

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF- M'SILA**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**

**N° : RE- 09**



**DOMAINE : SCIENCE TECHNOLOGIE**

**FILIERE : ELECTROTECHNIQUE**

**OPTION : RESEAUX ELECTRIQUES**

**Mémoire présenté pour l'obtention**  
**Du diplôme de Master Académique**

**Par : BOUROUBI Malek**

HERABI Asma

**Intitulé**

**Amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques par SFCL en présence du défaut de court-circuit**

**Soutenu devant le jury composé de :**

Pr. GHEMARI Zine	Université Mohamed Boudiaf-M'sila	Président
Dr. ABDOU Abdelhak	Université Mohamed Boudiaf-M'sila	Examineur
Dr. BELKHIRI Salah	Université Mohamed Boudiaf-M'sila	Rapporteur

**Année universitaire : 2019/2020**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## Remerciement

Toute gratitude et remerciement à DIEU LE TOUT-PUISSANT, qui nous a permis d'achever cet modeste travail.

Nous présentons tous remerciement et appréciation à notre encadreur **Dr. BELKHIRI Salah** qui nous a dirigé dans nos travaux avec ses corrections, ses conseils et ses encouragements.

Nous offrons un merci spécial à la famille généreuse pour son aide et ses incitations.

Nous tenons à remercier les membres de jury **Pr. GHEMARI Zine et Dr. ABDOU Abdelhak** d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Nous remercions également tous le corps enseignant et administratif qui ont contribué à notre formation universitaire.

Un grande merci pour les étudiants de notre promo 2020 en Génie électrique.

Sans oublier la famille proche et les amis et tous qui partagent avec nous les moments de ces années et ce travail que ce soit avec un bon mot ou une prière, Qu'Allah vous récompense tout le meilleur.

---

# Table des Matières

INTRODUCTION GENERALE .....	1
-----------------------------	---

## CHAPITRE I : Généralité sur les matériaux supraconducteurs

I. 1. Introduction.....	4
I. 2. Bref historique .....	4
I. 3. Présentation générale de la supraconductivité .....	5
I. 3. a. Résistivité .....	6
I. 3. b. Aimantation.....	7
I. 4. Présentation d'un ruban supraconducteur à haute température critique .....	8
I. 5. Grandeurs critiques des supraconducteurs .....	10
I. 6. Classification des supraconducteurs .....	11
I. 6. a. Supraconducteurs de type I et II .....	11
I. 6. b. Supraconducteurs LTS et HTS .....	12
I. 7. Mobilité des vortex .....	12
I. 7. a. Flux flow .....	13
I. 7. b. Flux creep .....	13
I. 8. Principales applications des supraconducteurs en électrotechnique .....	14
I. 8. a. Machines tournantes .....	14
I. 8. b. Câbles de transport .....	14
I. 8. c. Stockage d'énergie .....	16
I. 8. d. Limitation de courant .....	17
I.9. Conclusion .....	17

## CHAPITRE II : Modélisations des matériaux supraconducteurs

II. 1. Introduction .....	18
II. 2. Equations mathématiques régissent le phénomène physique .....	19
II. 2. 1. Relation $B(H)$ .....	19
II. 2. 2. Relation $E (J)$ .....	19
II. 3. Les Modèles de comportement .....	21
II. 3. 1. Modèle de l'état critique ou le modèle de Bean .....	21
II. 3. 2. Modèle de KIM.....	22
II. 3. 3. Modèle de Flux Flow et Flux Creep .....	22
II. 4. Limiteurs supraconducteurs de courant .....	23
II. 4. 1. Différents types de limiteur de courant supraconducteur .....	23
II. 4. 1. a. Limiteur résistif .....	23
II. 4. 1. b. Limiteur inductif .....	25
II. 5. Formulation des Équations Électromagnétiques.....	26
II. 5. 1. Modèle électrostatique .....	26
II. 5. 2. Modèle magnétostatique .....	26
II. 5. 2. a. Modèle magnétostatique scalaire .....	27
II. 5. 2. b. Modèle magnétostatique vectorielle .....	27
II. 5. 3. Modèle magnétodynamique .....	27
II. 6. Principe de la limitation de courant de défaut par un SFCL résistif .....	29
II. 6. 1. Le régime nominal .....	30
II. 6. 1. a. $I_c$ supérieur à $I_n$ .....	30
II. 6. 1. b. $I_c$ inférieur à $I_n$ .....	31
II. 6. 2. Le régime de limitation .....	32
II. 6. 3. Le régime de récupération .....	33
II. 7. Conclusion .....	34

## CHAPITRE III : Résultat de Simulation et leurs interprétations

III. 1. Introduction .....	35
III. 2. Définition de la stabilité d'un réseau électrique .....	36
III. 3. Classification de la stabilité des réseaux électriques .....	36
III. 3. 1. Stabilité de l'angle du rotor (Angulaire).....	37
III. 3. 1. 1. Stabilité Angulaire Aux Petites Perturbations .....	37
III. 3. 1. 1. a. La stabilité statique .....	37
III. 3. 1. 1. b. La Stabilité Dynamique .....	37
III. 3. 1. 2. Stabilité Transitoire ST .....	38
III. 3. 2. Stabilité de fréquence .....	38
III. 3. 3. Stabilité de tension .....	38
III. 4. But de la stabilité transitoire .....	39
III. 5. Logiciel de simulation .....	39
III. 5. 1. Utilisation de PSAT .....	40
III. 6. Réseau test .....	40
III. 7. Etude de l'influence de défaut sur la stabilité du réseau à 14 JB .....	42
III. 7. 1. Régime normal (sans défaut) .....	42
III. 7. 2. Régime de défaut (court-circuit) .....	42
III. 7. 2. a. Régime de défaut (court-circuit triphasé symétrique au nœud de JB 04) sans l'insertion du limiteur de courant SFCL ( $R_{SFCL}=0$ ) pu et $T_d=250ms$ .....	43
III. 7. 2. b. Régime de défaut (court-circuit triphasé symétrique au nœud de JB 04) avec l'insertion du limiteur de courant SFCL ( $R_{SFCL}=1$ pu) et $T_d=250ms$ .....	45
III. 7. 3. Calcul du temps critique d'élimination du défaut .....	49
III. 8. Conclusion .....	51
CONCLUSION GENERALE .....	52

## Liste des figures

<b>Fig. I. 1 :</b> Résistivité d'un supraconducteur en fonction de la température.....	6
<b>Fig. I. 2 :</b> Évolution de la résistivité en fonction de la température .....	6
<b>a)</b> Pour un matériau conventionnel et supra ( $T_c = 4.2 \text{ K}$ ) .....	6
<b>b)</b> Pour un fil de mercure .....	6
<b>Fig. I. 3 :</b> Chaleur spécifique d'un échantillon d'YBCO.....	9
<b>Fig. I. 4 :</b> Ruban mono filamentaire supraconducteur .....	9
<b>Fig. I. 5 :</b> Ruban composé de 19 filaments supraconducteurs .....	9
<b>Fig. I. 6 :</b> Ruban composé de 55 filaments supraconducteurs.....	10
<b>Fig. I. 7 :</b> Surfaces critiques des principaux supraconducteurs.....	11
<b>Fig. I. 8 :</b> Diagramme de phases d'un supraconducteur de type I et type II .....	12
<b>Fig. I. 9 :</b> Caractéristique $E(J)$ d'un supraconducteur avec activation thermique.....	13
<b>Fig. I. 10 :</b> Représentation schématique d'un câble triphasé en supraconducteur à haute Température critique (SHTC) refroidi à l'azote liquide (LN <sub>2</sub> ).....	15
<b>Fig. I. 11 :</b> 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.....	16
<b>Fig. I. 12 :</b> Conducteur formé de 4 rubans supraconducteurs isolés les uns des autres.....	16
<b>Fig. II. 1 :</b> Caractéristique $B(H)$ d'un supraconducteur.....	19
<b>Fig. II. 2 :</b> Caractéristique $E(J)$ d'un supraconducteur.....	20
<b>Fig. II. 3 :</b> Caractéristique $E(J)$ basée sur le Modèle de Bean.....	21
<b>Fig. II. 4 :</b> modèle de Flux Flow et Creep.....	23

<b>Fig. II. 5</b> : principe du limiteur de courant résistif .....	24
<b>Fig. II. 6</b> : Limiteur inductif à fort couplage.....	25
<b>Fig. II. 7</b> : Limiteur inductif à bobinage découplé.....	25
<b>Fig. II. 8</b> : Les trois états du limiteur : l'état passant pour un courant de ligne inférieur ou égal au courant nominal; l'état de limitation lors d'un court-circuit provoquant la transition supraconducteur et l'état de récupération lorsque le limiteur est isolé du réseau.....	29
<b>Fig. II. 9</b> : Choix de $I_c$ par rapport à $I_n$ . La courbe (1) représente la transition "raide" d'une couche mince. La courbe (2) représente la transition douce d'un matériau fritté. Les deux matériaux ont le même courant critique $I_c$ . Pour la courbe (1) il est préférable d'avoir un courant nominal $I_{n1}$ inférieur à $I_c$ afin d'autoriser des dépassements transitoires de $I_{n1}$ alors que pour la courbe (2) il est possible de placer $I_{n2}$ au-dessus de $I_c$ pour diminuer la durée de la transition.....	31
<b>Fig. II.10</b> : Transition d'un supraconducteur fritté. Il bascule de son état supraconducteur à son état dissipatif .....	32
<b>Fig. III.1</b> : Page d'accueil du PSAT.....	35
<b>Fig. III. 2</b> : Classification des différents types de stabilités .....	36
<b>Fig. III. 3</b> : Les buts de la stabilité transitoire.....	39
<b>Fig. III.4</b> : Interface graphique (GUI) du PSAT.....	40
<b>Fig. III.5</b> : Schéma d'un réseau test de 14 jeux de barres.....	41
<b>Fig. III.6</b> : Structure de réseau test sur logiciel PSAT.....	42
<b>Fig. III.7.a</b> : les angles rotorique (rad) de 5 générateurs sans SFCL.....	43
<b>Fig. III.7.b</b> : les vitesses (rad/s) de 5 générateurs sans SFCL.....	43
<b>Fig. III.7.c</b> : Les puissances réactives (pu) pour les 5 générateurs sans SFCL.....	44
<b>Fig. III.7.d</b> : les puissances actives (pu) pour les 5 générateurs sans SFCL.....	44



<b>Fig. III.7.e</b> : les tensions (pu) sans SFCL.....	44
<b>Fig. III.8</b> : Réseau test de 14 bus IEEE, SFCL en série avec générateur n ° 5.....	45
<b>Fig. III.9.a</b> : les angles rotoriques (rad) de 5 générateurs avec SFCL.....	46
<b>Fig. III.9.b</b> : les vitesses (rad/s) de 5 générateurs avec SFCL.....	46
<b>Fig. III.9.c</b> : l'allure des puissances réactive (pu) pour les 5 générateurs avec SFCL.....	47
<b>Fig. III.9.d</b> : l'allure des puissances active (pu) pour les 5 générateurs avec SFCL.....	47
<b>Fig. III.9.e</b> : l'allure des tensions (pu) avec SFCL.....	48

---

## Liste des tableaux

<b>Tab I.01.</b> Bref historique de la supraconductivité .....	4
<b>Tab I.02.</b> Comparaison entre le comportement magnétique d'un conducteur parfait et celui d'un supraconducteur idéal .....	8
<b>Tab. III.01</b> : le TCID pour chaque jeu de barre .....	49
<b>Tab. III.02:</b> CCT en défaut triphasé avec et sans SFCL .....	50

## Symboles et Acronymes

Indice	Mot clé	Unité
T	Température	[K]
T <sub>c</sub>	Température critique	[K]
$\tau$	Constante de temps	[s]
L	Inductance	[H]
R	Résistance électrique	[ $\Omega$ ]
R <sub>L</sub>	Résistance de limitation	[ $\Omega$ ]
$\rho_{Cu}$	Résistivité du cuivre	[ $\mu\Omega \cdot m$ ]
H	Champ magnétique	[A/m]
H <sub>c</sub>	Champ magnétique critique	[A/m]
$\chi$	Susceptibilité magnétique	/
H*	Champ magnétique d'irréversibilité	[A/m]
J	Densité de courant	[A/m <sup>2</sup> ]
J <sub>c</sub>	Densité de courant critique	[A/m <sup>2</sup> ]
$\rho_{ff}$	Résistivité électrique de flux flow	[ $\Omega \cdot m$ ]
$\rho_n$	Résistivité électrique à l'état normal	[ $\Omega \cdot m$ ]
H <sub>c1</sub>	Champ critique 1	[A/m]
H <sub>c2</sub>	Champ critique supérieur de champ critique 1	[A/m]
E <sub>c</sub>	Champs électrique pour lequel le courant critique est défini	[V. m]
$\rho$	Résistivité électrique	[ $\Omega \cdot m$ ]
B	Induction magnétique	[T],[mT]

## Listes des Acronymes et Symboles

$\mu_0$	Perméabilité magnétique du vide	[H/m]
M	Aimantation	[A/m]
$\theta$	Température.	[K]
$\rho_c$	Résistivité de Flux Creep.	[ $\Omega \cdot m$ ]
$U_0$	Potentiel de profondeur.	
$I_n$	courant nominal	[A]
$I_{lim}$	courant limité	[A]
$\Phi$	flux magnétique	[Wb]
$I_c$	Courant critique	[A]
$Bi_{2223}$	$Bi_{1.8} Pb_{0.26} Sr_2 Ca_2 Cu_3 O_{10+x}$	/
$V_n$	tension nominale	[V]
E	Champs électrique	[V. m]
n	Indicateur de la qualité d'un ruban supraconducteur	/
$I_{n1}$	courant inférieur à courant critique	[A]
$I_{n2}$	courant supérieure à courant critique	[A]
$R_{SFCL}$	Résistance de Superconductor fault current limiter	[ $\Omega$ ]
Td	Time domain simulations	[ms]
t	Temps	[S]
$R_{ch}$	Résistance du charge	[ $\Omega$ ]
$V_{ch}$	Tension du charge	[V]
$R_{sh}$	Résistance shunt	[ $\Omega$ ]
CCT	Critical Clearing Time	[ms]
G	générateur	/

## Listes des Acronymes et Symboles

---

C	générateur compensateur	/
LTS	Low Temperature Superconductors	/
HTS	High Temperature Superconductors	/
TAFF	Thermally Activated Flux Flow	/
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage	/
SFCL	Superconductor fault current limiter	/
SHTC	Supraconducteur à haute température critique	/
LN2	Azote liquide	/
HT	Haute Tension	/
MT	Moyenne Tension	/
MVF	Méthode des volumes finis	/
PSAT	The Power System Analysis Toolbox	/
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission Systems	/
SVC	compensateurs statiques	/
STATCOM	Compensateur synchrone statique	/
JB	jeux de barre	/



**INTRODUCTION  
GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE :

L'énergie électromagnétique est parmi les choses très importantes au monde dans tous les secteurs, plus particulièrement au l'industries et aux transports, car les réseaux sont interconnectés en un seul et même système de transport d'énergie électrique « boucler », alors cette énergie doit être Soumise à des règles pour obtenir une énergie parfaite, stable et constante. Surtout avec l'augmentation de la puissance demandée, le développement des interconnexions et le fait que les réseaux sont de plus en plus maillés. [1]

En effet, Les réseaux de transport d'électricité sont des parties qui sont, de façon continues, subir à des défauts d'ordre électriques (courts-circuits...) et/ou mécaniques du fait de leur forte exposition aux éléments naturels (vents, pluies, foudre ...) [2]. Par conséquent, il doit être préparé pour détecter et faire face à ces défauts et les défaillances par des dispositifs de protection assurant la sélectivité, rapidité, fiabilité, la qualité, la stabilité bien sûr et l'équilibre entre la distribution et la consommation. Tout est pour assurer la continuité de service dans les limites de puissance demandée, le maintien de la tension et de la fréquence dans les normes difficiles.

La stabilité transitoire consiste à traiter des effets des perturbations agressives de forte amplitude et de courte durée, tel que, les défauts de court-circuit, les déconnexions de lignes, des groupes de production, les variations brusque de la charge... etc. L'intervention des dispositifs de protection et de régulation est indispensable pour rétablir la stabilité pendant la période transitoire. [3, 4]

Les anomalies d'ordre électrique et plus particulièrement les courts-circuits provoquent, en complément d'une augmentation du courant dans les différentes parties pouvant amener à une destruction totale ou partielle des organes de coupures, une variation de toutes les grandeurs du système pouvant rendre instable le réseau électrique [2]. Alors les différents appareillages (transformateurs, lignes, disjoncteurs, fusibles . . .) doivent être capable de supporter des courants de court-circuit de plus en plus importants.

Un court-circuit est un régime transitoire pendant lequel, l'impédance du réseau est diminué puis s'annule. Ce phénomène électrique qui se produit notamment lorsque deux fils électriques sont mis en contact direct, le plus souvent suite à un défaut d'isolation. Il se traduit par une augmentation brusque de l'intensité du courant qui peut aller jusqu'à provoquer un incendie. En réponse à de tels courant de court-circuit, parmi les

applications électrotechniques, la plus prometteuse et très attractive semble être le limiteur de courant supraconducteur car il apporte une solution nouvelle et inaccessible avec les techniques conventionnelles.

Depuis la découverte du phénomène de la supraconductivité, la recherche dans le domaine des supraconducteurs a été relancée surtout après l'apparition des supraconducteurs de type II, tandis que les applications industrielles, peuvent être envisageables. Ils sont parmi les dispositifs de protection utilisables dans le réseau électrique qui est en constante évolution. Leurs propriétés physiques justifient la récente mise en œuvre et leur développement. Ils sont caractérisés par la disparition totale de la résistivité en dessous d'une certaine température appelée température critique ( $T_c$ ).

Leurs applications en électrotechnique peuvent être également envisageables, dans différents domaines tel que ; machines tournantes, câbles de transport, Stockage d'énergie, limitation de courant de défaut SFCL, ce qui était le but de ce mémoire.

Le limiteur supraconducteur de courant de défaut (SFCL) est un appareil autonome et répétitif qui n'a pas besoin de moyen de détection du défaut. Le principe de ce limiteur est basé sur la transition d'un élément supraconducteur mis en série dans la ligne à protéger quand, durant un défaut, le courant dépasse son courant critique : la résistance développée par le matériau permet alors de limiter le courant. [5]

Le mémoire est donc composé de la manière suivante :

- Le premier chapitre sera consacré à une introduction générale sur les matériaux supraconducteurs, nous présenterons ce phénomène physique, son historique et ses principales applications en électrotechnique.
- Le deuxième chapitre présente l'étude théorique du limiteur supraconducteur à travers de modélisation des matériaux supraconducteurs par des équations mathématiques régissent le phénomène physique, nous parlerons sur ses modèles de comportement Bean, KIM, Flux Flow et Flux Creep, ensuite nous définiront le limiteur supraconducteur brièvement et rappelons ses types résistif et inductif. Nous déterminerons les équations qui décrivent le fonctionnement électrique et magnétique du système étudié, enfin nous parlons sur le principe de la limitation de courant de défaut par un SFCL résistif avant, durant et après le défaut.
- Le dernier chapitre sera consacré aux résultats de simulation par le logiciel PSAT et leurs interprétations après avoir donné un bref aperçu sur la stabilité d'un réseau

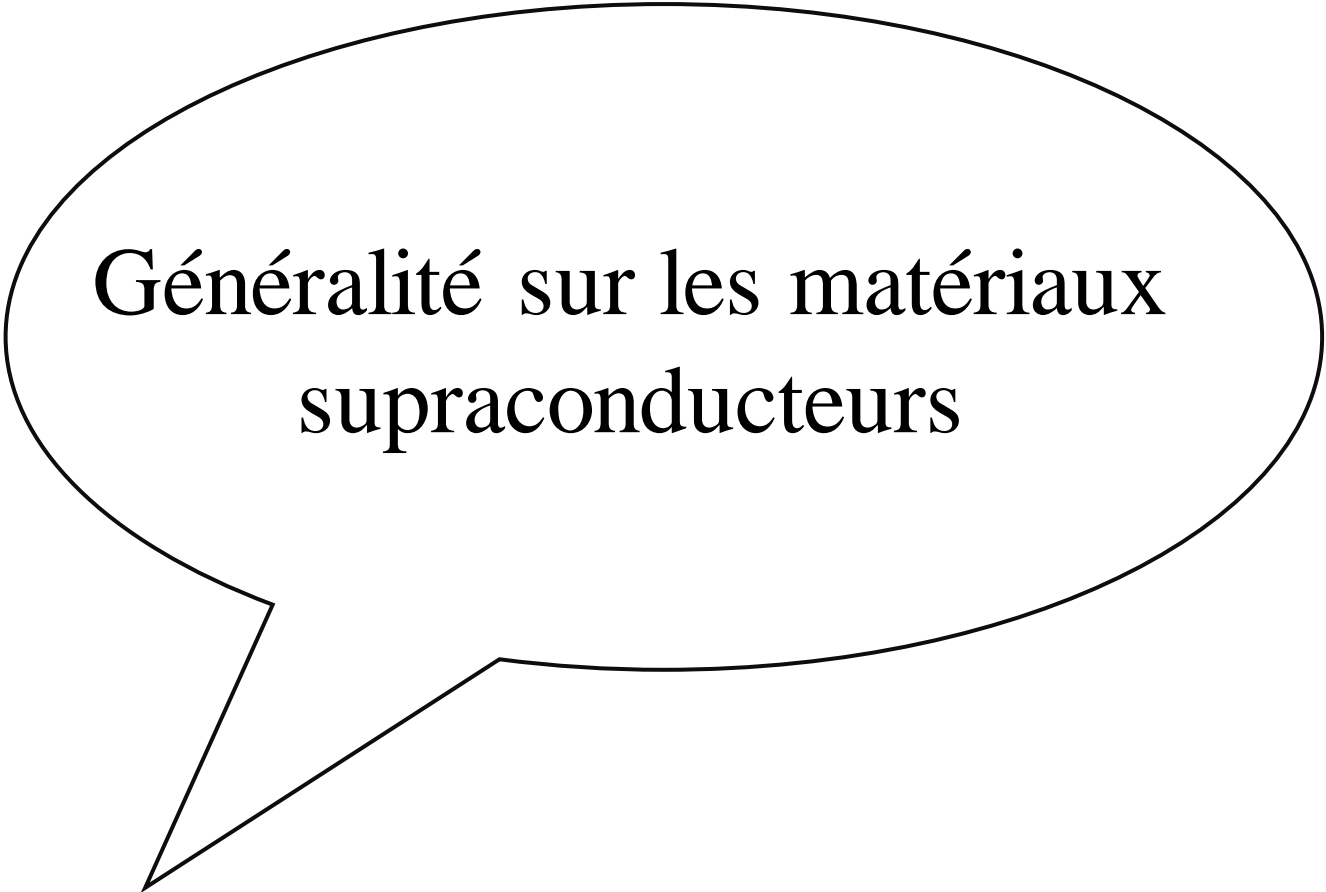
électrique et ses classifications. Nous faisons l'étude de l'influence de défaut (court-circuit) sur la stabilité du réseau et l'intérêt apporté par les SFCLs pour améliorer cette dernière. L'application a été effectuée sur un réseau IEEE 14 jeux de barres et 5 générateurs avec le PSAT sous l'environnement MATLAB. Deux cas de figures sont présentés afin d'étudier l'influence de défaut sur la stabilité de ce réseau : sans l'insertion de SFCL et avec l'emplacement de SFCL.

