Expotif de la région de fluage-fluage (à 77K)	$n_{77k}$	6	—
Expotif de la région de Flux-flow	$\beta$	3	—
La densité de courant	$J(t)$	$\frac{i_{sc}(t)}{a_{sc}}$	$A/m^2$
Densité de courant critique (à 77K), c'est-à-dire densité de courant où $E = 1mV / cm$	$J_{C77K}$	$1.5 \times 10^7$	$A/m^2$
Champ électrique à la transition de l'état de flux-flow à l'état de flux-flux	$E_0$	0.1	V/m
Résistance de l'état de conduite normale (à $T_C$ )	$\rho$	$1.0 \times 10^{-6}$	$\Omega m$
Coefficient de transfert de chaleur au réservoir de refroidissement	K	$1.5 \times 10^3$	$w/km^2$
Chauffage spécifique volumétrique	CV	$1.0 \times 10^6$	$J/km^3$
Capacité thermique du supraconducteur	$C_{SC}$	$L_{SC} a_{sc} c_v$	J/K

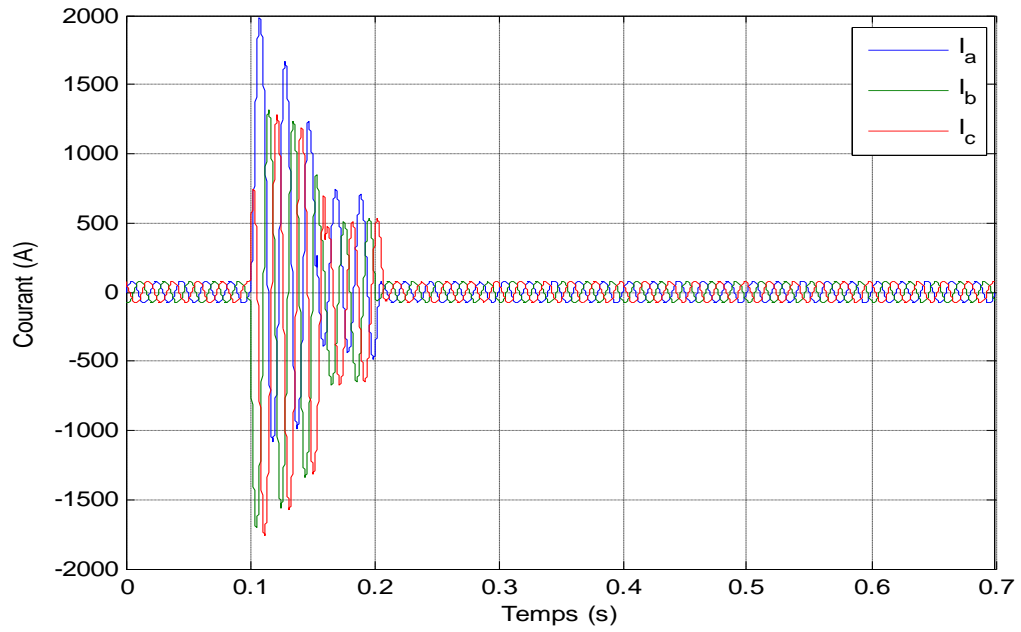
Résistance thermique du supraconducteur au réservoir de refroidissement	$\theta_{sc}$	$Q = \int i_{sc}(t)^2 R_{sc}(t) dt$	K/W
La chaleur a dissipé dans le supraconducteur	$Q_{sc}(t)$	$\frac{1}{kl_{sc} \pi d_{sc}}$	J
Chaleur enlevée par le système de refroidissement	$Q_{évacuées}(t)$	$\int \frac{T(t) - T_a}{\theta_{sc}} dt$	J
Résistance instantanée des supraconducteurs	$R_{sc}(t)$	$\frac{E(t, T) l_{sc}}{J(t) a_{sc}}$	$\Omega$

