

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**

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME  
MASTER EN GENIE ELECTRIQUE**

**OPTION: RESEAUX ELECTRIQUES**

## **THEME**

---

**Modélisation des matériaux supraconducteurs application a la  
limitation de courant de défaut dans un réseau électrique à neuf  
(09) jeux de barres**

---

**Proposé et dirigé par :**

Mr. BELKHIRI Salah

**Présenté par :**

Mr. DAHMANI Hemza

Mr. DOUMIR Souheyb



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# DEDICACE

Avant tout, je tiens à remercier le bon Dieu, et l'unique qui m'offre le courage et la volonté nécessaire pour affronter les différentes difficultés de la vie.

Je dédie ce modeste travail

A nos très chers parents, que dieu les garde et les protège pour leurs soutien moral et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.

A nos frères et nos sœurs.

A toutes nos familles.

A nos amis et nos collègues de la promotion 2018 « Réseaux  
Electrique »

A tous les musulmans dans le monde entier.

# REMERCIEMENT

Nous rendons nos profondes gratitude à Dieu qui nous a aidés à réaliser ce modeste travail.

Nous exprimons nos profondes gratitude à nos parents pour leurs encouragements, leurs soutiens et pour les sacrifices qu'ils ont enduré.

Nous remercions notre encadreur Mr. BELKHIRI Salah pour les efforts qu'il a déployé, pour nous aider, conseiller, encouragerait corriger.

Nous tenons à remercier les membres de jury d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Nous remercions aussi tout le corps enseignant et administratif qui a contribué à notre formation universitaire.

Un remerciement spécial aux étudiants de la 2<sup>ème</sup> année Master de la spécialité de génie électrique spécifiquement réseaux électriques.

Sans oublier tous nos amis.

## Table des Matières

INTRODUCTION GENERALE :	2
-------------------------	---

### CHAPITRE I : Généralités sur la Supraconductivité

I.1. Introduction :	5
I.2. Historique de la supraconductivité :	5
I.3. Théorie de BCS	6
I.4. Propriétés élémentaires des matériaux supraconducteurs :	7
I.4.1. Résistivité électrique	7
I.4.2. Le diamagnetisme	8
I.5. Les types de supraconducteurs :	9
I.5.1. Supraconducteurs de type I	9
I.5.2. Supraconducteurs de type II	10
I.5.3. Matériaux à haute température critique	11
I.6. Grandeurs Critiques :	12
I.6.1. Température Critique	12
I.6.2. Champ Magnétique Critique	13
I.6.3. Densité de courant critique	13
I.6.4. Surface critique	14
I.7. Mobilité des vortex	15
I.8. Passage du courant dans un fil supraconducteur :	15
I.9. Transition de l'état supraconducteur à l'état normal :	16
I.10. Conclusion :	16

### CHAPITRE II : Modélisation des Matériaux Supraconducteurs

II.1. Introduction	18
II.2. Equations mathématiques régissent le phénomène physique :	18
II.2.1. Relation $B(H)$	18
II.2.2. Relation $E(J)$	19
II.3. Les Modèles de comportement :	20
II.3.1. Modèle de l'état critique	20
II.3.2. Modèle de Bean	20
II.3.2. Loi de KIM	21
II.3.3. Modèle de puissance	21
II.3.4. Modèle de Flux Flow et Flux Creep	21
II.3.5. Modèle de résistance variable	22
II.4. Principales applications des supraconducteurs :	23
II.4.1. Applications en vie quotidienne	24
II.4.1.1. Les applications médicales	24
II.4.1.2. Les moyens de Transport	24
II.4.2. Applications en électrotechnique	25
II.4.2.1. Machines tournantes	25

II.4.2.2.Câbles de transport.....	26
II.4.2.3.Stockage d'énergie .....	26
II.4.2.4.Les transformateurs.....	27
II.4.2.5.Limitation de courant.....	27
II.5.Conclusion : .....	27

### CHAPITRE III : Limitation de Courant de Défaut

Introduction.....	29
III.2.Limitation de courant dans les réseaux électriques : .....	29
III.2.1.Les différents réseaux et leurs niveaux de tension .....	29
III.2.2.Les défauts .....	30
III.2.3.L'élimination des défauts .....	31
III.2.4.Les courant des défaut.....	32
III. 3. Principe général des limiteurs de courant : .....	33
III. 3.1. Limiteurs de courant classiques.....	33
III.3.1.1. Réactance série .....	33
III.3.1.2. Limiteur à redresseurs commandés .....	34
III.3.1.3. Résistance .....	35
III.3.1.4. Résistance variable .....	35
III. 3.2. Limiteurs de courant supraconducteurs.....	36
III. 3.2.1. Différents types de limiteur de courant supraconducteur .....	37
III. 3.2.2. Comparaison des différents SFCL.....	41
III.4. Insertion du limiteur de courant dans le réseau électrique : .....	42
III.5.Conclusion : .....	43

### CHAPITRE IV : Simulation du Courant de Défaut

IV.1.Introduction .....	45
IV.2. Simulation et discussion des résultats: .....	46
IV.2Résultats de Simulation du Circuit Sans Défaut : .....	48
IV.2.1Circuit Sans Défaut et Sans Limiteur : .....	50
IV.2.2Circuit Sans Défaut et Avec Limiteur : .....	50
IV.3 Résultats de simulation du Circuit Avec Défaut : .....	53
IV.3.1Court Circuit Biphase :.....	53
IV.3.3 Court de circuit Triphasé :.....	59
IV.3.3.1 Circuit avec Défaut et Sans Limiteur : .....	59
IV.3.3.2 Circuit avec Défaut et Avec Limiteur : .....	62
IV.4 Conclusion :.....	65
CONCLUSION GENERALE : .....	67

## Liste des Figures

Figure I.1. Résistivité d'un supraconducteur en fonction de la température.....	7
Figure I.2. Différence entre un conducteur parfait et un supraconducteur.....	8
Figure I.3. caractéristique B(H) d'un supraconducteur de type I.....	9
Figure I.4. Diagramme de phase d'un supraconducteur de type II .....	10
Figure I.5. Surfaces critiques des principaux supraconducteurs.....	12
Figure I.6. Dépendance de la résistivité en fonction de la température.....	12
Figure I.7. Représentation les types de la supraconductivité en fonction du champ.....	13
Figure I.8 La caractéristique tension courant pour un fil supraconducteur .....	14
Figure I.9. Surfaces critiques des principaux supraconducteurs.....	14
Figure I.10 Caractéristique E(J) d'un supraconducteur avec activation thermique.....	15
Figure I.11.a : Passage du courant dans un supraconducteur de type I.....	15
Figure I.11.b : Passage du courant dans un supraconducteur de type II .....	15
Figure II.1 Caractéristique B(H) d'un supraconducteur.....	18
Figure II.2 Caractéristique (J) d'un supraconducteur .....	19
Figure II.3 Modèle de Bean.....	20
Figure II.4 : modèle de Flux Flow et Creep. ....	22
Figure II.5 : Modèle de résistance variable . ....	23
Figure III.1 Hiérarchisation par niveau d'un réseau de transport et de distribution d'électricité. ....	30
Figure III.2 Cycle OFOFOF pour une ligne aérienne. ....	31
Figure III.3 Cycle OFOF pour une ligne souterraine. ....	31
Figure III.4. Limitation de courant par transformateur court-circuité, .....	34
Figure III.5. Limitation de courant par thyristors contrôlant un circuit raisonnant, .....	34
Figure III.6. Courants de court circuit avec et sans limiteur , .....	36
Figure III.7. Principe du limiteur de courant résistif, .....	37
Figure III.8. Principe du limiteur de courant inductif, .....	39
Figure III.9. Principe du limiteur de courant de type pont redresseur, .....	39
Figure III.10.Principe du limiteur de courant de type contrôleur de courant de défaut, ....	40
Figure III.11. Principe du limiteur de courant du type noyaux magnétiques saturés, .....	41
Figure III.12. Insertion de limiteurs de courant de défaut dans un réseau, . ....	42
Figure IV.1 : Circuit de simulation Sans Limiteur. ....	46
Figure IV.2 : Circuit de simulation Avec Limiteur. ....	47
Figure IV.5 : L'allure des courants $I_4$ , $I_5$ , $I_6$ de la ligne (7-8). ....	49
Figure IV.7 : Circuit de simulation Sans Défaut et Avec limiteur. ....	50
Figure IV.8 : L'allure des courants $I_1$ , $I_2$ , $I_3$ de la ligne (4-7). ....	51
Figure IV.10 : L'allure des courants $I_4$ , $I_5$ , $I_6$ de la ligne (7-8). ....	52
Figure IV.12 : Circuit avec Défaut Biphase Sans Limiteur.....	53
Figure IV.13 : L'allure des courants $I_1$ , $I_2$ , $I_3$ de la ligne (4-7). ....	54
Figure IV.14 : L'allure des tensions $U_{12}$ , $U_{23}$ , $U_{13}$ de la ligne (4-7). ....	54
Figure IV.15 : L'allure des courants $I_4$ , $I_5$ , $I_6$ de la ligne (7-8). ....	55
Figure IV.16 : L'allure des tensions $U_{12}$ , $U_{23}$ , $U_{13}$ de la ligne (7-8). ....	55
Figure IV.17 : Circuit avec Défaut Biphase et Avec Limiteur.....	56
Figure IV.18 : L'allure des courants $I_1$ , $I_2$ , $I_3$ de la ligne (4-7). ....	57
Figure IV.19 : L'allure des tensions $U_{12}$ , $U_{23}$ , $U_{13}$ de la ligne (4-7). ....	57
Figure IV.20 : L'allure des courants $I_4$ , $I_5$ , $I_6$ de la ligne (7-8). ....	58
Figure IV.21 : L'allure des tensions $U_{12}$ , $U_{23}$ , $U_{13}$ de la ligne (7-8). ....	58

Figure IV.22 : Circuit avec Défaut Triphasé et Sans Limiteur.....	59
Figure IV.23 : L'allure des courants $I_1, I_2, I_3$ de la ligne (4-7).....	60
Figure IV.24 : L'allure des tensions $U_{12}, U_{23}, U_{13}$ de la ligne (4-7).....	60
Figure IV.25 : L'allure des courants $I_4, I_5, I_6$ de la ligne (7-8).....	61
Figure IV.26 : L'allure des tensions $U_{12}, U_{23}, U_{13}$ de la ligne (7-8).....	61
Figure IV.27 : Circuit avec Défaut Triphasé et Avec Limiteur.....	62
Figure VI.28 : L'allure des courants $I_1, I_2, I_3$ de la ligne (4-7).....	63
Figure IV.29 : L'allure des tensions $U_{12}, U_{23}, U_{13}$ de la ligne (4-7).....	63
Figure IV.30 : L'allure des courants $I_4, I_5, I_6$ de la ligne (7-8).....	64
Figure IV.31 : L'allure des tensions $U_{12}, U_{23}, U_{13}$ de la ligne (7-8).....	64

## Liste des tableaux

Tableau I. Liste de quelques matériaux supraconducteurs de type I. ....	10
Tableau II. Températures critiques de quelques matériaux à haute température critique.....	11

## Symboles

Indice	Mot clé	Unité
t	Temps	[s]
T	Temperature	[K]
T <sub>C</sub>	Temperature critique	[K]
B	Induction magnétique	[T],[mT]
B <sub>a</sub>	Induction appliquée	[T],[mT]
Z	L'impédance de la charge	[ Ω ]
Z <sub>n</sub>	L'impédance de neutre	[ Ω ]
Z <sub>cc</sub>	L'impédance de court-circuit	[ Ω ]
R	Résistance électrique	[ Ω ]
H	Champ magnétique	[A/m]
H <sub>C</sub>	Champ magnétique critique	[A/m]
L	Inductance	[ H ]
L <sub>f</sub>	Inductance de fuite	[ H ]
L <sub>m</sub>	L'inductance magnétisante	[ H ]
HTC	Haute température critique	/
J	Densité de courant	[A/m <sup>2</sup> ]
I <sub>c</sub>	Intensité critique	[A]
I <sub>CC</sub>	Intensité courant de court-circuit	[A]
J <sub>c</sub>	Densité de courant critique	[ A/m <sup>2</sup> ]
ρ	Résistivité électrique	[Ω. m]
ρ <sub>n</sub>	Résistivité électrique à l'état normal	[Ω. m]
ρ <sub>FF</sub>	Résistivité électrique de Flux Flow	[Ω. m]
E	Champs électrique	[V. m]
C	La capacité homopolaire du réseau	[F]
P	La puissance active	[W]
Q	La puissance réactive	[W]
P <sub>CC</sub>	La puissance de court-circuit	[W]
E <sub>C</sub>	Champs électrique pour lequel le courant critique est défini	[V. m]
TAFF	Thermally Activated Flux Flow	/
H <sub>c1</sub>	Champ critique 1	[A/m]

---

Hc <sub>2</sub>	Champ critique supérieur	[A/m]
LTS	Low Temperature Superconductors	/
SFCL	Superconductor fault current limiter	/
HTS	High Temperature Superconductors	/
V	Tension	[V]
$\Sigma$	Conductivité électrique	[S/m]
$\mu_0$	Perméabilité magnétique du vide	[H/m]
M	Aimantation	[A/m]
N	Valeur de puissance	/
LHC	Large Hadron Collider	/
ITER	Thermonuclear Experimental Reactor	/
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage	/
LS	Limiteur supraconducteur	/
JB	Jeu de barre	/
TP	Transformateur de puissance	/
G	Générateur	/
THT	Très Haute Tension	[V]
Un	Tension nominale	[V]
L	La longueur	[m]
S	La section	[m <sup>2</sup> ]
F	La force	[N]
Y	L'admittance	[S]



**INTRODUCTION  
GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE :

Le phénomène de la supraconductivité a été découvert en 1911 a fortement relancé l'intérêt des supraconducteurs. Cependant, la plupart des applications de ces matériaux nécessitent une flexibilité et une résistance mécanique particulières. Les propriétés physiques justifient la récente mise en œuvre et le développement des supraconducteurs déposés sous forme de couche mince. Ces supraconducteurs sont constitués d'un film supraconducteur déposé sur un substrat métallique flexible via une couche tampon, puis recouvert d'un shunt protecteur.

Les applications des supraconducteurs en électrotechnique ne cessent d'évoluer et sont actuellement envisageables et certains prototypes sont même commercialisés. Les propriétés exceptionnelles de ces matériaux peuvent être utilisées dans la production, le transport et le stockage de l'énergie électrique. Cependant, l'application la plus prometteuse semble être la protection des réseaux par l'utilisation des limiteurs supraconducteurs de courant. Ces dispositifs apportent une solution nouvelle et inaccessible par les techniques conventionnelles. En effet, ils possèdent une résistance nulle dans leurs régimes assignés, mais développent naturellement et rapidement une résistance élevée et par conséquent un champ électrique au moment des défauts dans le réseau électrique, [1].

Les courants de court-circuit des réseaux électriques n'ont cessé de croître pour répondre à l'augmentation de la consommation tout en produisant une meilleure qualité d'énergie. Le nouveau paysage énergétique via la libéralisation du marché de l'énergie électrique, ouvre la voie à une production décentralisée très diversifiée. La protection de ces réseaux nécessite donc l'utilisation de nouveaux systèmes complémentaires aux appareils de protections classiques, limitant rapidement et efficacement le courant de court-circuit. Les limiteurs de courants de défaut supraconducteurs ont doublé avantages.

L'objectif de notre travail de mémoire est de modéliser le comportement électrique et thermique du limiteur de courant supraconducteur, le modèle développé doit décrire le comportement réel du limiteur supraconducteur, et il doit être simple à intégrer dans n'importe quel type de réseau électrique monophasé ou triphasé.

La limitation de courant permettrait de réduire les contraintes électromagnétiques supportées transitoirement par les organes d'un réseau de distribution électrique. Pour réaliser cette limitation, il est possible d'utiliser la transition naturelle d'un matériau de son état supraconducteur vers son état résistif. L'impédance de ligne des réseaux électriques de distribution à Haute Tension (H.T.) est généralement élevée, à la fois pour faciliter la régulation de tension (la gamme de variation de la chute de tension est directement

Proportionnelle à l'impédance de ligne du réseau), mais aussi pour limiter les pertes. Les réseaux ne sont cependant pas à l'abri de défauts (court-circuit ou défauts impudents) et donc de contraintes électromécaniques et électrothermiques bien plus importantes que celles supportées en régime nominal. En pratique, le courant de défaut peut valoir de vingt à trente fois la valeur du courant nominal.

Le limiteur de courant se fonde lorsque le courant devient anormalement élevé, la transition de l'état supraconducteur vers un état fortement dissipatif permet l'insertion d'une impédance dans un circuit électrique et donc la limitation du courant.

L'objectif de notre travail du mémoire est de modéliser le comportement électrique du limiteur de courant supraconducteur, le modèle développé doit décrire le comportement réel du limiteur supraconducteur, et il doit être simple à intégrer dans n'importe quel type de réseau électrique.

Dans le cadre de cette étude sur les limiteurs supraconducteurs de courant de défaut, ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres suivants :

Le premier chapitre est une introduction générale sur la supraconductivité. Nous présenterons ce phénomène physique, son historique avec leurs types et caractéristiques ainsi que des introductions à leurs techniques de mise au point.

Dans le deuxième chapitre nous allons exposer les modèles mathématiques qui permettent de modéliser les dispositifs comprenant des matériaux supraconducteurs. Il s'agit des équations de Maxwell couplées aux modèles mathématiques qui reflètent de façon satisfaisante les régimes Flux-Flow-Creep des supraconducteurs, principalement le modèle en loi de puissance  $E(J)$ . Nous présentons aussi le modèle mathématique qui permet de modéliser les deux comportements : magnétique et électrique ; ensuite nous terminerons par les principales applications des supraconducteurs.

Le troisième chapitre est une présentation du phénomène de la limitation de courant de défaut. Nous parlerons de ces avantages et du principe de fonctionnement des limiteurs.

Nous donnerons ensuite un état de l'art complet des limiteurs supraconducteurs et nous conclurons par une comparaison des différentes solutions techniques.

Dans le quatrième chapitre nous présentons les résultats de simulation obtenus lors d'un défaut sur un réseau électrique sans et avec limiteur de courant en utilisant le logiciel PSIM. Finalement, une conclusion générale résumant l'essentiel de notre travail à travers ce mémoire et les perspectives envisagées seront présentés.

# CHAPITRE I

## GENERALITE SUR LA SUPRACONDUCTIVITÉ

## I.1. Introduction :

La supraconductivité est la propriété que possèdent certains matériaux à ne s'opposer au passage du courant, c'est-à-dire à avoir une résistance nulle, à condition que leur température soit inférieure à une certaine valeur appelée température critique ( $T_c$ ). Ces matériaux s'opposent également aux champs magnétiques externes. Ce phénomène a lieu à des températures très basses. Les courants électriques peuvent donc circuler à travers un métal sans aucune dissipation d'énergie.

## I.2. Historique de la supraconductivité :

Le phénomène de la supraconductivité a été découvert en 1911 par le physicien hollandais Heike Kamerlingh Onnes, lors de la liquéfaction de l'hélium, il constate que la résistivité chute brutalement à zéro. Ainsi un courant électrique continu peut circuler quasi indéfiniment sans dissipation d'énergie.

On dit qu'il y a transition de l'état normal de conducteur vers l'état supraconducteur. Cette transition intervient à une température appelée *température critique*.

En 1933, W. Meissner et R. Ochsenfeld [2], observent qu'hormis les qualités exceptionnelles de conduction de ces métaux, ils possèdent la propriété d'exclure toute pénétration d'un champ magnétique extérieur grâce à la circulation de super-courants dans le supraconducteur. Cet effet de non-pénétration du champ magnétique est nommé effet Meissner.

Une théorie microscopique (BCS) portant les noms de ses auteurs [3], a été émise en 1957 par John Bardeen, Leon N. Cooper et John Schrieffer (tous trois prix Nobel de physique en 1972) pour expliquer la supraconductivité. Cette théorie explique qu'à très basse température, les électrons s'apparient, c'est-à-dire se mettent en couple. On dit qu'ils forment des paires de Cooper. Cet état ordonné résulte de l'existence d'une attraction entre électrons par l'intermédiaire des vibrations du réseau atomique qu'on peut schématiser ainsi: un électron de conduction se déplaçant dans le métal provoque sur son passage une déformation locale et momentanée du réseau par l'attraction qu'il exerce sur les ions positifs. Ces ions se déplaçant créent un excédent de charge positive. Un deuxième électron sera soumis à cet excédent de charge positive qui a fait écran à la charge négative du premier électron.

Comme les électrons circulent beaucoup plus vite que les ions (qui sont nettement plus lourds), le deuxième électron subit l'effet prolongé de la charge positive quand le premier électron est loin de lui. L'interaction entre les deux électrons a donc une grande portée.

Les paires d'électrons ainsi formées se déplacent sans dissipation d'énergie dans le réseau cristallin. Les électrons sont des fermions, c'est-à-dire des particules qui ne peuvent se trouver au même endroit dans le même état physique. Mais la véritable explication théorique de la supraconductivité à très basse température repose sur le fait que les paires de Cooper, constituées de deux électrons, forment en définitive des bosons qui, eux, peuvent se trouver en grand nombre dans le même état physique, en l'occurrence dans un état de plus basse énergie. Elles ne peuvent alors pas perdre d'énergie par dissipation, et se propagent donc sans résistance. Tout se passe comme si, pour elles, tous les mécanismes de perte avaient disparu. Cette agglomération d'un grand nombre d'électrons appariés dans un seul et même état physique est ce que les physiciens appellent une condensation de Bose-Einstein. Avec cette théorie, le mécanisme de la supraconductivité ne permettait pas d'obtenir des températures critiques supérieures à une trentaine de Kelvins (au-delà, l'agitation thermique casse les paires). Pour cette raison la découverte en 1986 par Johannes Georg Bednorz et Karl Alexander Müller [4], de la supraconductivité dans un oxyde synthétique de cuivre, lanthane et baryum à une température critique de 35 K, plus élevée que toutes celles connues jusqu'alors, a eu un retentissement considérable. Cette découverte relance alors la recherche dans ce domaine, et permet la mise en évidence de ce phénomène jusqu'à 164 K, en 1998.

### **I.3. Théorie de BCS :**

Il a fallu attendre 1957 pour voir un modèle microscopique de supraconductivité élaboré par J. Bardeen, L.N. Cooper et J.R. Schrieffer [5]. Même si cela a été prouvé à échouer dans l'explication des mécanismes de la supraconductivité haut-T<sub>c</sub> et d'autres matériaux supraconducteurs exotiques, il est encore largement appliqué formalisme pour interpréter les résultats expérimentaux et une base de référence pour d'autres théories spécifiques. Comme une partie substantielle de ce travail vise à fournir une formulation généralisée de leur théorie, il convient de donner ici une explication détaillée pour ça.

La théorie BCS repose sur l'idée d'une interaction attractive entre électrons dus aux phonons. Il est bien connu que l'interaction de Coulomb entre deux charges électriques identiques est répulsive. Cependant, dans certaines circonstances et lorsque décrit dans l'espace dynamique, l'attraction efficace peut lier électrons en raison de leur mouvement à travers le réseau ionique. La meilleure façon intuitive de comprendre ce fait est donné par l'image d'un matelas épais et mou sur laquelle sont lancées de lourdes balles: la trajectoire

d'une balle dépression dans laquelle une deuxième balle se déplaçant sur le matelas tomberait comme si les balles attireraient l'un l'autre. L'image microscopique de supraconducteur les métaux sont identiques: les électrons déforment légèrement le réseau cristallin en attirant des noyaux d'ions, créant une zone de plus grande densité de charge positive autour de lui-même; ce l'excès de charge positive attire à son tour un autre électron. Au niveau quantique, ces distorsions et vibrations du réseau cristallin sont appelées phonons. A condition que l'énergie de liaison soit inférieure aux excitations thermiques du treillis qui les briserait, les électrons resteraient appariés; à peu près, cela explique pourquoi la supraconductivité nécessite des températures très basses. Cooper aussi a montré que l'appariement optimal est obtenu par des électrons avec des spins opposés et les moments. [6]

## I.4. Propriétés élémentaires des matériaux supraconducteurs :

### I.4.1. Résistivité électrique

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 ( $T_c$ ) est la caractéristique la plus connue de ces matériaux (Figure I.1). Une autre propriété est le diamagnétisme parfait sous certaines conditions de champ magnétique, [7].