Finalement, nous clôturons notre étude par une conclusion générale résumant le contenu de cette approche à travers ce mémoire et on terminera enfin, par les perspectives de continuation de ce travail.





# **Chapitre I :**



Généralité sur les matériaux  
supraconducteurs

## I. 1. Introduction :

L'objectif principal de ce chapitre est de présenter le contexte général des matériaux auxquels nous sommes intéressés dans ce travail, c'est bien les matériaux supraconducteurs. Ces derniers sont des matériaux surprenants, leur capacité à conduire le courant sans pertes ainsi que leur diamagnétisme parfait permet la fabrication de systèmes électrotechniques plus compétitifs.

La première partie est constituée d'un résumé succinct de l'histoire de la supraconductivité, nous citons les principales dates et théories de principes concernant les supraconducteurs, une introduction permettra dans un premier temps de découvrir ce phénomène, ensuite nous présenterons le comportement magnétothermique de ces derniers. Une seconde partie traite les différents types des supraconducteurs et leurs principales applications en électrotechnique.

## I. 2. Bref historique :

L'histoire de la supraconductivité commence en 1911 dans un laboratoire de l'Université de Leiden aux Pays-Bas. Heike Kammerling-Onnes, qui s'est intéressé auparavant à la liquéfaction de l'hélium, étudie les propriétés des métaux à basse température, à la température de l'hélium liquide plus exactement. C'est alors que Gilles Holst, étudiant dans ce laboratoire, observa la disparition brutale de la résistivité du mercure lorsque la température devenait légèrement inférieure à 4.2 K. Les propriétés extraordinaires observées sur la conduction électrique ont conduit à l'appellation de ce nouvel phénomène : "état supraconducteur". [6]

Anné	Faits ayant marqué la recherche autour de la supraconductivité
1908	Liquéfaction de l'hélium par K. Onnes
1911	Découverte de la supraconductivité par K. Onnes et G. Holst sur un échantillon de mercure dans un bain d'hélium liquide
1913	Échec du premier aimant supraconducteur
1933	Mise en évidence du diamagnétisme des supraconducteurs par Meissner et Ochsenfeld
1954	Premier aimant supraconducteur (Nb)
1957	Théorie microscopique de la supraconductivité par Bardeen Cooper et Schrieffer

1958	Mise au point de conducteurs NbZr et Nb <sub>3</sub> Sn
1960	Découverte des fortes densités de courant sous induction élevée
1962	B. Josephson prédit les effets quantiques qui portent son nom (effet Josephson)
1964	Première application significative des supraconducteurs à Argonne
1965	Premiers cryoalternateurs
1968	Définition du brin multifilamentaire par le laboratoire Rutherford
1974	Mise en service de la chambre à bulle BEBC au CERN
1982	Premières images IRM, et première application industrielle et commerciale des supraconducteurs
1983	Mise au point des câbles multifilamentaires supraconducteurs alternatifs par Alcatel Alstom Recherche et GEC Alstom. Premier accélérateur supraconducteur (TEVATRON)
1986	Berdnoz et Muller découvrent la supraconductivité à haute température critique de céramiques bas d'oxyde
1987	Envolée des températures critiques (YbaCuO, 93 K) Démarrage de TORE SUPRA à Cadarache
1988	Mise en fonctionnement de T15 (Nb <sub>3</sub> Sn, 6.4 T, 4.5 K)
1989	Mise en fonctionnement du système de champ toroïdale de TORE SUPRA
1993	T <sub>c</sub> = 135 K des composés HgBa <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>8-δ</sub>
1998	Le record de la supraconductivité arrive à T <sub>c</sub> = 164 K
1999	Test du premier système RMN à 900 MHz, bobines modèles d'ITER et début de construction du LHC
2001	Découverte des propriétés supraconductrices du composé MgB <sub>2</sub>

**Tab. I.1:** Bref historique de la supraconductivité [6]

### I. 3. Présentation générale de la supraconductivité :

La supraconductivité est un état de la matière dans lequel celle-ci présente une remarquable combinaison de propriétés électriques et magnétiques. La disparition totale de la résistivité en dessous d'une certaine température appelée température critique (T<sub>c</sub>) est la caractéristique la plus connue de ces matériaux (Figure 1). Une autre propriété est le diamagnétisme parfait sous certaines conditions de champ magnétique [7].

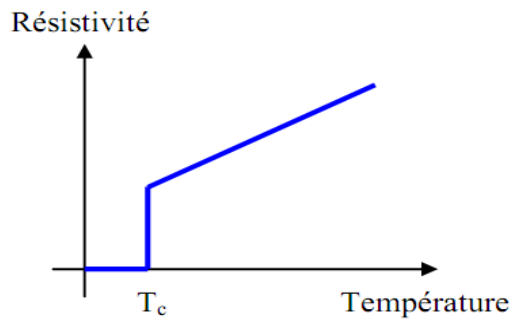
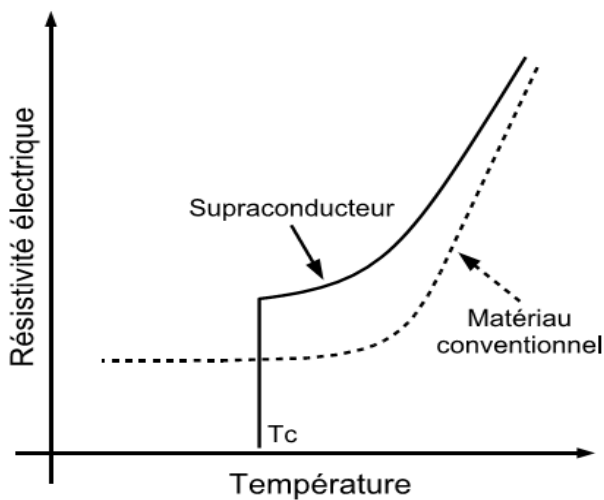


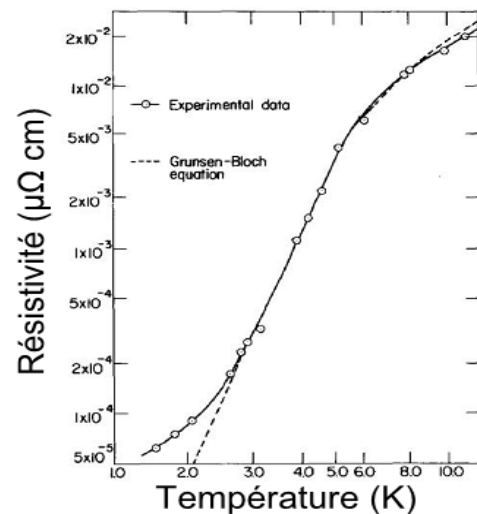
Fig. I. 1 : Résistivité d'un supraconducteur en fonction de la température [7]

I. 3. a. Résistivité :

C'est le phénomène le plus connu et le plus remarquable : en dessous d'une certaine température, appelée température critique ( $T_c$ ), la résistivité d'un matériau supraconducteur devient brutalement non mesurable (Figure 2). Pour le mercure, cette chute brutale intervient lorsque la température  $T$  est de l'ordre de 4.2 K. [6]



(a) Pour un matériau conventionnel et supra [6]  
( $T_c = 4.2$  K)



(b) Pour un fil de mercure [6]

Fig. I. 2. a : Évolution de la résistivité en fonction de la température. [6]

Des expériences reposant sur la décroissance exponentielle de l'induction magnétique générée par le courant circulant dans une bobine supraconductrice soigneusement court-circuitée montrent que la résistivité chute aux alentours de  $10^{-24} \Omega \cdot m$ . La constante de temps  $\tau = L/R$  du circuit électrique est alors supérieure à 100 millénaires. Paradoxalement, la résistivité d'un matériau supraconducteur à l'état normal (c'est-à-dire non supraconducteur) est élevée, de l'ordre du  $\mu\Omega \cdot m$ . Pour comparaison, la résistivité du cuivre à 90 K est de  $\rho_{Cu}(90 K) = 0.003 \mu\Omega \cdot m = 0.3 \mu\Omega \cdot cm$ . [6]

### I. 3. b. Aimantation :

Un matériau supraconducteur n'est pas seulement un conducteur parfait. Dans l'état normal, il est non magnétique, son comportement n'est pas modifié par la présence d'un champ magnétique. En revanche, en dessous de la température critique, il devient diamagnétique : son aimantation est négative, pour des champs magnétiques inférieurs à une certaine valeur appelée champ critique ( $H_c$ ). Ce diamagnétisme, sous certaines conditions, peut être pratiquement parfait. Le supraconducteur expulse alors totalement l'induction magnétique, et ce indépendamment des conditions initiales. La susceptibilité magnétique  $\chi$  est alors égale à  $-1$ . Cet effet est appelé effet Meissner.

Ce comportement diamagnétique distingue les matériaux supraconducteurs des matériaux parfaitement conducteurs. Un matériau dont seule la résistivité s'annule (conducteur parfait) présente une hystérésis magnétique. En champ croissant, ce matériau va se comporter comme un supraconducteur : des courants induits en surface vont écranter l'induction magnétique extérieure. Par contre, en champ décroissant à partir de  $H_c$ , les courants induits dans le conducteur parfait vont s'opposer à la variation d'induction (loi de Lenz) alors que dans un supraconducteur, les courants induits vont s'annuler. Le tableau 2 ci-après illustre cette distinction entre conducteur parfait et supraconducteur lors d'un refroidissement sous champ magnétique externe. [6]

		Refroidissement puis suppression du champ $B_e$		
		→		
		$T = 300 \text{ K}$ $B_e \neq 0 \text{ T}$	$T < T_c$ $B_e \neq 0 \text{ T}$	$T < T_c$ $B_e = 0 \text{ T}$
Conducteur parfait ( $\rho = 0$ )				

**Tab. I. 2.:** Comparaison entre le comportement magnétique d'un conducteur parfait et celui d'un supraconducteur idéal. [6]

#### I. 4. Présentation d'un ruban supraconducteur à haute température critique :

Un échantillon supraconducteur est un conducteur électrique composé d'un cœur et d'un stabilisateur. Le cœur, en noir sur les figures 4, 5 et 6, est réalisé à l'aide de brins supraconducteurs torsadés et noyé dans une matrice résistive appelée stabilisateur. Ce dernier sert à assurer la stabilité électrique (lors d'un "quençh"), thermique et mécanique de l'échantillon. Il est en général composé d'un alliage contenant majoritairement de l'argent. Pour des supraconducteurs de type "couches minces", on utilise un alliage d'or. [6]

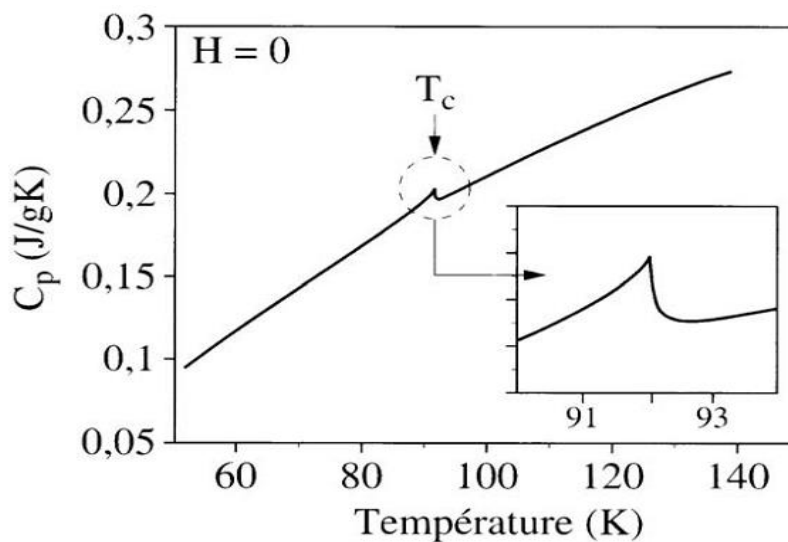


Fig. I. 3 : Chaleur spécifique d'un échantillon d'YBCO [6].

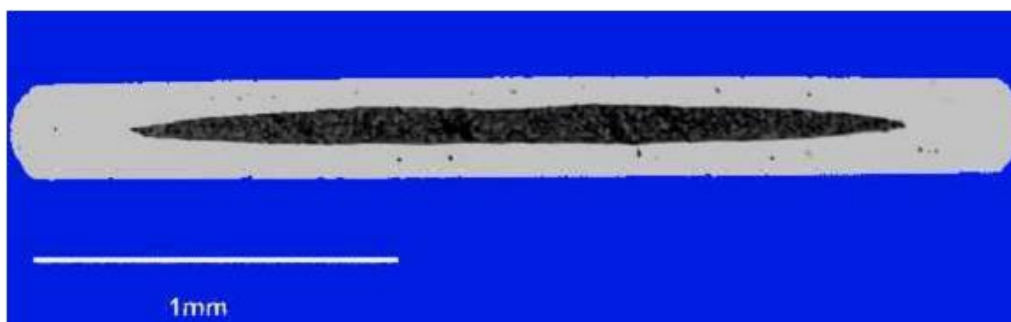
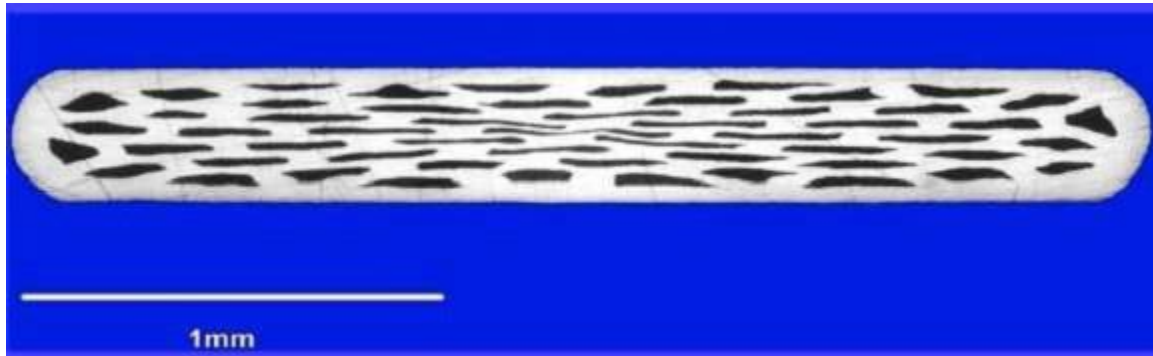


Fig. I. 4 : Ruban mono filamentaire supraconducteur. [6]



Fig. I. 5 : Ruban composé de 19 filaments supraconducteurs. [6]



**Fig. I. 6 :** Ruban composé de 55 filaments supraconducteurs. [6]

### **I. 5. Grandeurs critiques des supraconducteurs :**

L'état supraconducteur est limité par trois grandeurs définissant une surface critique au-delà de laquelle le matériau transite vers un état dissipatif caractérisé par l'apparition d'un champ électrique. La température critique ( $T_c$ ) et le champ magnétique d'irréversibilité ( $H^*$ ) sont des grandeurs intrinsèques au matériau, tandis que la densité de courant critique ( $J_c$ ) dépend du procédé de fabrication (Figure 7) [8]. Au-delà de  $T_c$  le supraconducteur se trouve dans un état normal caractérisé par une résistivité  $\rho_n$ . [7]



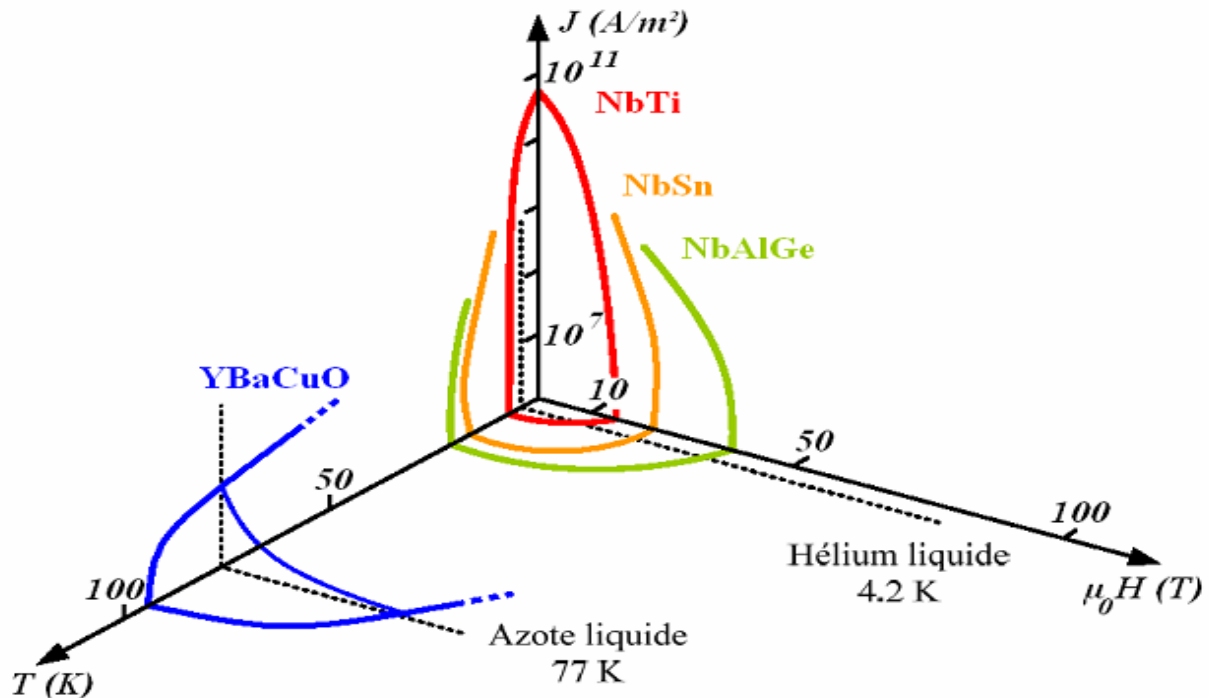


Fig. I. 7 : Surfaces critiques des principaux supraconducteurs [7]

L'application des supraconducteurs à la limitation de courant fait essentiellement intervenir deux grandeurs critiques : la température  $T_c$  et la densité de courant  $J_c$ . [7]

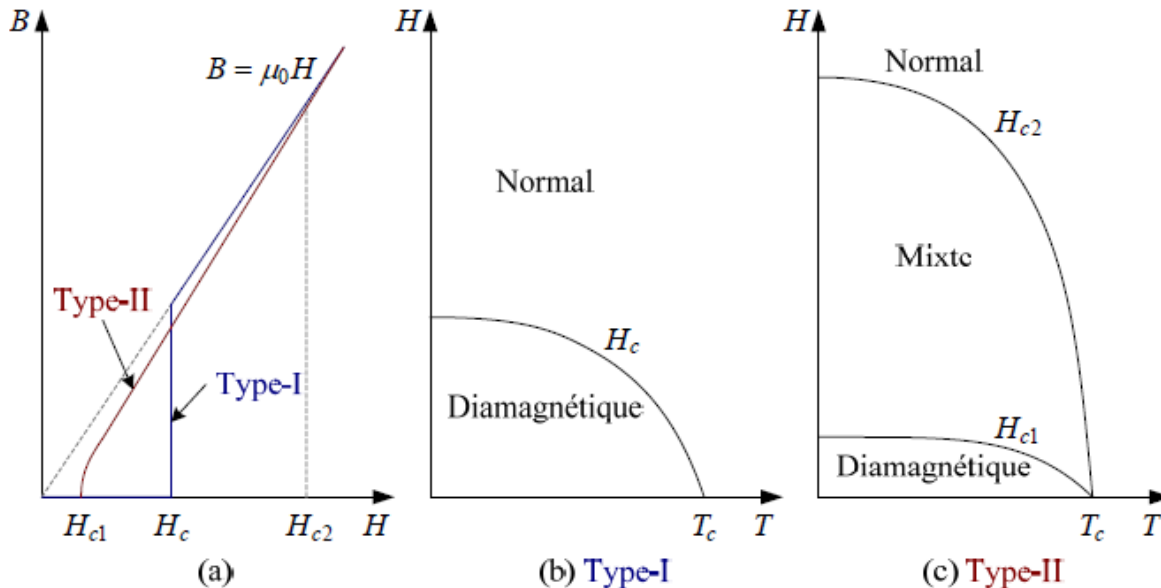
## I. 6. Classification des supraconducteurs :

### I. 6. a. Supraconducteurs de type I et II :

Les supraconducteurs de type **I** perdent brutalement leur supraconductivité à un champ magnétique critique  $H_c$ , tandis que les supraconducteurs de type **II** laissent pénétrer progressivement le champ magnétique en commençant de  $H_{c1}$  (qui diminue avec  $\kappa$ ) jusqu'à ce que le champ de pénétration  $H$  atteigne  $H_{c2}$  (qui augmente avec  $\kappa$ ) et la supraconductivité disparaît (figure 8. a).