**III.3.1.b. Les résultats et simulation**

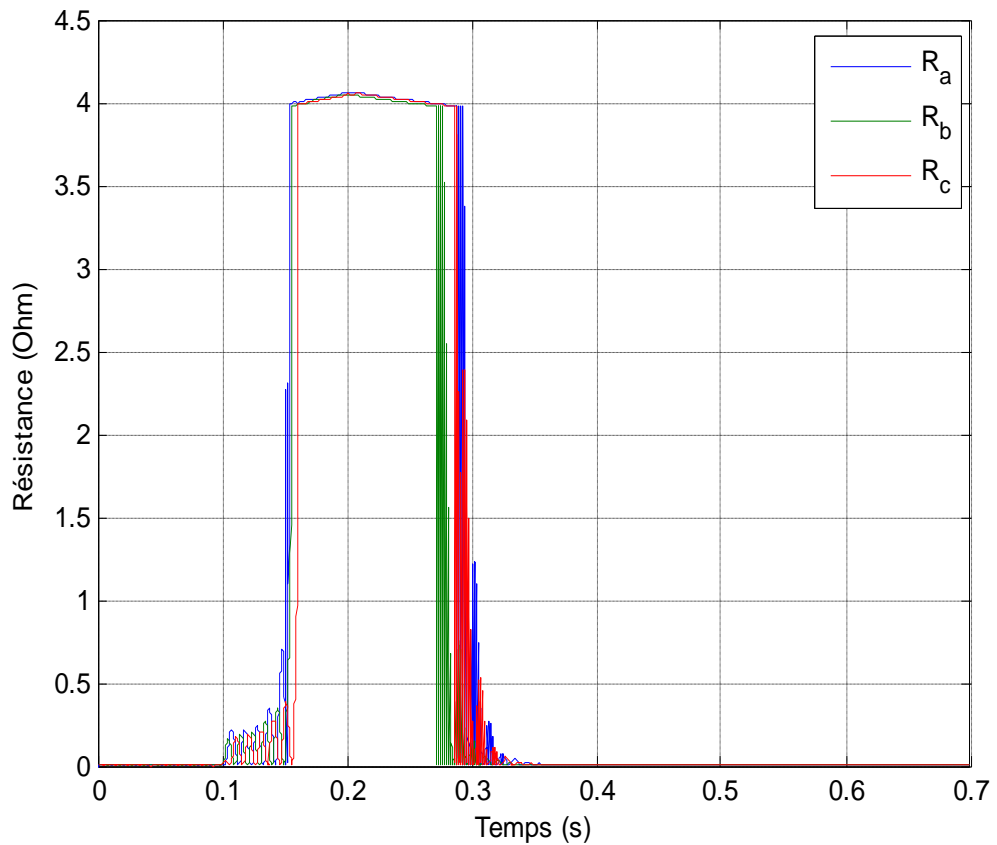
Les (Fig.III.6-7) représentent les allures des tensions et des courants pour les trois phases. D'après ces résultats en remarque que il y'a une limitation importante de courant, cette limitation n'est pas instantané à cause de la variation de la température de supraconducteur n'est pas instantané.



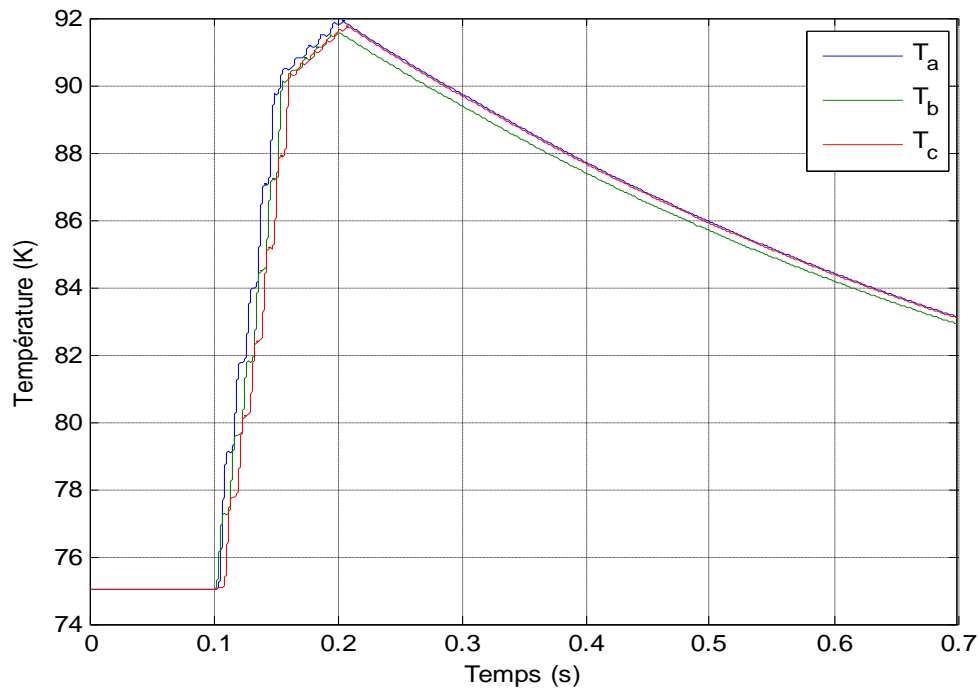
**Fig.III.6** : variation de tension en fonction de temps dans le cas défaut avec SFCL



**Fig.III.7** : variation de courant en fonction de temps dans le cas défaut avec SFCL.



**Fig.III.8** : variation de la résistance en fonction de temps dans le cas défaut avec SFCL.



**Fig.III.9:** variation de température en fonction de temps dans le cas défaut avec SFCL.

D'après les résultats obtenus dans les (Fig.III.8-9), nous avons remarqué que :

- Pour  $t < 0.1s$  donc avons le défaut, les résistances des SFCL sont nuls car le courant de la ligne est faible, aussi la valeur de la température est de 75K (la température ambiante).
- Pour  $0.1 < t < 0.2s$  pendant le court-circuit, les résistances des supraconducteurs commence d'augmenter grâce à l'effet joule qui augmente la température. (Fig.III.8-9). Après 0.2s, le défaut disparu, mais les valeurs des résistances reste grandes, cette remarque a été causé par la conduction thermique avec le milieu extérieur est lent.

### III.3.2. Influence de la durée défaut

Dans cet essai, nous avons changé seulement la durée de défaut (0.2-0.3s, 0.2-0.5s et 0.2-0.7s).