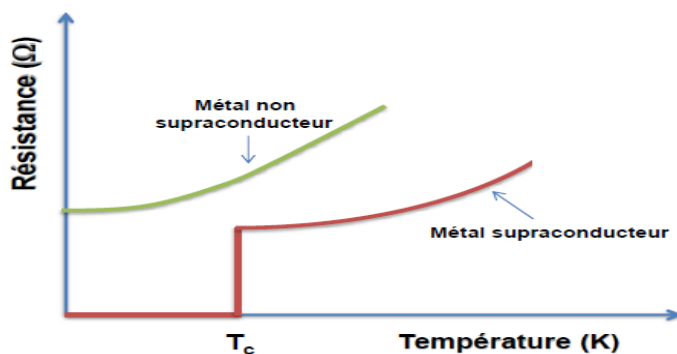


Figure I.1. Résistivité d'un supraconducteur en fonction de la température, [7].

### I.4.2. le diamagnétisme:

Si la chute brutale de la résistivité reste la manifestation la plus spectaculaire de la supraconductivité, le comportement magnétique tout à fait original des supraconducteurs s'avère être la signature la plus profonde du phénomène [YukikazuIwasa 2009].

En 1933, le centre de supraconductivité se déplace de Leiden à Berlin. C'est là que Walther Meissner et Robert Ochsenfeld découvrent que lorsqu'un conducteur parfait, sous champ nul à température ambiante, est refroidi en dessous de  $T_c$  puis soumis à un champ magnétique (refroidissement hors champ magnétique), des courants d'écrantage vont être induits pour conserver  $B=0$  à l'intérieur du matériau comme montré sur la Figure I.2 a. Si au contraire, le conducteur parfait est soumis à un champ magnétique avant d'être refroidi (refroidissement sous champ magnétique), par la suite, le champ magnétique extérieur est ramené à zéro, dans ce cas, la variation  $dB/dt$  doit être conservée et des courants de piégeage seront induits pour piéger l'induction magnétique à l'intérieur du matériau comme montré dans la Figure I.2 b. Il en va tout à fait différemment dans le cas d'un supraconducteur. Dans le premier cas où le champ magnétique est appliqué après refroidissement, le conducteur parfait et le supraconducteur se comporte d'une manière identique car l'induction magnétique est toujours nulle dans le matériau.

Dans le second cas, c'est-à-dire dans le cas de refroidissement sous champ magnétique, l'induction magnétique est expulsée de l'intérieur du supraconducteur ( $B=0$ ) dès qu'il est refroidi en dessous de sa température critique.

Ce comportement est connu sous le nom d'effet Meissner : il s'agit de l'expulsion de toute induction magnétique de l'intérieur du supraconducteur, qu'elle soit là avant que le spécimen soit devenu supraconducteur ou pas. Le diamagnétisme parfait est une propriété intrinsèque d'un supraconducteur, qui n'est cependant valable que si la température et le champ magnétique sont en tout point inférieurs à leur valeur critique  $T < T_c$ ,  $H < H_c$  [7]

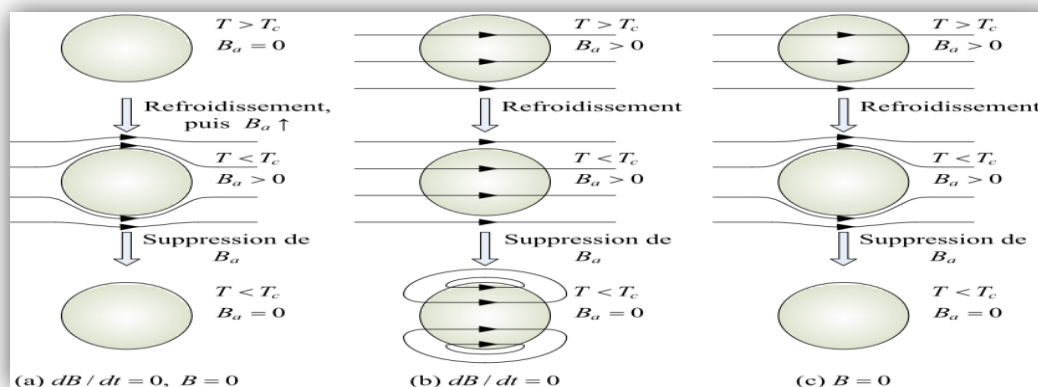


Figure I.2. Différence entre un conducteur parfait et un supraconducteur, [7].

## I.5. Les types de supraconducteurs :

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

### I.5.1. Supraconducteurs de type I

Les supraconducteurs de type I sont caractérisés par un seul champ critique  $H_c$ . Lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique extérieur  $H$  l'induction magnétique  $B$  est nulle à l'intérieur tant que  $H < H_c$  et l'aimantation  $\vec{M} = -\vec{H}$ . Par contre à la surface du matériau dans une épaisseur de l'ordre de  $\lambda_L$  appelée longueur de London, [10], l'induction pénètre le matériau et des courants supraconducteurs d'écrantage se développent.

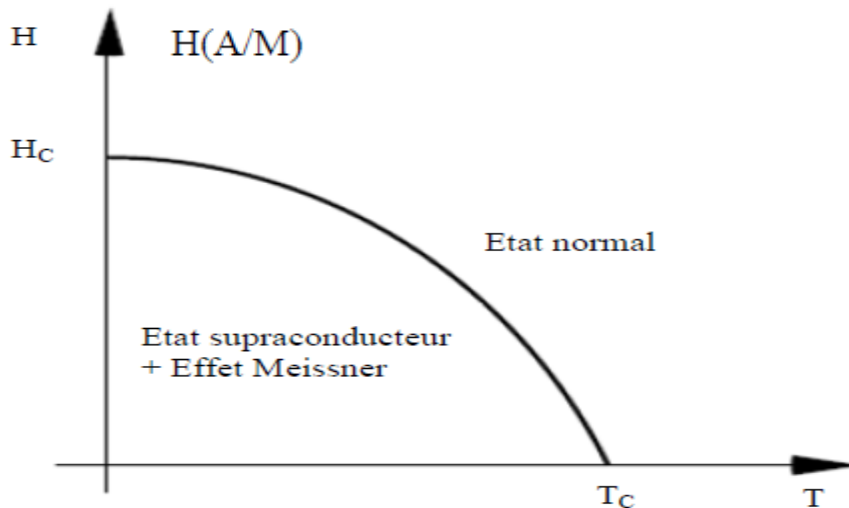


Figure I.3. caractéristique  $B(H)$  d'un supraconducteur de type I, [8].

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

Tableau I. Liste de quelques matériaux supraconducteurs de type I.

Eléments	Température critique (k)
Carbon (C)	15
Lead (Pb)	7,2
Lanthanum (La)	4,9
Mercury (Hg)	4.15
Aluminum (Al)	1,175
Zinc (Zn)	0,85
Uranium (U)	0,20
Rhodium (Rh)	0,000325

### I.5.2. Supraconducteurs de type II

On retiendra de ce qui précède qu'un supraconducteur de type I est un diamagnétique parfait (expulsion du champ magnétique) aussi bien qu'un conducteur parfait (résistivité nulle). Il existe toutefois d'autres supraconducteurs, dits de *type II*, dont les caractéristiques ne sont pas aussi simples.

Une première partie des matériaux de cette catégorie est composée de supraconducteurs dits *classiques*. Bien que découverts il y a plusieurs décennies, ils occupent aujourd'hui encore une grande place dans les applications industrielles de la supraconductivité. Les plus importants d'entre eux sont les alliages à base de niobium tel que le Nb<sub>3</sub>Sn, le Nb<sub>3</sub>Ge (qui possède la plus haute température critique de cette classe de supraconducteurs :  $T_c = 23.4$  K), ou encore les alliages Nb-Ti.

Une autre classe importante de matériaux de type II, beaucoup plus récente, est celle des supraconducteurs dits à *Haute température critique* (HTc)

Le diagramme de phases d'un supraconducteur de type II est plus complexe que celui d'un supraconducteur de type I. Même si l'état Meissner existe aussi, il est séparé de l'état normal par une zone supplémentaire, souvent appelée *état mixte*. On se trouve donc en présence de deux champs critiques différents, notés  $H_{c1}$  et  $H_{c2}$  :

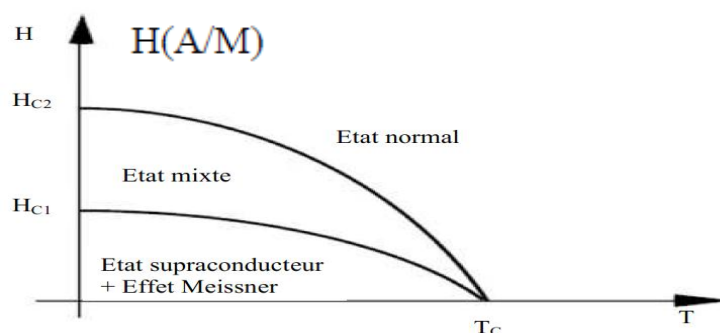


Figure I.4. Diagramme de phase d'un supraconducteur de type II, [9].

Dans l'état mixte, le champ magnétique pénètre l'échantillon localement, sous la forme de "lignes de flux" isolées. Ces lignes sont entourées de courants circulaires locaux, d'où leur nom de *vortex* (par analogie avec les tourbillons que l'on trouve dans les fluides). A l'intérieur de ces vortex, l'échantillon est dans l'état normal (c'est-à-dire non supraconducteur).

Ces petits "tubes" de champ magnétique ont la propriété de tous contenir exactement le même flux ; les vortex ont une importance fondamentale dans le comportement des supraconducteurs de type II, aussi bien sur le plan des propriétés magnétiques qu'électriques

### I.5.3. Matériaux à haute température critique

Les supraconducteurs se distinguent également par leurs  $T_c$ . En dessous de 30 K ce 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. Les développements de conducteurs à haut  $T_c$  se concentrent autour des matériaux sans éléments toxiques, à savoir les composés au bismuth Bi (BiSrCaCuO) et de type ReBaCuO, où Re est une terre rare, très souvent l'yttrium (Y), mais d'autres éléments sont aussi utilisés (Nd, Gd, Sm, ...).

Les supraconducteurs à haute température critique sont des composés intermétalliques, donc très fragiles mécaniquement, comme le Nb<sub>3</sub>Sn. Leur structure est de type pérovskite. Ce sont des oxydes de cuivre ou cuprates formés de  $n$  plans CuO<sub>2</sub> (les plans  $ab$ ), séparés par des atomes d'yttrium (ou une autre terre rare) ou de calcium et intercalés entre deux blocs identiques d'extrémité qui contiennent des métaux ou des terres rares et de l'oxygène, [14].

**Tableau II. Températures critiques de quelques matériaux à haute température critique**

Éléments	Température critique (k)
La <sub>2-x</sub> Sr <sub>x</sub> CuO <sub>4</sub>	38
Eu <sub>2</sub> Ba <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>10-x</sub>	43
Pb <sub>2</sub> Sr <sub>2</sub> YCu <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	70
Yba <sub>2</sub> Cu <sub>4</sub> O <sub>8</sub>	80
Yba <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>6+x</sub>	92
Bi <sub>2</sub> Sr <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>10</sub>	110
Tl <sub>2</sub> Ba <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>10</sub>	125
HgBa <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>8+x</sub>	135

## I.6. Grandeurs Critiques:

L'état supraconducteur non dissipatif est limité par trois grandeurs, appelées grandeurs critiques, au-delà desquelles le matériau passe dans un état fortement dissipatif. Il s'agit de la densité de courant critique  $J_c$ , de la température critique  $T_c$ , et du champ magnétique  $H_c$ . Ces trois grandeurs sont fonction les unes des autres et forment ainsi une surface critique au-delà de laquelle le matériau cesse d'être non dissipatif. La figure I.5 représente la surface critique de quelques matériaux supraconducteurs, refroidis à l'azote liquide et l'hélium liquide, [10].

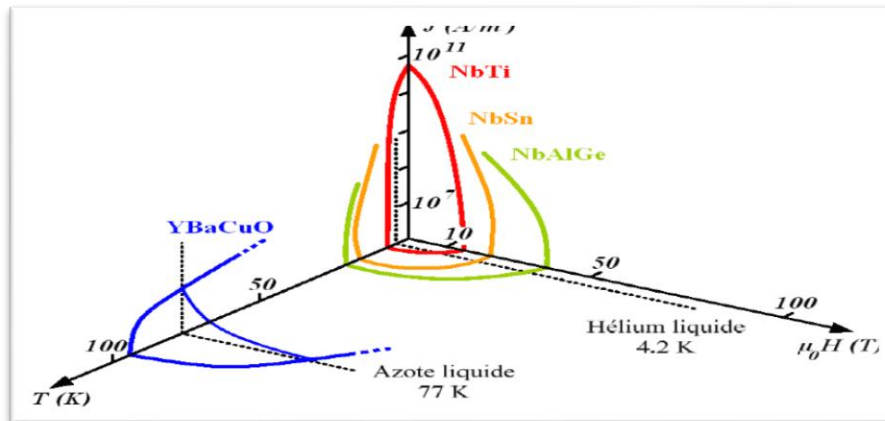


Figure I.5. Surfaces critiques des principaux supraconducteurs, [10].

### I.6.1. Température Critique

L'état de supraconductivité caractérise la plupart des métaux à condition que la température soit très proche de 0 K. La température en dessous de laquelle un matériau devient supraconducteur est nommée température critique.  $T_c$  est également la température de transition qui délimite l'état supraconducteur de l'état normal. A noter que la supraconductivité est obtenue aux températures  $T_c$  plus élevées pour les métaux mauvais conducteurs dans l'état normal, comme par exemple le mercure et le plomb.

Proche de  $T_c$  la variation de la résistivité en fonction de la température est très rapide (voir Figure I.6).

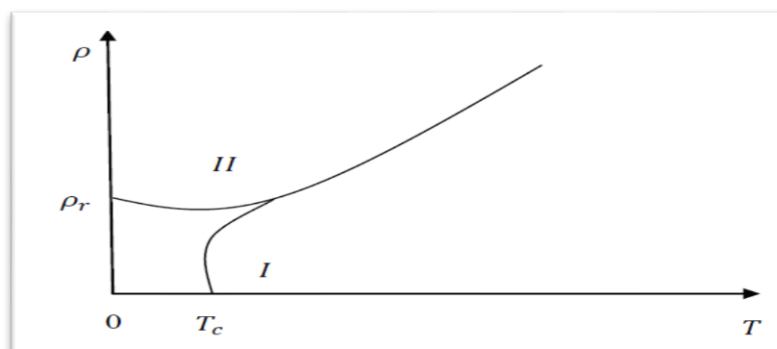


Figure I.6. Dépendance de la résistivité en fonction de la température, [11].

La température a une influence importante sur les autres caractéristiques d'un matériau Supraconducteur comme le magnétique, la résistivité ou la profondeur de pénétration, [11].

### I.6.2. Champ Magnétique Critique

L'état supraconducteur peut disparaître pour un champ magnétique extérieur d'une certaine intensité  $H_c$  dépendant de la température. Dans la Figure I.6, la courbe  $H_c(T)$  divise le quadrant  $H(T)$ , ( $H > 0$ ,  $T > 0$ ), en deux régions ; état supraconducteur et état normale. La température maximale à laquelle un matériau est supraconducteur est obtenue pour un champ extérieur nul.

Le supraconducteur présente la propriété nommée **effet Meissner Ochsenfeld**, qui consiste à ce que les lignes de champ magnétique sont expulsées du matériau. Ainsi pour  $T$  supérieurs à  $T_c$  le matériau est non magnétique (aimantation nulle), par contre pour  $T$  inférieur à  $T_c$  il est parfaitement diamagnétique (aimantation négative) si le champ magnétique extérieur n'est pas très élevé ( $H < H_c$ ). Le champ critique varie avec la température suivant la loi approximative :

$$H_c(T) = H_0 \left[ 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad (\text{I.1})$$

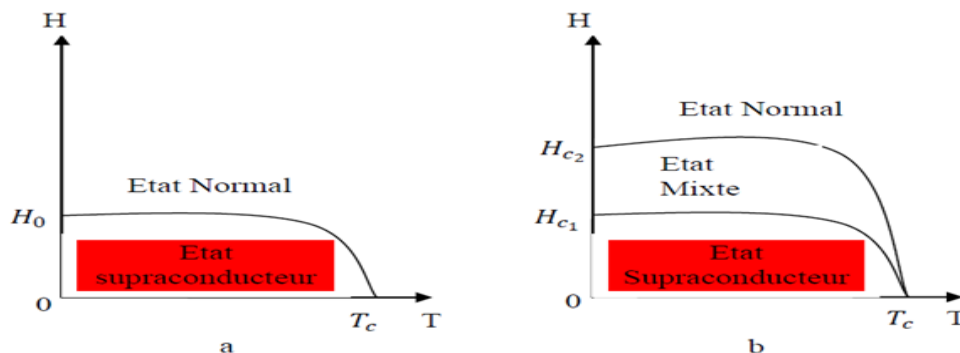


Figure I.7. Représentation les types de la supraconductivité en fonction du champ, [4]

### I.6.3. Densité de courant critique

C'est la grandeur qui limite l'état supraconducteur. La densité de courant critique est la valeur maximale correspondante au-delà de laquelle une résistivité apparaît. Des fils relativement fins réalisés de matériaux supraconducteurs peuvent être employés pour transporter de forts courants puisqu'il n'y a aucune perte d'énergie thermique. Cependant, ces matériaux sont, conçus pour transporter un certain courant maximum limite. Au-dessus de ce courant critique ils cessent d'être supraconducteurs et passent à l'état normal même s'ils sont au-dessous de la température critique.

Ce courant critique représenté par sa densité  $J$  est utilisé dans les limiteurs de courant supraconducteurs.

La densité de courant critique ( $J_c$ ) est une fonction non linéaire de la température et du champ magnétique, Plus le supraconducteur est refroidi, plus le courant à transporter sans transition est élevé. (Figure I.8) représente la tension en fonction du courant circulant à travers un fil supraconducteur

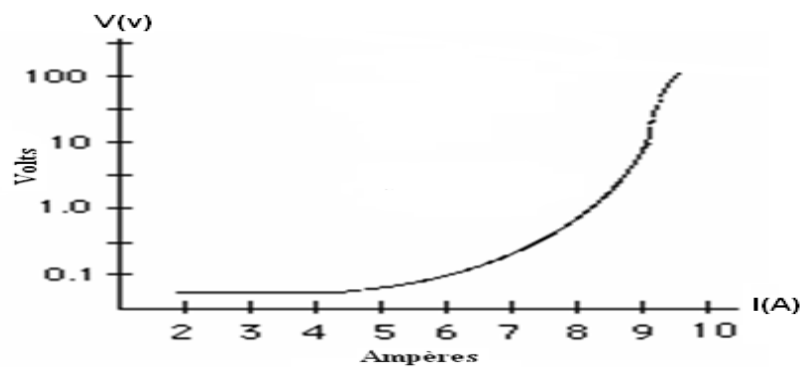


Figure I.8 La caractéristique tension courant pour un fil supraconducteur. [10].

#### I.6.4. Surface critique

Le supraconducteur peut perdre l'effet Meissner dans son état supraconducteur dans l'une des conditions suivantes:

La température du matériau dépasse la température critique  $T_c$ .

Le champ magnétique extérieur appliqué dépasse une valeur critique appelée champ critique  $H_c$ .

La densité de courant dans le matériau devient supérieure à la densité de courant critique  $J_c$ .

Ces trois paramètres  $T_c$ ,  $H_c$  et  $J_c$  permettent de définir le domaine supraconducteur. (Figure I.9), [12].

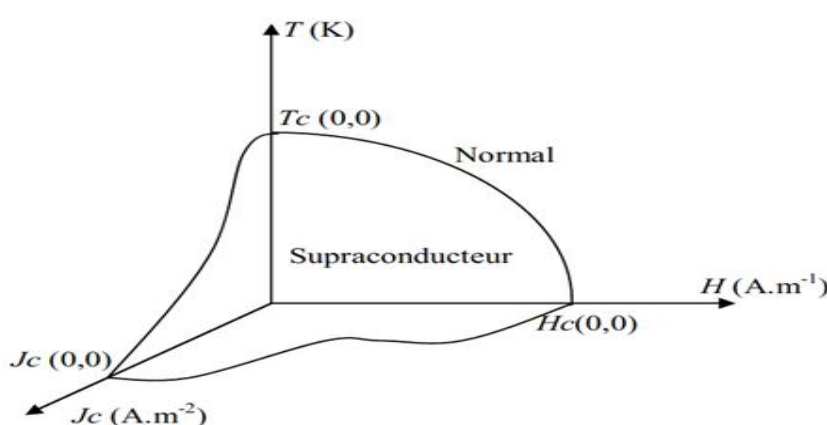


Figure I.9. Surfaces critiques des principaux supraconducteurs, [13].

### 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.

Cette mobilité fait appel à deux types de mouvements appelés : flux flow et flux-creep (Figure I.10), [14].

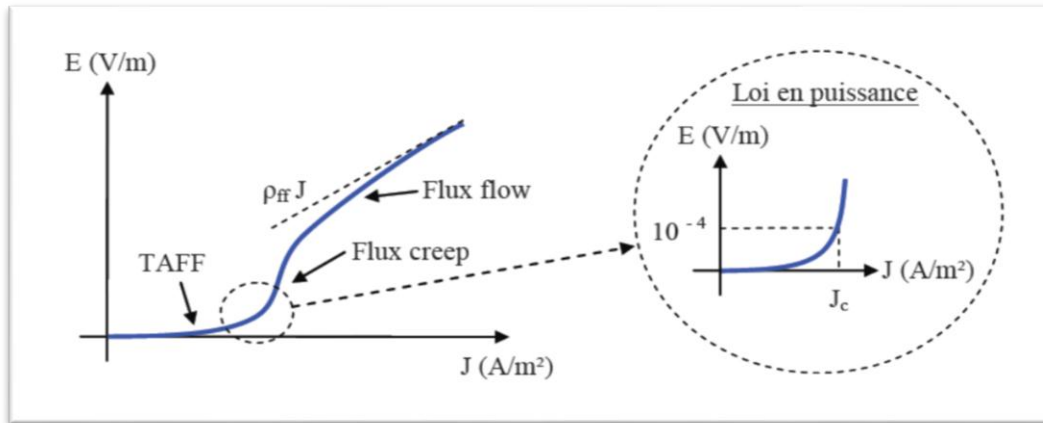


Figure I.10 Caractéristique  $E(J)$  d'un supraconducteur avec activation thermique [11].

### I.8. Passage du courant dans un fil supraconducteur :

Dans un supraconducteur de type I, le courant imposé à un fil se concentrait au voisinage de la surface extérieure dans la zone de London de ce type, avec une densité de courant décroissant exponentiellement à partir de la surface. Par contre, dans le supraconducteur de type II le courant circule dans tout le volume et en particulier à travers la zone de London des vortex, [15].