Les supraconducteurs de type **I** sont les plus simples. Ils ne peuvent prendre que deux états : état normal ou état supraconducteur. On peut déterminer dans lequel de ces deux états ils se trouvent grâce à leur propre courbe caractéristique. Si  $T > T_c$  ou si  $H > H_c$  alors le matériau se comporte comme dans son état normal (figure 8. b).

Les supraconducteurs de type **II** possèdent deux valeurs remarquables de champ magnétique appelées  $H_{c1}$  et  $H_{c2}$ . Lorsque  $H < H_{c1}$ , le matériau se comporte exactement comme un supraconducteur de type **I** par contre si  $H_{c1} < H < H_{c2}$ , alors le matériau est encore dans son état supraconducteur mais n'est plus diamagnétique. Si  $H > H_{c2}$  alors le matériau ne présente plus ses propriétés supraconductrices (il est dans son état normal) (figure 8. c) [9].



**Fig. I. 8 :** Diagramme de phases d'un supraconducteur de type I et type II [9].

### I. 6. b. Supraconducteurs LTS et HTS

Les supraconducteurs se distinguent également par leurs  $T_c$ . En dessous de 30 K se sont les basses températures critiques (LTS pour Low Temperature Superconductors) alors qu'au-delà ce sont les hautes températures critiques (HTS pour High Temperature Superconductors). Les HTS sont de type II. [7]

### I. 7. Mobilité des vortex :

Il est important de bien comprendre les lois qui régissent la mobilité des vortex, celle-ci étant à l'origine de la transition des supraconducteurs de type II. Cette mobilité fait appel à deux types de mouvements appelés : flux flow et flux creep (Figure 9). [7]

**I. 7. a. Flux flow :**

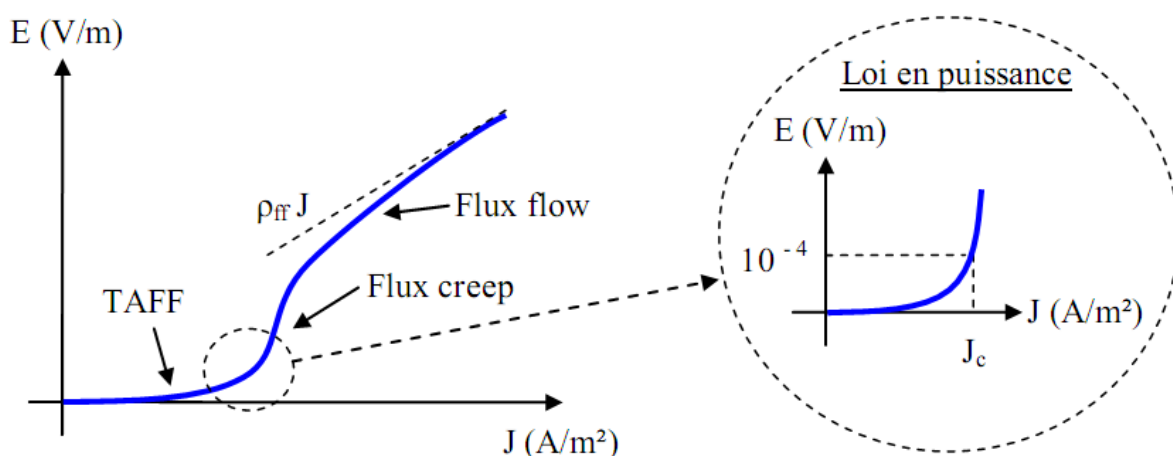
Considérons un vortex libre (sans force de piégeage) dans une matrice supraconductrice, il peut ainsi se déplacer sous l'action de forces extérieures. Par exemple le passage d'un courant dans le matériau engendre une force de Lorentz sur les vortex, tandis qu'une induction magnétique extérieure crée une force de Laplace sur les lignes de flux. Le vortex va alors se déplacer avec une certaine viscosité. Ce mouvement engendre un champ électrique et une résistivité dite de flux flow notée  $\rho_{ff}$  égale en première approche à (I.1) :

$$\rho_{ff} = \frac{H}{H_{c2}} \times \rho_n \quad (\text{I.1})$$

Avec «  $\rho_n$  » la résistivité du supraconducteur à l'état normal. [7]

**I. 7. b. Flux creep :**

Lorsque la force de piégeage est du même ordre que la force de Lorentz créée par le courant appliqué au supraconducteur, le mouvement libre des vortex est contrarié. La viscosité ainsi que la résistivité associée à l'écoulement des vortex n'est plus celle du flux flow. Les vortex se déplacent alors d'un site de piégeage à l'autre. Un mécanisme thermiquement activé (TAFV) confère aux vortex une probabilité non nulle de franchir les barrières de potentiel associées aux centres de piégeage et de sauter de site en site [10]. Ce mouvement engendre un champ électrique et une résistance dans le matériau appelée résistance de flux creep. [7]



**Fig. I. 9 :** Caractéristique  $E(J)$  d'un supraconducteur avec activation thermique. [7]

Le régime de flux creep peut être modélisé par une loi en puissance empirique  $E(J)$  (I.2) permettant de relier la densité de courant au champ électrique [11] (Figure 9). [7]

$$E(j) = E_c \left( \frac{j}{j_c} \right)^n \quad (\text{I.2})$$

Avec « E » et « J » étant respectivement le champ électrique et la densité de courant traversant le supraconducteur. «  $E_c$  » est le critère de supraconductivité défini arbitrairement à 1  $\mu\text{V}/\text{cm}$ , il représente le seuil à partir duquel le matériau n'est plus considéré comme supraconducteur. «  $J_c$  » est la densité de courant critique, elle représente la densité de courant dans le matériau lorsque celui-ci développe un champ électrique égal à  $E_c$ . Enfin « n » est l'indice de transition résistive qui donne le degré de piégeage de l'échantillon. Cette loi représente bien le comportement électrique des matériaux pour des densités de courant proches de  $J_c$  ( $\pm 5\%$ ), en dessous de cette zone la loi en puissance n'applique plus et la résistivité est considérée comme nulle ( $\rho < 10\text{-}25\Omega.\text{m}$ ). [7]

### **I.8.Principales applications des supraconducteurs en électrotechnique :**

Parmi les divers domaines d'applications de la supraconductivité, on y citera les principales applications dans le domaine de l'électrotechnique :

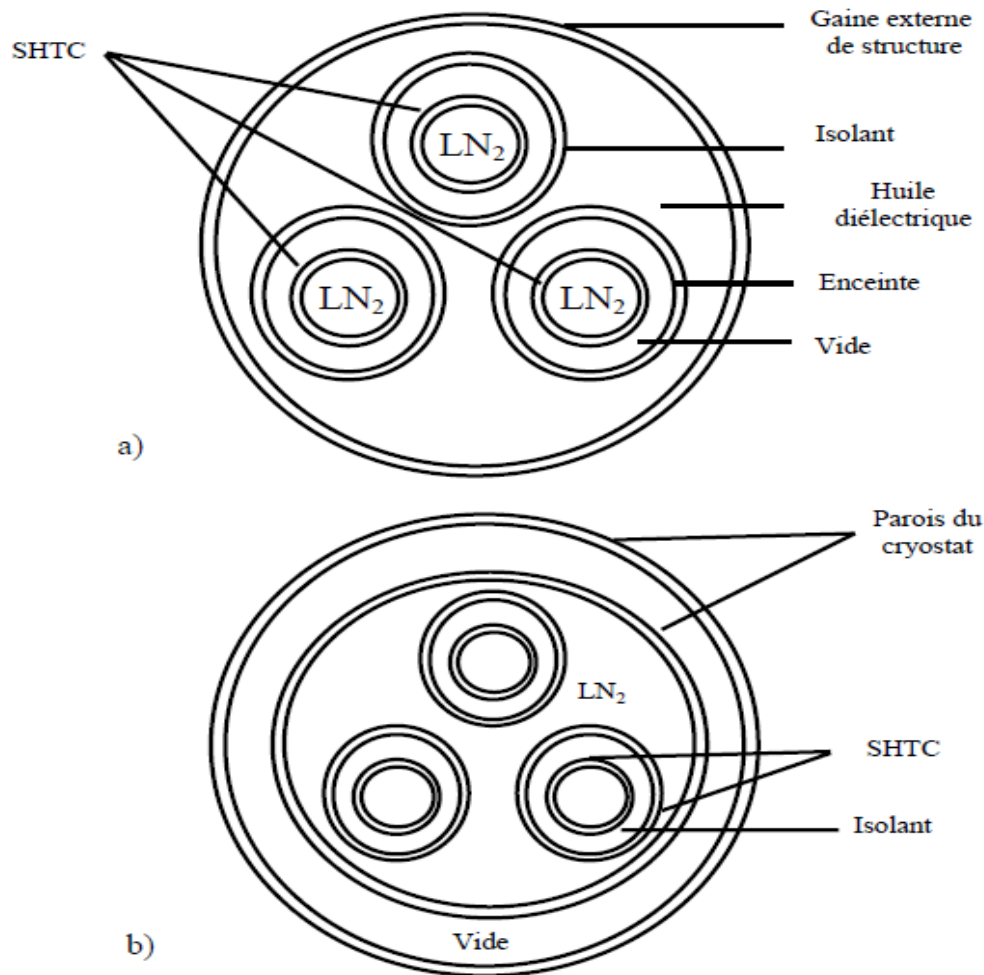
#### **I. 8. a. Machines tournantes :**

L'utilisation des supraconducteurs dans les cryoalternateurs est à l'origine de nombreux prototypes [12]. 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. [7]

#### **I. 8. b. Câbles de transport :**

Les supraconducteurs créant nettement moins de pertes que les câbles classiques, ils sont très intéressants pour les applications de transport d'énergie. Cependant le problème de la cryogénie sur de grandes longueurs peut s'avérer difficile à résoudre. Une solution consiste à faire circuler un fluide cryogénique dans un tube au centre du câble et à enrouler le fil

supraconducteur autour. Avec l'accroissement de la demande en énergie, certaines lignes électriques nécessitent d'être renforcées. Cependant l'espace nécessaire à la pose de nouveaux câbles n'est pas toujours suffisant, dans ce cas les supraconducteurs offrent une solution intéressante. [7]

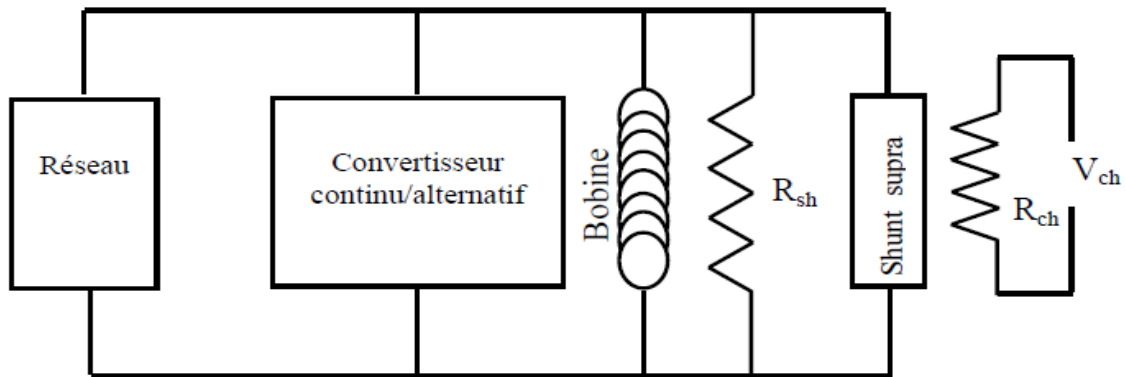


**Fig. I. 10 :** Représentation schématique d'un câble triphasé en supraconducteur à haute Température critique (SHTC) refroidi à l'azote liquide (LN<sub>2</sub>) :

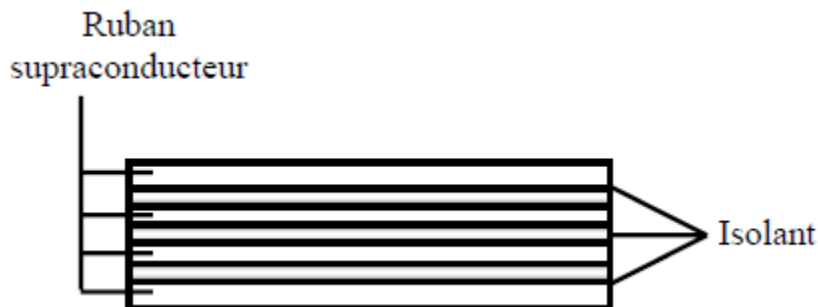
- a) Chaque phase est dans une enceinte cryogénique et l'isolant est à température ambiante ;
- b) une seule enceinte cryogénique contient les trois phases ; chaque phase est formée de deux conducteurs concentriques, l'isolant se trouve à basse température [13], [14].

### I. 8. c. Stockage d'énergie :

Le principal inconvénient de l'énergie électrique est qu'elle est difficilement stockable. Le Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) [15] permet de stocker de l'énergie sous forme magnétique, cette dernière pouvant être restituée avec un très bon rendement. Son fonctionnement consiste à court-circuiter une bobine supraconductrice, permettant ainsi au courant de se reboucler indéfiniment. Le SMES peut servir comme réservoir d'énergie pour réguler les réseaux électriques, il peut également être utilisé comme source d'énergie impulsionnelle pour les lanceurs électromagnétiques ou le formage magnétique. [7]



**Fig. I. 11 :** 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. [13] [14]



**Fig. I. 12 :** Conducteur formé de 4 rubans supraconducteurs isolés les uns des autres. [13] [14]

**I. 8. d. Limitation de courant :**

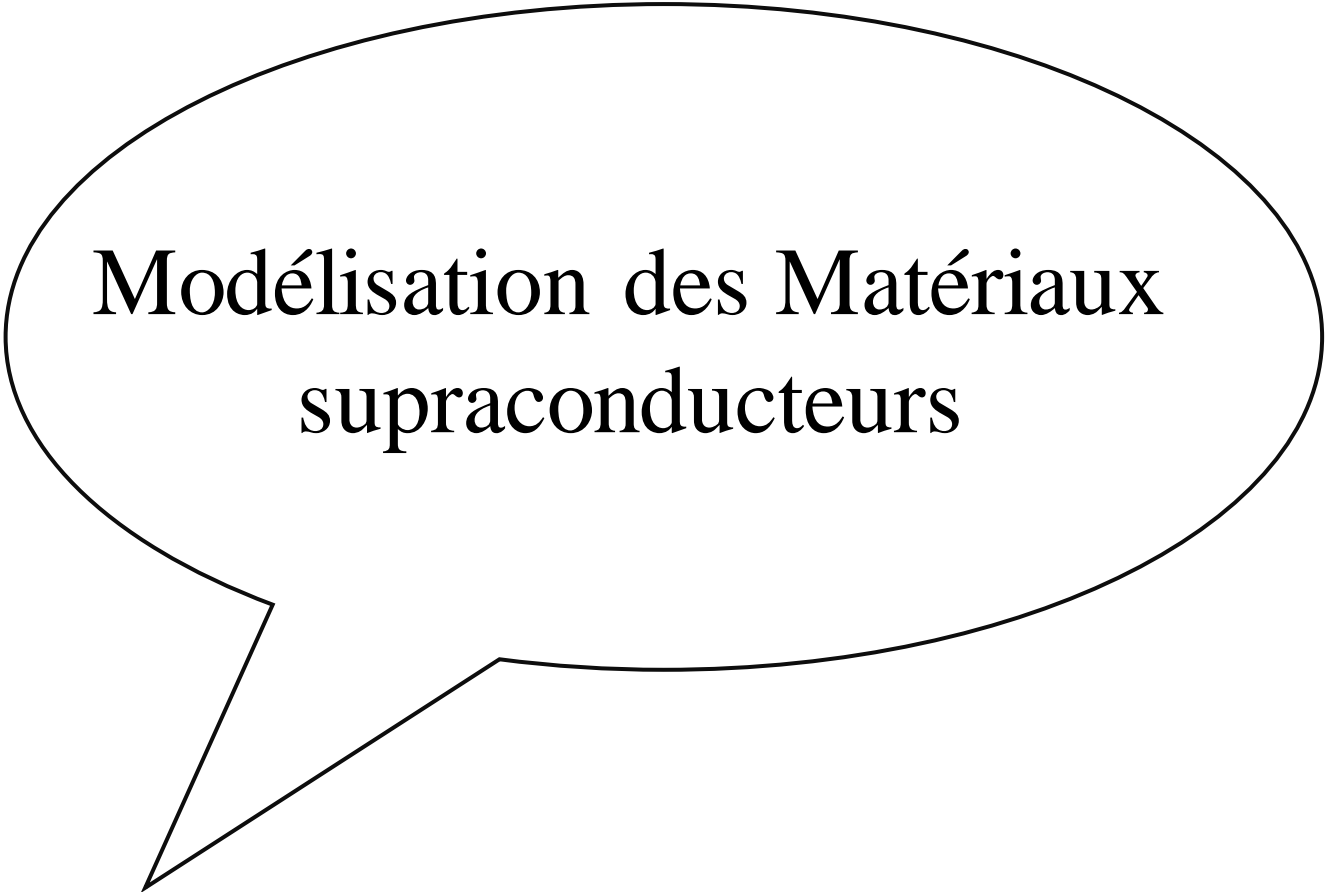
Le limiteur supraconducteur permet de protéger le réseau électrique des courants de court-circuit en agissant comme un régulateur naturel de courant. C'est le sujet de notre étude, son fonctionnement est détaillé dans les prochains chapitres. [7]

**I. 9. Conclusion :**

Dans ce chapitre, on a présenté un bref historique sur les matériaux supraconducteurs et leurs propriétés. Nous avons vu également que la supraconductivité peut apporter de réelles améliorations dans plusieurs applications électriques, l'une de ces applications plus prometteuse et très attractive celle de la limitation de courants de défaut dans les réseaux électriques à travers les dispositifs SFCL qui était notre objectif dans cette étude. La compréhension du comportement des SFCL nécessite de développer des modèles électromagnétiques régissant ce phénomène et ceci fera l'objet du chapitre suivant.



# **Chapitre II :**



Modélisation des Matériaux  
supraconducteurs



## II. 1. Introduction :

L'optimisation des matériaux supraconducteurs nécessite de connaître leur comportement électromagnétique ainsi que magnétothermique. On s'intéresse alors au développement d'un modèle macroscopique qui permet d'obtenir des grandeurs physiques globales qui régissent ce phénomène, ce deuxième chapitre a fait l'objet de présenter les différents modèles qui peuvent décrire le comportement d'un limiteur de courant supraconducteur introduit dans un réseau électrique avant, pendant et après la limitation de courant de défaut.

Etant donné qu'un réseau électrique doit être dimensionné pour supporter son régime assigné mais aussi en cas de défaut, un régime de court-circuit, et à savoir que, le courant de court-circuit peut atteindre 30 fois la valeur du courant nominal, il est impératif que tout le réseau (générateurs, transformateurs, jeux de barres...) doive être surdimensionné électriquement et mécaniquement ; ce qui impose un prix très coûteux.

L'introduction d'appareils capables de réduire le courant de court-circuit est très conseillée, ce qui est le principe d'un limiteur de courant à base du supraconducteur (Superconducting Fault Current Limiter SFCL), cela consiste à introduire une impédance supplémentaire lorsqu'un défaut apparaît. En utilisant la transition de l'état supraconducteur vers un état résistif, on réalise une impédance variable. Par simple dépassement du courant critique d'un élément supraconducteur inséré dans la ligne électrique, le matériau va transiter naturellement lors d'un court-circuit, sans avoir besoin d'appareil de détection pour provoquer cette transition.

Par la simplicité de ce principe et sa performance qui n'est pas égale par les techniques conventionnelles de limitation du courant, il est très indiqué pour permettre l'amélioration de la qualité de service des réseaux actuels. De plus son fonctionnement est répétitif et autonome. Ce qui n'est pas comme l'utilisation de fusible qui nécessite son remplacement et l'intervention d'un opérateur humain. Ainsi, le courant de court-circuit deviendrait une notion théorique qui ne serait jamais atteinte. Si les courants limités n'excèdent pas, par exemple, huit fois le courant nominal, la puissance dissipée lors d'un court-circuit devient alors plus de six fois inférieure à la valeur actuelle.

## II. 2. Equations mathématiques régissent le phénomène physique :

### II.2.1. Relation B(H)

L'induction magnétique  $B$  à l'intérieur d'un matériau en fonction du champ externe  $H$  et de l'aimantation  $M$  est donnée par l'expression :

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

Nous avons vu qu'un supraconducteur était diamagnétique, c'est à dire que  $B$  est nul à l'intérieur du matériau, lorsque  $H < H_{c1}$ . Ceci entraîne que  $M = -H$  et  $\chi = -1$ . En revanche, lorsque le champ  $H_{c1}$  est supérieur à  $H$ , le matériau supraconducteur n'est plus diamagnétique. Comme le champ critique  $H_{c1}$  d'un supraconducteur de type II est de valeur faible, l'induction  $B$  auquel il est soumis lors de son utilisation est en général supérieure à  $\mu_0$ . Il peut donc être considéré comme macroscopiquement non magnétique.