A la lumière de ces résultats, la durée de défaut augmente la température maximale de supraconducteur jusqu'à 101K pour le troisième cas (c.-à-d. pour la durée de défaut entre 0.2s et 0.7s), et même remarque la résistance (Fig.III.11).

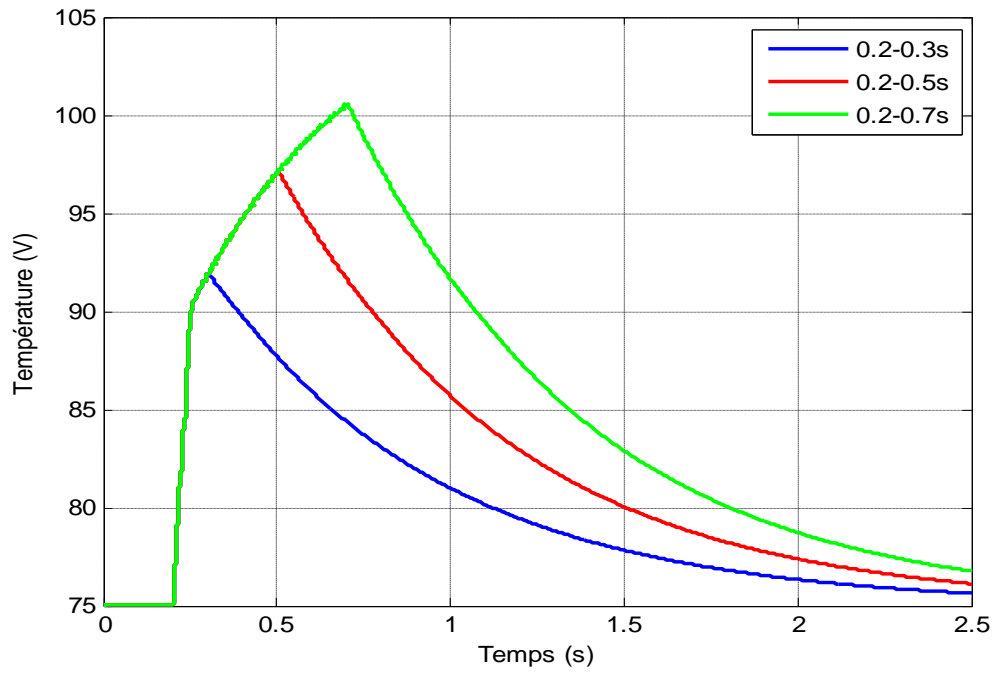


Fig.III.10: variation de température pour différents durées de défaut.

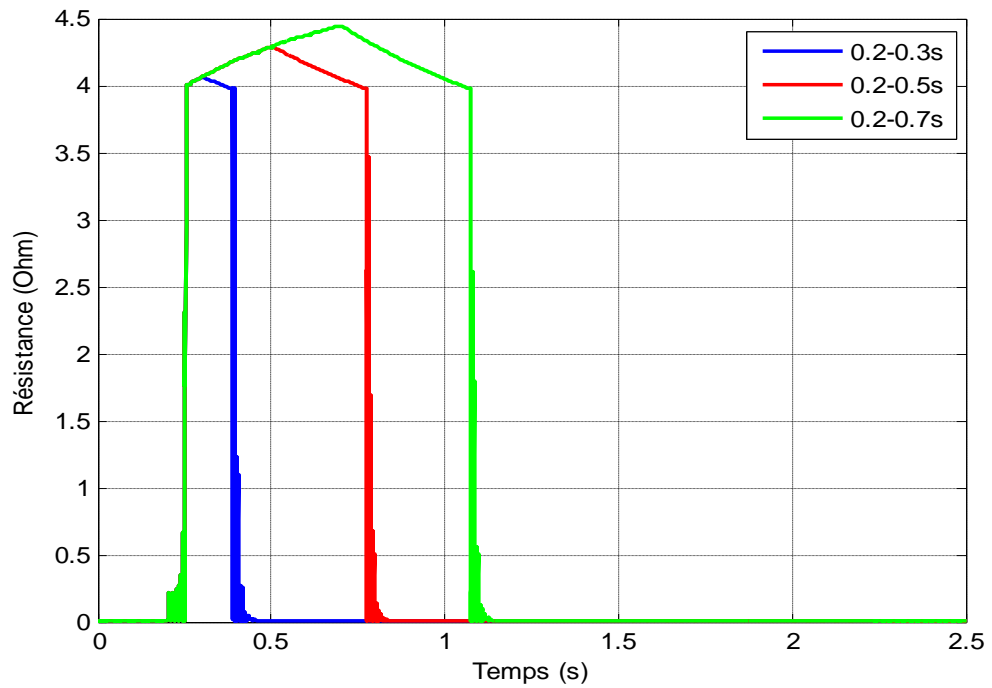


Fig.III.11: variation de la résistance pour différents durées de défaut.

### III.3.3. Influence de la charge

Avant et pendant le défaut, pour les charges 2MW, 4MW et 6MW la variation de les températures et les résistances sont les mêmes, mais après le défaut, le courant de la charge fait la différence entre les allures pour les différents charges (figure III.12-13).