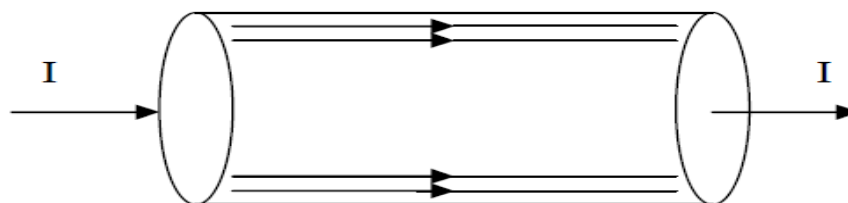


Figure I.11.a : Passage du courant dans un supraconducteur de type I.

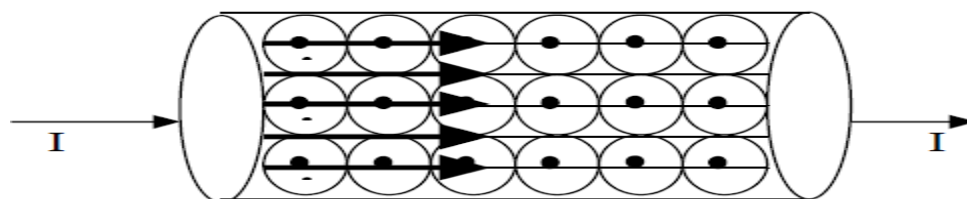


Figure I.11.b : Passage du courant dans un supraconducteur de type II.

## I.9. Transition de l'état supraconducteur à l'état normal :

Les matériaux supraconducteurs présentent une transition de résistivité entre l'état normal et l'état supraconducteur. Cette transition peut être induite par dépassement d'une des grandeurs critiques: la température critique  $T_c$ , le champ critique  $H_c$  ou la densité de courant critique  $J_c$ . Une fois cette transition amorcée, elle peut se propager, soit naturellement grâce à l'effet Joule induit localement dans le supraconducteur, soit en assistant cette propagation.

**T > T<sub>c</sub>:** La transition par dépassement de la température critique semble la plus naturelle. Elle est utilisée pour réaliser des interrupteurs supraconducteurs mais est pourtant mal adaptée au limiteur de courant, compte tenu des constantes de temps thermiques et des problèmes d'isolation que poserait l'insertion d'un élément de chauffage. L'apport d'énergie par rayonnement électromagnétique (rayon X) est difficilement envisageable.

**H > H<sub>c</sub>:** L'application d'une impulsion de champ magnétique supérieur à  $H_c$  permet de faire transiter le supraconducteur. Dans le cas des supraconducteurs industriels à basses températures critiques (BT<sub>c</sub>), les champs critiques, de l'ordre de quelques teslas, demanderaient des commandes de taille très importante. Par contre, cette technique est envisagée pour forcer la transition de barreaux massifs de HT<sub>c</sub> composé BSCCO 2223 (BiPb) 2Sr2Ca2Cu3O10), dont la caractéristique  $J_c$  (B) est très sensible à l'induction magnétique B.

**J > J<sub>c</sub>:** La transition par dépassement du courant critique est à la base même du principe du limiteur de courant supraconducteur. Elle permet de s'affranchir de tout système de détection ou de commande, le courant en ligne jouant le rôle de déclencheur de la limitation. En modifiant la section des conducteurs, on peut calibrer simplement le courant seuil. En fait, la condition  $J > J_c$  ne conduit pas directement le supraconducteur à l'état normal, mais dans un état dissipatif intermédiaire. Il peut y avoir emballement thermique (cas des BT<sub>c</sub>), conduisant, après un certain délai, à la situation  $T > T_c$ , [16].

## I.10. Conclusion:

Dans ce premier chapitre nous avons présenté un bref historique de la supraconductivité, leurs propriétés et ses types, ainsi que leurs comportements magnétique. Où nous avons conclu que la baisse température critique des matériaux supraconducteurs reste un inconvénient majeur.

La mise en place des modèles électromagnétiques régissant le comportement de ce matériaux fera l'objet du second chapitre.

# CHAPITRE II

## MODELISATION DES MATERIAUX SUPRACONDUCTEURS

## II.1.Introduction

Les modèles présentés ci-après sont des modèles macroscopiques. Ils proposent en fait des relations entre la densité de courant  $J$  et le champ électrique  $E$ , la relation entre l'induction  $B$  et le champ magnétique  $H$  ayant été choisie linéaire et amagnétique. Ces relations, bien que reflétant la dissipation due au déplacement des vortex, oublient donc leur existence et considèrent un matériau où le champ magnétique pénètre de façon homogène et continue et non plus sous forme de vortex.

## 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 :

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

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  $x = -1$ .

En revanche, lorsque le champ  $H > H_{c1}$  est supérieur à  $H_{c1}$ , 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  $\mu_0 H$ . Il peut donc être considéré comme macroscopiquement non magnétique.

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

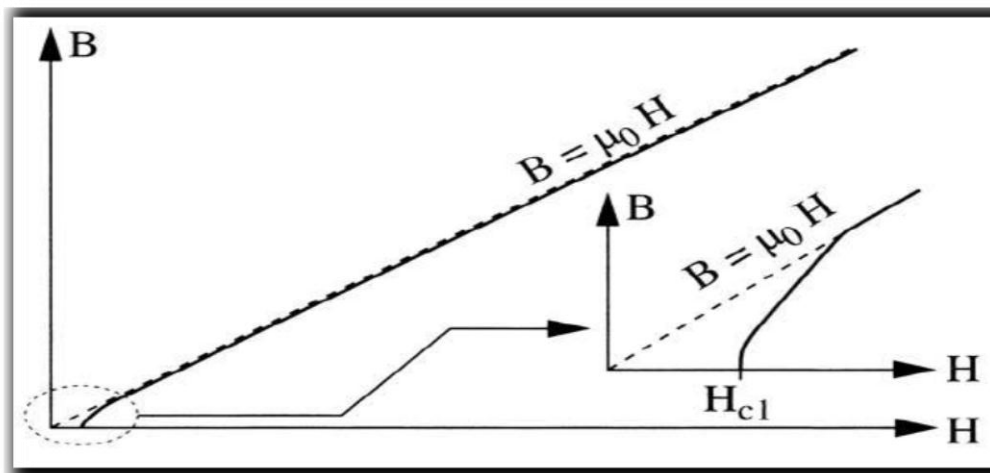


Figure II.1 Caractéristique  $B(H)$  d'un supraconducteur, [15].

### 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 (J) s'écrit :

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

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 raide (Figure II.2).

Le paramètre  $n$  est parfois considéré comme un indicateur de la qualité d'un ruban : plus il est élevé et plus le brin est d'excellente qualité. En effet, dans ce cas, pour des densités de courant et une valeur de  $n$  faibles, les pertes en régime sous- critique sont plus élevées que pour une valeur élevée de l'exposant de plus, dans ce dernier 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 introduite dans un programme informatique afin de déterminer les grandeurs électromagnétiques analytiquement, elle devient cependant difficilement utilisable, sauf dans le cas où  $n$  est grand, [17].

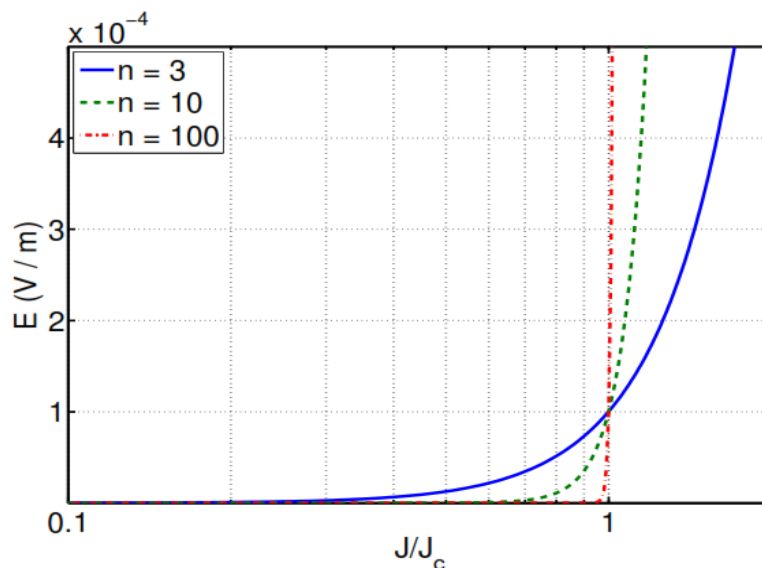


Figure II.2 Caractéristique (J) d'un supraconducteur, [16].

## II.3. Les Modèles de comportement :

### II.3.1. Modèle de l'état critique

Le modèle de l'état critique stipule qu'à température donnée la densité de courant dans un supraconducteur est, soit nulle, soit égale à la densité de courant critique  $J_c$ .

D'un point de vue mathématique, dans les équations de Maxwell, cela se traduit par :

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

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

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

Dans les équations II.1 et II.2 :

- $\overrightarrow{E}$  est le champ électrique (en  $\text{V m}^{-1}$ ).
- $\overrightarrow{B}$  est le champ d'induction magnétique (en T).
- $\overrightarrow{H}$  est le champ magnétique (en  $\text{A m}^{-1}$ )
- $\overrightarrow{J}$  est la densité de courant électrique (en  $\text{A m}^{-2}$ ).
- $\sigma$  est la conductivité du milieu (en  $\Omega^{-1} \text{m}^{-1}$ ).
- $\rho$  est la résistivité du milieu (en  $\Omega \text{m}$ ).
- $\mu$  est la perméabilité magnétique du milieu (en  $\text{H m}^{-1}$ ).

### II.3.2. Modèle de Bean

Le modèle de Bean. [18], suppose, en plus que la densité de courant critique est indépendante de la valeur de l'induction magnétique B (Figure II.3).

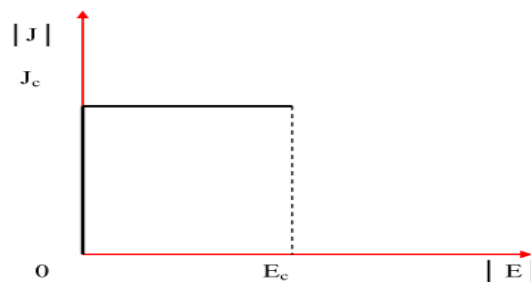


Figure II.3 Modèle de Bean, [17].

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

### II.3.3. Loi 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.

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

### II.3.4. Modèle de puissance

$$\vec{E}(\vec{J}) = \frac{E_c}{J_c} \left(\frac{J}{J_c}\right)^{n-1} \vec{J} \quad (\text{II.6})$$

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

C'est un modèle qui modélise bien le comportement des supraconducteurs à haute température critique (HTC) autour de  $J_c$ , [19].

Les paramètres de variation de cette loi sont la densité de courant critique,  $J_c$  et l'exposant, «  $n$  ». Avec ce modèle on peut faire varier les courbes  $E(J)$  de sorte qu'on peut modéliser un conducteur normal pour  $n = 1$  (loi de comportement linéaire) jusqu'à l'obtention d'une courbe raide comme dans le cas du modèle de l'état critique pour un  $n > 100$  [20].

### II.3.5. Modèle de Flux Flow et Flux Creep

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 », [21].

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

$K$  : Constant de Boltzmann.

$\theta$  : Température.

$\rho_c$  : Résistivité de Flux Creep.

$U_0$  : Potentiel de profondeur.

• 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».

$$E = \pm \left( E_c + \rho_f \cdot J_c \left( \frac{|J|}{J_c} - 1 \right) \right) \rho_f : \text{Résistivité de Flux Flow}$$

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  $E_c$ .

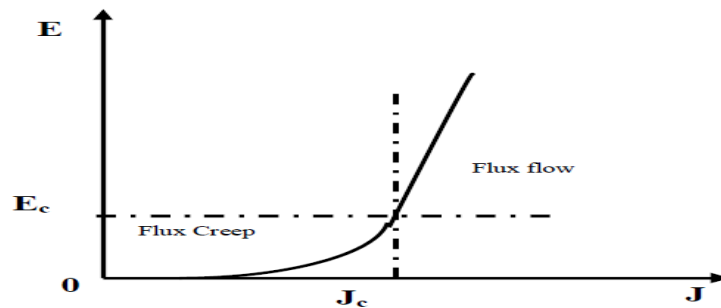


Figure II.4 : modèle de Flux Flow et Creep, [21].

### II.3.6. Modèle de résistance variable

FCL (fault current limiter) de type de commutation qui consiste en le shunt Résistance avec la valeur  $R_{FCL}$  et la résistance variable est utilisée. La valeur de la résistance variable est nulle au cours d'une normale Condition. Lorsque les courants de défaut dépassent une valeur critique, la valeur de résistance de la résistance variable augmente linéairement de 1 (ms) (une telle caractéristique peut être obtenue par une bobine supraconductrice [21]). Par conséquent, la majorité du courant circule dans le shunt Résistance, puis limitée. Pour éviter une surcharge, nous avons Supposé que la valeur de résistance de la résistance variable

Retourne à 0 en même temps lorsque les disjoncteurs Sont ouverts. [22]

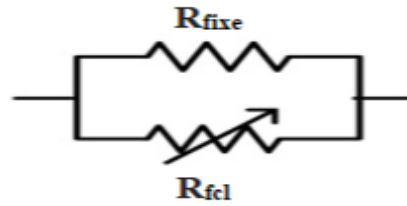


Figure II.5 : Modèle de résistance variable,

$$R = \begin{cases} 0 & (J < J_c, T < T_c) \\ R_c \left(\frac{J}{J_c}\right)^{n-1} & (J > J_c, T < T_c) \\ R_{fcl}(T) & (T > T_c) \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

$$R_c = E_c / J_c$$

$R_c$  : résistance critique

$E_c$  : champ magnétique critique

$J_c$  : densité de courant critique

$n$  : facteur de qualité

$T$  : température

## II.4.Principales applications des supraconducteurs :

L'intérêt technologique des supraconducteurs est indéniable. En effet, les systèmes classiques actuels qui remplissent parfaitement leurs fonctions ont plusieurs limites :

- Leurs conducteurs chauffent : phénomène incontournable dû aux pertes par effet Joule.
- L'induction magnétique créée par leurs circuits est limitée à 2 Teslas.

De plus, les circuits magnétiques classiques sont contraignants au vu de leurs encombrements et du poids.

- Le couple, directement lié au courant et grandeur physique importante se trouve lui aussi limité dans les machines électriques classiques. Et, les pertes par effet Joule limitent fortement l'intensité du courant.

Nous voyons donc tout de suite l'intérêt de l'utilisation de machines supraconductrices et les enjeux qu'elles représentent pour contrecarrer ces obstacles.

Bien que l'industrie électrique ne soit pas encore totalement prête à opter pour la technologie des supraconducteurs (cela constitue pour elle un grand changement), plusieurs applications sont vu le jour.

On note toutefois que les supraconducteurs se rencontrent surtout dans les domaines où les contraintes économiques sont peu importantes, comme la recherche ou le développement. Car les besoins en réfrigération pénalisent les petites industries. Bien que l'utilisation des supraconducteurs soit limitée par la basse température qu'ils nécessitent, il n'en reste pas moins que les scientifiques leur ont trouvé des applications très diversifiées que ce soit dans les domaines de l'environnement, de la médecine, de l'ingénierie, de l'électronique.

On distingue trois catégories d'applications des supraconducteurs en électrotechnique suivant la valeur utile de l'induction magnétique générée par le supraconducteur, [23].

**\*Très forts champs magnétiques** : Cette catégorie concerne les bobines de champs, les systèmes de stockage d'énergie.

**\*Forts champs magnétiques** : Cette catégorie concerne les moteurs, les alternateurs, les transformateurs, les systèmes de stockage de l'énergie.

**\*Faible champ magnétique** : Cette catégorie concerne les lignes du transport d'électricité, les transformateurs, les limiteurs de courant.

## **II.4.1.Applications en vie quotidienne:**

### **II.4.1.1.Les applications médicales**

Un des premiers domaines où furent appliqués les supraconducteurs est la médecine avec l'IRM (Imagerie à Résonance Magnétique).

L'IRM repose intégralement sur la puissance de l'électroaimant qui est la base même de l'appareil. Pour en prendre conscience il faut savoir qu'il faudrait des centaines de kilowatts pour qu'un aimant conventionnel atteigne le champ magnétique requis. Par conséquent, l'utilisation d'un aimant supraconducteur est très intéressante, [24].

### **II.4.1.2.Les moyens de Transport**

Imaginons un train qui glisse quelques centimètres au-dessus de la voie à plus de 500 km/h. Cela existe. Deux méthodes sont possibles : la lévitation magnétique de type électromagnétique ou celle de type électrodynamique. La première ne fait pas appel à la supraconductivité, contrairement à la seconde. Cette dernière est basée sur la répulsion entre les éléments embarqués sur le train et des plaques conductrices (ou des bobines court-circuitées) situées sur la voie. L'avantage des bobines est de réduire la puissance dissipée, [25].

L'entrefer (distance sol-train) peut être de 10 cm si les aimants du train sont suffisamment puissants. Il faut faire appel à la supraconductivité. Ces trains à lévitation présentent plusieurs avantages : outre le fait qu'ils circulent à de très hautes vitesses (ce qui raccourcit la durée des trajets), ils n'usent pas les voies (car il n'y a pas de contact direct). Les contraintes des trains sur rails (contact pantographe-caténaire, adhérence, freinage, signalisation) n'autorisent pas aujourd'hui des vitesses commerciales au-delà de 350 km/h. Les trains à lévitation semblent donc prometteurs.

Le seul train à lévitation magnétique commercial à ce jour se trouve à Shanghai, en Chine. Malgré tous les avantages cités plus haut, le train à lévitation magnétique reste difficile à mettre en place du fait des moyens qu'il faut déployer et notamment le système de refroidissement des aimants ainsi que l'alimentation électrique. C'est pourquoi la découverte de nouveaux supraconducteurs à des  $T_c$  plus élevées permettrait à ces recherches d'avancer et ainsi trouver un usage commercial à ce nouveau type de transports.

## **II.4.2.Applications en électrotechnique**

### **II.4.2.1.Machines tournantes**

Cette utilisation des supraconducteurs peut se faire de deux manières :

La première manière consiste à utiliser les SHT pour le bobinage du rotor. Dans ce cas les fils supraconducteurs seront parcourus par un courant continu et soumis à un champ magnétique de deux composantes : une composante principale continue et une petite composante variable qui résulte de la réaction magnétique d'induit. Les pertes dans les fils supraconducteurs sont très faibles, ce qui conduit à des pertes inférieures à celles des alternateurs classiques, [26].

La deuxième manière consiste à utiliser les SHT pour le bobinage de l'induit et de l'inducteur en même temps. Dans ce cas, il faut tenir compte du fait que les courants circulant dans l'induit sont des courants alternatifs et donc l'utilisation de câbles spécialement conçus pour le fonctionnement en courant alternatif s'impose, ces câbles présentent des pertes inférieures à celles des enroulements classiques. Les pertes pour ce type d'alternateurs sont encore moins importantes que celles des alternateurs classiques.

L'enceinte cryogénique dans le deuxième cas est plus importante que dans le premier cas (le refroidissement de l'induit et de l'inducteur), la détermination desquelles des deux est économiquement meilleurs est une question qui n'est pas encore tranchée.

En rappel que dans les machines à réluctance variable, les pastilles supraconductrices peuvent être insérées entre les pôles afin d'augmenter le nombre de lignes de champ par effet d'écrantage du champ créé par ces pastilles refroidis hors champ magnétique

#### **II.4.2.2.Câbles de transport**

Les câbles supraconducteurs de transport intéressent de plus en plus les chercheurs et les industriels, avec ce type de lignes, on peut augmenter la puissance transmise avec des niveaux de tensions faibles par rapport à ceux permis par les lignes conventionnelles. Le paramètre le plus compliqué à réaliser dans ce type de lignes est l'isolation diélectrique. Cette isolation, qui est un paramètre important en haute tension, devient difficile à réaliser en milieu cryogénique.

Au Japon, la compagnie Furukawa Electric a installé en mars 2004 un câble, refroidi à l'azote, de 500 m de longueur, de 77 kV et 1 kA dans le réseau électrique pour le tester pendant une année.

La plupart des études effectuées sur les câbles supraconducteurs de transport concernent des configurations alternatives, qui entraînent des pertes dans le supraconducteur.

Pour transport en continu et alternatif, les performances par rapport aux câbles conventionnels sont meilleures. Les pertes peuvent être réduites de moitié en utilisant un câble de transport supraconducteur pour la même puissance transitée.

En Chine, un programme ambitieux concerne l'introduction de lignes supraconductrices pour le réseau de transport Est-Ouest. Actuellement, une ligne en supraconducteur à haute température critique de 33,5 m de longueur, de 35 kV et 2 kA fonctionne déjà.

#### **II.4.2.3.Stockage d'énergie**

L'énergie est stockée sous forme magnétique dans une bobine supraconductrice. Cette énergie est le résultat de la circulation du courant dans la bobine, pratiquement sans diminution dans le temps. Les avantages de tels systèmes sont surtout le rendement très élevé en comparaison avec les systèmes conventionnels de stockage d'énergie et la rapidité à restituer de l'énergie.

En effet, le rendement d'un système supraconducteur de stockage d'énergie peut atteindre 97% alors que ce rendement ne dépasse pas 70% pour un système de barrage à pompe.

Avec tous ces avantages. L'un des problèmes rencontrés dans ce type d'installations est la présence de forces très élevées qui subissent le bobinage.

Les systèmes utilisés pour stocker de l'énergie peuvent être sous forme de solénoïdes, de tores ou de structures intermédiaires entre les deux (bobines à système de forces équilibrées).

L'utilisation de ce dernier type de bobines peut réduire jusqu'à 4 fois les dimensions de la bobine par rapport à un tore et à 2 fois par rapport à un solénoïde pour la même valeur d'énergie stockée.

#### **II.4.2.4. Les transformateurs**

L'une des applications des supraconducteurs en électrotechnique concerne les transformateurs. Pour cette application les pertes en régime alternatif des supraconducteurs restent un inconvénient majeur.

Les études effectuées ont montré des performances remarquables de ce type de transformateurs. En effet, par rapport à un transformateur conventionnel, les pertes peuvent diminuer de 30%, le volume de 50% et le poids de 70% [27].

#### **II.4.2.5. 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, [28]. C'est le sujet de notre étude, son fonctionnement est détaillé dans la suite de notre travail.

### **II.5. Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons vu l'étude du comportement électromagnétique et thermique des supraconducteurs afin de le recopier dans un langage mathématique point de départ de la modélisation.

Ce chapitre a décrit aussi la loi de comportement choisie pour présenter le phénomène de la supraconductivité, qui ne peut être représenté par la loi d'Ohm.

Et à la fin de cette partie, nous avons présenté certaines principales applications des supraconducteurs parmi lesquelles, la limitation de courant de défaut qui fera l'objectif du chapitre suivant.

# CHAPITRE III

## LIMITATION DE COURANT DE DEFAUT

### III.1.Introduction :

Un réseau électrique doit non seulement être dimensionné pour supporter son régime nominal (courant nominal  $I_n$  et tension nominale  $U_n$ ), mais aussi, en cas de défaut, un régime de court-circuit (courant de court-circuit  $I_{cc}$  et tension nominale  $U_n$ ). Le courant de court-circuit peut atteindre vingt à quarante fois le courant nominal de la ligne. Ainsi tout le réseau (disjoncteurs, câbles, transformateurs, jeux de barres..) doit être surdimensionné en dimension et mécaniquement afin de supporter de tels courants et de tels efforts électromécaniques (la puissance de court-circuit étant supérieure de vingt à quarante fois la puissance nominale). Il apparaît donc intéressant et nécessaire d'introduire sur le réseau des appareils capables de réduire le courant de court-circuit  $I_{cc}$  sans pour autant modifier le courant nominal ; ce sont des limiteurs de courant. Plusieurs types de limiteurs existent selon la spécificité de la ligne sur laquelle ils sont installés et les performances recherchées.