On peut alors écrire  $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$  (Figure II.1), [16].

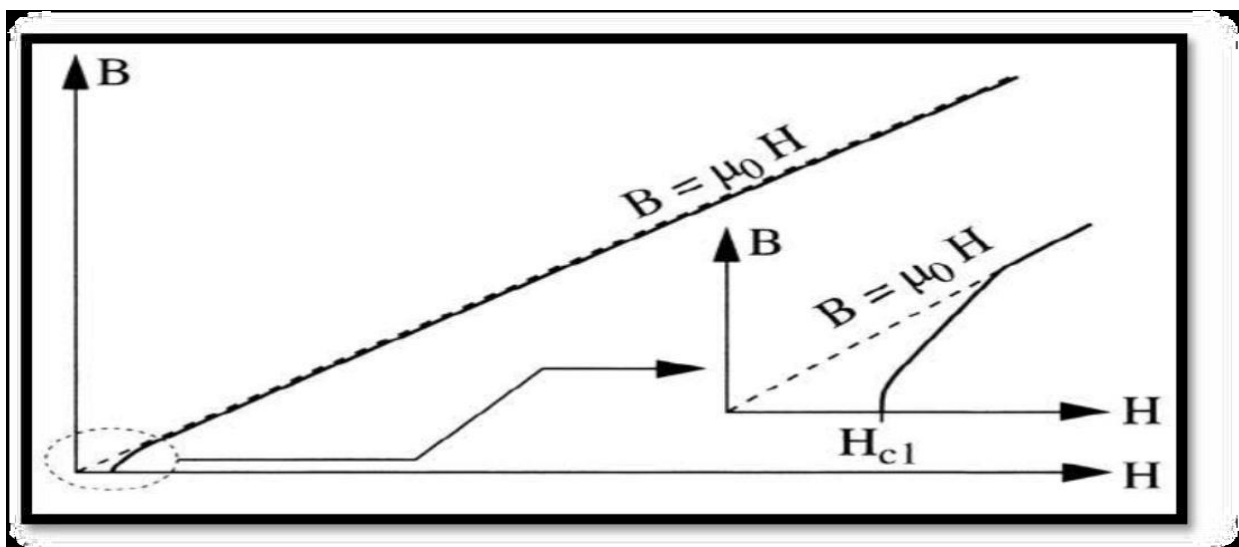


Fig. II. 1 : Caractéristique  $B(H)$  d'un supraconducteur, [16].

### II. 2. 2. Relation E (J) :

À partir de mesures courant-tension sur un échantillon, on peut déduire la caractéristique expérimentale  $V(I)$  qui se met habituellement sous la forme d'une loi de

puissance. Si l'on Admet que cette caractéristique reste valable pour la densité de courant, la relation  $E(J)$  s'écrit  $E = E_c \left(\frac{J}{J_c}\right)^n$  (II.2)

Dans l'équation (II.2), l'exposant « n » dépend non seulement du matériau, mais aussi de la température et de l'induction. Plus l'exposant  $n$  est élevé, et plus la transition est rapide (Figure II.2).

Le paramètre « n » est parfois considéré comme un indicateur de la qualité d'un ruban supraconducteur : plus il est élevé et plus le matériau est d'excellente qualité. En effet, dans ce cas, le courant critique peut alors être déterminé sans ambiguïté dès lors qu'une tension apparaît aux bornes de l'échantillon.

La relation (II.2) peut être résolue au moyen d'un programme informatique afin de déterminer les grandeurs électromagnétiques. Analytiquement, elle devient cependant difficilement utilisable, sauf dans le cas où « n » est grand [17].

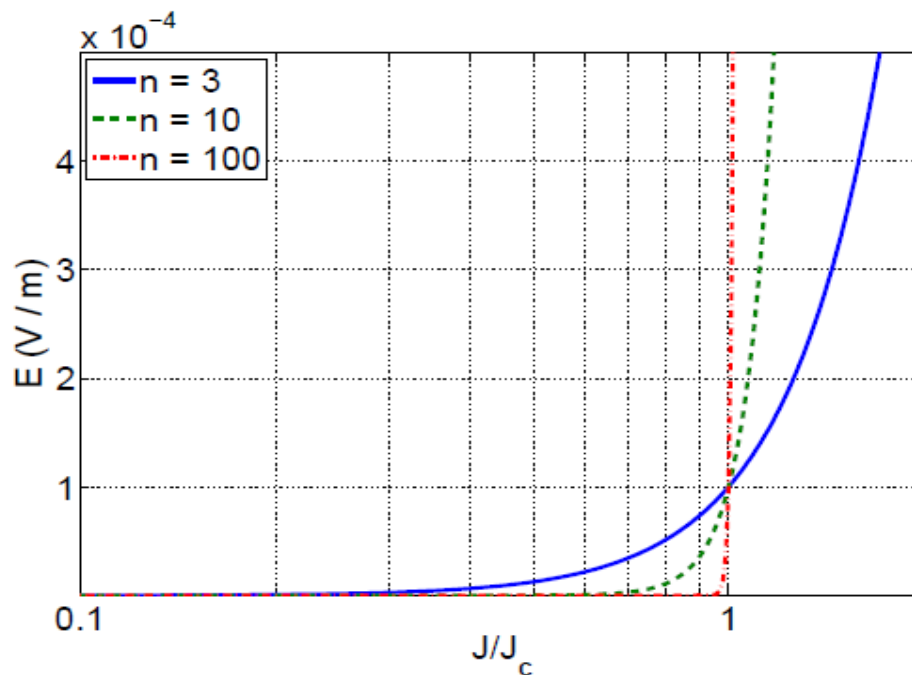


Fig. II. 2 : Caractéristique  $E(J)$  d'un supraconducteur, [17].

## II. 3. Les Modèles de comportement :

### II. 3. 1. Modèle de l'état critique ou le modèle de bean :

C'est le modèle le plus classique qui stipule qu'à une température donnée la densité de courant dans un supraconducteur est soit nulle, soit égale à la densité de courant critique  $J_c$ . Le supraconducteur est considéré comme non magnétique.

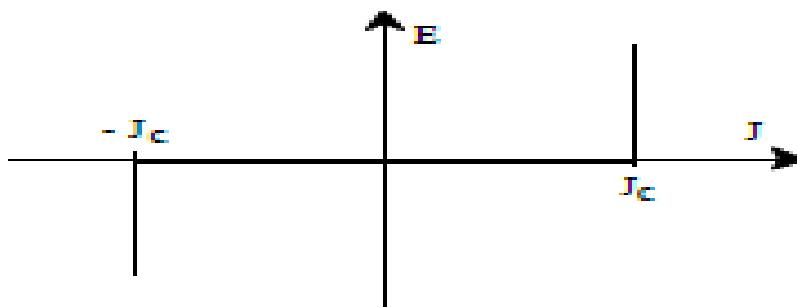
$$J = J_c \frac{|B|}{|E|} \quad (\text{II.3})$$

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

D'un point de vue plus mathématique, on traduit ces expressions avec les équations de Maxwell :

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

Le modèle de Bean (1962) suppose, en plus, que la densité de courant critique est indépendante de la valeur de l'induction magnétique  $B$ . [18]



**Fig. II. 3 :** Caractéristique  $E(J)$  basée sur le Modèle de Bean, [18].

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. [18]

### II. 3. 2. 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 quel que 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 étal.

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

C'est le modèle le plus utilisé pour la modélisation de la dépendance de la densité de courant critique avec l'induction magnétique. [19]

### II. 3. 3. Modèle de Flux Flow et Flux Creep [16]

Nous pouvons définir deux modes de fonctionnement pour le supraconducteur, selon la valeur de la densité de courant critique  $J_c$ :

- Si  $|J| \leq J_c$ , le réseau de vortex est ancré, néanmoins, des vortex passent d'un site d'ancrage à un autre sous l'action de l'agitation thermique. Ce phénomène dissipatif est appelé régime de « flux Creep »,

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

$K$  : Constant de Boltzmann.

$\theta$  : Température.

$\rho_c$  : Résistivité de Flux Creep.

$U_0$  : Potentiel de profondeur.

- Si  $|J| > J_c$ , le réseau de vortex se déplace et génère des pertes faisant apparaître une résistance électrique dans le matériau supraconducteur. Ce phénomène est appelé régime de « flux flow ».

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

$\rho_f$ : Résistivité de Flux Flow

La densité de courant critique peut alors être définie comme étant la limite entre le régime de flux creep et le régime de flux flow. Cette limite étant très floue, la densité critique de courant est souvent déterminée par la valeur d'un champ électrique critique  $E_c$ . [16]

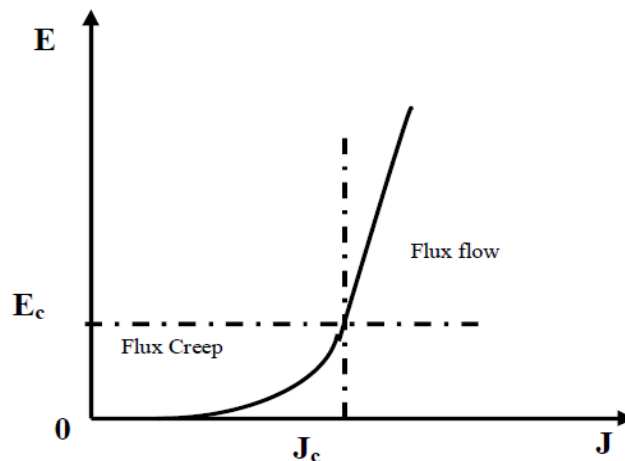


Fig. II. 4 : modèle de Flux Flow et Creep [16].

## II. 4. Limiteurs supraconducteurs de courant :

Par leur résistivité nulle à l'état supraconducteur et leur forte résistivité à l'état normal, les HTS sont d'excellents candidats pour la limitation de courant.

Le fonctionnement répétitif et autonome confère également des atouts non négligeables aux limiteurs supraconducteurs de courant (SCFCL pour Superconducting Fault Current Limiter).

Cependant comme tout système supraconducteur il nécessite un environnement cryogénique composé d'un cryostat et d'un fluide cryogénique ou d'un cryogénérateur [7].

### II. 4. 1. Différents types de limiteur de courant supraconducteur :

#### II. 4. 1. a. 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.

Le courant est ainsi limité par la transition brutale de l'état supraconducteur à l'état normal.

Un disjoncteur en série, rapide, mais de faible pouvoir de coupure, permet d'isoler le défaut et protéger le limiteur contre une excursion en température excessive (figure II.5) [17].

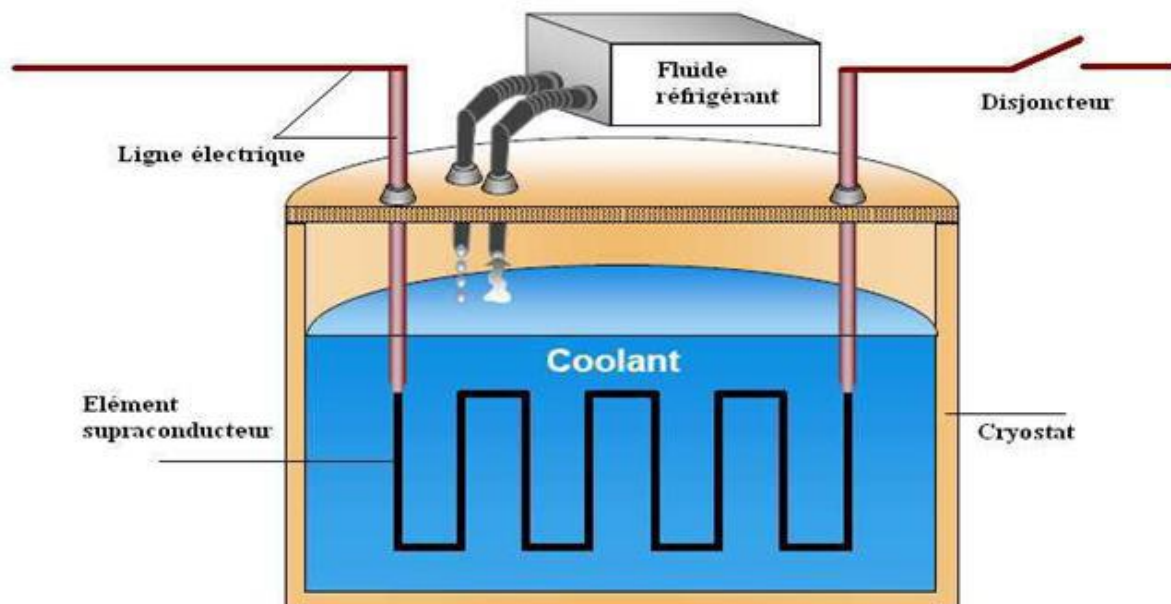


Fig. II. 5 : principe du limiteur de courant résistif [17].

Une impédance en parallèle permet d'adapter l'impédance de limitation et de réduire les éventuelles surtensions. La structure non inductive a par ailleurs les avantages suivants :

- Les courants de fuite et les pertes par courant de Foucault au niveau des structures (supports et cryostat) qui peuvent être métalliques sont réduits.
- Les pertes du supraconducteur qui n'est soumis qu'à son champ propre sont réduites.
- L'énergie magnétique stockée dans l'enroulement supraconducteur au moment de la transition est négligeable.
- Le courant de court-circuit étant essentiellement ohmique, l'utilisation du disjoncteur auxiliaire de coupure est plus simple.

Par contre, le limiteur est en série avec la ligne, il nécessite des conducteurs supraconducteurs capables de porter de forts courants ( $I_n / I_{lim} \approx 0,2$  à  $0,3$ ) qui restent difficiles à réaliser sans passer par la mise en parallèle de plusieurs bobinages [17].

### II.4.1.b Limiteur inductif

À l'état passant, le limiteur a une faible inductance équivalente alors qu'à l'état bloquant, une forte impédance apparaît.

Le concept le plus simple consiste à coupler antiparallèlement deux solénoïdes réalisés avec des conducteurs de courants critiques différents (figure II.6). En cas de défaut, un seul des deux bobinages (Bobinage déclencheur) transite à l'état normal, l'essentiel du courant est transféré à la bobine qui n'a pas transité et l'impédance est pratiquement l'inductance de celle-ci. Le dimensionnement du déclencheur, en particulier la longueur de supraconducteur nécessaire, est le même que celui d'un bobinage limiteur résistif de même résistance  $R$  et la dissipation en régime de défaut reste proche de  $R^{-1}$  puisque le déclencheur est soumis en régime de défaut à la tension du réseau.

La dissipation en régime de défaut n'est théoriquement moindre que si  $R \gg 1$ , cela nécessiterait de grandes longueurs de conducteur, qui entraîneraient des pertes froides en régime normal importantes [20].

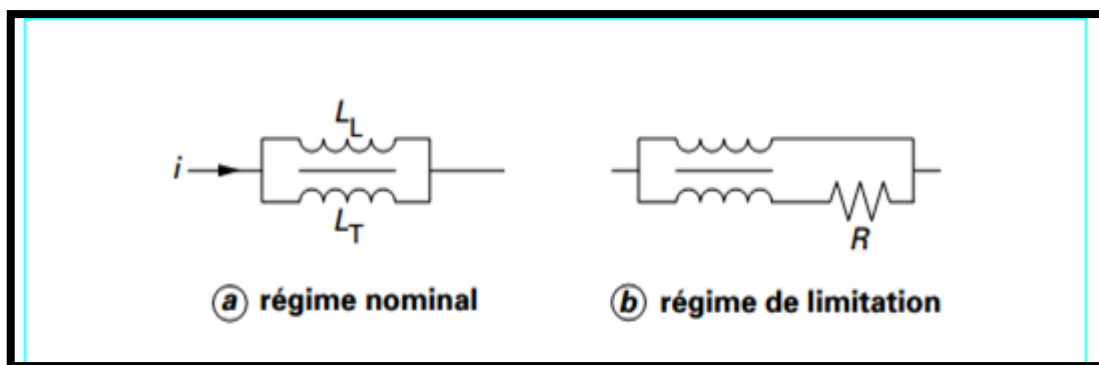


Fig. II. 6 : Limiteur inductif à fort couplage [20].

Le bon fonctionnement de ce dispositif est lié au couplage entre les deux bobinages qui doit être excellent, ce qui est incompatible avec un bon découplage thermique des deux bobinages. Pour réduire cet inconvénient, on peut mettre en parallèle une inductance de limitation avec un bobinage supraconducteur déclencheur non inductif (figure II.7) [20].

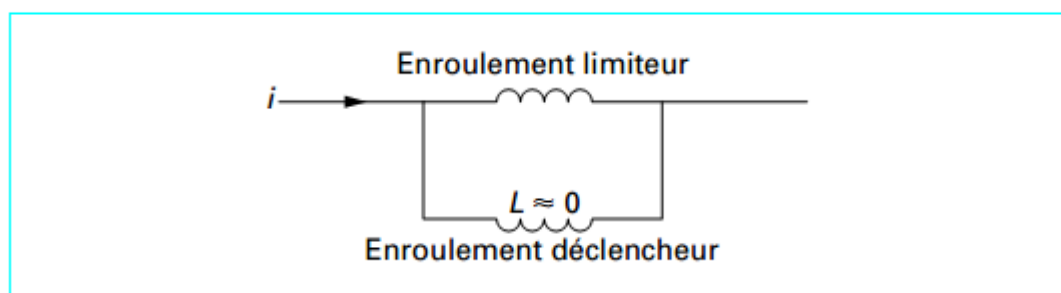


Fig. II. 7 : Limiteur inductif à bobinage découplé [20].



## II. 5. Formulation des Équations Électromagnétiques

Les modèles de J. C. Maxwell décrivent globalement tous les phénomènes électromagnétiques, mais suivant les dispositifs que l'on étudie, certains phénomènes deviennent négligeables. Les équations se découpent donnant alors naissance à des modèles plus simples. Parmi ces modèles, nous citons : le modèle électrostatique, électrocinétique, magnétostatique, magnétodynamique [22].

### II. 5. 1. Modèle électrostatique [22]

Dans ce modèle la répartition des charges électriques ne dépend pas de temps (régime stationnaire : cas de courant continu) de ce fait le champ magnétique crée ne varie pas dans le temps.

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

Les équations de ce modèle se simplifient comme suit :

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

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

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

On a :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V \quad (\text{II.12})$$

Le modèle se ramène alors à l'équation

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

### II. 5. 2. Modèle magnétostatique :

Dans ce modèle, le terme  $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$  est nul. Ceci s'explique par le fait que le champ magnétique est produit par des sources indépendantes du temps. Deux modèles existent : [21]

**II. 5. 2. a. Modèle magnétostatique scalaire : [22]**

Dans ce cas, les courants électriques sont nuls, il vient alors que les champs ne dépendent pas du temps, on obtient :

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

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

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

$\vec{H}$  Dérive d'un potentiel scalaire magnétique  $\Phi$ , d'où la nomination du modèle magnétostatique scalaire, tel que :  $\vec{H} = - \text{grad } \Phi$

Le modèle se ramène alors à l'équation :

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

**II. 5. 2. b. Modèle magnétostatique vectorielle :**

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

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

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

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

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

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

D'où le système d'équation :

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

**II. 5.3 Modèle magnétodynamique : [22]**

Ce modèle s'applique aux dispositifs électromagnétiques dans lesquels les sources de courant ou de tension varient dans le temps. C'est à dire que le terme qui représente la variation temporelle de vecteur induction magnétique est non nul, ainsi, les champs électrique et magnétique sont alors couplés par la présence des courants de Foucault. [21]

L'utilisation de ce modèle est très réponde dans l'étude des machines électriques, des dispositifs de chauffage par induction, des transformateurs, ... etc.

En se basant sur les équations de J. C. Maxwell, on peut formuler l'équation qui décrit l'évolution spatiale - temporelle des phénomènes électromagnétiques.

Il existe plusieurs formulations en électromagnétisme. Parmi ces formulations, on choisit la formulation en champ électrique  $\vec{E}$ . [21]

En termes d'équations, nous avons :

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

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

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

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

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

En prenant le rotationnel :

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

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

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

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

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

Finalement on obtient :

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

Avec :

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

On a:

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

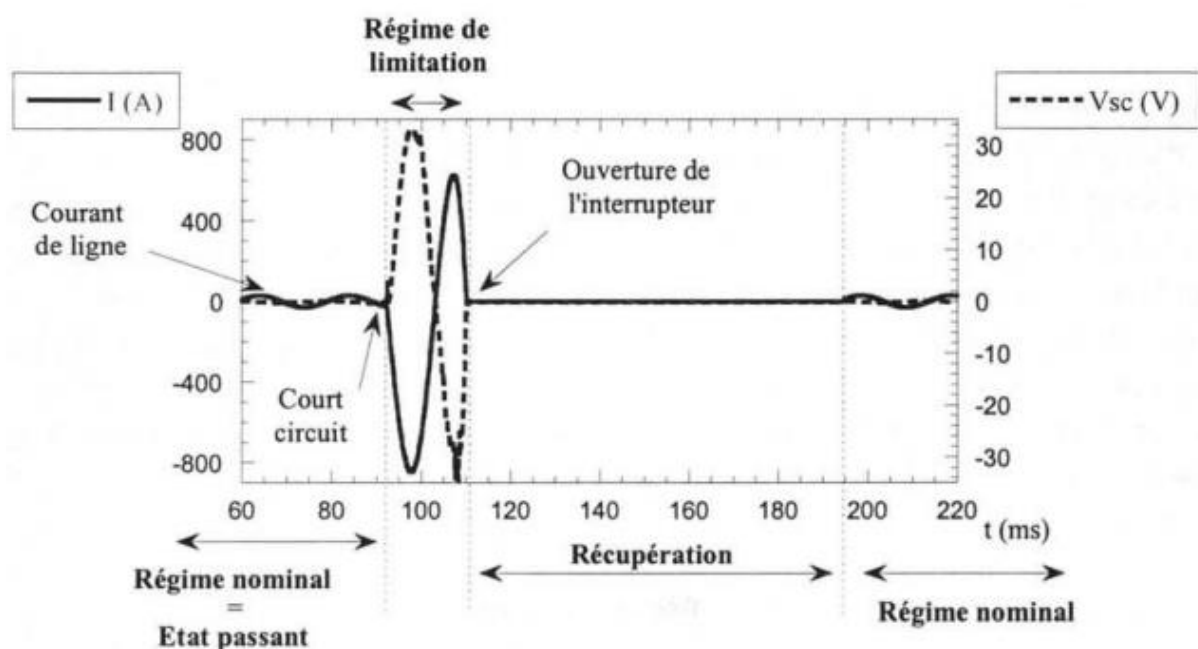
Où :

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

## II. 6. Principe de la limitation de courant de défaut par un SFCL résistif.

Ce paragraphe présente de manière générale le principe d'un limiteur de courant résistif en introduisant les trois états dans lequel peut être un limiteur. Chaque état fera ensuite l'objet d'un chapitre entier afin de revenir sur les facteurs importants.