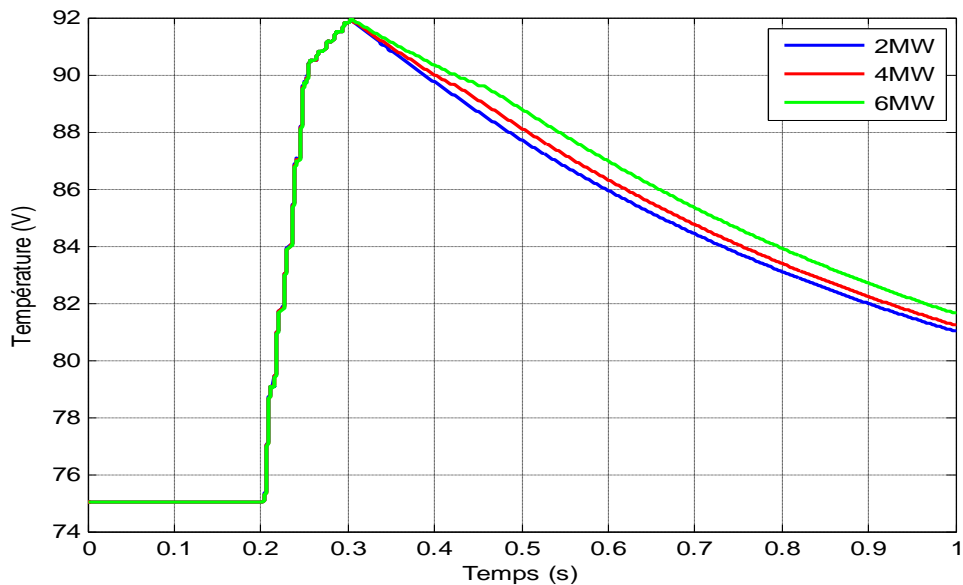


Fig.III.12: variation de la résistance pour différents charges.

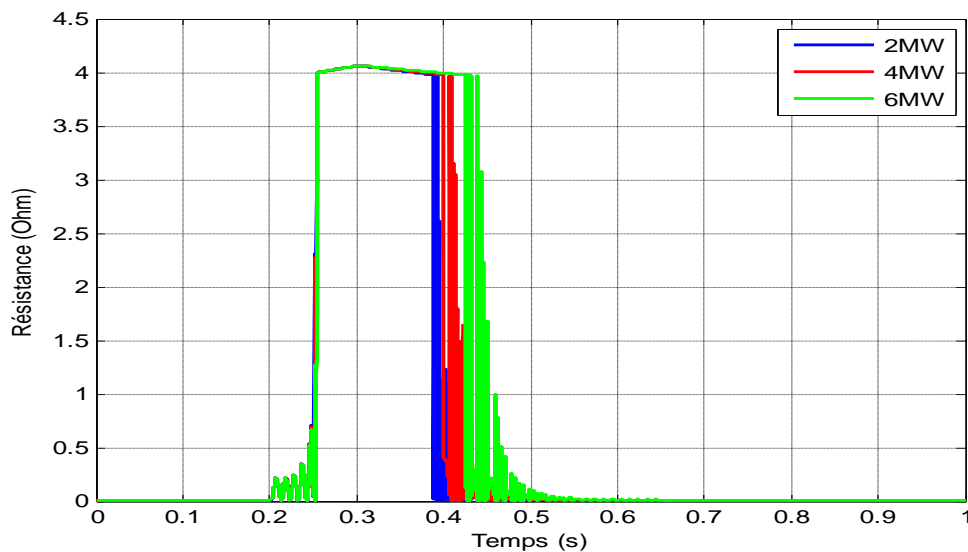
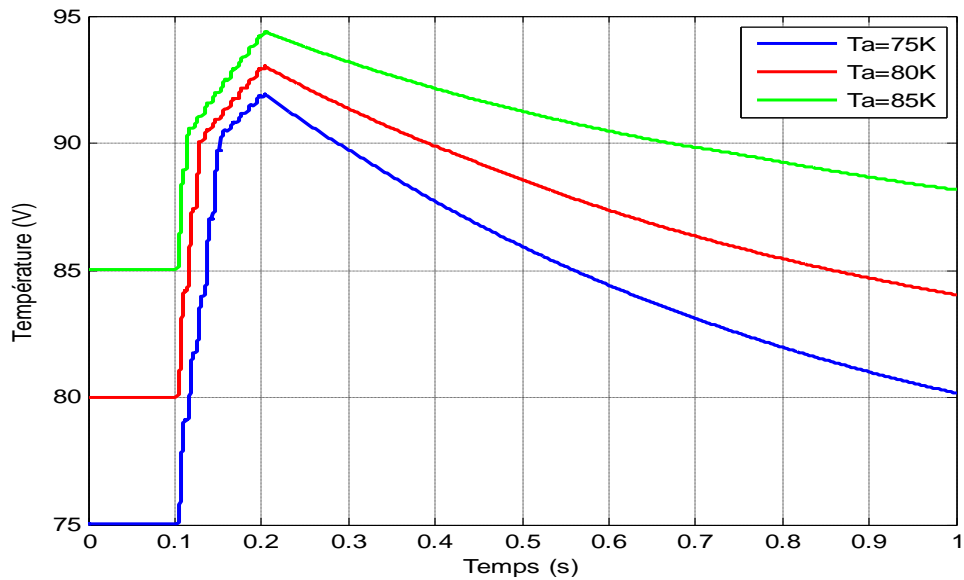