Nous présentons dans ce chapitre les différents types des limiteurs de courants de défaut, leurs caractéristiques et différentes positions d'emplacement dans les réseaux électriques.

### III.2.Limitation de courant dans les réseaux électriques :

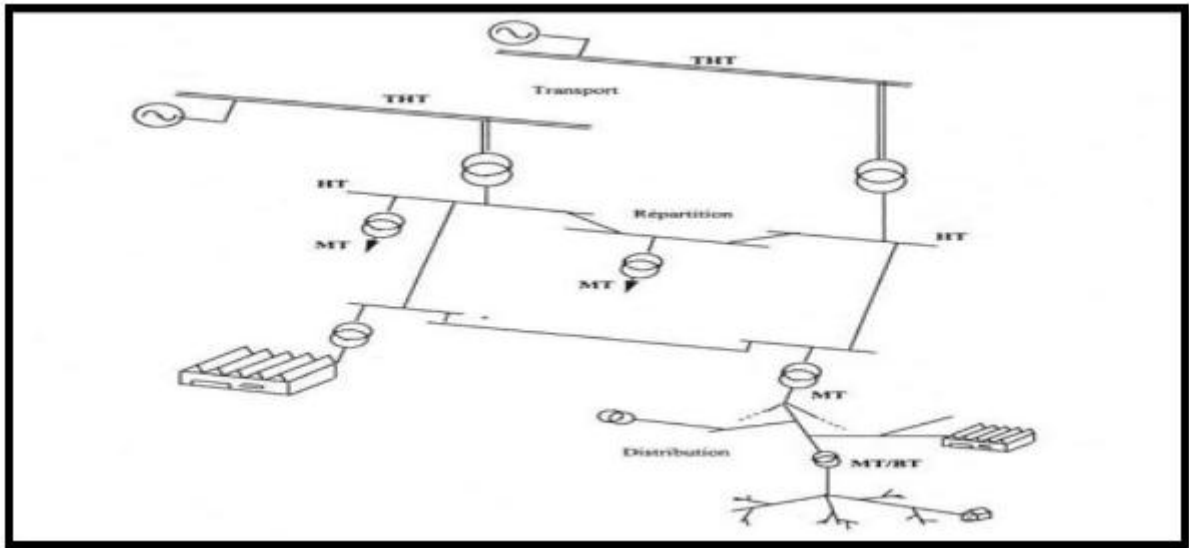
#### III.2.1.Les différents réseaux et leurs niveaux de tension

Dans les pays dotés d'un système électrique développé, le réseau est structuré en quatre niveaux en fonction de la tension nominale efficace entre phases  $U_n$ .

**H.T.B** : tension nominale supérieure à 50 kV. Avant 1989, ce niveau était partagé en deux niveaux distincts auxquels il est encore fait référence. Il s'agit de la Très Haute Tension (THT) pour les réseaux transportant l'énergie des gros centres de production vers les régions consommatrices. Ces réseaux sont interconnectés. Viennent ensuite les réseaux de répartition à Haute Tension (HT) qui assurent à l'échelle régionale la desserte des points de livraison à la distribution. **H.T.A**:  $1 \text{ kV} < U_n < 50 \text{ kV}$ . Ce niveau couvre les réseaux d'alimentation de la clientèle, dénommé réseau moyenne tension (MT) avant 1989.

**B.T.B**:  $500 \text{ V} < U_n < 1 \text{ kV}$ . C'est le réseau basse tension (BT).

**B.T.A**:  $50 \text{ V} < U_n < 500 \text{ V}$ . C'est la basse tension terminale (BTT) avec 400 V entre phases. Bien que ces dénominations soient officielles, nous utiliserons souvent les anciennes appellations (HT, MT.) car elles restent très employées dans le milieu de l'électrotechnique. La figure III.1 représente schématiquement l'agencement des différents niveaux de tension pour le transport et la distribution de l'électricité. Voir la figure III.1, [29].



**Figure III.1 Hiérarchisation par niveau d'un réseau de transport et de distribution d'électricité. [29]**

La représentation schématique d'un réseau de distribution aérien MT (Figure III.1) permet de présenter les composants principaux des réseaux de distribution, [29].

### III.2.2. Les défauts

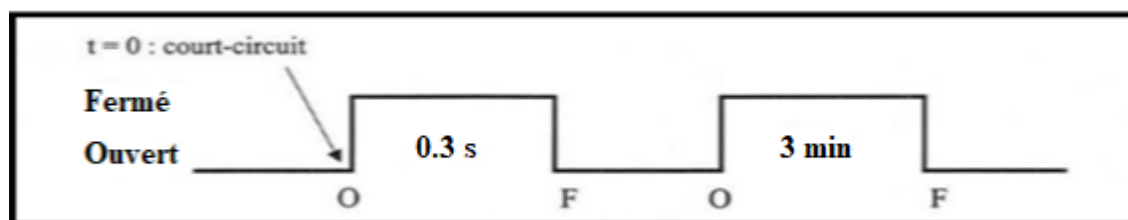
De nombreux types de défauts existent selon le réseau de distribution (ligne aérienne ou câble souterrain), selon le lieu du défaut (sur la boucle de distribution, sur le tableau de distribution), selon les phases touchées (défaut monophasé entre une phase et la terre, défaut biphasé ou triphasé entre deux ou trois phases, défaut évolutif passant par exemple de monophasé à triphasé), selon la durée du défaut (fugitif lorsqu'il est inférieur à 0,3 secondes, semi-permanent pour des défauts inférieurs à 15 secondes ou permanents). Beaucoup d'autres facteurs peuvent encore intervenir sur le type de défaut, comme le mode d'exploitation, le régime de neutre ou les performances des protections.

Les courants de court-circuit sont nuisibles pour le réseau, soit pour des raisons thermiques (fusion des conducteurs, dégradation des isolants), soit pour des raisons mécaniques à cause des déformations provoquées par les forces électromagnétiques, soit pour des raisons de coût car ils contribuent aux vieillissements prématurés du matériel. Il est donc nécessaire d'éliminer le défaut (en général en ouvrant le circuit) pour permettre l'auto-extinction du défaut ou une réparation si celui-ci persiste. De plus, il est nécessaire de limiter la valeur crête du courant de défaut (en particulier la première demi onde qui peut être très importante si le court-circuit est en pleine asymétrie) avant son élimination.

### III.2.3.L'élimination des défauts

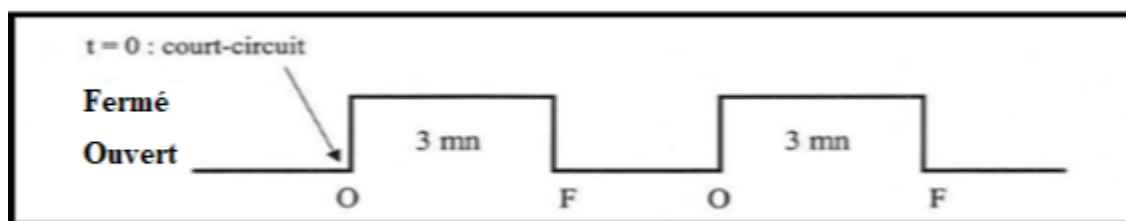
Lorsque deux fils se touchent, par exemple à cause du vent, (défaut fugitif car le contact entre les deux fils est inférieur à 0,3 s), il y a création d'un arc électrique entre eux.

Il faut alors couper le courant pour éteindre l'arc et attendre quelques centaines de millisecondes afin de permettre à l'air de se dés ioniser sinon l'arc réapparaîtra lors de la remise sous tension du réseau. Ainsi, de manière générale, l'exploitant utilise des cycles d'Ouverture - Fermeture (cycles OF) des protections (disjoncteurs) afin de tenter de perturber le moins possible la distribution tout en favorisant l'auto-extinction du défaut Avant d'être obligé d'ouvrir définitivement la ligne si celui-ci persiste. Ces cycles dépendent principalement du défaut (monophasé ou triphasé) les cycles les plus répandus sont:



**Figure III.2 Cycle OFOF pour une ligne aérienne.**

Lors de l'apparition d'un défaut, ouverture de la ligne pendant 0,3 s. Si le ouverture pendant 3 mn (si nécessaire) avant une ouverture définitive du disjoncteur si le défaut ne s'est pas résorbé. Pour les câbles souterrains le schéma est différent car en général un défaut provient d'un endommagement accidentel de la ligne) :



**Figure III.3 Cycle OFOF pour une ligne souterraine.**

Ouverture des protections durant 3 minutes. Si le défaut persiste la ligne est définitivement ouverte. L'ouverture de la ligne est assurée par des disjoncteurs qui interrompent le courant près d'un passage à zéro. Sur les réseaux HTB ou HTA l'interruption n'est pas immédiate : un arc électrique apparaît dans la chambre de coupure entre les pôles du disjoncteur en raison de l'importance du courant de court-circuit. En THT il est même obligatoire de propulser dans la chambre de coupure un jet de gaz ayant

une tension de claquage élevée afin de souffler l'arc électrique. En insérant un limiteur de courant en série avec les appareils de protection, leur taille et leur temps de coupure peuvent alors être réduits grâce à la diminution du courant de court-circuit. Après la limitation, le limiteur devra être de nouveau opérationnel avant la fermeture des organes de protection. Il est donc souhaitable qu'un limiteur de courant puisse être réinséré dans le réseau après 0,3 secondes, il est important qu'il puisse être inséré après 15 secondes, et il est vital qu'il puisse être inséré 3 mn après la limitation du défaut. Or, comme nous allons le voir dans les chapitres suivants, un limiteur supraconducteur s'échauffe pendant son temps de limitation. il faut donc qu'il ait refroidi avant que la ligne ne soit de nouveau fermée, [30].

#### III.2.4. Les courant de défaut

Le courant nominal  $I_n$  (ou courant assigné) est le courant maximal autorisé en régime permanent dans la ligne électrique alors que le courant de ligne  $I_{ligne}$  est le courant circulant réellement dans celle-ci. Enfin, le courant d'utilisation de la ligne est la valeur moyenne du courant de ligne. La puissance nominale  $S_n$  (ou puissance assignée) d'un réseau de niveau de tension entre phase un (et de niveau de tension phase-neutre  $V_n$ ) est égale à (remarque: même si la dénomination actuelle est "assignée", nous utiliserons pour la suite le terme "nominal" pour  $I_n$  et  $S_n$ ) :

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

Pour un réseau moyen tension ou haute tension, le courant moyen (moyenne du courant de ligne) est de l'ordre de 40 à 50% du courant nominal. Le limiteur doit être dimensionné pour supporter le courant nominal, mais il peut être optimisé, par exemple, pour un courant deux fois plus faible. Il faut toutefois rester prudent pour ce type de dimensionnement qui ne peut être fait que si la consommation de la ligne sur laquelle le limiteur doit être inséré en fonction du temps est à peu près connue. En effet certains réseaux ont un courant de ligne deux fois plus faible que  $I_n$  sur une moyenne annuelle, mais pendant trois mois de suite, ils peuvent fonctionner à leur courant nominal. Lors d'un court-circuit, le courant en régime de défaut établi est appelé courant de court-circuit  $I_{CC}$  la puissance de court-circuit  $P_{CC}$  de la ligne pour un réseau de niveau de tension un est alors égale à :

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

Pour un défaut triphasé :

$$I_{CC} = \frac{V_n}{Z} \quad \text{avec :} \quad U_n = \sqrt{3} \times V_n \quad (\text{III.3})$$

L'impédance  $Z$  est la somme de l'impédance interne du transformateur et de l'impédance du réseau ramenée en amont du défaut. Pour un défaut biphasé:

$$I_{cc} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times V_n Z \quad (\text{III.4})$$

Pour un défaut monophasé:

$$\overline{I_{cc}} = \frac{\overline{V_n}}{Z_n} + 3jC\omega\overline{V_n} \quad (\text{III.5})$$

avec:  $C$  la capacité homopolaire du réseau MT et  $Z_n$  l'impédance de neutre [12].

### III.3. Principe général des limiteurs de courant :

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

#### III.3.1. Limiteurs de courant classiques

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

##### III.3.1.1. Réactance série

L'insertion permanente de réactances en série dans les réseaux permet de limiter les courants de défauts mais dégrade la stabilité transitoire et introduit des surtensions transitoires durant les séquences de reformation des appareils de coupure. De plus, les chutes de tensions en régime nominal et l'encombrement n'étant pas négligeables, De fait,

Cette solution introduit une composante inductive qui peut être gênante pour certains types de réseau.

### III.3.1.2. Limiteur à redresseurs commandés

Pour limiter ces inconvénients, il est préférable d'introduire des composants de commutation telle que les thyristors au moment du défaut. Un des dispositifs de référence est le transformateur série court-circuité par des thyristors, [31]. (Figure III.4). Lorsque les thyristors sont passants le transformateur est en court-circuit, l'impédance série est négligeable devant la charge. Cependant lorsque les thyristors sont bloqués, le transformateur est en circuit ouvert et son impédance augmente fortement.

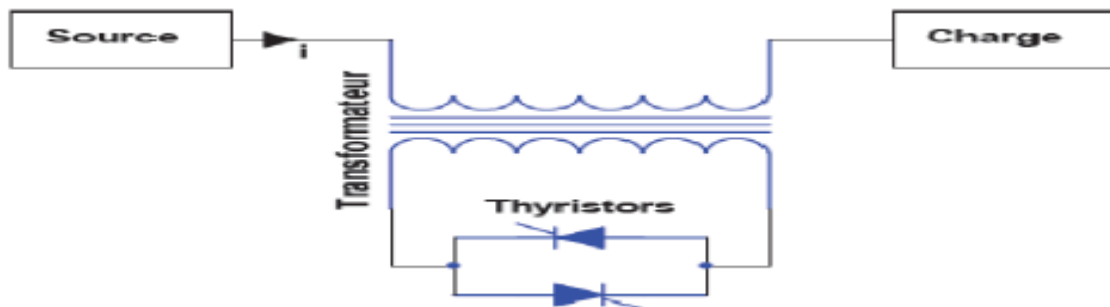


Figure III.4. Limitation de courant par transformateur court-circuité, [31].

Il est également possible d'utiliser des dispositifs à résonance, [32]. Insérés en série avec des thyristors (Figure III.5), permettant de contrôler l'impédance du circuit LC en modifiant la commande de l'angle d'amorçage

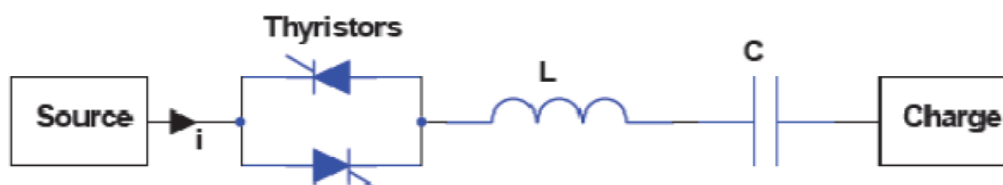


Figure III.5. Limitation de courant par thyristors contrôlant un circuit résonnant, [33].

L'inductance et la capacité sont choisies et raccordées de façon à ne pas dépasser les limites de  $di/dt$  des thyristors. Les dispositifs commandés comme les disjoncteurs statiques, permettent de commuter très rapidement le courant d'une branche de faible impédance à une branche d'impédance élevée. Dans tous les cas, la synchronisation des dispositifs semi-conducteurs de commutation est délicate ; ces systèmes restent difficiles à adapter aux fortes puissances et à la haute tension et les composants de puissance présentent des chutes de tension non négligeables à l'état passant.

### III.3.1.3. Résistance

Cette méthode consiste à réduire à l'aide d'une simple résistance le courant de court-circuit. Celle-ci est intéressante lorsque le rapport  $I_c/I_n$  est très élevé. L'opportunité d'utilisation d'un tel système doit se décider en fonction de la chute de tension engendrée et de la dissipation de l'énergie locale qui s'ensuit.

Une autre solution consiste à ajouter, comme dans le cas de l'utilisation de capacités, des disjoncteurs statiques afin de commuter le courant dans une branche plus résistive. Les inconvénients des systèmes de commutation comme dans le limiteur de courant par thyristors décrits ci-dessus, propres à ce système, persistent.

### III.3.1.4. Résistance variable

Une des solutions les plus efficaces consiste à utiliser une résistance variable en série avec le réseau. Cette variation doit provenir d'un changement de phase ou de l'état du matériau. Le phénomène physique responsable du changement peut être (thermique, mécanique, magnétique...) ou autre, mais il est toujours liée au courant. Cependant ce système présente deux problèmes, d'une part les variations par changement de phase nécessitent une énergie qui tend à diminuer la vitesse de transition. D'autre part les variations par changement d'état soulèvent le problème de l'inhomogénéité qui tend à concentrer la puissance localement et ainsi affaiblir le matériau. Les matériaux à Coefficient Thermique Positif (CTP) ayant une résistance contrôlée thermiquement sont des candidats potentiels pour la limitation de courant. Il existe deux familles de CTP, d'une part les résistances homogènes métalliques (Fer, Tungstène...) pour lesquelles la résistivité augmente d'un facteur 7 à 17 entre la température ambiante et la température du point de fusion. D'autre part les polymères chargés (carbone ou céramiques conductrices) qui offrent des facteurs de résistivité supérieurs à 100. Ces matériaux sont principalement utilisés en basse tension pour limiter les arcs électriques à l'ouverture des disjoncteurs, [34].

### III. 3.2. Limiteurs de courant supraconducteurs

Un réseau électrique doit être dimensionné pour supporter son régime assigné mais aussi en cas de défaut, un régime de court-circuit. Dans un réseau de distribution, le courant de court-circuit peut atteindre 30 fois la valeur du courant assigné, ainsi tout le réseau (générateurs, transformateurs, jeux de barres...) doit être surdimensionné électriquement mécaniquement, ceci étant très coûteux. Il est donc intéressant d'introduire des appareils capables de réduire le courant de court-circuit.

Le principe d'un limiteur de courant supraconducteur (Superconducting Fault Current Limiter), [35] 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 (Figure III.6).

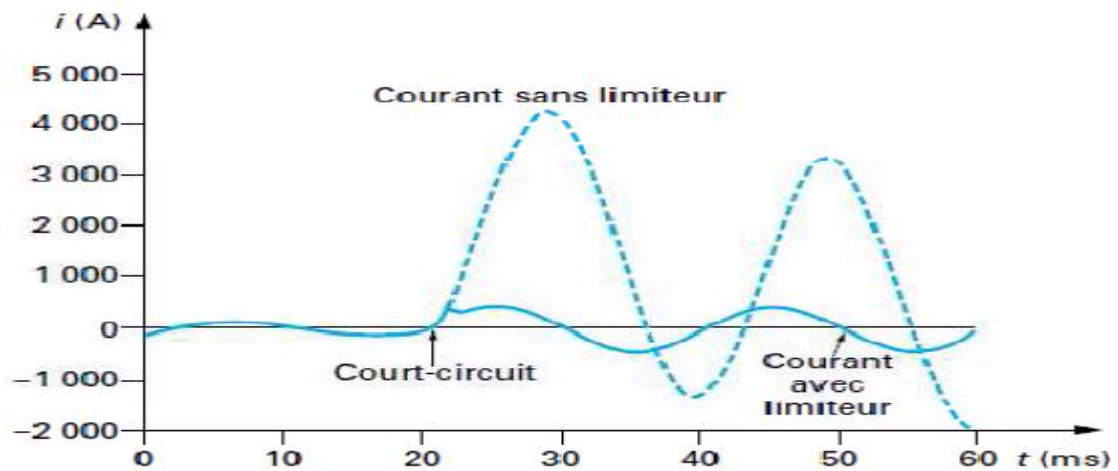


Figure III.6. Courants de court-circuit avec et sans limiteur ,[35].

Ce principe simple et inaccessible par des techniques conventionnelles de limitation du courant est très attractif pour permettre l'amélioration de la qualité de service des réseaux actuels.

De plus son fonctionnement est répétitif et autonome. C'est le fusible permanent qui ne nécessite ni d'être changé ni 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.

Il est même possible d'imaginer de dimensionner de manière totalement différente les réseaux futurs, surtout dans les pays en voie de développement où le réseau est entièrement à construire. Le transport du courant pourrait se faire non plus par les lignes de THT mais par des lignes supraconductrices en MT avec des courants importants grâce à l'insertion systématique de limiteurs de courant. Tous les disjoncteurs pourraient être remplacés par de simples interrupteurs

### III. 3.2.1. Différents types de limiteur de courant supraconducteur

#### a) Limiteur résistif

Le principe du limiteur de courant résistif est simple, il s'agit d'insérer en série dans la ligne à protéger un élément supraconducteur qui transite naturellement par dépassement de son courant critique lors d'un court-circuit. Le courant est alors limité par la transition brutale de l'état supraconducteur à l'état normale, [36]. 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 III.7).

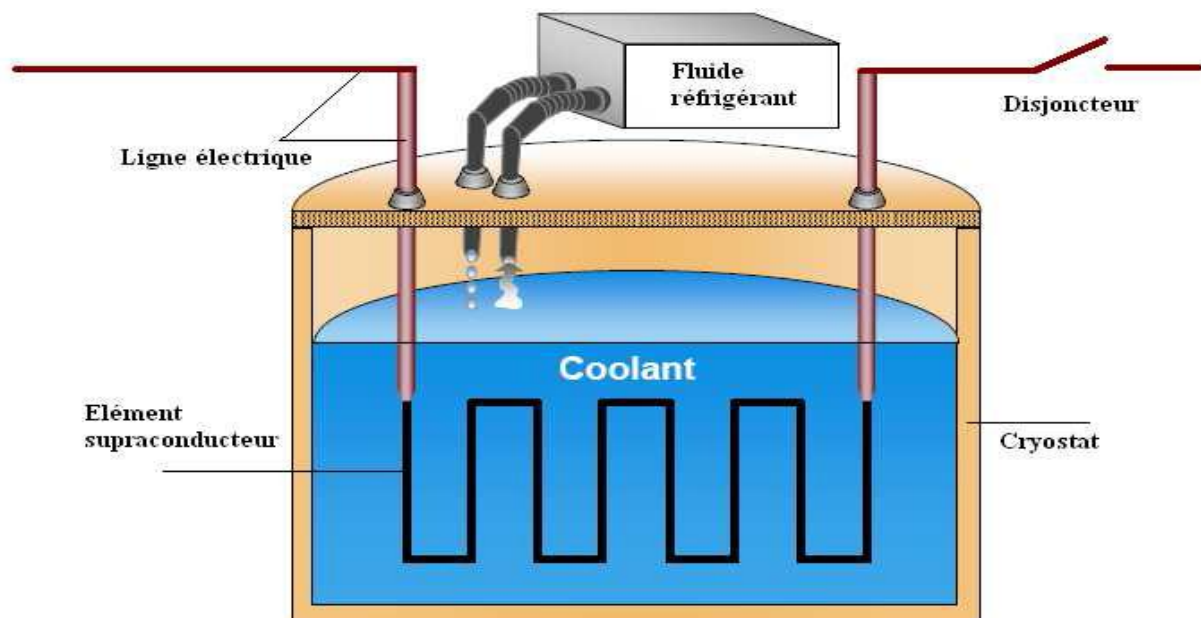


Figure III.7. Principe du limiteur de courant résistif, [36].