Le limiteur de courant peut présenter trois états différents selon la valeur du courant qui le traverse comme le montre la figure II.8. Lorsque le courant est inférieur à sa valeur nominale, il se trouve dans son état *passant*, correspondant au régime nominal. La chute de tension à ses bornes est alors très faible. Lors d'un court-circuit, le supraconducteur va basculer dans un état dissipatif et limiter le courant par la résistance alors développée. C'est l'état de limitation. Ensuite, le supraconducteur est isolé du réseau afin de refroidir et de retrouver son état supraconducteur. C'est l'état de récupération. A la fin de celui-ci, le limiteur peut de nouveau être inséré dans le réseau. Il se retrouve alors dans son état passant. [23]



**Fig. II. 8 :** Les trois états du limiteur : l'état passant pour un courant de ligne inférieur ou égal au courant nominal ; l'état de limitation lors d'un court-circuit provoquant la transition supraconducteur et l'état de récupération lorsque le limiteur est isolé du réseau. [23]

Le problème de la limitation réside dans le choix du champ électrique maximal autorisé aux bornes des éléments supraconducteurs, de la valeur du courant maximal autorisé et de la valeur du courant limité par rapport aux valeurs nominales. Ces choix dépendront entre autres de la géométrie du conducteur, du matériau, des attentes du distributeur d'électricité comme nous allons le voir dans les chapitres suivants. [23]

### II. 6. 1. Le régime nominal :

C'est le régime pour lequel le courant circulant dans le limiteur est inférieur ou égal au courant nominal. Le courant nominal  $I_n$  est le courant maximal autorisé dans la ligne alors que le courant de ligne  $I_l$  est le courant circulant réellement dans la ligne en régime normal (sans défaut). Le courant nominal étant fixé par l'exploitant du réseau de distribution, le choix du courant critique  $I_c$  du supraconducteur par rapport à  $I_n$  se pose ( $I_c$  est ajusté en choisissant le diamètre du matériau supraconducteur). Est-il plus intéressant de choisir un fonctionnement avec  $I_c$  proche voire même supérieur à  $I_n$  ou bien au contraire le courant critique doit-il être très inférieur au courant nominal ? [23]

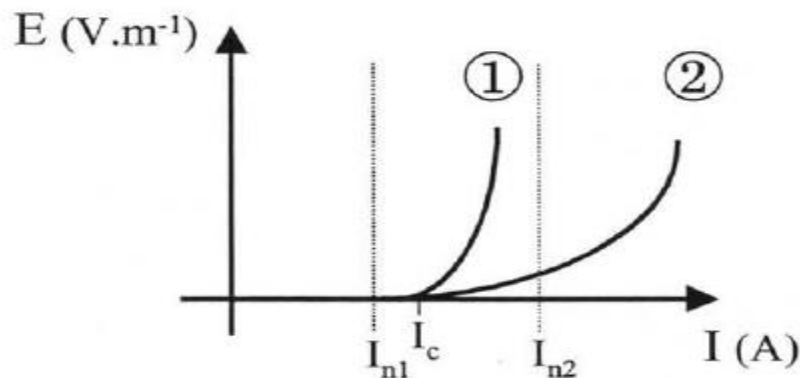
#### II. 6. 1. a. $I_c$ supérieur à $I_n$ :

Lorsque le courant est inférieur au courant critique, les pertes du système sont dues aux pertes en champ propre du supraconducteur. Ces pertes sont d'autant plus faibles que l'on est loin du courant critique. Il paraît donc plus intéressant (d'un point de vue énergétique) de choisir un courant critique supérieur au courant nominal. Mais, pour commencer à limiter le courant, il faut au moins que le courant dépasse  $I_c$  (voir deux fois  $I_c$ ).

Ainsi, si le courant critique est dix fois supérieur au courant nominal, le limiteur ne commencera à limiter les courants de court-circuit qu'à partir de quinze à vingt  $I_n$ . Le limiteur de courant n'est plus très utile pour le réseau.

Le choix de  $I_c$  par rapport à  $I_n$  dépend aussi, pour une grande partie, du matériau utilisé. Ainsi pour des matériaux frittés qui ont une transition lente, il paraît plus intéressant de fixer  $I_c = I_n$  (voir  $I_c < I_n$ ) afin de profiter au maximum de la résistance développée par le supraconducteur lors de sa transition. Pour une couche mince où la transition est très rapide, il peut s'avérer intéressant de placer  $I_c$  au-dessus de  $I_n$  (par exemple avec un courant critique de l'ordre de deux à trois fois  $I_n$ ) afin d'autoriser des dépassements transitoires du courant nominal (comme le démarrage d'un moteur ou la mise sous tension d'un transformateur ou d'une capacité) sans pour autant limiter le courant.

Le choix de  $I_c$  par rapport à  $I_n$  devra aussi être étudié en fonction de l'emplacement du limiteur dans le réseau et du type de réseau (HT ou MT) [23].



**Fig. II. 9 :** Choix de  $I_c$  par rapport à  $I_n$ . La courbe (1) représente la transition "raide" d'une couche mince. La courbe (2) représente la transition douce d'un matériau fritté. Les deux matériaux ont le même courant critique  $I_c$ . Pour la courbe (1) il est préférable d'avoir un courant nominal  $I_{n1}$  inférieur à  $I_c$  afin d'autoriser des dépassements transitoires de  $I_{n1}$  alors que pour la courbe (2) il est possible de placer  $I_{n2}$  au-dessus de  $I_c$  pour diminuer la durée de la transition [23].

Si le courant critique est bien supérieur au courant nominal, le supraconducteur restera au début de sa transition lors d'un court-circuit et son élévation en température sera faible. Il récupèrera donc plus rapidement. Dans le cas où le temps de récupération est critique pour l'exploitant, il pourra rentrer en compte dans la détermination de  $I_c$  par rapport à  $I_n$ .

Il n'existe donc pas de règle pour fixer le courant critique, mais celui-ci devra être choisi conjointement avec l'exploitant et dépendra du type de matériau utilisé (sachant que ce dernier dépendra aussi du type de court-circuit à limiter) [23].

### II. 6. 1. b. $I_c$ inférieur à $I_n$ :

Comme le courant critique est déterminé à partir d'un critère arbitraire (champ électrique de  $1 \mu V \cdot cm^{-1}$ ), il ne correspond pas forcément au début de la transition vers l'état résistif (ou transition en masse. Ainsi, avec certains matériaux ( $Bi_{2223}$  frittés ou texturés par exemple) il est possible de se placer à un courant de ligne supérieur à  $I_c$  en régime permanent. Le supraconducteur est dans son régime dissipatif, mais pas encore dans son régime normal. Pour des échantillons de  $Bi_{2223}$  frittés, ces pertes sont inférieures à  $1 W \cdot A^{-1} \cdot m^{-1}$  (par mètre de matériau et par ampère circulant dans celui-ci) si l'on se place à 1,5 fois  $I_c$  et de l'ordre de 2 à  $3 W \cdot A^{-1} \cdot m^{-1}$  si l'on se place près de 1,7 fois  $I_c$ .

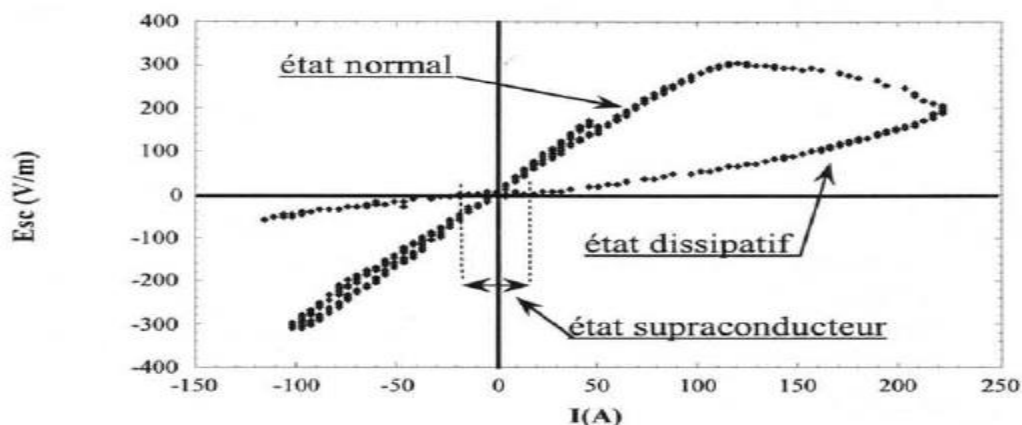
Ainsi plus le niveau de tension du réseau dans lequel est inséré le limiteur est important et plus cette solution est envisageable (les pertes acceptables pour un limiteur de courant sont égales à  $0,025 \cdot S_n$ ). En résumé, avoir un courant nominal supérieur au courant critique permet d'augmenter la vitesse de transition et ainsi d'atteindre plus rapidement une résistance élevée. Ceci permet de réduire le volume de supraconducteur utilisé par le limiteur de courant, et donc de réduire son coût. Cette solution est d'autant plus envisageable que le courant de ligne est en moyenne de l'ordre de à 40% à 50% du courant nominal. Ainsi les pertes restent faibles, tout en autorisant quelques pics lors des heures de fortes demandes en électricité [23].

## II. 6. 2. Le régime de limitation :

Lors d'un court-circuit le supraconducteur bascule dans son état dissipatif et le supraconducteur présent une résistance  $R_L$ . Le champ électrique alors développé par les éléments supraconducteurs limite le courant à une valeur  $I_{lim}$ . La tension nominale  $V_n$  du réseau se retrouve aux bornes du limiteur et le courant limité est égal à  $I_{lim} = V_n / R_L$ .

Lorsque le supraconducteur transite, il bascule dans un état dissipatif (où il développe une résistance fortement non linéaire) sans nécessairement atteindre son état normal (où il développe une résistance ohmique).

Toutefois il est préférable (mais non nécessaire) d'atteindre l'état normal du supraconducteur afin de profiter au maximum de l'augmentation de sa résistance (ce qui permet de réduire la longueur nécessaire pour bien limiter le courant).



**Fig. II. 10 :** Transition d'un supraconducteur fritté. Il bascule de son état supraconducteur à son état dissipatif ( $E < \rho \cdot J^n$ ) avant d'atteindre son état normal ( $E < \rho \cdot J^n$ ) [23].

Toute l'énergie du court-circuit est dissipée dans le supraconducteur.

C'est pourquoi il est nécessaire d'isoler rapidement le limiteur de courant du réseau lors d'un défaut car l'élévation en température du matériau peut provoquer sa destruction (dilatation différentielle, contraintes mécaniques, clivage) voir même sa fusion si la température de fusion est atteinte (environ 860 °C pour le Bi<sub>2</sub>223). C'est pour cette raison qu'il est nécessaire d'utiliser des matériaux homogènes. Si la transition n'a lieu qu'en quelques points localisés dans le matériau, les gradients de températures pourront alors atteindre en ces points un million de degrés par seconde.

Le choix du courant limité  $I_{lim}$  et donc de la longueur de matériau nécessaire (puisque la section est déterminée par le courant critique et le courant nominal) n'est pas trivial. Il dépend entre autres du type de réseau et de la place du limiteur. Si le courant limité est proche du courant nominal, voir inférieur, cette configuration peut ne plus permettre la sélectivité entre les protections. De plus, il existe des surintensités transitoires de quelques fois le courant nominal qu'il n'est pas forcément nécessaire de limiter (comme des démarrages de moteurs, des enclenchements de transformateurs).

Un autre facteur dans le choix du courant  $I_{lim}$  pourra être le temps de récupération du matériau après la limitation. Pour un temps de récupération plus court, il faut une longueur de matériau plus grande (afin de réduire l'excursion en température globale).

Pour ajuster la longueur de matériau nécessaire et la valeur du courant limité il est possible de placer une résistance en parallèle du limiteur [23].

### **II. 6. 3. Le régime de récupération :**

C'est le régime après la limitation dans lequel le limiteur de courant est isolé du réseau. Pour les limiteurs supraconducteurs à basse température critique, leur temps de récupération est pénalisant pour leur insertion dans un réseau car il est assez long (plusieurs minutes).

Pour les supraconducteurs à haute température, les temps de récupération n'excèdent guère quelques secondes. De plus ce temps dépend beaucoup de leur forme : une couche mince présentant une grande surface par rapport à son volume récupèrera beaucoup plus vite qu'un barreau massif.

S'il est nécessaire que le système ait récupéré en moins de 300 ms pour satisfaire aux exigences des cycles OF, alors il sera nécessaire d'augmenter le volume de supraconducteur afin de limiter la montée en température à quelques dizaines de degrés lors d'un court-circuit.



Lorsque la température du supraconducteur est redevenue inférieure à sa température critique, le limiteur est inséré de nouveau dans le réseau. Il se retrouve alors dans son état initial et peut limiter de nouveau un court-circuit [23].

## II.7. Conclusion :

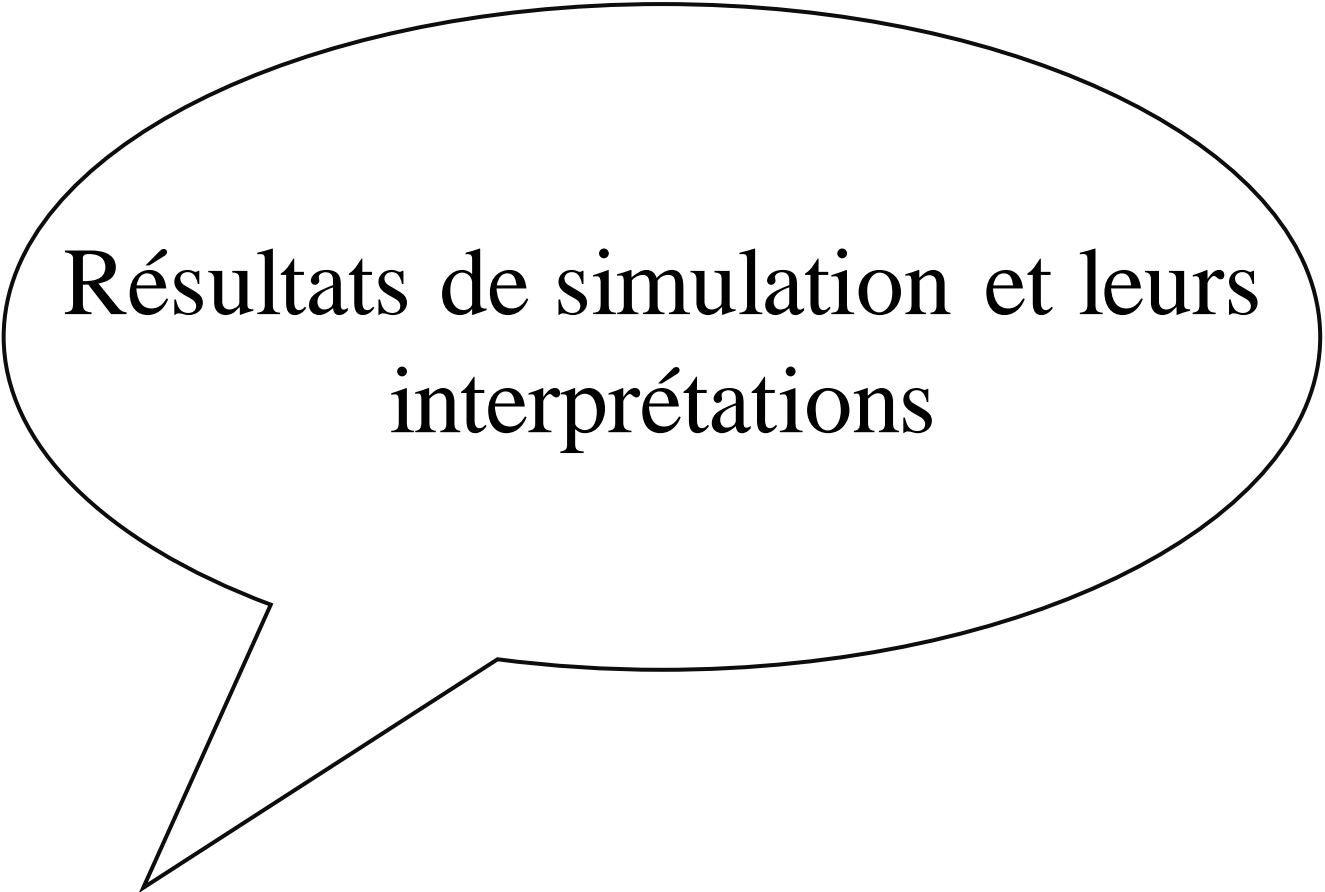
Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes formulations du problème électromagnétique ainsi que les outils mathématiques pour la modélisation des matériaux supraconducteurs à hautes températures critiques. Nous nous intéressons particulièrement au modèle magnétodynamique dans un milieu supraconducteur, la formulation en champ électrique  $\vec{E}$  a été également retenu.

La modélisation du comportement électromagnétique des supraconducteurs, conduit par une approche numérique, connaît de nombreuses difficultés. Une méthode numérique modélisant les matériaux supraconducteurs a été développée. Elle est basée sur la résolution d'équations fortement non-linéaires. Pour cela, nous avons alors basé sur la méthode adoptée qu'une méthode des volumes finis (MVF).

Nous avons décrit également dans ce chapitre les différents types de limiteurs et leurs configurations dans un réseau électrique, l'étude de limitation de courant nécessite de décomposer ce chapitre en deux parties : l'une sur l'étude des supraconducteurs en vue de la limitation du courant, l'autre sur l'insertion de cet appareil et de voir son influence sur la stabilité transitoire du réseau pendant le régime de défaut. En effet, afin d'utiliser des supraconducteurs à haute température critique pour la réalisation d'un limiteur de courant, il nous a d'abord fallu comprendre leur comportement tant en régime nominal qu'en régime de limitation. L'étude de ce dispositif, son implémentation et de voir leur influence sur la stabilité du réseau test 14 jeux de barres durant période de trois régimes (avant, pendant et après l'apparition des courants de défauts (court-circuit) fera l'objet de troisième chapitre. Dans ce dernier, nous étudierons aussi le comportement de ce réseau électrique face au défaut symétrique, en utilisant le logiciel PSAT sous MATLAB pour donner les différents résultats de simulations concernant l'influence de SFCL sur l'amélioration de la stabilité transitoire.



# **Chapitre III :**



Résultats de simulation et leurs  
interprétations

### III. 1. Introduction :

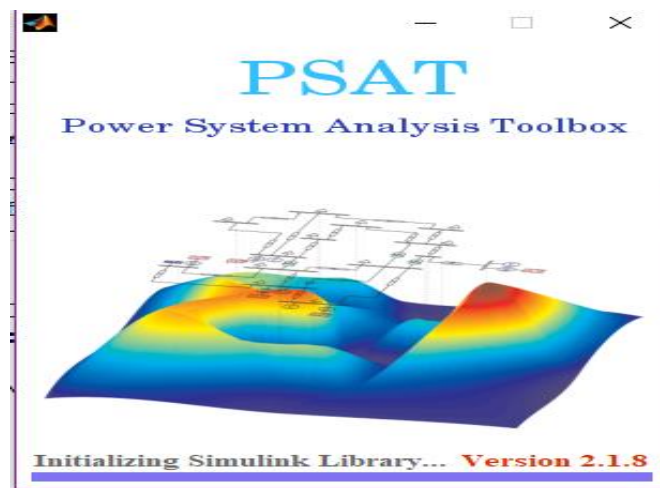
Les courants et tensions qui apparaissent lors d'une perturbation affectant les réseaux électriques, jouent un rôle important dans la stabilité du système. Ces perturbations peuvent être externes (telles que les coups de foudre) ou internes (telles que les défauts de court-circuit, les variations brusques de charge, etc.). Elles affectent les conditions de fonctionnement normal, et conduisent souvent à la perte de la stabilité de tout le système.

Dans le présent chapitre, nous étudions le comportement des réseaux électriques face au défaut symétrique (court-circuit triphasé), sans intégrations des dispositifs FACTS tels que SVC, STATCOM.

Nous allons étudier l'influence de différents facteurs cités ci-après sur la stabilité transitoire :

- la localisation du défaut
- le temps d'élimination des défauts (lent ou bien rapide)
- la variation de la résistance de défaut (la charge)

Les simulations numériques, les résultats de calculs ainsi que les représentations graphiques ont été obtenus par le logiciel PSAT (Power System Analysis Toolbox).