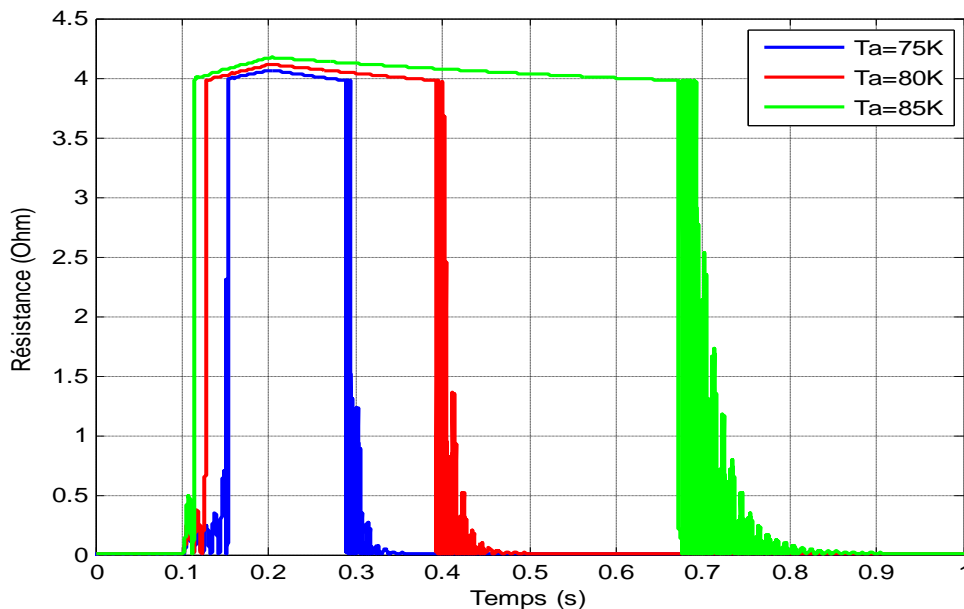
Fig.III.13: variation de la température pour différents charges.

### III.3.4. Influence de la Température

Dans cet essai, nous avons changé la température ambiante (milieu de refroidissement  $T_a$ ).



**Fig.III.14:**variation de la température pour différents température ambiante.



**Fig.III.15:**variation de la résistance de limiteur pour différents température ambiante.

D'après les (Fig.III.14-15), nous avons remarqué que le supraconducteur transiter rapidement vers l'état normale si la température ambiante élever.

Aussi, après disparition de défaut, le limiteur prend un temps lent pour la retour vers l'état supra.

### III.3.5. Etude de l'énergie dissipé dans le limiteur

Dans cette partie, l'énergie a été calculée et représenté à partir de courant de limiteur et leur résistance.



Les (Fig.III.16-17) montre que l'énergie dissipé dans le limiteur commence d'augmenter à partir de l'instant de court-circuit ; mais a l'instant où il y'a une transition de résistance 0.15s, l'énergie transite vers une valeur maximale puis diminue. Donc lorsque la valeur de la résistance de supraconducteur est faible, l'énergie dissipée est aussi faible (d'ordre 30W).

A l'instant de transition de l'état de supraconducteur vert l'état normal (0.15s), la résistance augmente brusquement, ce changement d'état influe sur l'énergie malgré le courant dépasse leur valeur maximale 250A.

Cette valeur peut dégrader la qualité ou détruire le supraconducteur, donc faut ajout un appareillage de protection contre ce phénomène.

En peut observer clairement que le courant parcouru dans le supraconducteur dans l'intervalle 0.2s a 0.3s est inferieur de courant dans le régime normal, cette diminution du la résistance de supraconducteur reste égale 4 Ohm, donc pendant cette intervalle il n'a pas un défaut mais le supraconducteur dans l'état normal.

Parmi les solutions il y'aux les résistances shunt avec le limiteur.