Une impédance en parallèle peut permettre d'adapter l'impédance de limitation et de réduire les éventuelles surtensions, [37]. 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.

### **b) Limiteur inductif**

La structure inductive met en jeu un transformateur dont les enroulements secondaires sont supraconducteurs (sauf dans le cas du limiteur hybride où le secondaire d'un transformateur est court-circuité par une résistance supraconductrice, [38]. Le limiteur est placé en série dans le circuit à protéger. La Figure III.8 présente schématiquement le principe. En régime nominal, le secondaire étant dans son état supraconducteur, le transformateur est court-circuité, et seule l'impédance de fuite est vue par le système, [39]. En cas de court-circuit sur le réseau, le secondaire transite et le limiteur se comporte comme une forte réactance. L'avantage de ce type de limiteur est de pouvoir dimensionner les parties supraconductrices à des intensités ou des tensions bien inférieures aux valeurs du réseau, les enroulements primaires étant réalisés en cuivre. Le rapport de transformation laisse toute latitude d'adaptation. Une des difficultés de cette structure est de limiter l'inductance de fuite à des niveaux acceptables pour le système. Un autre inconvénient réside dans l'encombrement et le poids de telles structures.

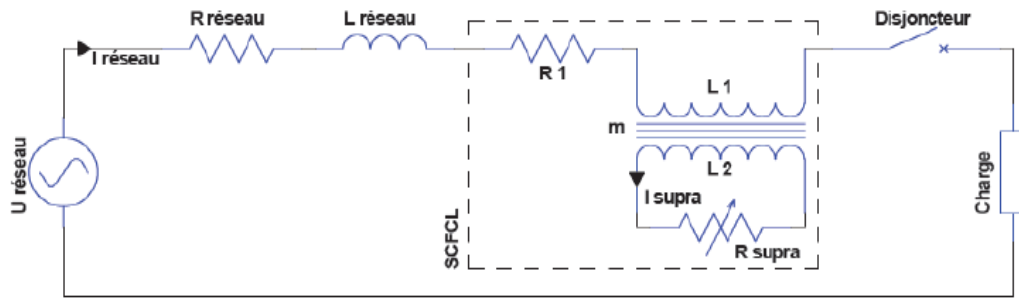


Figure III.8. Principe du limiteur de courant inductif, [39].

Le limiteur inductif permet de limiter efficacement les courants de court-circuit, mais son principe est plus compliqué que celui du limiteur résistif. De plus, sa réalisation peut être délicate car il nécessite en général un bon couplage entre le circuit primaire et le circuit secondaire qui ne sont pas forcément à la même température. Le limiteur résistif quant à lui ne présente pas ces inconvénients.

### c) Limiteur de type pont redresseur

Ce type de SFCL a été inventé par Boenig en 1983, [40]-[41]. Il est composé d'un pont redresseur à diodes ou thyristors, d'une bobine supraconductrice  $L_{\text{supra}}$  et d'une source de tension continue  $U_{\text{dc}}$  (Figure III.9).

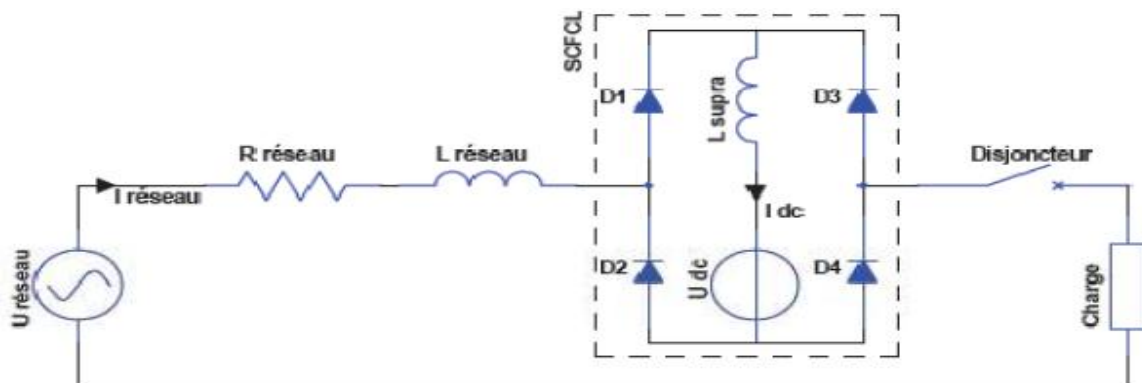


Figure III.9. Principe du limiteur de courant de type pont redresseur, [40].

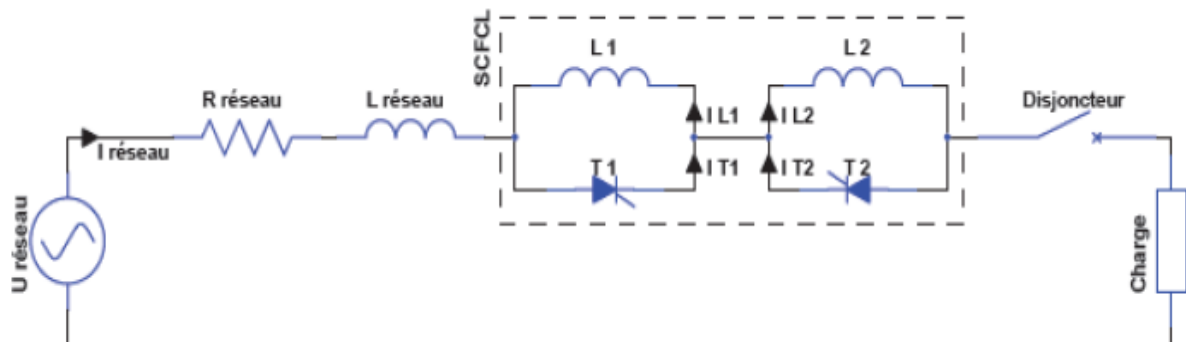
Un courant continu  $I_{\text{dc}}$  traversant une bobine supraconductrice  $L_{\text{supra}}$  est délivré par une source de tension  $U_{\text{dc}}$ . En régime assigné le courant  $I_{\text{réseau}}$  étant inférieur au courant  $I_{\text{dc}}$ , les diodes sont passantes et le courant  $I_{\text{réseau}}$  ne traverse pas l'inductance  $L_{\text{supra}}$ . Dans ce cas l'impédance du SFCL est faible et seule l'électronique de puissance génère des pertes. Si le courant  $I_{\text{réseau}}$  excède le courant  $I_{\text{dc}}$ , les diodes (D1, D4) ou (D2, D3) selon l'alternance concernée par le court-circuit, se bloquent.

Ce quasi fonctionnement en pont redresseur fait circuler le courant  $I_{\text{réseau}}$  dans la bobine  $L_{\text{supra}}$  qui limite le courant par sa forte inductance.

En remplaçant les diodes par des thyristors il devient possible de stopper le court-circuit au passage par zéro du courant. De plus, le courant de déclenchement est réglable par  $I_{\text{dct}}$  peut facilement être adapté aux besoins du réseau. Cependant le fonctionnement reste peu fiable, en effet en régime de défaut un dysfonctionnement d'une diode court-circuitera la bobine, annulant ainsi le phénomène de limitation de courant.

#### d) SFCL de type contrôleur de courant de défaut

Ce type de SFCL a été développé par Kuperman et Juengst en 2000, [42]. Il est composé de deux thyristors T1 et T2 montés en opposition-série et court-circuités respectivement par les inductances supraconductrices L1 et L2 (Figure III.10).



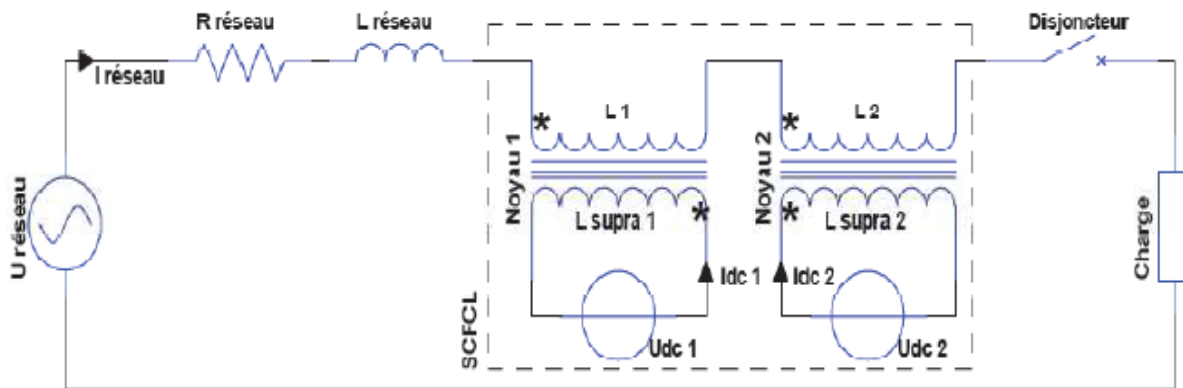
**Figure III.10. Principe du limiteur de courant de type contrôleur de courant de défaut, [41].**

En régime assigné l'amplitude du courant  $I_{\text{réseau}}$  étant inférieure à  $I_{\text{dc}}$ , les thyristors conduisent en permanence et l'impédance du SFCL correspond à la chute de tension des thyristors.

En régime de défaut le courant  $I_{\text{réseau}}$  dépasse  $I_{\text{dc}}$ , ceci bloque alternativement les thyristors et aiguille ainsi le courant dans les inductances qui leurs sont associées. Par conséquent les inductances supraconductrices L1 et L2 sont alternativement insérées sur le réseau à chaque passage par zéro du courant, cette augmentation d'impédance permet ainsi de limiter le courant. Cette architecture possède les mêmes caractéristiques que le SFCL avec pont redresseur mais exige une source de tension et le circuit de commande des thyristors.

### e) SFCL de type noyaux magnétiques saturés

Pour limiter le courant de court-circuit, une impédance non-linéaire peut être obtenue en reliant les enroulements  $L_1$  et  $L_2$  de deux noyaux magnétiques saturés par des bobines supraconductrices  $L_{\text{supra}1}$  et  $L_{\text{supra}2}$  parcourues par des courants continus (Figure III.11).



**Figure III.11. Principe du limiteur de courant du type noyaux magnétiques saturés, [41].**

Les deux noyaux étant saturés, l'inductance apparente du SFCL est faible et correspond à la somme des résistances et des réactances de  $L_1$  et  $L_2$ . En régime assigné,  $I_{\text{réseau}}$  est assez faible pour maintenir les noyaux entièrement saturés, assurant ainsi la faible impédance du SFCL. Dans le cas d'un défaut, l'augmentation d'énergie conduit alternativement les deux noyaux hors de leur saturation, dans leur zone de perméabilité élevée. Ceci entraîne une importante augmentation de l'impédance apparente du SFCL, développant ainsi un champ électrique permettant de limiter le courant. L'enroulement supraconducteur n'étant que très faiblement traversé par le courant variable, les pertes à basse température sont faibles et ne nécessitent pas de système de refroidissement important. Cependant, le noyau de fer et toute l'installation restent relativement encombrants.

#### III. 3.2.2. Comparaison des différents SFCL

Actuellement SFCL sont commercialisés et il est difficile de prévoir quel type sera le plus prometteur pour l'avenir. Cependant il est possible de les distinguer en fonction de 5 principales caractéristiques :

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

### III.4. Insertion du limiteur de courant dans le réseau électrique :

L'insertion d'un limiteur dans un réseau de distribution peut être envisageable en plusieurs endroits. Selon l'emplacement choisi, le limiteur de courant pourrait avoir des caractéristiques différentes (courant nominal, courant à limiter, temps de récupération [43]. Ainsi, en fonction de son emplacement, le type de matériau supraconducteur utilisé pourra être différent.

Une des plus intéressantes configurations consiste à installer un limiteur entre deux jeux de barres (Figure III.12) afin d'augmenter le maillage du réseau (afin d'accroître la continuité de service).

Actuellement, certains réseaux moyens tension ne peuvent pas être interconnectés entre eux car les courants de court-circuit engendrés seraient trop importants. La sensibilité accrue de l'opinion publique et le coût engendré vis à vis de l'installation de nouvelles lignes de transport, poussent à tirer le meilleur parti des infrastructures existantes. Ainsi en haute tension, le bouclage de deux réseaux évite d'amener une autre source pour sécuriser les départs.

- Le limiteur L1 protège le générateur et améliore sa stabilité
- Les limiteurs L2 permettent de maintenir la liaison L3 en cas de défaut sur B
- Le limiteur L3 permet de déconnecter les deux sections A et B et d'éviter que A ou B ne débitent sur un même court-circuit (l'interconnexion n'aggrave pas les courants de défaut)
- Les limiteurs L4 permettent de protéger sélectivement les départs C et D

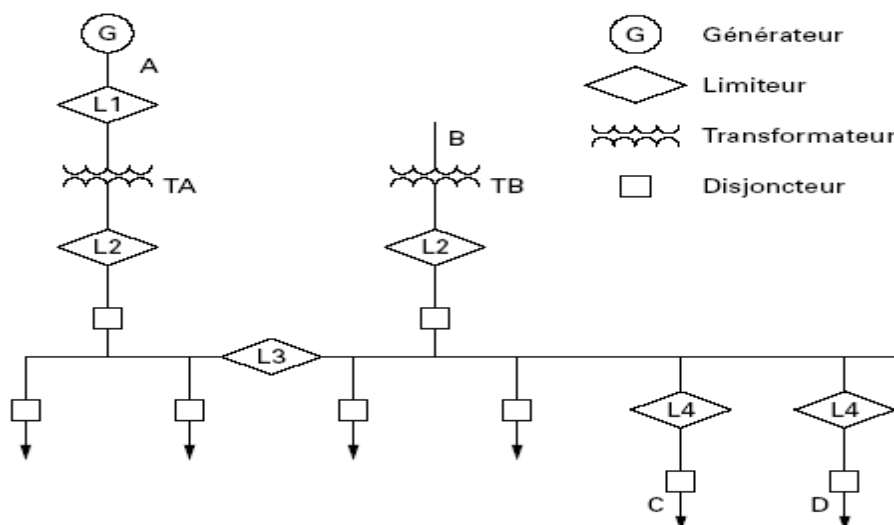


Figure III.12. Insertion de limiteurs de courant de défaut dans un réseau, [44].

Une autre possibilité intéressante dans les réseaux actuels consiste à placer le limiteur en aval du transformateur *HT / MT* avant le jeu de barre, au niveau de l'arrivée MT. Ainsi, sur un réseau existant, il est possible de rajouter des départs sur le jeu de barre et de conserver les mêmes protections (disjoncteurs). Sans limiteurs, les courants de court-circuit auraient été trop importants.

Pour le dimensionnement d'un réseau futur, un limiteur placé en aval d'un transformateur permettrait de réduire la tension de court-circuit  $U_{cc}$  du transformateur et donc de diminuer la chute de tension à ces bornes.

Actuellement les transformateurs sont dimensionnés avec des  $U_{cc}$  importants afin justement de réduire les courants de court-circuit.

De nombreux emplacements sont encore possibles, comme au niveau d'un départ, après le jeu de barre afin de sécuriser une installation sensible. Ou encore entre un réseau existant et un générateur isolé que l'on veut relier à celui-ci.

Lors de la conception des réseaux futurs, un limiteur de courant peut être prévu après l'arrivée MT sur les transformateurs afin de limiter les courants de court-circuit et ainsi éviter de surdimensionner le réseau.

### **III.5.Conclusion :**

Les défauts sont définis comme étant des événements qui contribuent à la violation des limites de conception des composants du réseau électrique. Le courant de court-circuit est défini comme étant une connexion anormale (relativement de basse impédance) entre deux points de potentiels différents, produite accidentellement ou intentionnellement peut endommager les équipements constituant le réseau.

Le limiteur de courant supraconducteur est un élément clé pour la protection des matériels électriques, l'extension des puissances transitées sur réseaux existants, l'accroissement du degré d'interconnexion des réseaux et de la qualité du service. Le phénomène exploité est, sauf de rares exceptions, le passage de l'état supraconducteur à l'état résistif, obtenu lorsque le courant atteint un certain seuil.

Nous avons décrit dans ce chapitre les différents types de limiteurs et leurs configurations dans un réseau électrique. 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. Le calcul des courants de court-circuit et de voir leur influence sur le réseau électrique sans et avec limiteurs de courant fera l'objet du chapitre suivant

# CHAPITRE IV

## SIMULATION DE COURANT DE DÉFAUT

## IV.1 Introduction:

Le logiciel PSIM, nous offre la simulation de défaut de court de circuit Biphase et Triphase aux bornes des jeux de barre, dans un réseau électrique et l'analyse des formes d'ondes et Les amplitudes de tensions et courants de défaut, chose qui nous a permet de voir le bon comportement du matériau supraconducteur et leur intérêt sur la limitation du courant de défaut.

Le modèle utilisé pour simuler le limiteur de courant de défaut avec l'utilisation des caractéristiques supraconductrices est : Modèle de résistance variable donné par (II .8)

- $R=0$  si  $T < T_c ; J < J_c$  ;
- $R=R_{ths}$  si  $T > T_c ; J > J_c$

Le circuit de simulation est alimenté par une source de tension alternative à partir des générateurs  $G_1$ ,  $G_2$  et  $G_3$  à travers les transformateurs de puissances TP 19 kv/220 kv avec une résistance de ligne  $R_L$  et une charge  $Rch_1$  connectée au jeu de barre 05 ( $JB_5$ ) et  $Rch_2$  connectée au jeu de barre 6 ( $JB_6$ ) et  $Rch_3$  connectée au jeu de barre 7 ( $JB_7$ ), la Figure (VI.1 ) représente le circuit de simulation sans limiteur et la Figure ( VI.2 ) représente le circuit de simulation avec limiteur.

### IV.2 Simulation et discussion des résultats:

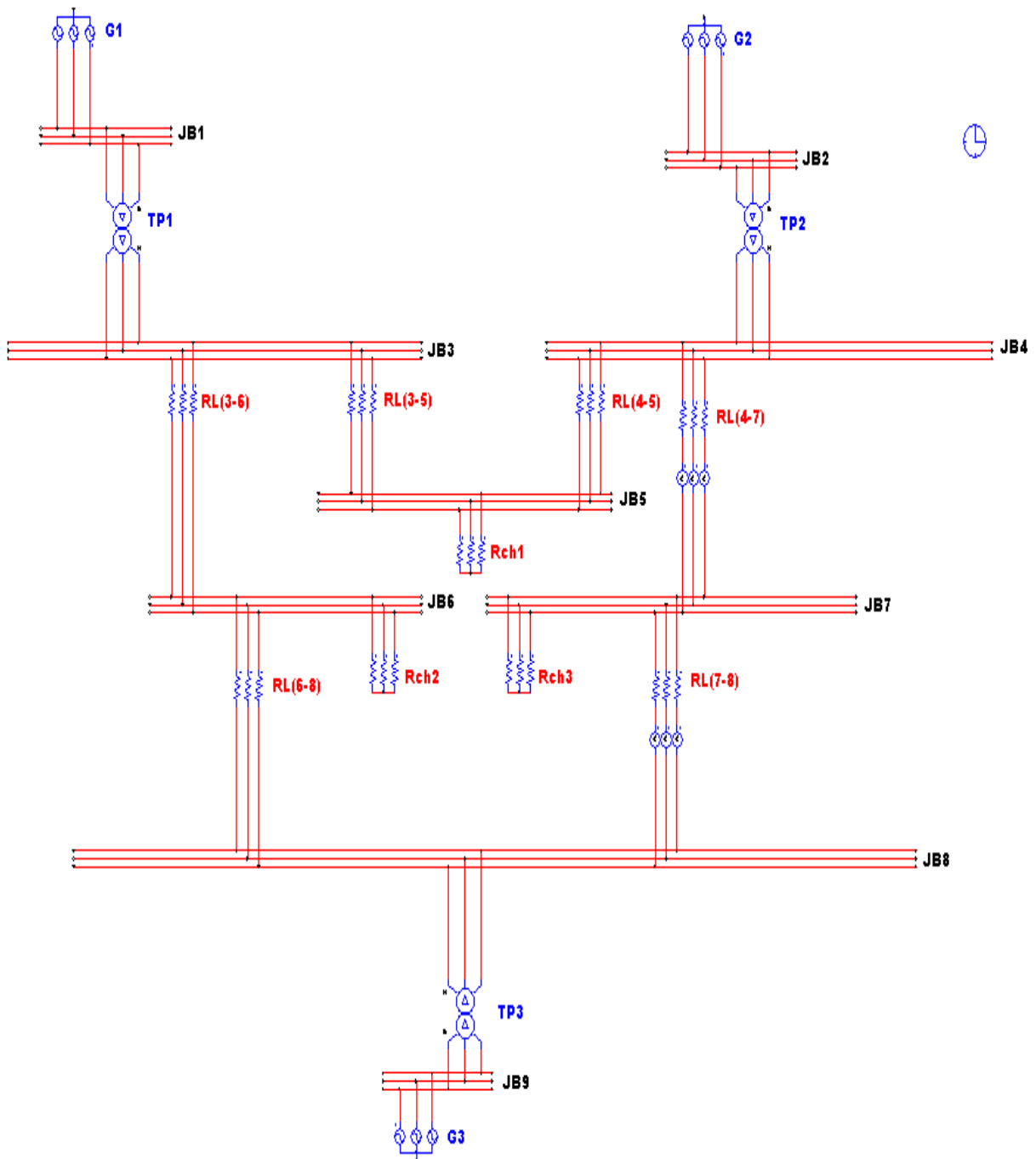


Figure IV.1 : Circuit de simulation Sans Limiteur.

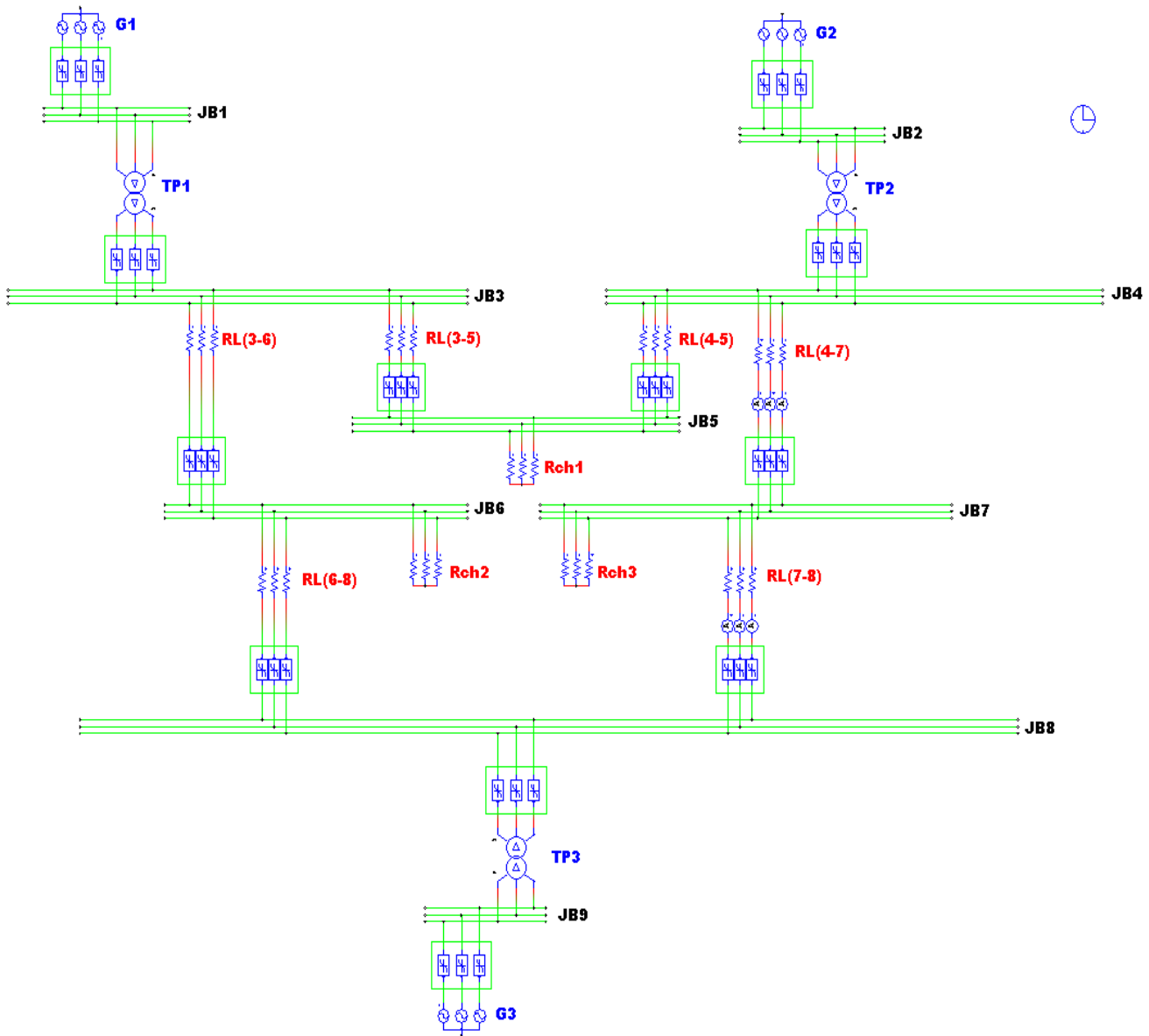


Figure IV.2 : Circuit de simulation Avec Limiteur.