**Fig. III. 1** : Page d'accueil du PSAT.

### III. 2. Définition de la stabilité d'un réseau électrique :

La stabilité d'un réseau électrique de HT est une propriété d'un système de puissance qui lui permet de rester dans un état d'équilibre dans des conditions normales de fonctionnement et de retrouver un état acceptable d'équilibre après avoir été soumis à une perturbation. [24]

### III. 3. Classification de la stabilité des réseaux électriques :

La stabilité peut être étudiée en considérant la topologie du réseau sous différents angles. L'état de fonctionnement d'un réseau électrique est décrit selon des grandeurs physiques, telles que l'amplitude et l'angle de phase de la tension à chaque bus, et la puissance active/réactive circulant dans chaque ligne et la vitesse de rotation de la génératrice synchrone. Si elles ne sont pas constantes, le réseau électrique est considéré comme étant en perturbations. La stabilité peut être classifiée selon la nature de la perturbation : stabilité de l'angle du rotor, stabilité de la tension et stabilité de la fréquence. La stabilité peut être classifiée en petite et grande amplitude de perturbation en fonction d'origine et de l'ampleur du défaut. Par rapport au temps d'évaluation, la stabilité peut être à court ou à long durée, tel qu'il est décrit dans la (Figure 3.1). [25]

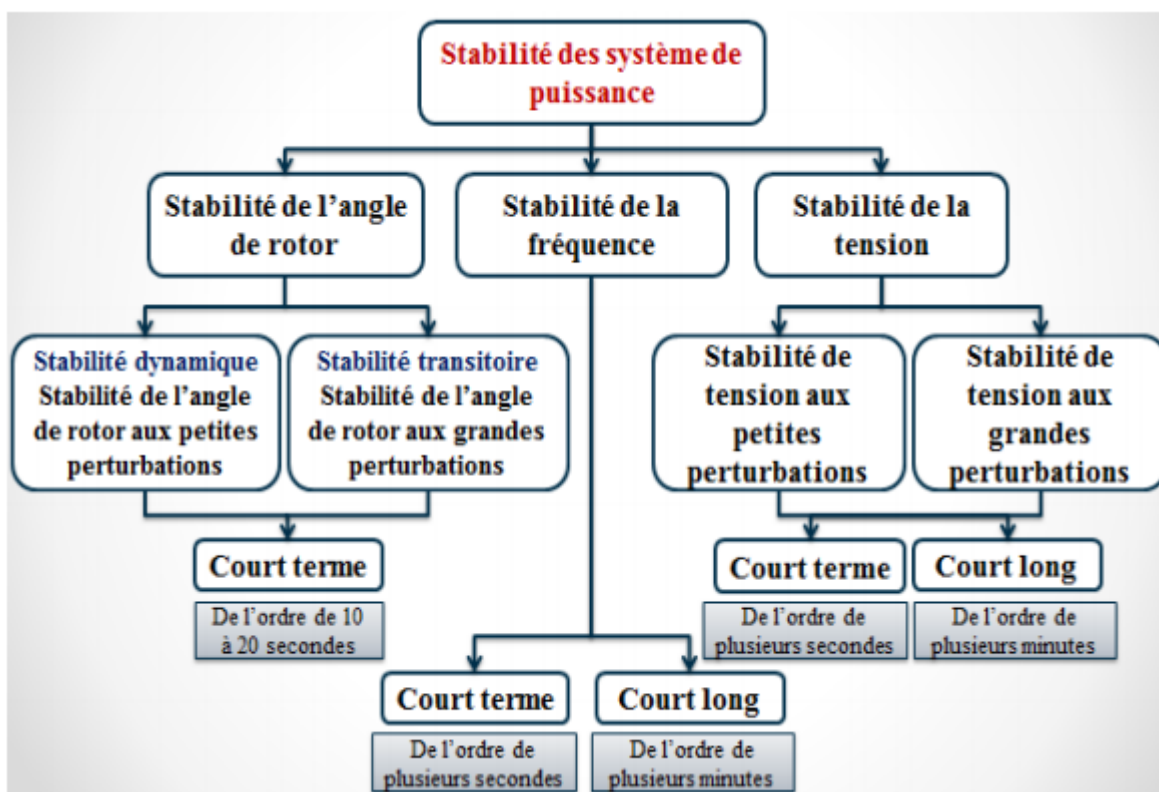


Fig. III. 2 : Classification des différents types de stabilités. [25]

**III. 3. 1. Stabilité de l'ongle du rotor (Angulaire) :**

Elle est définie comme la capacité d'un ensemble de machines synchrones interconnectées de conserver le synchronisme dans des conditions de fonctionnement normales ou après avoir été soumis à une perturbation.

L'instabilité angulaire se manifeste sous forme d'un écart croissant entre les angles rotoriques : soit d'une machine et de reste du système, soit d'un groupe de machines et du reste du système. Une machine qui a perdu le synchronisme sera déclenchée par une protection de survitesse ou par une protection de perte de synchronisme, ce qui met en danger l'équilibre production consommation du système.

Selon l'amplitude de la perturbation, on parle de la stabilité angulaire aux petites perturbations (stabilité dynamique) ou de la stabilité angulaire aux grandes perturbations (stabilité transitoire). [26]

**III. 3. 1. 1. Stabilité Angulaire Aux Petites Perturbations :**

Elle concerne la capacité du système à maintenir le synchronisme en présence de petites perturbations comme : une petite variation de la charge ou de génération, manœuvre d'équipement, etc. L'évaluation de ce type de perturbation prend quelque secondes. [24]

**III. 3. 1. 1. a. La stabilité statique :**

Après le régime transitoire dû à la perturbation, le système entre dans le régime permanent. Dans ce cas, pour étudier le système, il faut évaluer la stabilité statique du réseau. Le système n'est pas stable si les contraintes de fonctionnement ne sont pas respectées. Cet état est appelé: l'état instable ou l'état d'urgence. Dans un réseau qui est dans l'état d'urgence, les opérateurs du centre de contrôle ont suffisamment de temps pour ramener le système à l'état stable ou au régime normal en apportant des modifications supplémentaires.

Si certaines contraintes d'exploitation ne sont pas respectées, une des parties du réseau se sépare du système, le reste continuant son fonctionnement. Dans cette situation, on peut ramener tout le réseau à l'état normal grâce à des opérations de restauration. [24]

**III. 3. 1. 1. b. La Stabilité Dynamique :**

Il arrive que des petites oscillations des angles rotoriques apparaissent sur les signaux, à cause d'un changement dans la structure du réseau, dans les conditions d'exploitation, dans les systèmes d'excitation ou au niveau des charges. Ces oscillations peuvent déstabiliser un

alternateur, une partie ou tout le réseau. La stabilité dynamique est reprendre dans une période de temps plus longue. [24]

### **III. 3. 1. 2. Stabilité Transitoire ST :**

Lorsqu'il y a une perturbation majeure sur le réseau et que le réseau retrouve son mode de fonctionnement normal après la perturbation, alors le réseau est dit transitoirement stable. Les perturbations majeures sont les courts-circuits, les pertes de lignes, les bris d'équipements majeurs comme les transformateurs de puissance et les alternateurs. Si on prend en compte ces diverses définitions et les différentes perturbations sur le réseau, on comprend que la stabilité dynamique et la stabilité transitoire sont intimement liées au niveau de stabilité en régime permanent. En effet, le niveau de stabilité en régime permanent doit être le plus élevée possible; lors d'une perturbation sur le réseau, un court circuit de quelques cycles par exemple, l'appel de puissance durant la perturbation et lors des instants qui suivent l'élimination du défaut ne doit pas atteindre la limite de stabilité en régime permanent sinon le synchronisme risque d'être perdu. Dans ce cas, le réseau sera transitoirement instable. Plus la limite de stabilité en régime permanent est élevée, plus la stabilité dynamique et la stabilité transitoire est accrue. Une limite de stabilité en régime permanent la plus élevée possible permet également de continuer à alimenter la charge lorsqu'un équipement majeur, comme alternateur, devient hors service. [27]

### **III.3.2 Stabilité de fréquence :**

La stabilité de la fréquence d'un système de puissance se définit par la capacité du système de maintenir sa fréquence proche de la valeur nominale suite à une perturbation sévère menant par conséquent à un important déséquilibre, entre les puissances produite et consommée. [28]

### **III.3.3 Stabilité de tension :**

La stabilité de tension concerne la capacité d'un système de puissance à maintenir des tensions acceptables à tous ses nœuds, dans des conditions du fonctionnement normales ou suite à une perturbation. L'instabilité de tension résulte de l'incapacité du système production-transport à fournir la puissance demandée par la charge. Elle se manifeste généralement sous forme d'une décroissance monotone de la tension. [29]

### III.4. But de la stabilité transitoire :

L'objectif le plus important des études de stabilité est de trouver le comportement dynamique des principales variables qui déterminent le fonctionnement des générateurs ainsi que l'angle, la vitesse, le courant, la tension et la puissance. Même, grâce à ces variables, il est possible de déterminer le temps critique d'élimination de défaut ou la marge de stabilité. Autrement dit, la ST vise à répondre à la question suivante : quel est le temps maximum de libération du défaut pour lequel le réseau reste stable? [24]

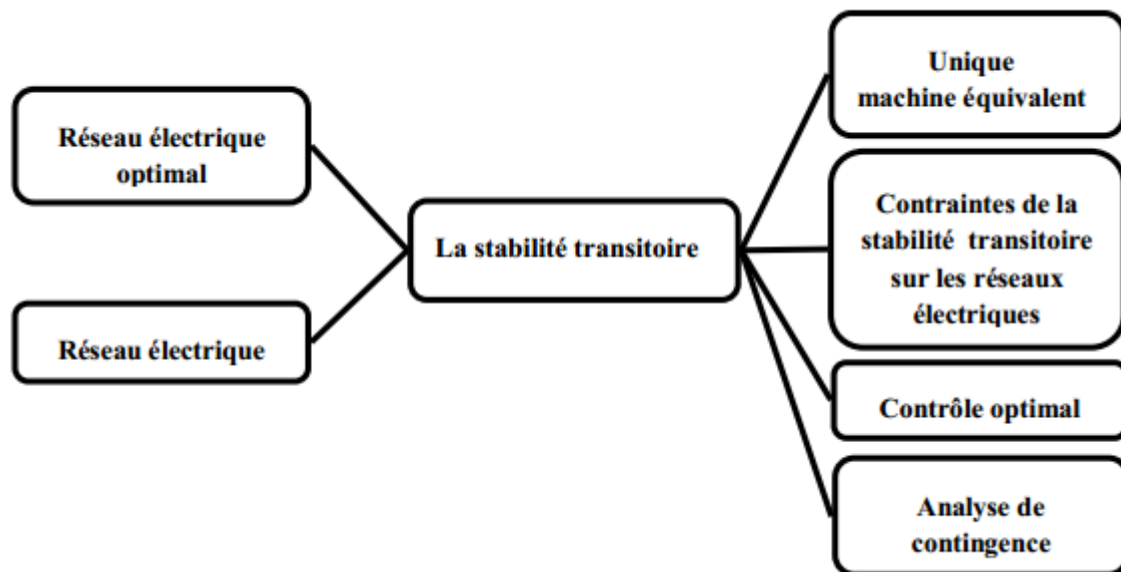


Fig. III. 3 : Les buts de la stabilité transitoire. [24]

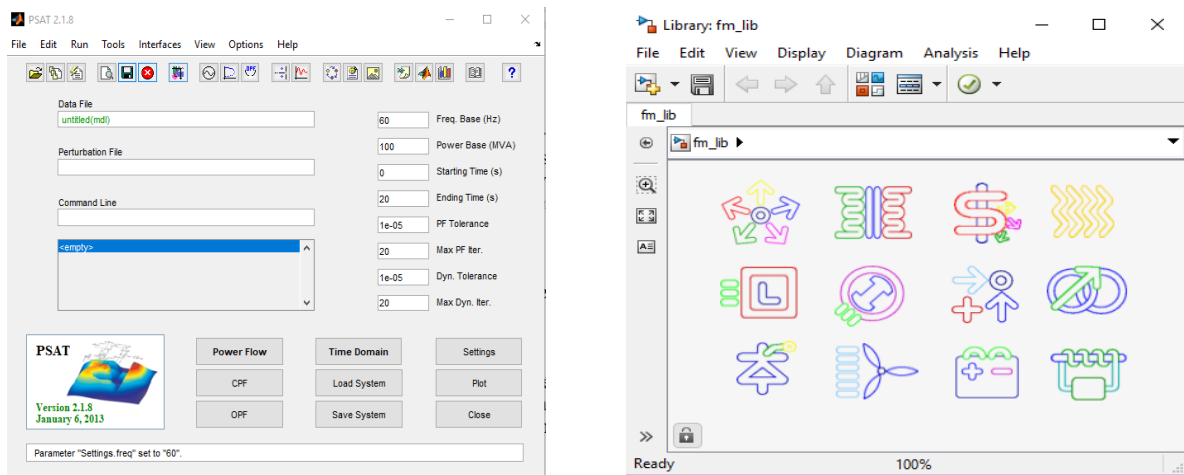
### III. 5. Logiciel de simulation :

Avant d'entamer la phase de simulation, il est essentiel d'exposer un bref aperçu sur le logiciel PSAT (Power System Analysis Toolbox), utilisé dans ce travail. PSAT est un logiciel didactique, développé sous Matlab par Dr. Federico Milano pour l'analyse des réseaux électriques. Il peut effectuer les fonctions statiques et dynamiques suivantes :

- ❖ Calcul d'écoulement de puissance PF (Power Flow). [30]
- ❖ Calcul d'écoulement de puissance Optimal OPF (Optimal Power Flow).
- ❖ Calcul d'écoulement de puissance en continu CPF (Continuation Power Flow).
- ❖ Analyse de la stabilité de petites perturbations SSSA (Small Signal Stability Analysis).

- ❖ Simulation temporelle TDS (Time Domain Simulation) [31, 32].

Ces caractéristiques rendent PSAT très utilisé par les chercheurs et les laboratoires des réseaux électriques. Malgré la disponibilité de plusieurs logiciels spécialisés dans l'analyse et l'étude des réseaux électriques, développés sous Matlab, PSAT reste un outil performant et très prisé [31].



**Fig. III. 4 :** Interface graphique (GUI) du PSAT.

### III. 5. 1. Utilisation de PSAT :

Les étapes d'utilisation de PSAT se résument comme suit :

- Ouvrir un nouveau fichier.
- Créer du réseau électrique à étudier.
- Lancer le modèle de la bibliothèque de simulation.
- Introduire les données numériques des éléments (générateurs, lignes, transfos,FACTS).
- Exécuter l'écoulement de puissances.
- Exécuter la simulation dans le domaine temporel.

### III. 6. Réseau test :

Le réseau test IEEE14 JB, montré dans la Figure III.3, Il comprend deux générateurs (G1 et G5) installés aux nœuds 1 et 2, trois générateurs compensateurs synchrones (G3, G4 et G2) installés aux nœuds 3, 6 et 8. Les générateurs sont considérés avec la limitation sur la puissance réactive.



Ce réseau contient:

- ✓ 5 générateurs.
- ✓ 4 transformateur
- ✓ 14 jeux de barres.
- ✓ 11 charges statiques.
- ✓ 20 lignes.

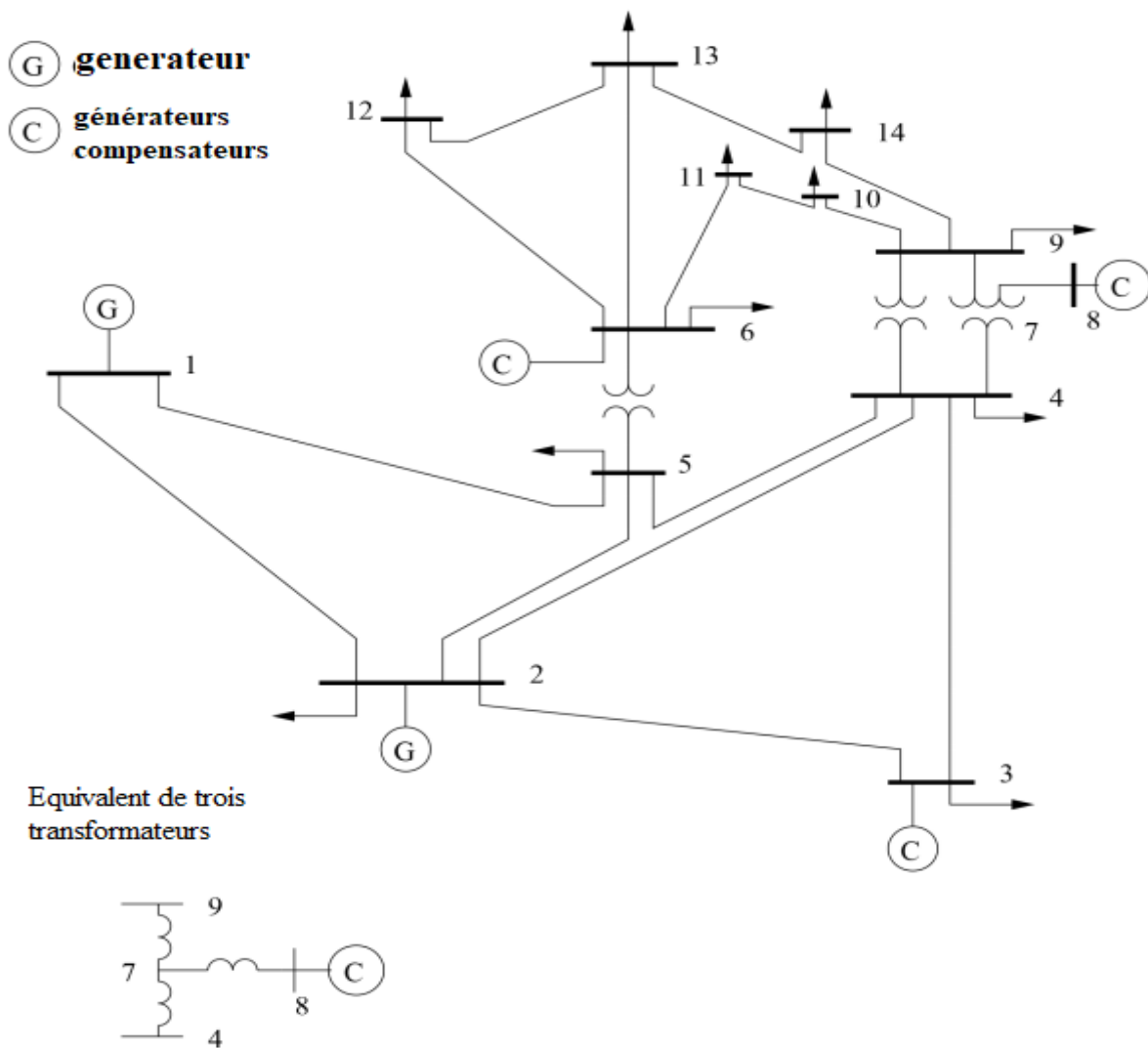


Fig. III. 5 : Schéma d'un réseau test de 14 jeux de barres.

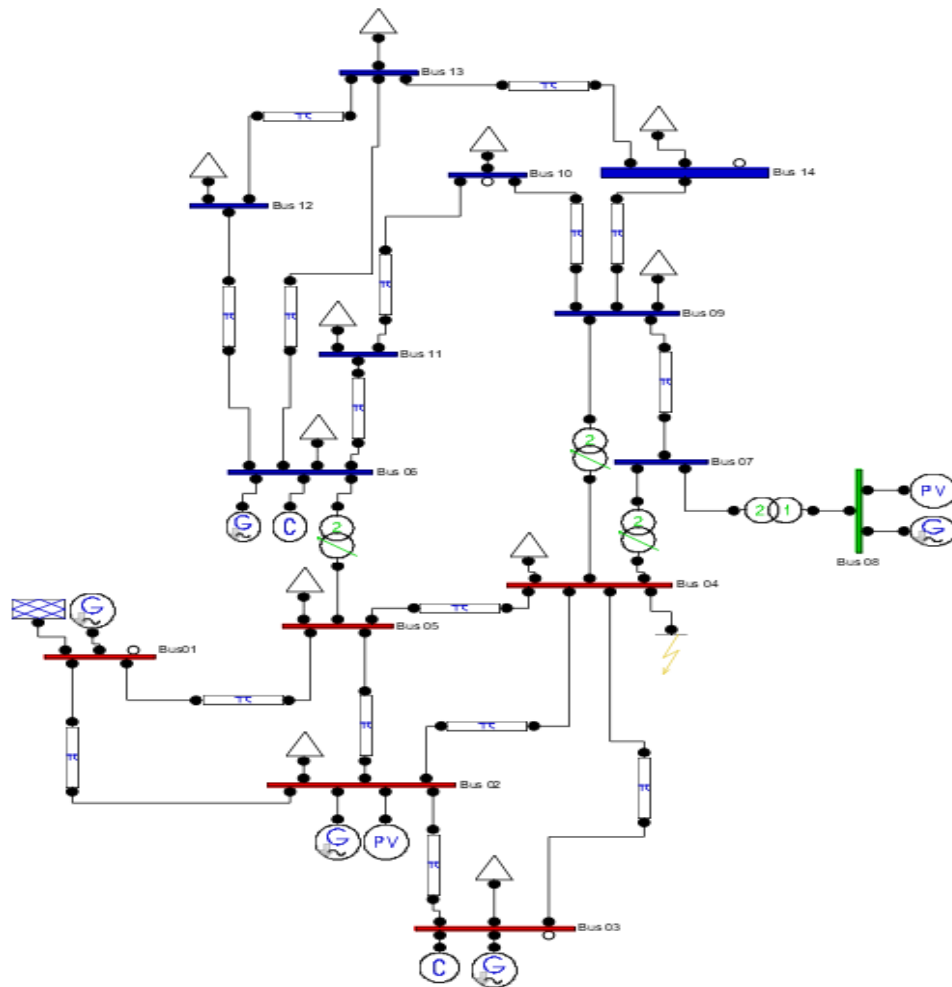


Fig. III. 6 : Structure de réseau test sur logiciel PSAT.