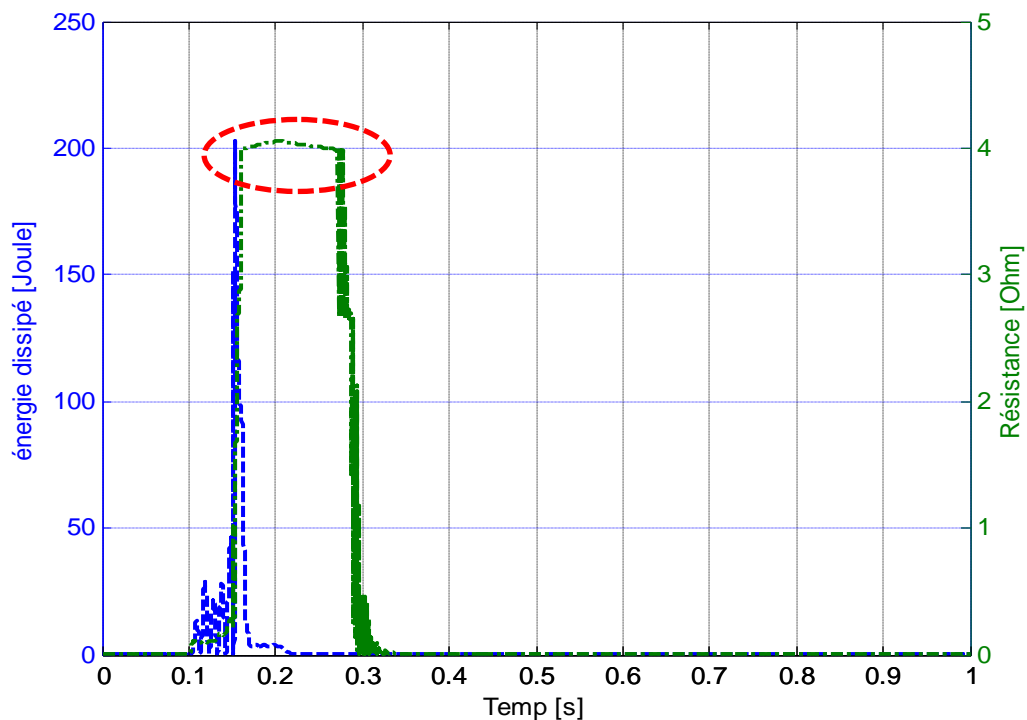


Fig.III.16: variation de l'énergie et la résistance en fonction du temps.

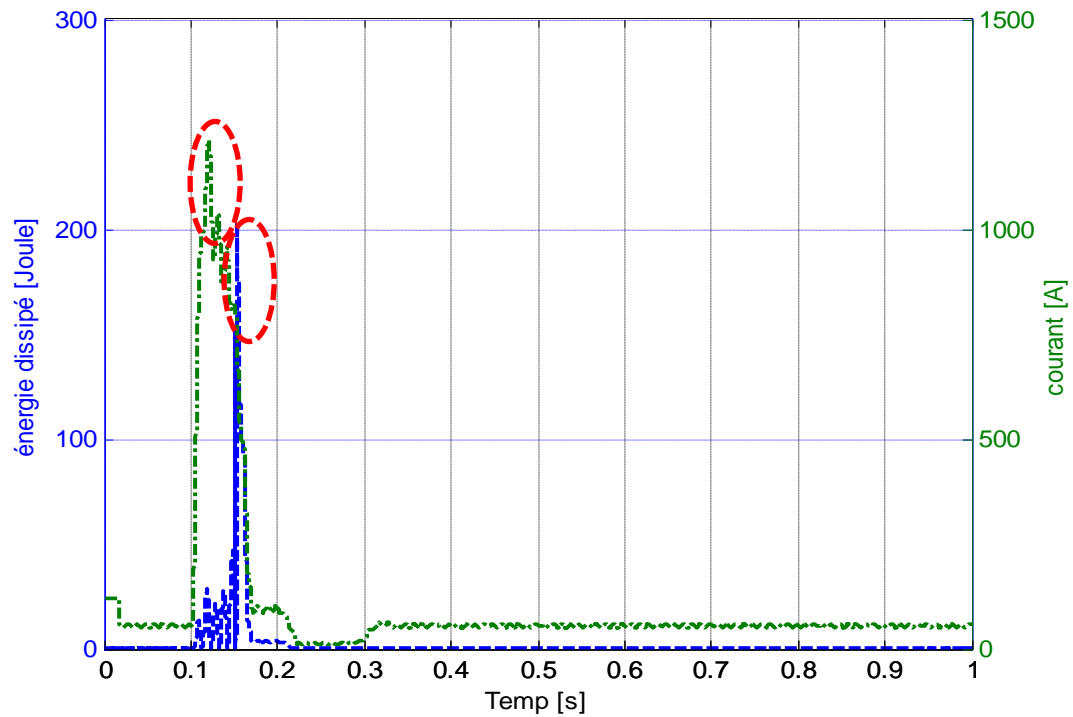


Fig.III.17:variation de l'énergie et lecourant en fonction du temps.

### III.4.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une modélisation d'un limiteur inductif basé sur les travaux de **HOSSEIN HEYDARI** et **STEVEN BLAIR**. Et nous avons simulé le comportement un réseau électriques de distribution avec l'intégration d'un limiteur inductif de courant, dont l'objectif de calculer les différentes grandeurs électriques et thermiques couplé dans les matériaux supraconducteurs, et afin d'étudier les pertes joules dans les SFCL, nous avons aussi calculé la puissance dissipé dans les limiteurs pendant le défaut.

D'après les résultats on constat que les limiteurs sont des systèmes de protection efficaces, mais il faut toujours éviter l'énergie de dissipation maximale.

*CONCLUSION*  
*GENERALE*

## **Conclusion Générale**

Le thème principal de cette mémoire de master est Analyse de L'énergie dissipative dans les limiteurs de courant inductif à base de supraconducteurs à haute température critique pour les systèmes d'énergie.

Pour modéliser le comportement électrothermique de ce limiteur, nous avons utilisé le modèle en puissance où les caractéristiques spécifiques (La densité de courant, la non linéarité de la résistance, la zone de flux-flow) des supraconducteurs à haute température critique sont tenir en compte.