**Les données de simulation :**

TP 19 kv/220 kv , f = 50 Hz ;  
 $R_L = 0.02 \Omega/km$  ;  $R_{ch1}, R_{ch2}, R_{ch3} = 300 \Omega$

## IV.3 Résultats de Simulation du Circuit Sans Défaut :

### IV.3.1 Circuit Sans Défaut et Sans Limiteur :

❖ Les courants de la ligne (4-7) : Comme illustré sur le graphe suivant  $I_n = 204$  A.

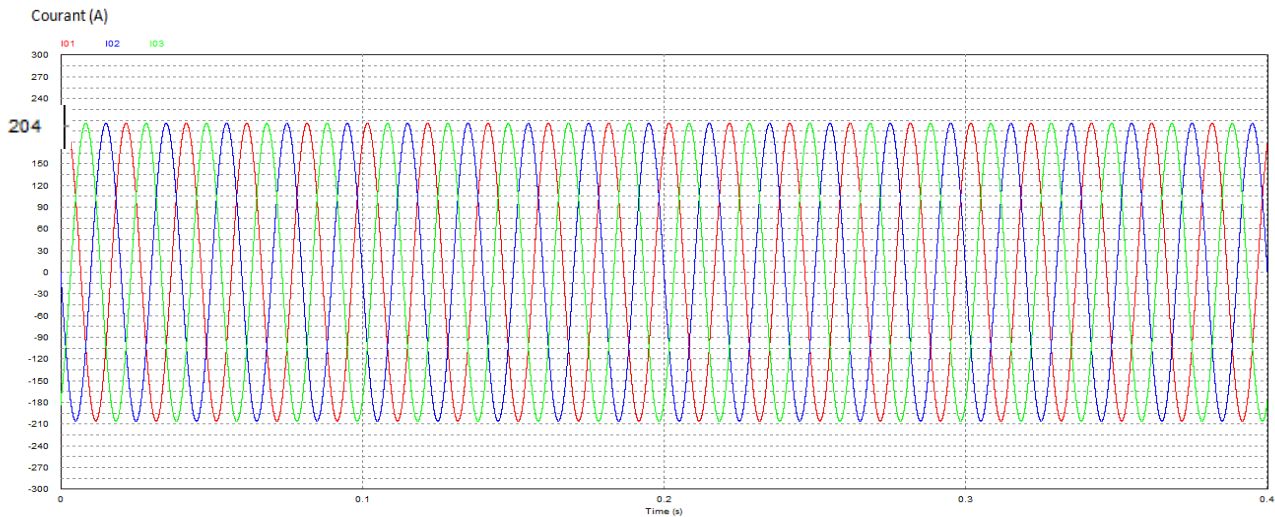


Figure IV.3 : L'allure des courants  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  de la ligne (4-7).

❖ Les tensions de la ligne (4-7) : La tension nominale de la ligne  $U_n = 220$  kV.

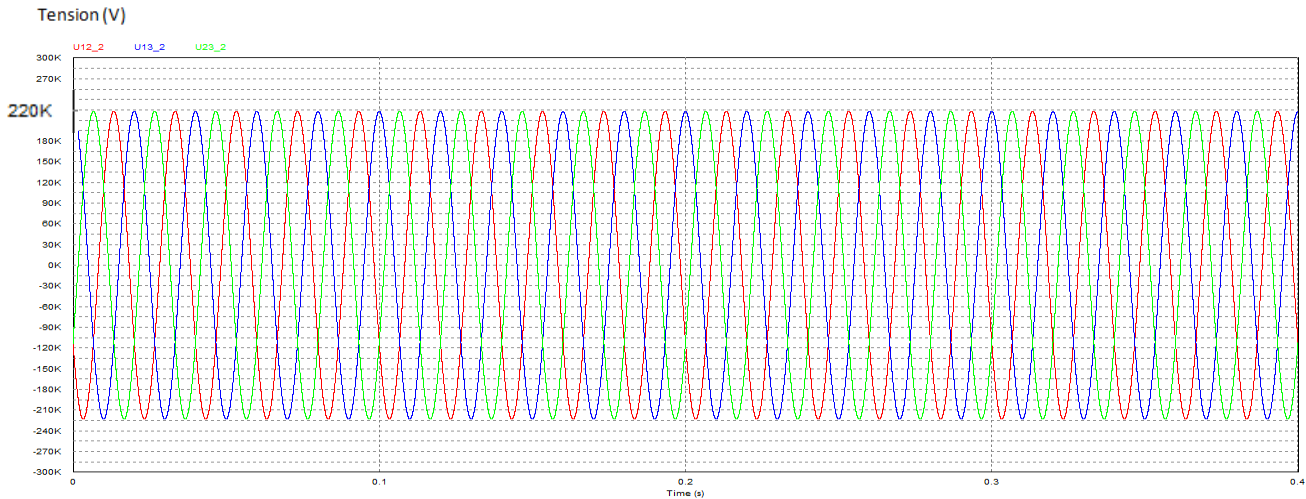
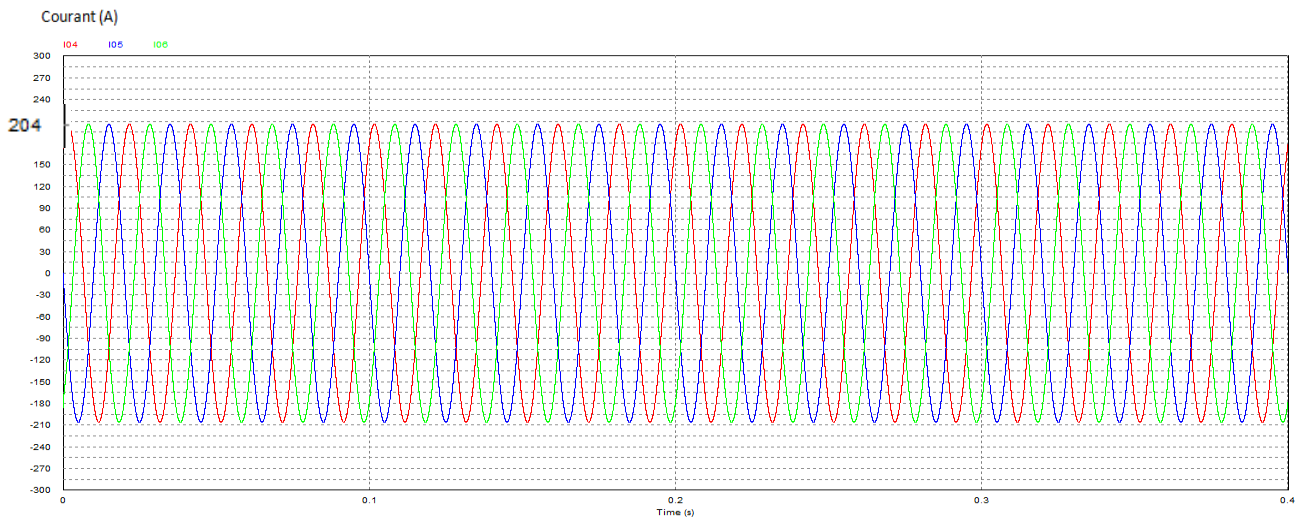


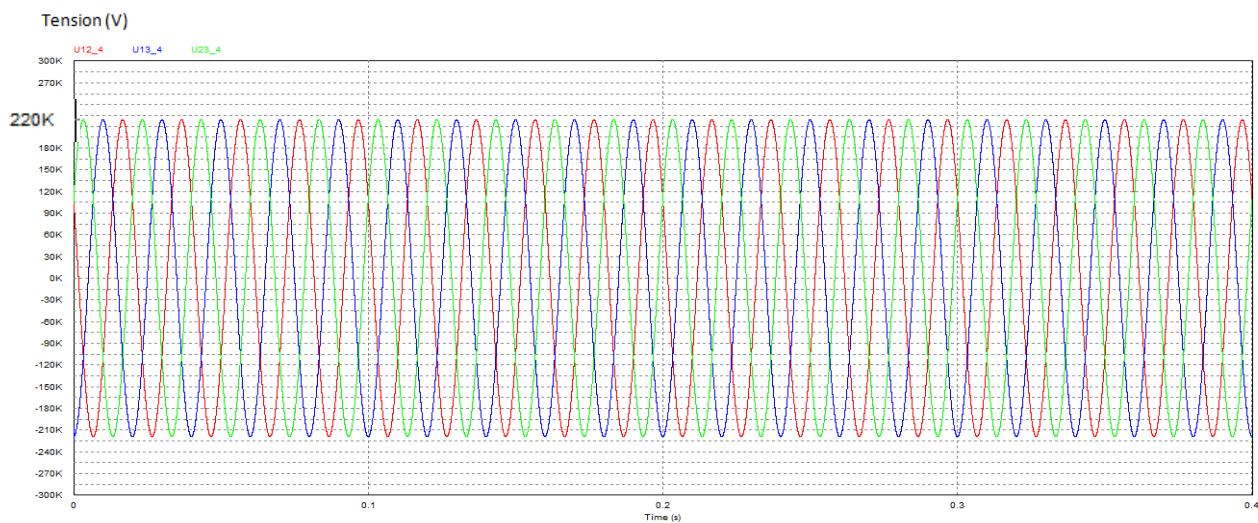
Figure IV.4 : L'allure des tensions  $U_{12}$ ,  $U_{23}$ ,  $U_{13}$  de la ligne (4-7).

❖ Les courants de la ligne (7-8): Comme illustré sur le graphe suivant  $I_n = 204$  A.



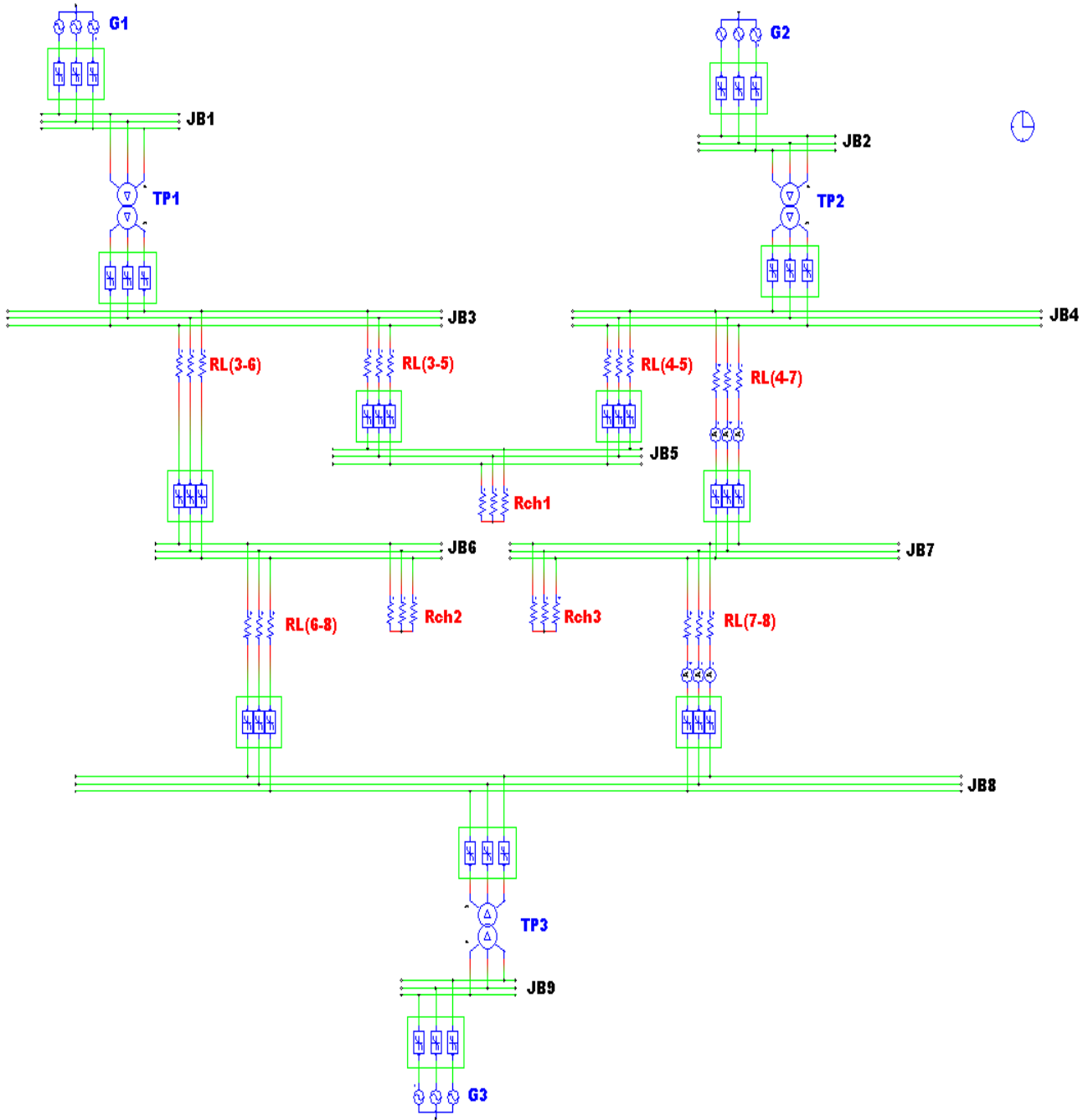
**Figure IV.5 : L'allure des courants  $I_4$ ,  $I_5$ ,  $I_6$  de la ligne (7-8).**

❖ Les tensions de la ligne (7-8): La tension nominale de la ligne  $U_n = 220$  kV.



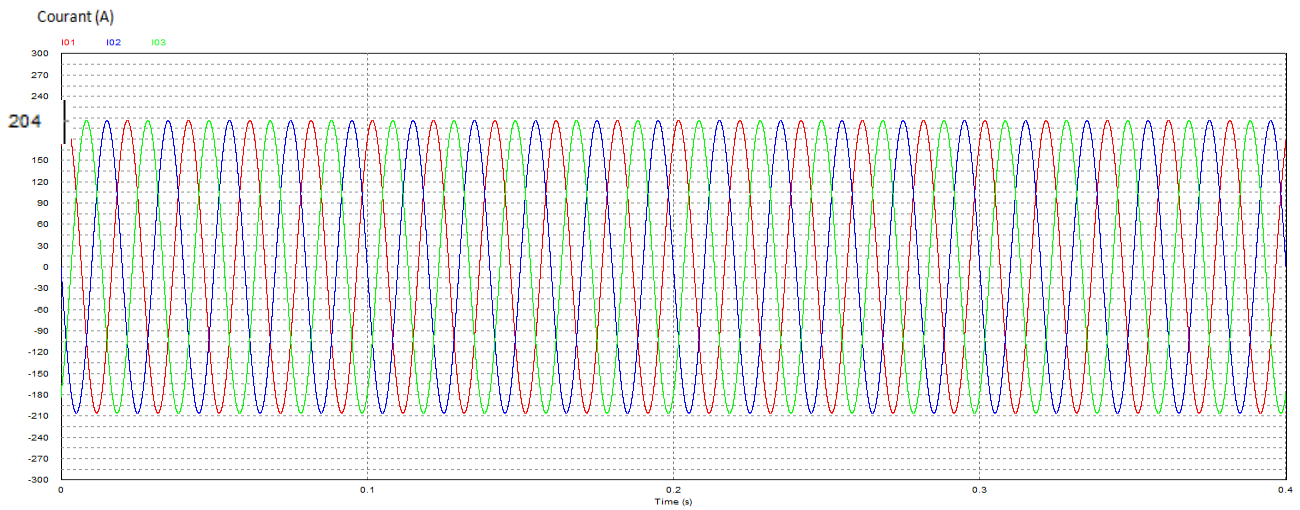
**Figure IV.6 : L'allure des tensions  $U_{12}$ ,  $U_{23}$ ,  $U_{13}$  de la ligne (7-8).**

**IV.3.2 Circuit Sans Défaut et Avec Limiteur :**



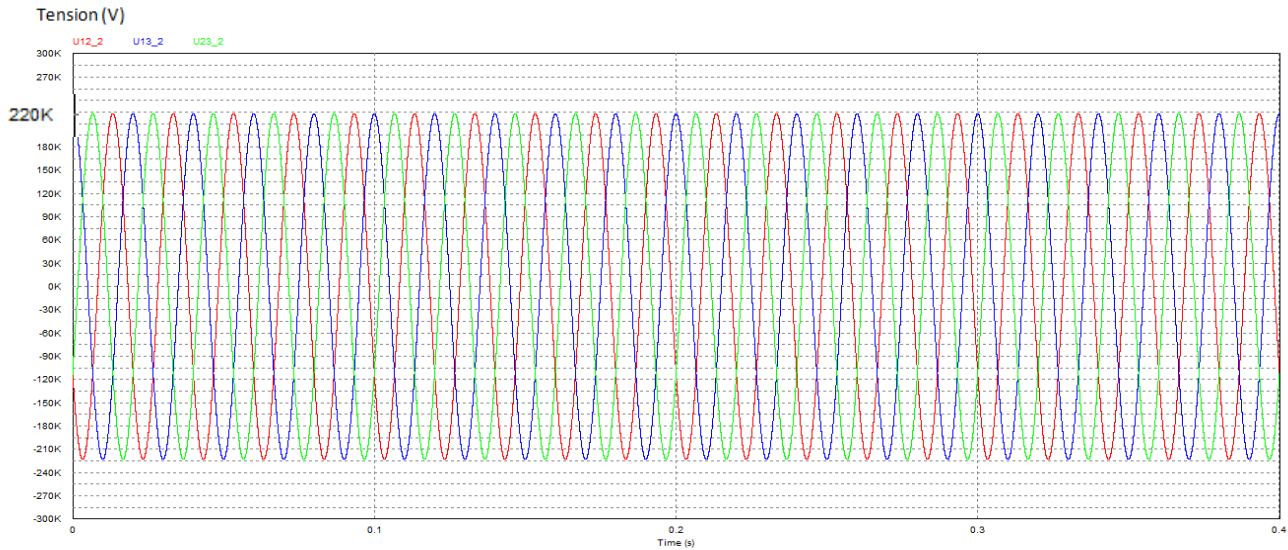
**Figure IV.7 : Circuit de simulation Sans Défaut et Avec limiteur.**

❖ Les courants de ligne (4-7) : Comme illustré sur le graphe suivant  $I_n = 204$



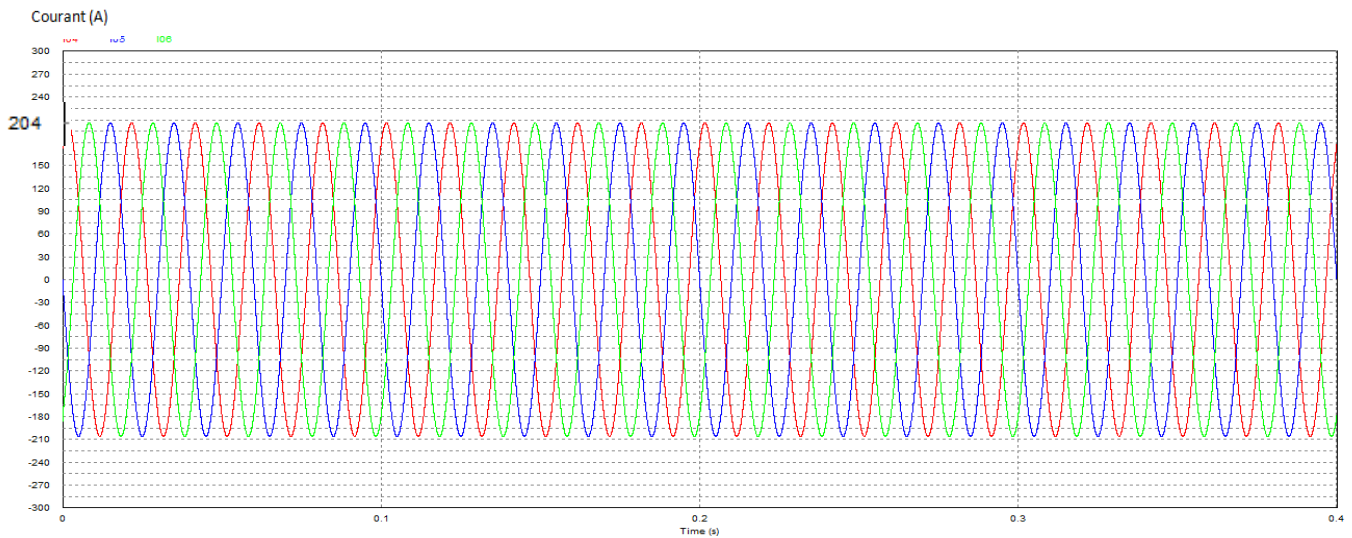
**Figure IV.8 : L'allure des courants  $I_1, I_2, I_3$  de la ligne (4-7).**

❖ Les tensions de la ligne (4-7) : La tension nominale de la ligne  $U_n = 220$  kV.