## III.7. Etude de l'influence de défaut sur la stabilité du réseau à 14 JB

### III.7. 1. Régime normal (sans défaut)

Le limiteur supraconducteur (SFCL) est considéré comme un conducteur d'impédance nulle dans le réseau.

### III.7.2. Régime de défaut (court-circuit)

Dans ce modèle de 14 JB, on s'intéresse en premier lieu à l'introduction des défauts (en agissant sur leurs emplacements, leurs durées et leurs résistances). Ensuite, de voir leurs effets sur la stabilité de ce dernier, on considère un défaut triphasé se produisant, à l'instant  $t = 4s$  pour tout les cas.

### III.7. 2. a. Régime de défaut (court-circuit triphasé symétrique au nœud de JB 04) sans l'insertion du limiteur de courant SFCL ( $R_{SFCL}=0$ ) pu et $T_d=250$ ms :

Dans ce cas le dispositif de limitation de courant (limiteur de courant résistif), n'est pas inséré dans le réseau.

Les résultats de simulations représentées dans les Fig. III-5 (a-b-c-d-e) montrent respectivement les angles rotoriques des générateurs, ses vitesses, ses tensions et ses puissances active et réactive.

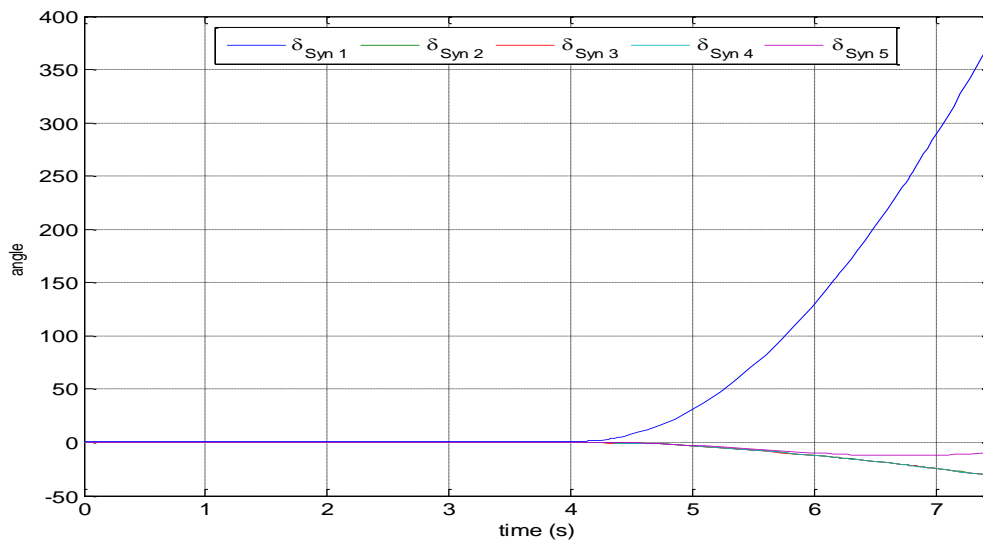


Fig. III. 7. a : les angles rotorique (rad) de 5 générateurs sans SFCL.

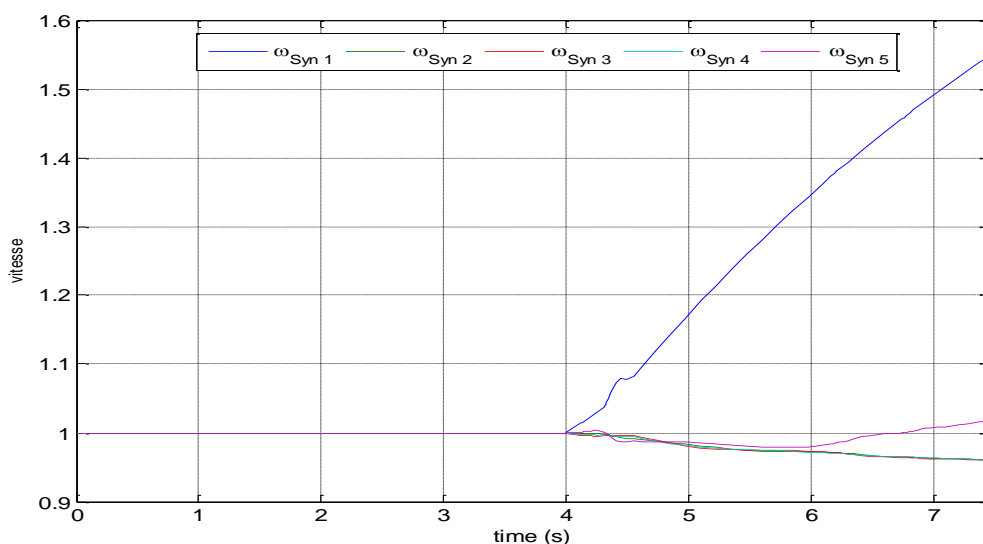


Fig. III. 7. b : les vitesses (rad/s) de 5 générateurs sans SFCL.

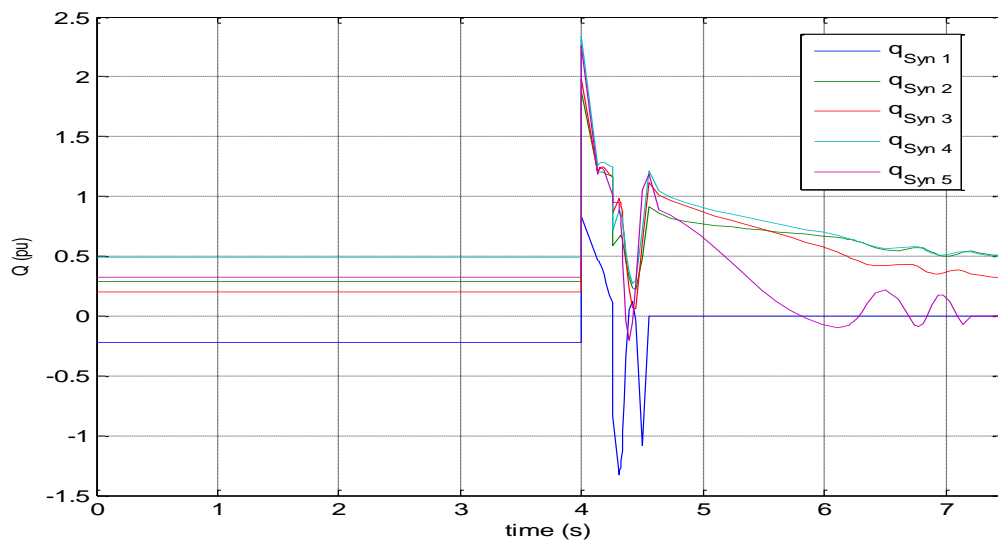


Fig. III. 7. c : Les puissances réactives (pu) pour les 5 générateurs sans SFCL.

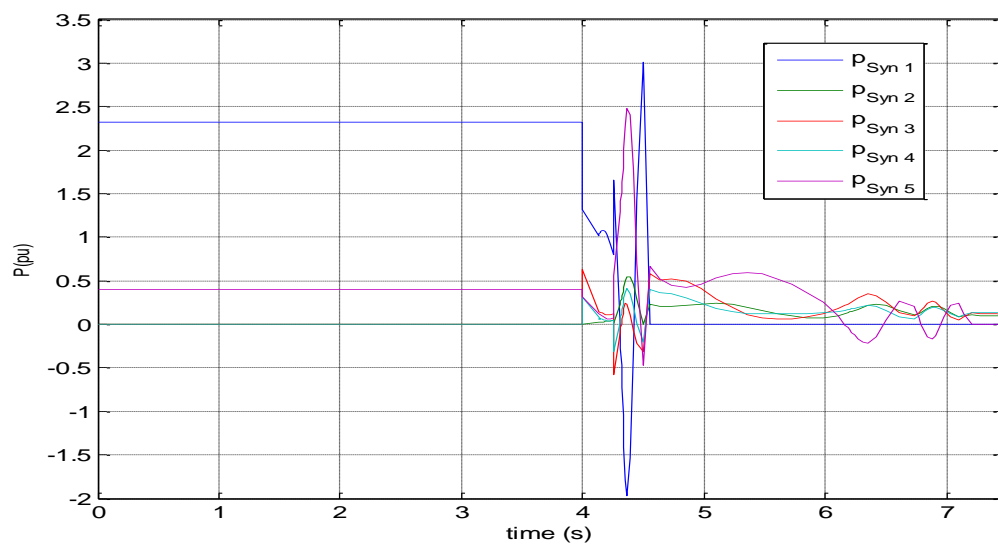


Fig. III. 7. d : les puissances actives (pu) pour les 5 générateurs sans SFCL.

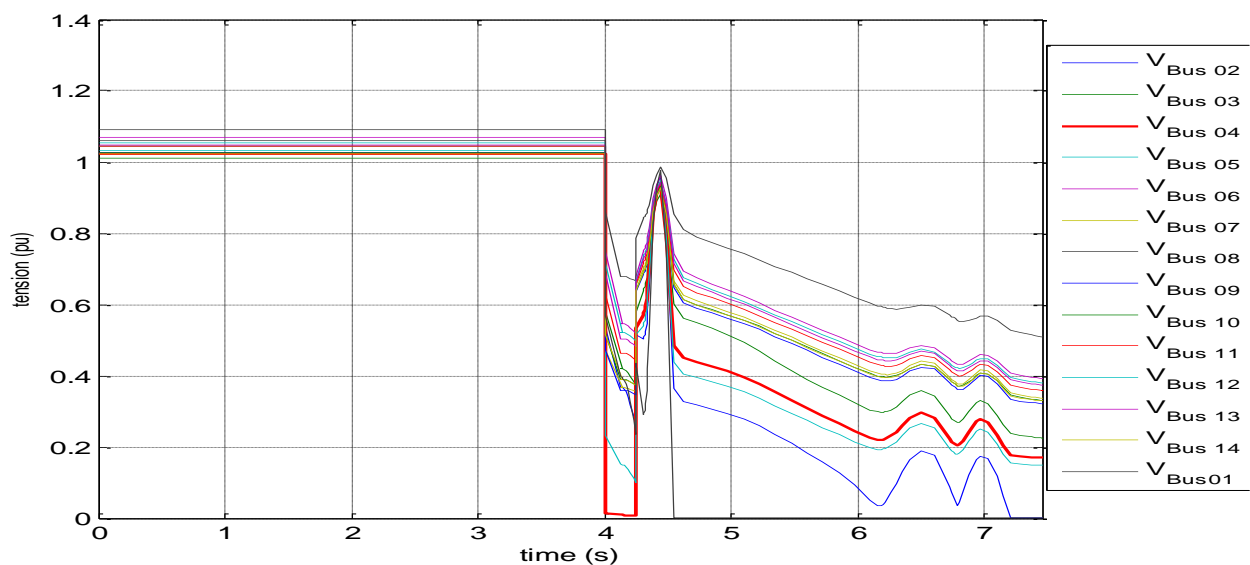


Fig. III.7.e : les tensions (pu) sans SFCL.

**Interprétation :**

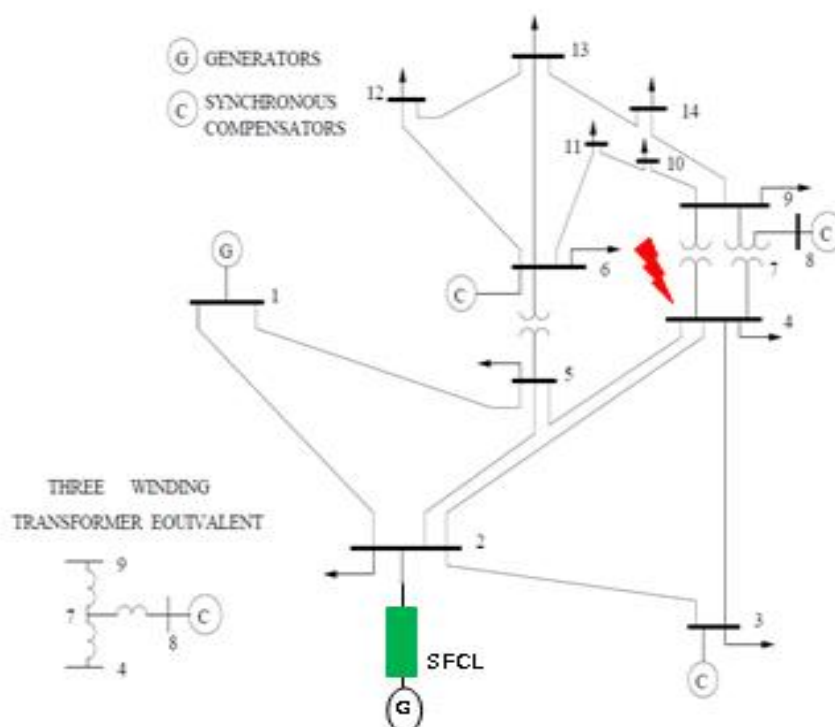
Dans le cas d'un défaut sur le JB04 avec  $R_{SFCL}=0$  pu le système a perdu sa stabilité.

- Pour les vitesses angulaires il y'a une accélération pour la vitesse de G1 et G5 et des accélérations pour les autres générateurs.
- Pour les puissances nous voyons des fortes diminutions de la puissance active surtout pour G1 et G5 et une augmentation pour la puissance réactive mais après quelques secondes toutes les puissances raidissent vers zéro.
- Nous constatons aussi que à  $t=4.4s$  toutes les tensions diminuent rapidement.

⇒ Ce qui implique que le réseau est instable.

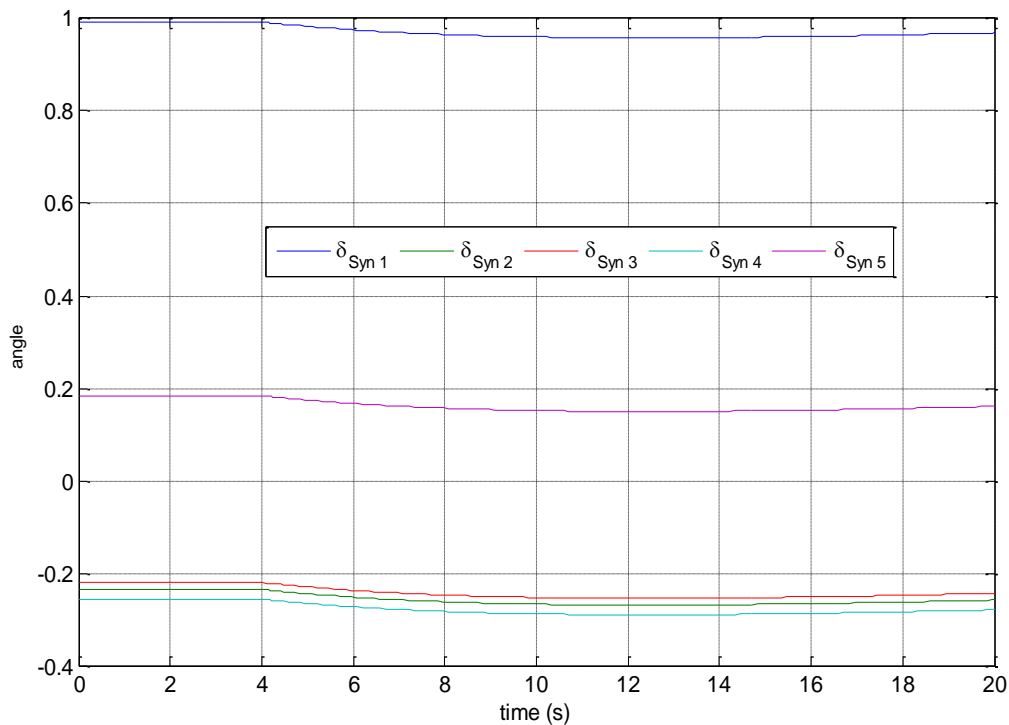
### III.7. 2. b. Régime de défaut (court-circuit triphasé symétrique au nœud de JB 04) avec l'insertion du limiteur de courant SFCL ( $R_{SFCL}=1$ pu) et $T_d=250ms$ :

Après avoir intégré un limiteur supraconducteur résistif dans le réseau on a les résultats suivants :

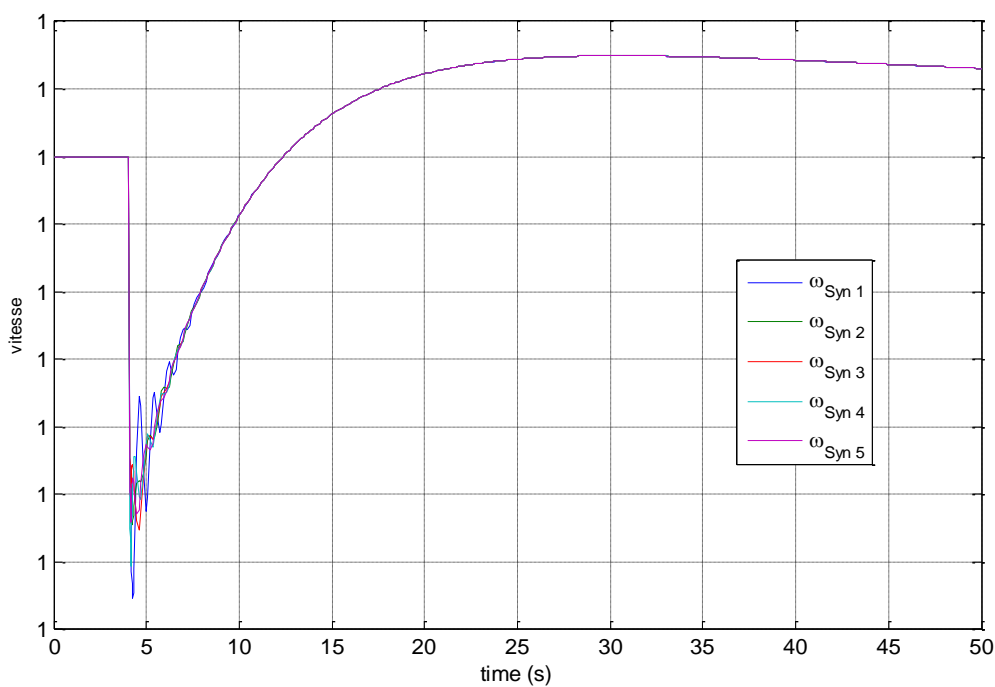


**Fig. III. 8:** Réseau test de 14 bus IEEE, SFCL en série avec générateur n° 5.

Les résultats de simulations représentées dans les Fig. III-7 (a-b-c-d-e) montrent respectivement les angles rotoriques des générateurs, ses vitesses, ses tensions et ses puissances active et réactive.



**Fig. III. 9. a :** les angles rotoriques (rad) de 5 générateurs avec SFCL.



**Fig. III. 9. b :** les vitesses (rad/s) de 5 générateurs avec SFCL.

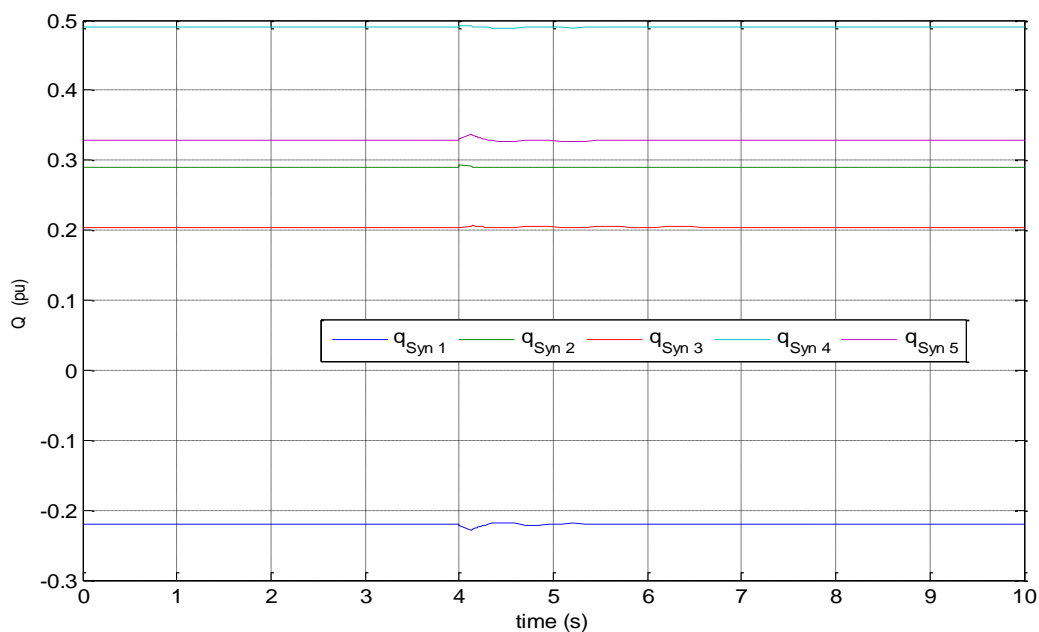


Fig. III. 9. c : l'allure des puissances réactive (pu) pour les 5 générateurs avec SFCL.