Le présent travail met l'accent sur le couplage entre les phénomènes magnétiques (modèle de transformateur) et électrique-thermique (modèle en puissance) pendant un court-circuit triphasé à l'aide de MATLAB/SIMULINK où le limiteur est considéré comme une impédance inductive et résistive variable en fonction du courant de ligne (phase) et de la température.

Notre travail est divisé en deux parties :

La première est basée sur l'étude d'un réseau électrique durant le fonctionnement normale, et pendant d'un défaut. Dans cette partie, les tensions et les courants des lignes sont représentées graphiquement à l'aide de la simulation.

La deuxième est basée sur l'étude d'un réseau électrique durant un court-circuit avec l'insertion d'un limiteur de courant. La résistance, la température, le courant sont représentées .Aussi, l'énergie dissipée dans le supraconducteur en fonction de temps.

A la lumière des résultats obtenus, il s'est avéré que le SFCL est le meilleur moyen de limitation de courant pour la protection de réseau électrique, mais il y'a un problème de l'énergie dissipé, c.-à-d. durant la limitation, et pendant l'accroissement de la valeur de la résistance, l'énergie dissipée augmente, cette accroissement influe sur le matériau supraconducteur et donc il faut protéger le matériau par des moyens supplémentaires.

En perspective, nous proposons une étude sur la stabilité de machines synchrones connectée au réseau électrique contient un limiteur inductif de courant pendant un court-circuit.

# Références Bibliographiques

- [1] Yves Brunet, Pascal Tixador « *Limiteurs Supraconducteurs* » Techniques de l'Ingénieur, Réf : D3662 v1 ,10 nov. 1997.
- [2] Florian Tefanescu « *Modelisation du Fonctionnement d'un Limiteur de Courant de Defaut Supraconducteur Inductif* » th international conference on electromechanical and power systems, October 4-6, 2007 - Chisinau, Rep.Moldova.
- [3] DariuszCzerwiński « *Modelling the Criticalparameters Of High Temperature superconductordevices In Transient states.* » these de doctorat, Université de technologie de Lublin 2013.
- [4] Mahtali Mohamed « *Constantine Etude et Caractérisation de Structures Supraconductrices.* », Thèse de Doctorat d'état en Physique Spécialité: Sciences des Matériaux Université Mentouri.
- [5] H. KamerlinghOnnes, Van Wetenschappen (Amsterdam) 14 (1911 ) 1 13-818.
- [6] W. Meissener and R. Ochsenfeld, Nature Wissenschaften21 (1933) 787.
- [7] F. and H. London, Proc. Roy. Soc. (London), A149(1935) 71 .
- [8] O.L. Ginzburg, L. D. Landau, Zn.Eksperim. Teor. Fiz. , 20 (1950) 1064.
- [9] J.N. Rjabinin and L.V. Schubnikov, Phys. Z.Sowj., 6(1935) 605-607.
- [10] A.A. Abricosov, Sov. Phys. JETP, 5(1957) 11 74.
- [11] J. Bardeen, L.N. Cooper, J.R. Schreiffer, Phys. Rev., 108 (1957) 11 75.
- [12] B. D. Josephson, Phys. Lett. 1 (1962) 251.
- [13] J.G. Bednorz, K. A. Muller, Z. Phys. B, 64 (1986) 1 89.
- [14] E. Guilmeau, « *Thèse de doctorat* », Université de CAEN, Basse Normandie, (2003).
- [15] Nemdili Saad ; «*Modélisation et Simulation du Limiteur de Courant Supraconducteur.* », Thèse de Doctorat de L'université Ferhat Abbas, Sétif 2013.
- [16] J. Baixeras, «*Les Supraconducteurs*», Editions Eyrolles et CNRS Ed., Paris, 1998.
- [17] C. Kittel, “ physique de l'état solide”, pp. 357-360, Ed. Dunod, Paris, (1983).
- [18] Khene Mohamed Lotfi;«*Etude de l'Aimantation dans Les Supraconducteurs.*», Thèse de Doctorat de l'Université M.Khider,Biskra 2015.compound system atambient pressure, Phys.Rev.Letter58,(1987),908.
- [19] M. Brousseau, « *Physique du solide*», Ed. Masson, Paris (1992) p. 320.
- [20] C. P. Bean. «*Magnetization of hard superconductors*». Physical Review Letters, 8:250,1962.