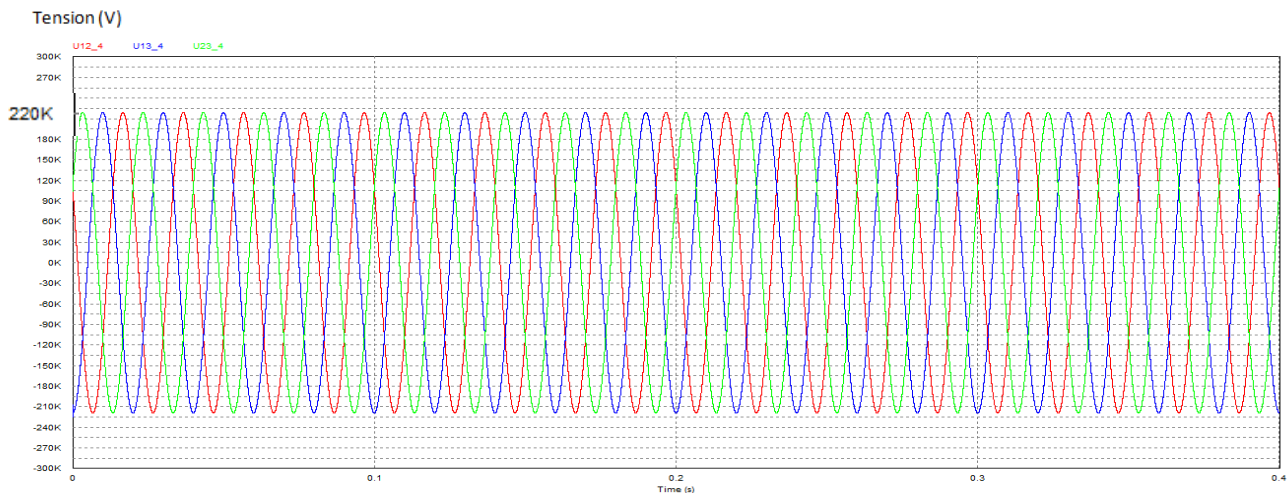
**Figure IV.9 L'allure des tensions  $U_{12}, U_{23}, U_{13}$  de la ligne (4-7).**

❖ Les courants de la ligne (7-8): Comme illustré sur le graphe suivant  $I_n = 204$  A.



**Figure IV.10 : L'allure des courants  $I_4$ ,  $I_5$ ,  $I_6$  de la ligne (7-8).**

❖ Les tensions de la ligne (7-8): La tension nominale de la ligne  $U_n = 220$  kV.



**Figure IV.11 : L'allure des tensions  $U_{12}$ ,  $U_{23}$ ,  $U_{13}$  (7-8).**

**Interprétation des résultats:** On remarque que  $U_n = 220$  kV et  $I_n = 204$  A. Pour la ligne (4-7) et la ligne (7-8), sont des mêmes valeurs trouvées dans le circuit sans défaut et sans limiteur, vu que le courant consommé par la charge ne pas dépassant le courant critique, par conséquent le limiteur supraconducteur se comporté comme étant une résistance négligeable dans le circuit.

## IV.4 Résultats de simulation du Circuit Avec Défaut :

### IV.4.1 Court Circuit Biphasé :

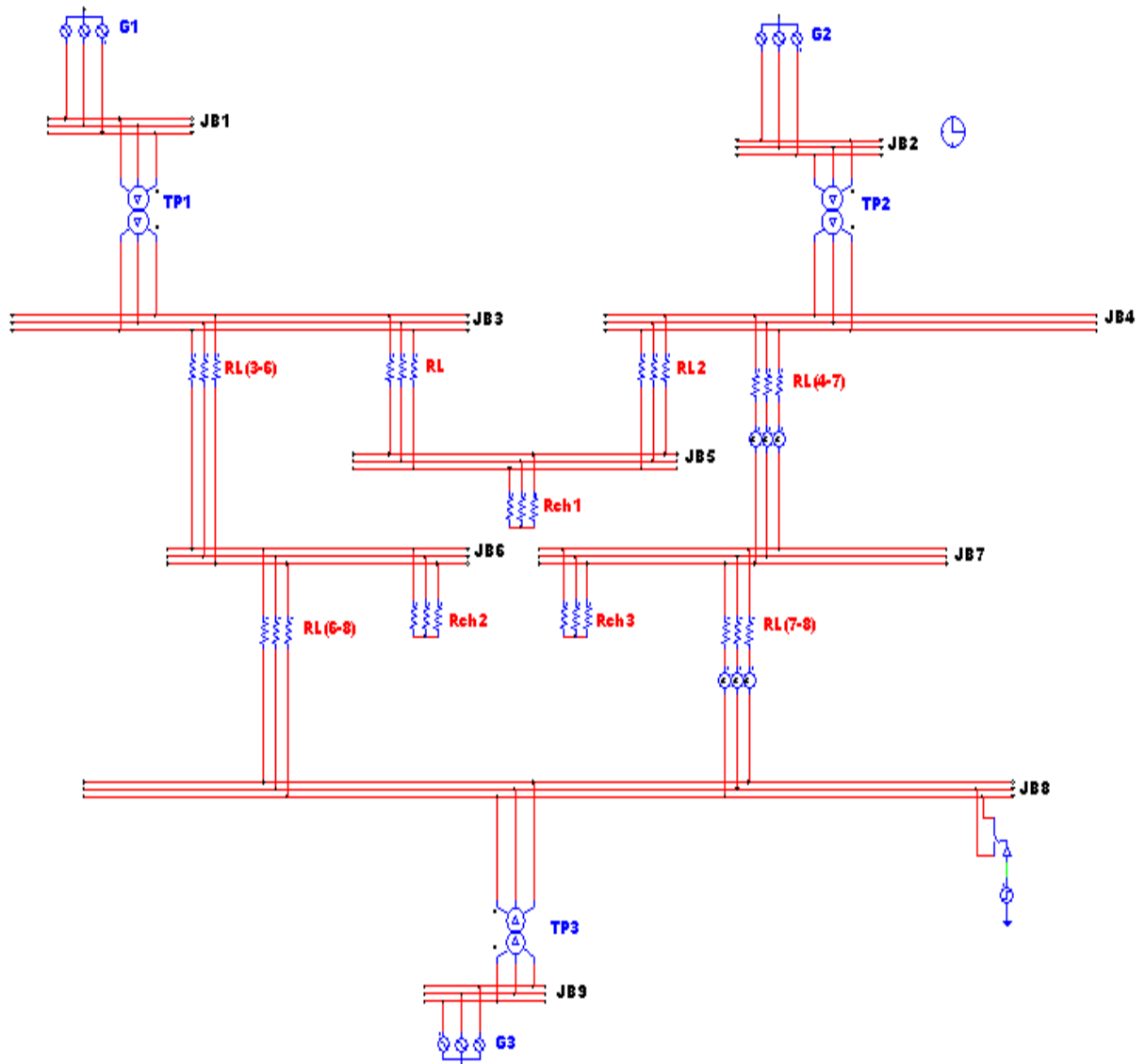


Figure IV.12 : Circuit avec Défaut Biphasé Sans Limiteur.

Un court-circuit Biphasé aux bornes du jeu de barre **JB 8** (V-W) est appliqué à l'instant  $t = 0.1$  s et pour une bonne visibilité, la simulation est effectuée sur une durée de 0.4 s.

## ❖ Les courants de la Ligne (4-7) :

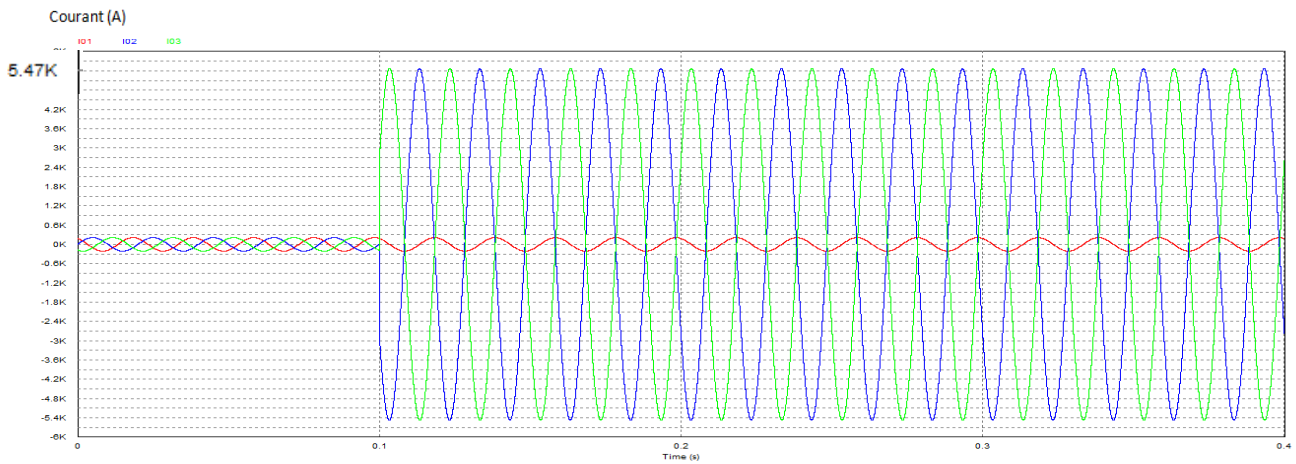


Figure IV.13 : L'allure des courants  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  de la ligne (4-7).

## ❖ Les tensions de la ligne (4-7) :

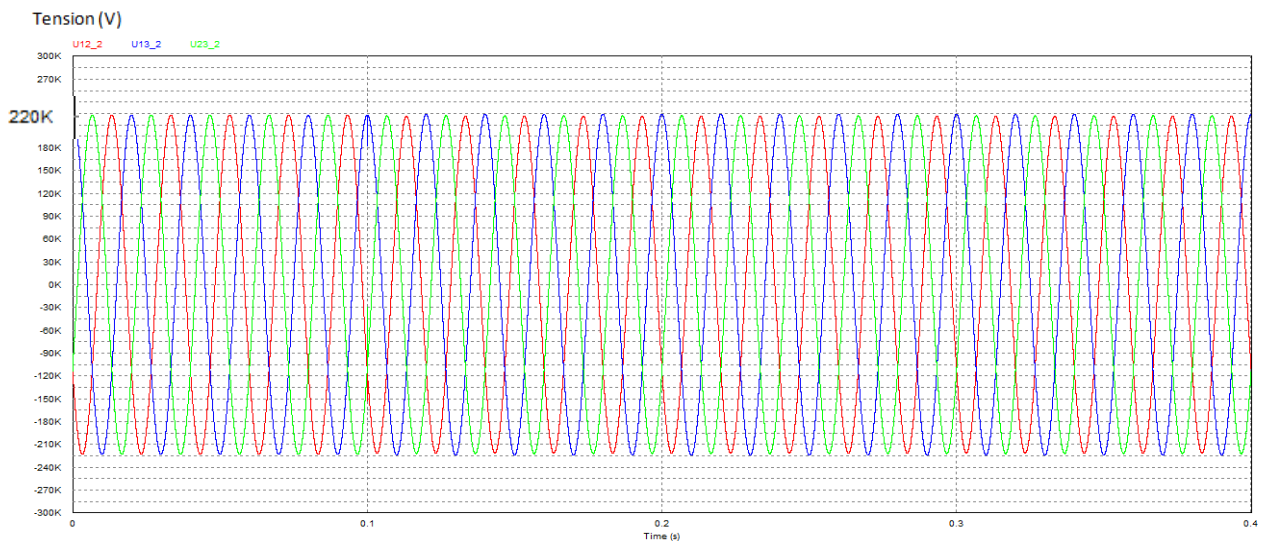


Figure IV.14 : L'allure des tensions  $U_{12}$ ,  $U_{23}$ ,  $U_{13}$  de la ligne (4-7).

**Interprétation des résultats:** Le courant nominal de la ligne (4-7) est  $I_n = 204$  A, jusqu'à l'application du défaut à  $t = 0.1$  s à partir de cet instant, Le courant de défaut  $I_{cc} = 5.47$  kA ( $I_{cc} = 27I_n$ ) pour les deux phases défectueuses (V-W), par ailleurs la phase (V) reste saine avec un courant de 204 A qui est la valeur nominale. Pour les tensions une petite perturbation à l'instant de défaut et après de ce dernier les tensions ils prennent ses formes initiales.

## ❖ Les courants de la ligne (7-8) :

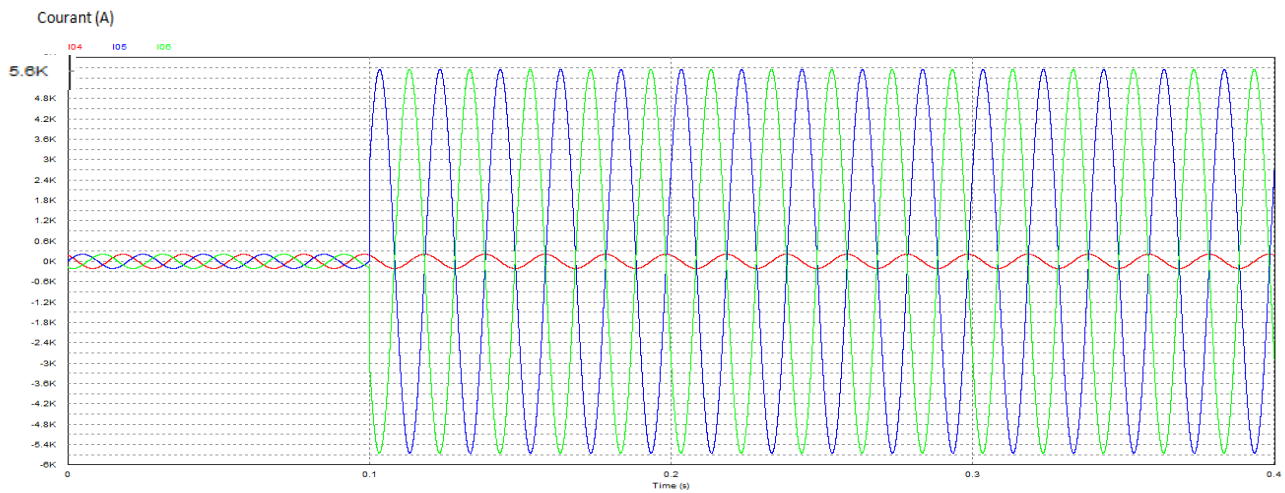


Figure IV.15 : L'allure des courants  $I_4$ ,  $I_5$ ,  $I_6$  de la ligne (7-8).

## ❖ Les tensions de la ligne (7-8) :

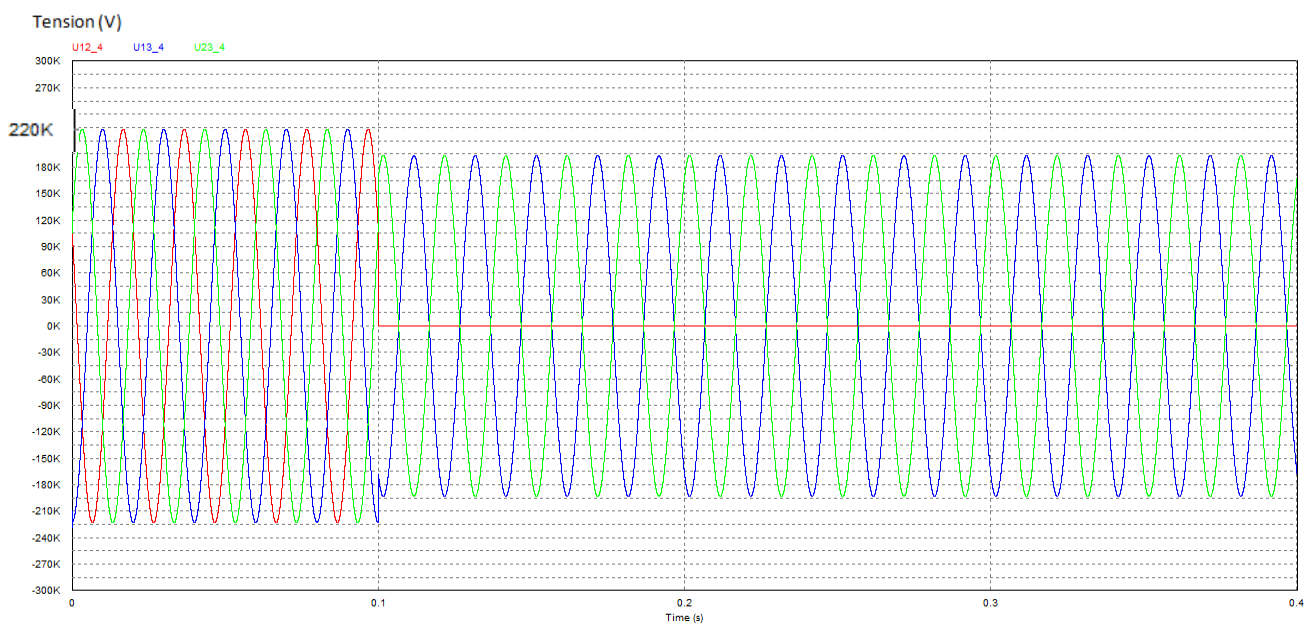
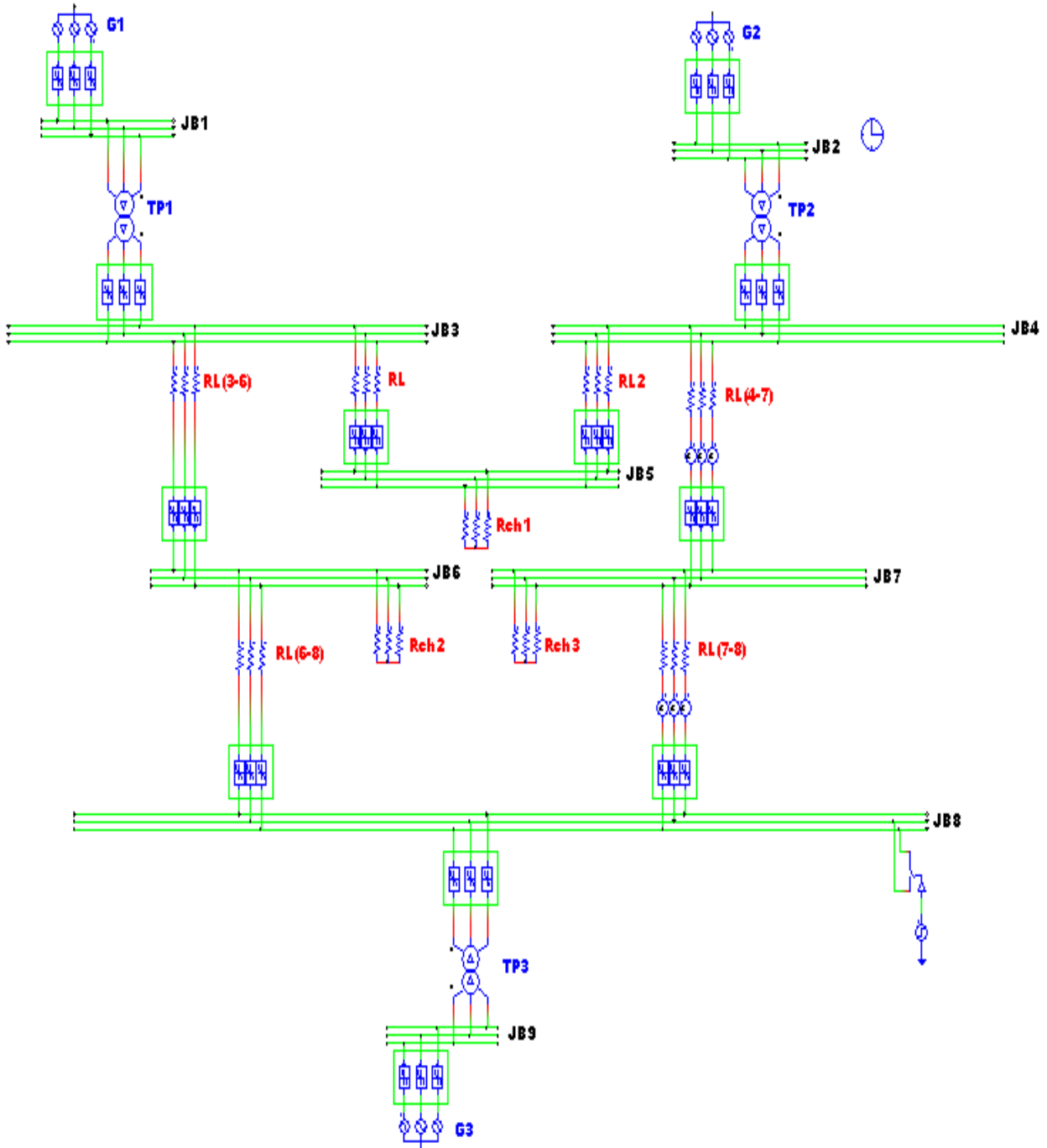


Figure IV.16 : L'allure des tensions  $U_{12}$ ,  $U_{23}$ ,  $U_{13}$  de la ligne (7-8).

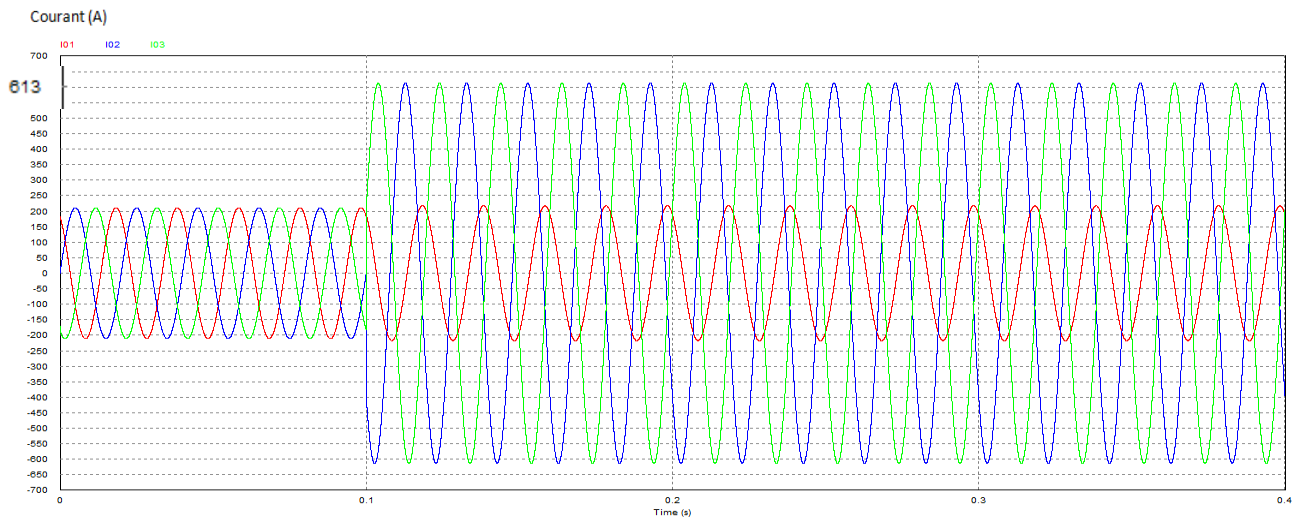
**Interprétation des résultats:** Le courant nominal de la ligne (7-8) est  $I_n = 204$  A, jusqu'à l'application du défaut à  $t = 0.1$  s à partir de cet instant, Le courant de défaut  $I_{cc} = 5.65$  kA ( $I_{cc} = 28I_n$ ) pour des deux phases défectueuses (V-W), par ailleurs la phase (V) reste saine avec un courant de 204 A qui est la valeur nominale Et pour les tensions on voit qu'un écrasement (sa valeur égale à zéro) de la tension  $U_{12}$  à cause de la mise à la terre des deux phases V et W.