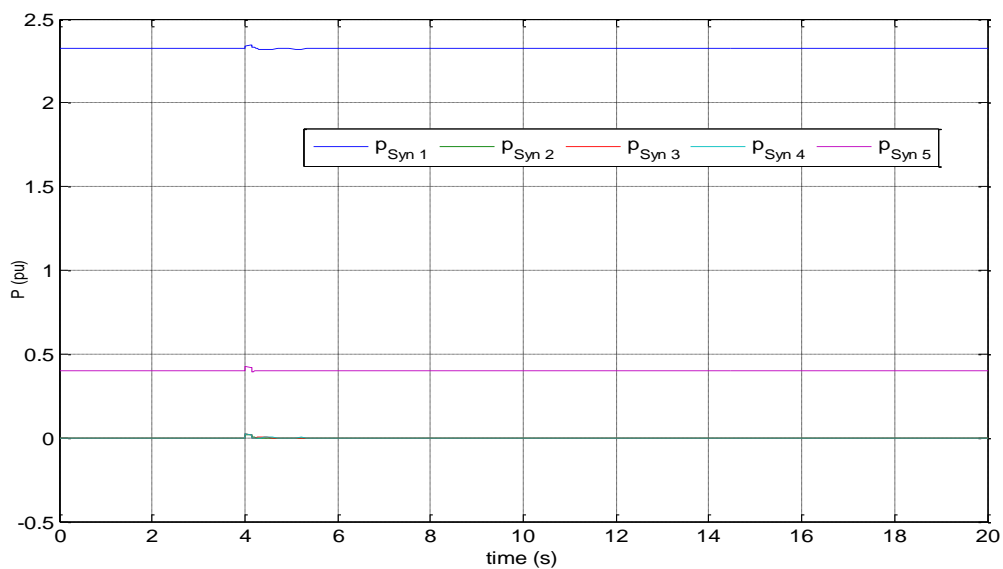
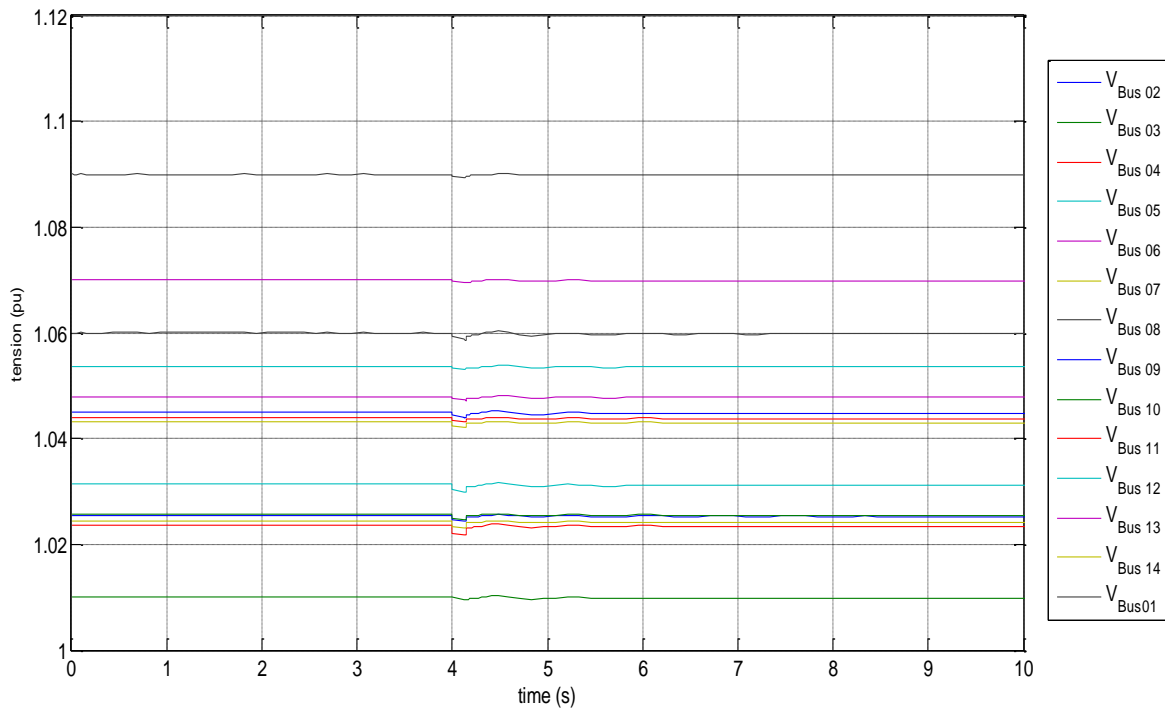


Fig. III. 9. d : l'allure des puissances active (pu) pour les 5 générateurs avec SFCL.



**Fig. III. 9. e :** l'allure des tensions (pu) avec SFCL.

**Interprétation :**

Le réseau devient stable par ce que :

- Des oscillations pour la vitesse de G1 et le système retrouve le point d'équilibre rapide et le même pour l'angle.
- On constate aussi que les tensions restent stables, la même chose pour les puissances active et réactive.

En ce qui concerne cette comparaison et pour l'influence de défaut sur la stabilité transitoire, les résultats présentés précédemment montrent que les pertes dans les jeux de barre ont fortement déséquilibré le système. En effet, pour le premier cas ( $R_{SFCL}=0$ ) le réseau allez vers l'instabilité, le défaut c'est causée l'égalité production-consommation par ce que dans ce cas le courant de défaut est plus grands alors les générateurs ne peux pas fournir cette quantité demandée. Et dans le 2eme cas ( $R_{SFCL}\neq 0$ ) le réseau a pu garder son synchronisme et sa stabilité par ce que le courant de défaut et petit. Après cette simulation on a conclu que le réseau est instable pour  $R_{SFCL}=0$  pu et stable pour  $R_{SFCL}=1$ pu. Alors la valeur de la résistance de SFCL à une influence capitale sur la détermination de la valeur du courant de défaut plus la résistance est important plus le courant de défaut est diminué (ils sont inversement proportionnels).



**III. 7. 3. Calcul du temps critique d'élimination du défaut :**

Dans le présent travail, La valeur optimale du CCT, est déterminée par essais et erreurs. Pour cela plusieurs valeurs de la durée défaut  $T_d$  sont préalablement choisies et testées consécutivement jusqu'à ce que le système devienne instable. La valeur de ce temps correspond au CCT.

Pour éclairer cette approche, on considère un défaut triphasé se produisant, à l'instant  $t = 4s$ , sur les différents jeux de barres. Le défaut persiste durant un intervalle de temps  $T_d$  dont on fait varier la valeur avec des pas très petits afin d'obtenir la valeur critique au-delà de laquelle la stabilité n'est plus assurée, après  $T_d$  le défaut est éliminé, l'évaluation de la stabilité des trois périodes avant, durant et après défaut.

<b>Jeux de Barres</b>	<b>Jb01</b>	<b>Jb04</b>	<b>Jb07</b>	<b>Jb10</b>
<b>TCID (ms)</b>	<b>60</b>	<b>100</b>	<b>260</b>	<b>300</b>

**Tab. III. 1 :** le TCID pour chaque jeu de barre.

**Interprétation :**

Le temps critique d'isolement le défaut est diminuait à mesure que la localisation du défaut se rapprochait de la centrale.

Les simulations effectuées sur le réseau test indiquent que le SFCL proposé peut améliorer la stabilité transitoire. On peut voir d'après les résultats que les réponses du système sont assez satisfaites pour un court-circuit triphasé au niveau de la ligne de transmission et on peut dire que le défaut est plus prononcé lorsqu'il se produit en ligne à proximité du bus du générateur. Par conséquent, il est nécessaire de choisir un emplacement optimal pour cet appareil; un mauvais emplacement peut réduire les performances du système d'alimentation.

Les résultats du CCT après défaut triphasé sur les différentes lignes sont donnés dans le tableau III.2.

Défaut	dan le J B	SFCL	CCT (ms)	CCT (ms)
		Dans la ligne	sans SFCL	avec SFCL
1		1-2	60	66
1		1-5	60	70
4		4-7	140	146
4		4-3	140	151
4		4-2	140	159
4		4-5	140	151
7		7-4	260	270
7		7-8	260	290
7		7-9	260	320
10		10-9	350	430
10		10-11	350	480

**Tab. III. 2:** CCT en défaut triphasé avec et sans SFCL.

Les valeurs CCT obtenues par simulation sans et avec l'insertion du SFCL nous aident à paramétrer les protections afin d'isoler les défauts et de maintenir la stabilité du système.

On peut remarquer que le CCT est un facteur critique pour juger si le système énergétique a une bonne capacité à maintenir le synchronisme et à maintenir la stabilité pendant une certaine période de perturbation.

**III. 8. Conclusion :**

Vu les propriétés des matériaux supraconducteurs qui peuvent apporter des solutions technologiques très importantes pour la limitation des courants de défauts et par conséquent l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques. Dans ce chapitre, nous avons discuté l'influence du courant de court-circuit sur la stabilité transitoire de réseau et l'intérêt apporté par les SFCL pour améliorer cette dernière. L'application a été effectuée sur un réseau IEEE 14 jeux de barres et 5 générateurs avec le PSAT sous l'environnement MATLAB. Deux cas de figures sont présentées afin d'étudier l'influence de défaut sur la stabilité de ce réseau. D'après l'analyse, nous avons constaté que l'emplacement de défaut est le facteur le plus important dans l'étendue des dégâts de défauts sur la stabilité, ainsi que le temps de l'élimination de défaut joue aussi un rôle très important pour juger si le système électrique a une bonne aptitude à garder la stabilité durant un défaut si les protections fait retard, et pour la valeur de la résistance de défaut à une influence capitale sur la détermination de la valeur du courant de défaut

Nous nous sommes préoccupé plus particulièrement dans notre étude par le choix de défaut symétrique par ce que c'est le cas le plus défavorable pour la stabilité des réseaux. Pour l'emplacement de défaut dans le 1er cas c'est par le type de jeux de barre et dans les deux autre cas (temps d'élimination de défaut et la variation de résistance) c'est parce que le JB04 est plus proche au autres générateurs. Alors dans ce chapitre on a discuté des défauts et dégager les effets de chacun sur la stabilité de ce réseau.



**CONCLUSION  
GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE :

L'objectif de ce travail est l'étude de la possibilité d'implémenter un supraconducteur à haute température critique (SFCL) dans un réseau électrique 14 jeux de barres dans le but, non seulement de limiter un courant de défaut (court-circuit) mais également d'améliorer sa stabilité transitoire.

Comme nous l'avons vu auparavant que le réseau ne peut pas atteindre un état de fonctionnement stable à cause des plusieurs variables, la stabilité du réseau électrique basée sur trois grandeurs essentielles, stabilité de l'angle de rotor, la tension et les fréquences pour assurer la continuité et l'amélioration de la qualité de l'énergie transportée et distribuée au consommateur, alors nous devons le sauver et on l'améliore avec des améliorateurs avancés et intelligents en fonction de l'évolution de système, la technologie et les défauts que se soit interne (court-circuit) ou externe (la foudre). À l'heure actuelle, la supraconductivité est une solution où un développement le plus approprié atteindre. Un limiteur de courant supraconducteur SFCL sert à protéger et affirmer le bon fonctionnement de service à cause son comportement et propriété, autonome et répétitif qui n'a pas besoin de moyen de détection du défaut, ce qui est un point fort pour lui.

À travers cette étude, nous avons décrit la supraconductivité, les matériaux supraconducteurs et ses applications en générale. Ensuite, les matériaux supraconducteurs sont modélisés mathématiquement à des températures critiques élevées par approximation numérique avec des équations fortement non-linéaires. Enfin, on a essayé d'appliquer un courant de court-circuit sur le réseau, pour voir la stabilité transitoire de réseau avant, durant et la faire face par un limiteur supraconducteur à travers un logiciel de simulation PSAT sur MATLAB.

Le modèle mathématique numérique développé dans le matériau supraconducteur a été implémenté par le code de calcul développé sous l'environnement MATLAB qui présente plusieurs avantages tels que la modélisation des matériaux, la précision des résultats et la visualisation des différentes grandeurs électromagnétiques et thermiques.

En particulier, nous avons proposé une formulation originale permettant d'approcher la transition du matériau de l'état supraconducteur à l'état normal. Cette formulation, consiste à modéliser le limiteur comme étant une résistance variable, cette résistance reste nulle durant le régime nominal et devient plus importante dans le régime de défaut.

La limitation de courant du court-circuit pour un limiteur du courant supraconducteur dépend à la fois de la densité du courant et de la température critique  $T_C$  (la translation de l'état supraconducteur à l'état normal basé sur la température critique  $T_C$  et  $J_C$ ).

D'abord, les perturbations sur n'importe quel jeu de barre déséquilibrent le système, cela conduit à l'instabilité, le courant de défaut impacte sur le réseau ça dépend leur emplacement, la durée et la résistance. Il force les générateurs surtout les plus proches à fournir des quantités insupportables aux consommateurs. Les angles rotoriques commencent à osciller jusqu'à l'intervention des systèmes de régulation de tension et de vitesse afin de restituer la marche en synchronisme et mener le réseau à un nouvel état de fonctionnement stable.

La stabilité transitoire avant et après l'insertion du SFCL n'est pas la même, cette étude prouve que le limiteur SFCL sert à intervenir de façon très rapide et autonome, par calcul la résistance de défaut et applique une autre plus forte pour récupérer la stabilité après un Td bien déterminé. Sa place doit être choisie avec précision parce que cela affecte sa performance. CCT est un facteur qui juge si un système est capable de maintenir le synchronisme et la stabilité pendant une période de déséquilibre (perturbée).

Les résultats obtenus ont montré qu'il existe une amélioration importante sur le comportement du réseau notamment sa stabilité transitoire lorsque le SFCL est implanté.

Pour la continuité de ce travail et afin de valider les résultats, on souhaiterait étendre les perspectives envisagées suivantes :

- ✓ Une comparaison entre la méthode des volumes finis et la méthode des éléments finis s'impose pour modéliser les matériaux supraconducteurs.
- ✓ Une confrontation entre le logiciel PSAT et Power World pour la modéliser les réseaux électriques.
- ✓ Le calcul des courants produits avant et après la limitation de courant.
- ✓ Etude plus détaillée spécifique aux réseaux électriques en Algérie.



**REFERENCE ET  
BIBLIOGRAPHIE**

## Références Bibliographiques

- [1] **BONNARD Charles-Henri** « Transformateur Limiteur de courant Supraconducteur à Haute Température Critique : Desing, Construction et Test » Maîtrise ès sciences appliquées, Ecole Polytechnique de Montréal, Octobre 2012.
- [2] **Dr. El Hadj AILAM** « Applications des supraconducteurs en électrotechnique : du rêve à la réalité » Une journée d'étude, l'Ecole Technique de Blida ETB-IFEG et Institut de Formation en Electricité et Gaz, Le 03/06/2015.
- [3] **M. ZITOUNI Fares** « Amélioration de la Stabilité Transitoire des Réseaux Electriques par l'utilisation des Systèmes FACTS » Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif, Le 15/12/2010.
- [4] **IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions**, « Definition and Classification of Power System Stability », IEEE Trans. On Power Systems, vol. 19, n°. 2, pp. 1387-1401, May 2004.
- [5] **Olivier Belmont** « Limitation de courant à base d'oxydes supraconducteurs et réalisation d'un appareil 100 A - 1 KV ». Energie électrique. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 1999. Français.
- [6] **Joseph DURON** « Modélisation de matériaux supraconducteurs-application à un limiteur de courant » Thèse de Doctorat, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Grenoble, France, 24 mars 2006.
- [7] **Yannick COINTE** « Limiteur Supraconducteur de Courant Continu » Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 13 décembre 2007.
- [8] **P.Tixador** « Les Supraconducteurs », Edition Hermès Paris, 39, (1995).
- [9] **Kévin BERGER** « Etude des phénomènes couplés magnétothermiques dans les supraconducteurs à haute température » Thèse de Doctorat, l'Université Henri Poincaré, Nancy I, 21 septembre 2006.
- [10] **P.W.Anderson** « Theory of flux creep in hard Superconductors », Phys. Rev. Lett 309, (1962).
- [11] **A.I.Larkin, V.M.Vinokur, M.V.Feigelman, V.Bry** of collective flux creep, Phys.



- [12] **H.Daffix, P.Tixador** « Design of a fully superconductor synchronous motor, Electric Machines and Power Systems » 25 227-245, (1997).
- [13] **JOSEPH BAIXIRAS** « Les Supraconducteurs Applications à l'électronique et à l'électrotechnique » CNRS EDITIONS France 1998.
- [14] **KEBBAB Noureddine** « Les Supraconducteurs, Modèles et Applications » Mémoire de Magister, Université de Batna, 05/04/2007.
- [15] **B.Bellin, P.Tixador** « Contribution à l'étude des bobinages supraconducteurs : le projet DGA du SMES HTS impulsif » Thèse de l'INPG, (2006). Rev.Lett. 63 2303, (1989).
- [16] **Mr. DAHMANI Hemza et Mr. DOUMIR Souheyb** « Modalisation Des Matériaux Supraconducteurs Application à la Limitation de Courant de Défaut dans un Réseau Electrique à Neuf (9) Jeux de Barres » Mémoire de Mastère, Université Mohamed Boudiaf- M'sila, 2018.
- [17] **NEMDILI SAAD** « Modélisation et Simulation du Limiteur de Courant Supraconducteur » Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas Sétif-1, 04/12/2013.
- [18] **Iszabela KLUTSCH** « Modélisation des supraconducteurs et mesures » Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 26 Septembre 2003.
- [19] **MARAF Halla NECIB Zaineb** « Analyse de L'énergie Dissipative Dans Les Limiteurs de Courant Inductif Pour Les Systèmes D'énergie » Mémoire de Mastère, Université de Kasdi Merbah Ouargla, 26/06/2018.
- [20] **GUECHI Charaf eddine** « Etude analytique de phénomène de limitation de courant » Mémoire de Mastère, Université Mohamed Boudiaf- M'sila, 2013/2014.
- [21] **M.L.KHENE** « Modélisation des phénomènes électromagnétique dans les structures a géométries complexes par adaptation de la méthode des volumes finis » thèse de Magister, Université de Batna, Juin 2006.

- [22] **Rouahna Farhat** « Calcul Analytique des Pertes dans les Matériaux Supraconducteurs à Haute Température Critique (SHTc) » Mémoire de Mastère, Université de Biskra, 05 Juin 2012.
- [23] **Olivier BELMONT** « Limitation de Courant à base d'oxydes Supraconducteurs 100 A-1 KV » Thèse de Doctorat, l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 12 Mai 1999.
- [24] **BOUNOUIRA ADLANE** « Etude de la Stabilité Transitoire des Réseaux Electriques » Mémoire de Master, L'Université de Constantine I, 2013/2014.
- [25] **MERZOUGUI Hadjer** « Etude de la stabilité transitoire d'un réseau avec intégration des sources renouvelables » Mémoire de Master, L'Université de Annaba, juin 2018.
- [26] **FERGANE Manel**, «Les Méthodes D'amélioration De La Stabilité Dynamique Dans Les Réseaux Electriques » Thème de Magister, L'Université de Sétif, 29/12/2014.
- [27] **M'HAMMEDI Hamid** « Amélioration de la stabilité du réseau électrique par l'utilisation des systèmes FACTS » Mémoire de Master, L'Université d'Adrar, 2016/2017.
- [28] **Kamel SAOUDI** « Stabilisateurs intelligents des systèmes électro-énergétiques » Thèse de Doctorat, L'Université de SETIF, 02 Novembre 2014.
- [29] **Rabah BENABID** « Optimisation Multi objectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux Electriques » Mémoire de Magister, Université de Laghouat, 04/09/2007.
- [30] **H. SAADAT** « Power system analysis 2nd edition » Milwaukee School of Engineering,
- [31] **BEN HAKKOUM Med Abdelilah, LEGOUGUI Ali** « Compensation de l'énergie réactive d'un réseau IEEE par system FACTS » Mémoire Master, Université Kasdi Merbah, Ouargla, May2016.
- [32] **Federico Milano**, Documentation de la version du PSAT 2.1.8.

**MEMOIRE DE DE FIN D'ETUDE EN VU DE L'OBTENTION DU DIPLOME  
MASTER EN ELECTROTECHNIQUE**

**SPECIALITE : Réseaux Electriques**

Proposé et dirigé par : **Dr. Salah BELKHIRI**

Présenté par : **Malek BOUROUBI**

**Asma HERABI**

**THEME :**

**Amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques par  
SFCL en présence du défaut de court-circuit**

**Résumé :**

Avec l'augmentation de la puissance, le développement des interconnexions et le fait que les réseaux sont de plus en plus maillés, les différents appareillages, doivent être capable de supporter des courants de court-circuit de plus en plus importants. Les limiteurs supraconducteurs sont des appareils autonomes et répétitifs qui n'ont pas besoin de moyen de détection du défaut, alors sont parfait pour la limitation et par conséquent la protection.

L'objectif principal de ce travail est la modélisation des supraconducteurs, particulièrement du limiteur de courant. Après avoir pris un aperçu qui explique le comportement et un modèle mathématique de limiteur supraconducteur du courant, à la fin un modèle sur un système triphasé à travers un logiciel de simulation PSAT sur MATLAB est exposé.

**Mots clés :** Réseau Electrique, Limiteur de courant de défaut supraconducteur, supraconducteur à haut température critique, résistivité, jeu de barre.

## ملخص

مع زيادة الطاقة وتطور الترابط وحقيقة أن الشبكات أصبحت أكثر وأكثر تشابكًا ، يجب أن تكون الأجهزة المختلفة قادرة على تحمل تيارات ماس كهربائي كبيرة بشكل متزايد. محددات التوصيل الفائقة هي أجهزة قائمة بذاتها ومتكررة لا تحتاج إلى وسائل للكشف عن الأخطاء ، لذا فهي مثالية للحماية

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو نمذجة الموصلات الفائقة ، ولا سيما المحدد الحالي. بعد أخذ نظرة عامة تشرح السلوك والنموذج الرياضي للمحدد الحالي فائق التوصيل ، ينتهي الأمر بنموذج على نظام ثلاثي الطور من خلال برنامج محاكاة PSAT. على MATLAB

**الكلمات المفتاحية :** شبكة كهربائية، محدد التيار الخاطئ الفائق التوصيل ، الموصل الفائق ذو درجة الحرارة العالية الحرجة ، المقاومة ، قضيب التوصيل.