- [21] C.P. Bean. «*Magnetization of high-field superconductors*», Reviews of modern physics, 31:39, January 1964.
- [22] J. K. Sykulski, R.L. Stoll and A. E. Mahdi, «*Modelling HTc Superconductors for AC Power Loss Estimation* », IEEE Transactions on magnetics. vol. 33, No. 2, March 1997.
- [23] I. Klutsch, G. Meunier, P. Labie, C. Guerin, P. Tixador, « *Modélisation des supraconducteurs. Enaxisymétrie*», Conférence Matériau Génie Electrique (MGE) 2-3 avril 2003 Grenoble
- [24] N. Takeda, M. Uesaka and K. Miya, «*Computation and experiments on the static and dynamic characteristics of high  $T_C$  superconducting levitation*», Cryogenics 1994, vol. 34, Number 9.
- [25] Joseph DURON Modélisation de Matériaux supraconducteurs -application à un limiteur de courant Joseph.0 DURON THÈSE NO3469 (2006).
- [26] PASCAL TIXADOR et YVES BRUNET, «*Supraconducteurs-Application de puissance à haute température critique* » Technique de l'ingénieur, D2705, 2008.
- [27] YANNICK COINTE. «*Limiteur supraconducteur de courant continu* » Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 2007.
- [28] K. Berger, B. Douine, J. Leveque, D. Netter, A. Rezzoug, T. Satiramatekul et F. Bouillault, «*Etudes des Pertes dans un tube Supraconducteur HTC : Comparaison de Méthodes de Calculs*» Electrotechnique du Futur, Gif-Sur-Yvette : France (2003) .
- [29] Attie Elie, Hollocou Alexandre, Noel, Camille, Robert Sebastien, Rotival Georges et Sablone Emmanuel. «*PSC : Train à lévitation magnétique et Supraconducteur* ». Rapport Final, 2011.
- [30] Ben Mebarek Fethi ; «*Modélisation des matériaux supraconducteurs application à un limiteur de courant* », Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister de l'Université Mohamed Khider, Biskra, 2014.
- [31] El Hadj Ailam. «*Machine synchrone à plots supraconducteurs : Etude et réalisation*» Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy I, 2006
- [32] Belmout Olivier; «*Limitation de Courant à Base d'Oxydes Supraconducteurs et Réalisation d'un Appareil 100 a \_1kv.* », Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, France 1999.
- [33] Cointe Yannick; «*Limiteur Supraconducteur de Courant Continu*» Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, Néel 2007.
- [34] J. Skindhoj, «*Repetitive current limiter based on polymer PTC resistor*», IEEE. Trans.Pow.Del.951,(1997).

- [35] S.Elschner, F.Breuer, M.Noë, T.Rettelbach, H.Walter, J.Bock, «*Manufacturing and testing of MCP 2212 bifilar coils for a 10 MVA fault current limiter*», IEEE Trans. Appl. Supercond. **13** 1980-3, (2003).
- [36] J.Bock, F.Breuer, H.Walter, S.Elschner, M.Kleimaier, R.Kreutz, M.Noë, «*Development and field test of a 10 kV / 10 MVA resistive current limiter based on bulk MCP BSCCO 2212*», IEEE Trans. Appl. Supercond. **15**1955-60, (2005).
- [37] R.Kreutz, J.Bock, F.Breuer, K-P.Juengst, M.Kleimaier, H-U.Klein, D.Krischel, M.Noë; R.Steingass, Kh.Weck, «*System technology and test of CURL10, a 10 kV, 10 MVA resistive high Tc superconducting fault current limiter*», IEEE Trans. Appl. Supercond. **15** 1961-4, (2005).
- [38] J. Leveque, «*Limiteur supraconducteur de courant structure hybride originale*», Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble (1993).
- [39] K.Kajikawa, K.Kaiho, N.Tamada, T.Onishi, «*Magnetic-shield type superconducting fault current limiter with high-Tc superconductors*», Electr. Eng. Japan **115** 1026–31, (1995).
- [40] Florian Stef Nescu; «*Modélisation du fonctionnement d'un limiteur de courant de défaut supraconducteur inductif* » ; Université de Craiova, Decebal 107, 200440 Craiova, Roumanie, Octobre 4-6, 2007.
- [41] Hossein Heydari ; «*A multi-objective heuristic method for optimal design of HTS fault current limiters*» ,Department of Electrical Engineering , Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran ,Received 27 July 2014; accepted 20 February 2016.

## Abstract

In this work, we present an analysis of the dissipative energy in current limiters for power systems using a modelling of electro-thermal phenomena in superconducting materials with a high critical temperature applied to limit the fault current. Generic equations for energy dissipation are established in terms of fault duration, SFCL resistance. The various electrical and thermal results have been widely presented from a SIMLINK / MATLAB simulation.

**Key words:** superconductor, inductive current limiter, energy dissipate

## Résumé

Nous avons présenté dans ce mémoire une analyse de l'énergie dissipative dans les limiteurs inductif de courant pour les systèmes à puissance à partir une modélisation des phénomènes électrothermiques dans les matériaux supraconducteurs à haute température critique appliquée pour limiter le courant de défaut. Les équations caractéristiques pour la dissipation d'énergie sont établies en termes de durée de défaut, de résistance SFCL. Les différents résultats électriques et thermiques ont été largement présentés à partir une simulation sous SIMLINK/MATLAB.

**Mots clés :** supraconducteur, limiteur inductif de courant, énergie dissipé

## ملخص

قدمنا في هذا العمل تحليلاً لطاقة الضائعة في محددات الحثية للتيار الخاطئ للأنظمة الطاقوية من خلال نمذجة الظواهر الكهروحرارية في المعادن فائقة الناقلية ذات درجة الحرارة العالية. المعادلات المميزة للطاقة الضائعة عرضت من خلال علاقتها مع مدة الخطأ أيضاً من خلال علاقتها مع قيمة المقاومة لمحددات التيار. مختلف النتائج ذات الطابع الكهربائي والحراري عرضت في هذا العمل بإسهاب من خلال محاكاة في برنامج ماتلاب.

الكلمات المفتاحية: المعادن فائقة الناقلية، محددات الحثية التيار، الطاقة الضائعة.