**IV.4.2 Circuit avec Défaut et Avec Limiteur:**



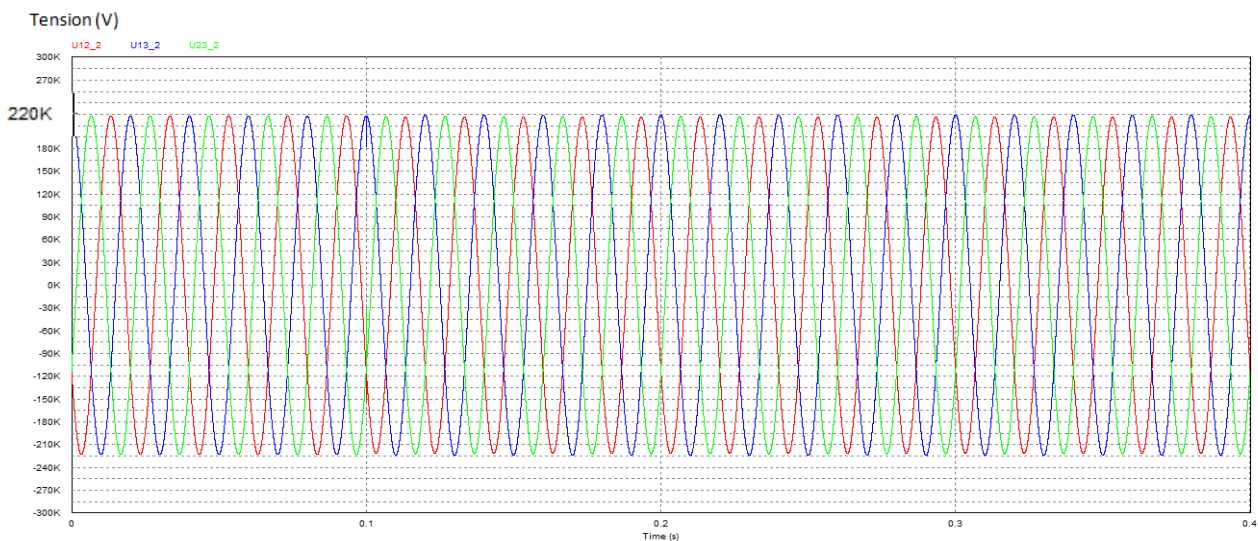
**Figure IV.17 : Circuit avec Défaut Biphasé et Avec Limiteur**

## ❖ Les courants de la ligne (4-7):



**Figure IV.18 : L'allure des courants  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  de la ligne (4-7).**

## ❖ Les tensions de la ligne (4-7):



**Figure IV.19 : L'allure des tensions  $U_{12}$ ,  $U_{23}$ ,  $U_{13}$  de la ligne (4-7).**

**Interprétation des résultats:** Après avoir inséré le limiteur on voit clairement que le courant est limité d'une valeur de 5.47 kA sans SFCL à une valeur  $I_L = 613$  A, avec SFCL à l'instant d'application du défaut (0.1s) où le courant de défaut dépasse le courant critique, par conséquent l'intervention du limiteur du courant où il joue le rôle d'une résistance à grande valeur (la transition du supraconducteur de l'état passant à l'état purement résistif).

## ❖ Les courants de la ligne (7-8):

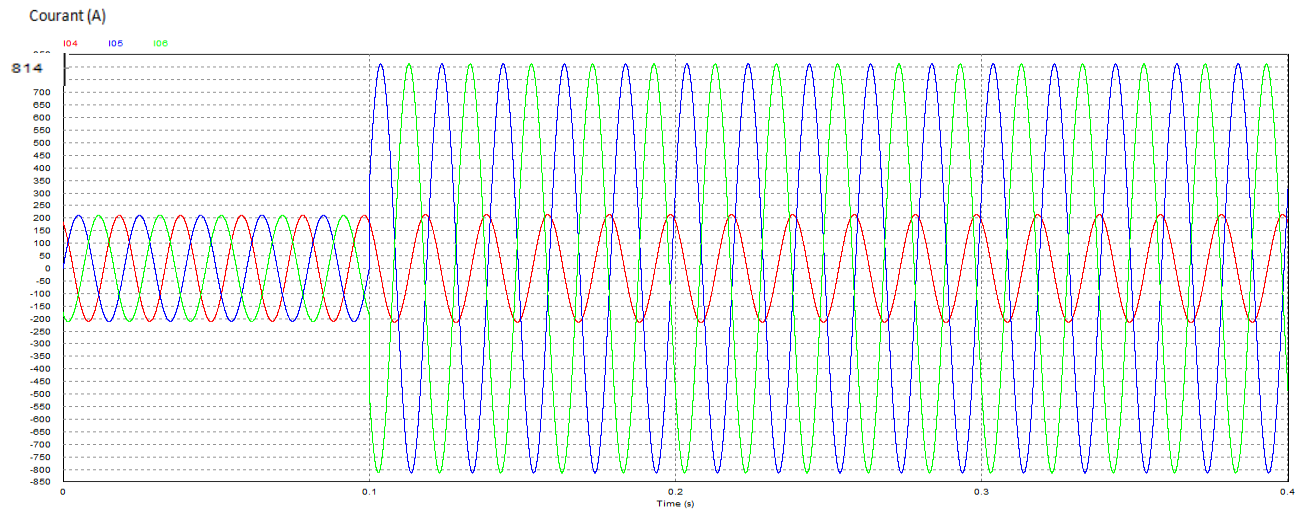


Figure IV.20 : L'allure des courants  $I_4$ ,  $I_5$ ,  $I_6$  de la ligne (7-8).

## ❖ Les tensions de la ligne (7-8) :

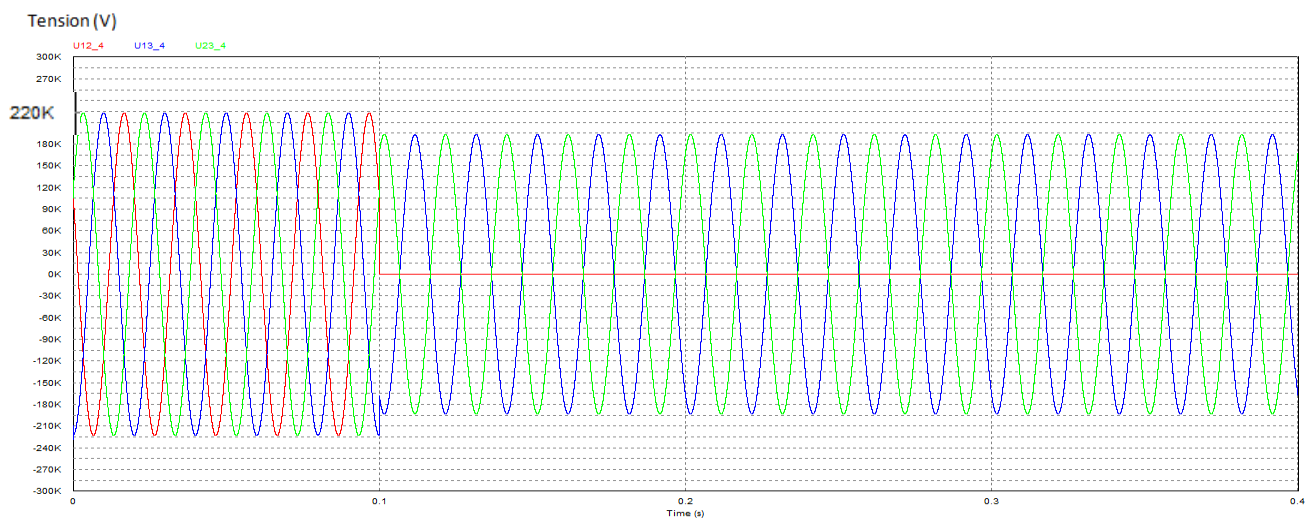


Figure IV.21 : L'allure des tensions  $U_{12}$ ,  $U_{23}$ ,  $U_{13}$  de la ligne (7-8).

**Interprétation des résultats:** Après avoir inséré le limiteur on voit clairement que le courant est limité d'une valeur de  $I_n=5.65$  kA sans SFCL à une valeur  $I_L= 814$  A à l'instant d'application du défaut (0.1s) où le courant de défaut dépasse le courant critique, par conséquent l'intervention du limiteur de courant. Et pour les tensions un écrasement de la tension  $U_{12}$  également.

### IV.4.3 Court de circuit Triphasé :

#### IV.4.3.1 Circuit avec Défaut et Sans Limiteur :

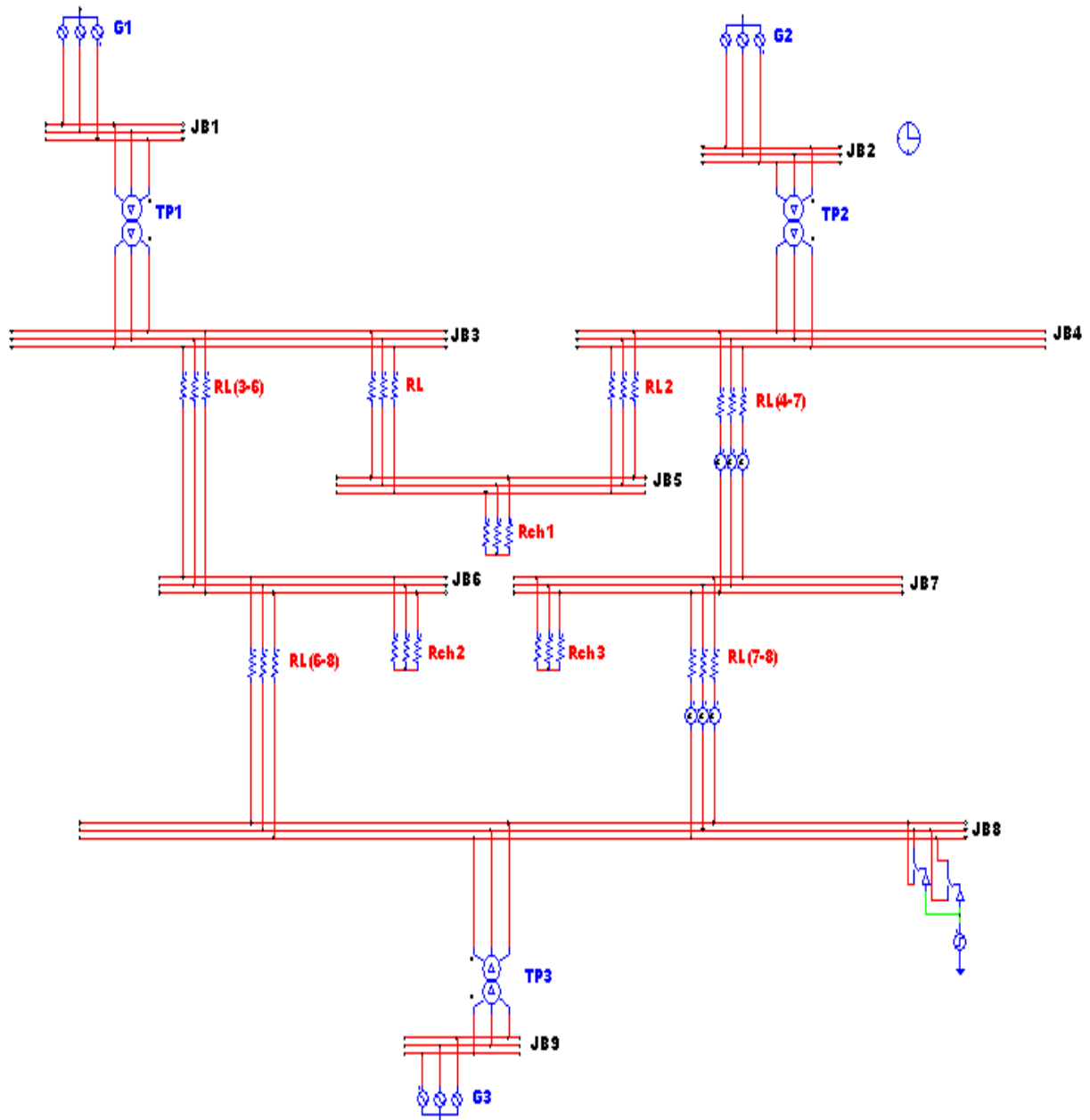


Figure IV.22 : Circuit avec Défaut Triphasé et Sans Limiteur.

Un court-circuit Triphasé aux bornes du jeu de barre **JB 8**(U-V-W) est appliqué à l'instant  $t = 0.1s$  et pour une bonne visibilité, la simulation est effectuée sur une durée de  $0.4s$ .

## ❖ Les courants de la ligne (4-7) :

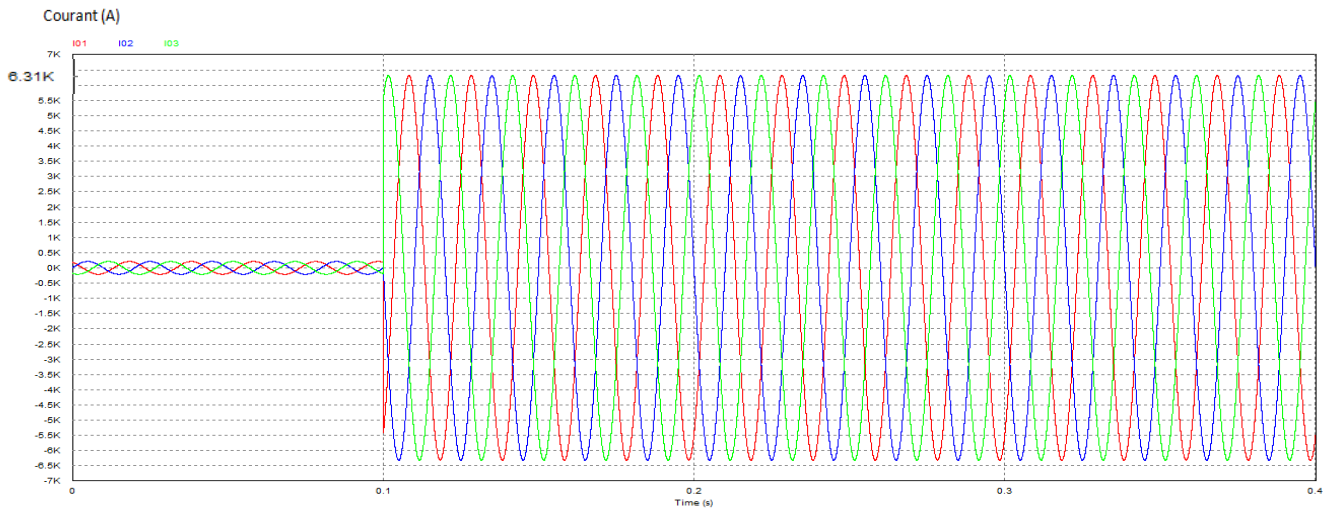


Figure IV.23 : L'allure des courants  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  de la ligne (4-7).

## ❖ Les tensions de la ligne (4-7) :

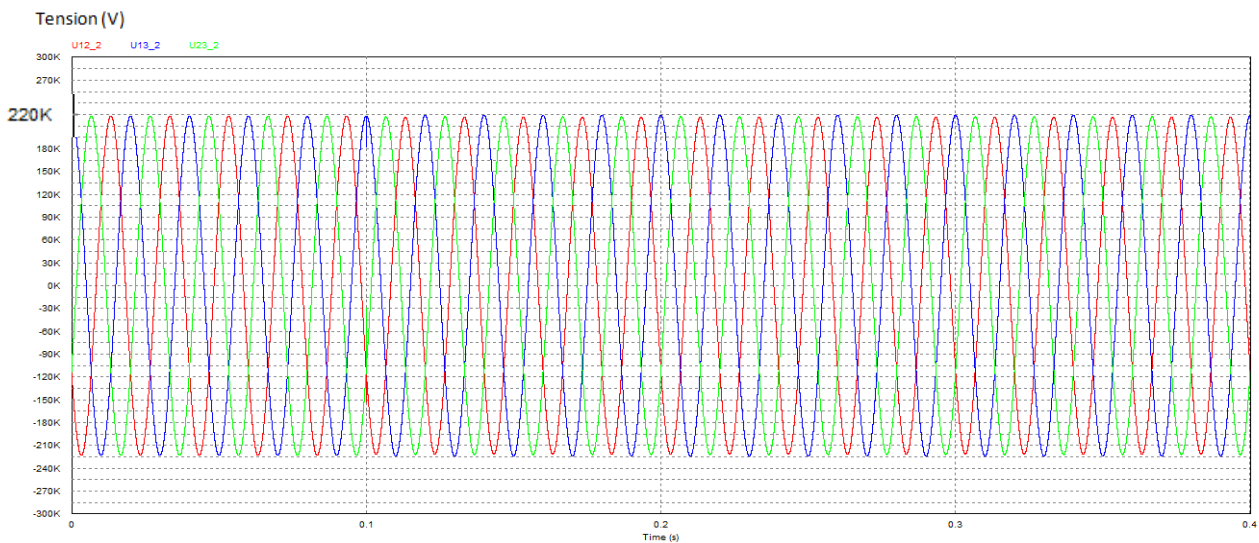
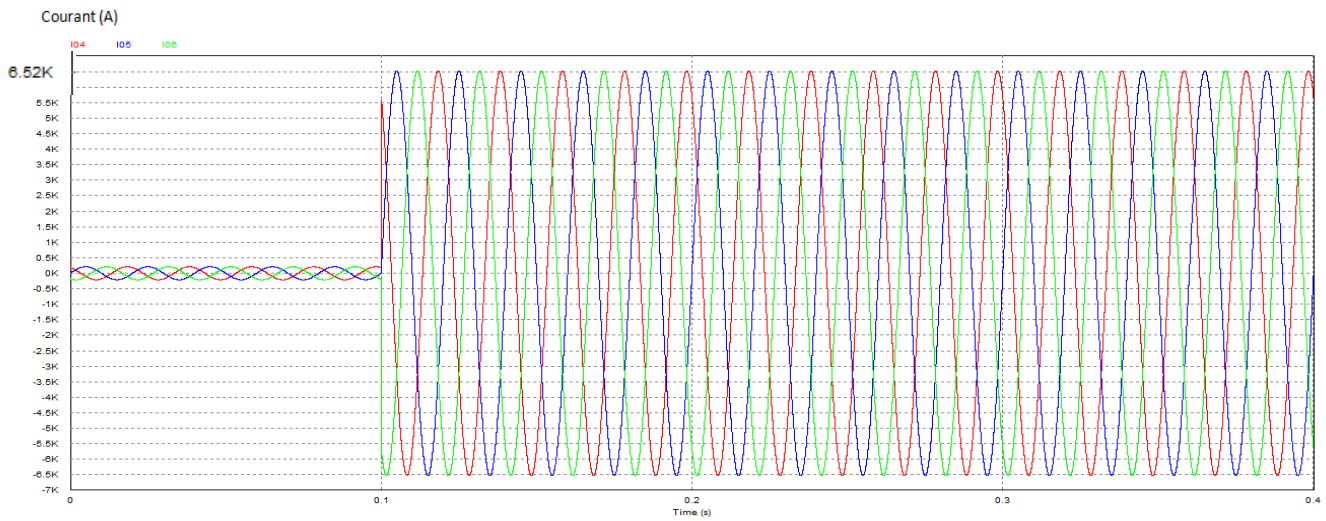


Figure IV.24 : L'allure des tensions  $U_{12}$ ,  $U_{23}$ ,  $U_{13}$  de la ligne (4-7).

**Interprétation des résultats:** Le courant nominal de la ligne (4-7) est  $I_n = 204$  A, jusqu'à l'application du défaut à  $t = 0.1$  s, à partir de cet instant, Le courant de défaut  $I_{cc} = 6.31$  kA. et Pour les tensions une petite perturbation à l'instant de défaut et après de ce dernier les tensions ils prennent ses formes initiales.

## ❖ Les courants de la ligne (7-8) :



**Figure IV.25 : L'allure des courants  $I_4$ ,  $I_5$ ,  $I_6$  de la ligne (7-8).**

## ❖ Les tensions de la ligne (7-8) :



**Figure IV.26 : L'allure des tensions  $U_{12}$ ,  $U_{23}$ ,  $U_{13}$  de la ligne (7-8).**

**Interprétation des résultats:** Le courant nominal de la ligne N (7-8) est  $I_n = 204$  A, jusqu'à l'application du défaut à  $t = 0.1$  s, à partir de cet instant, Le courant de défaut  $I_{cc} = 6.52$  kA, et pour les tensions on voit qu'un écrasement (sa valeur égale à zéro) des trois tensions à cause de la mise à la terre des trois phases U, V et W.

IV.4.3.2 Circuit avec Défaut et Avec Limiteur :

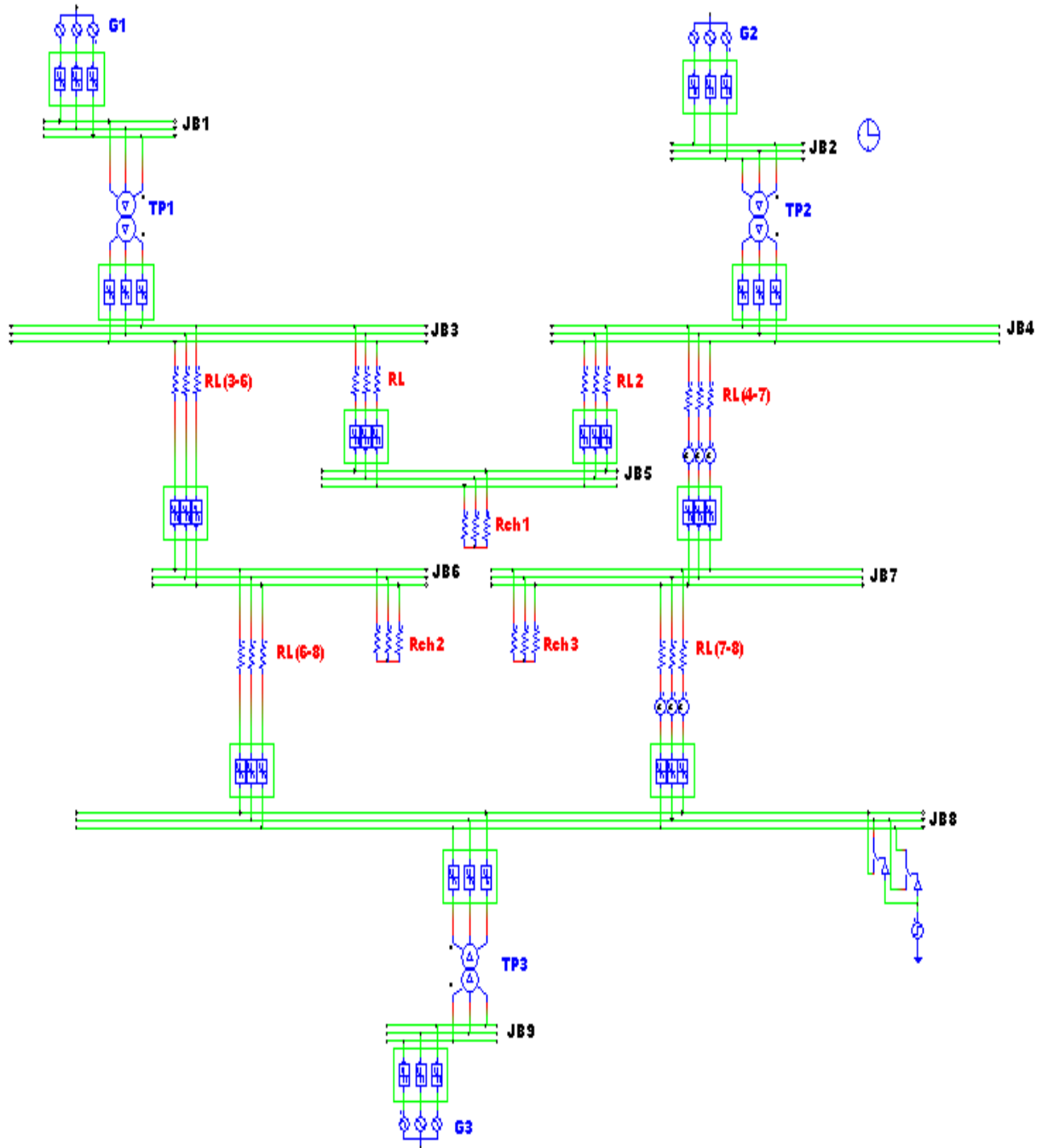


Figure IV.27 : Circuit avec Défaut Triphasé et Avec Limiteur.

## ❖ Les courants de la ligne (4-7) :

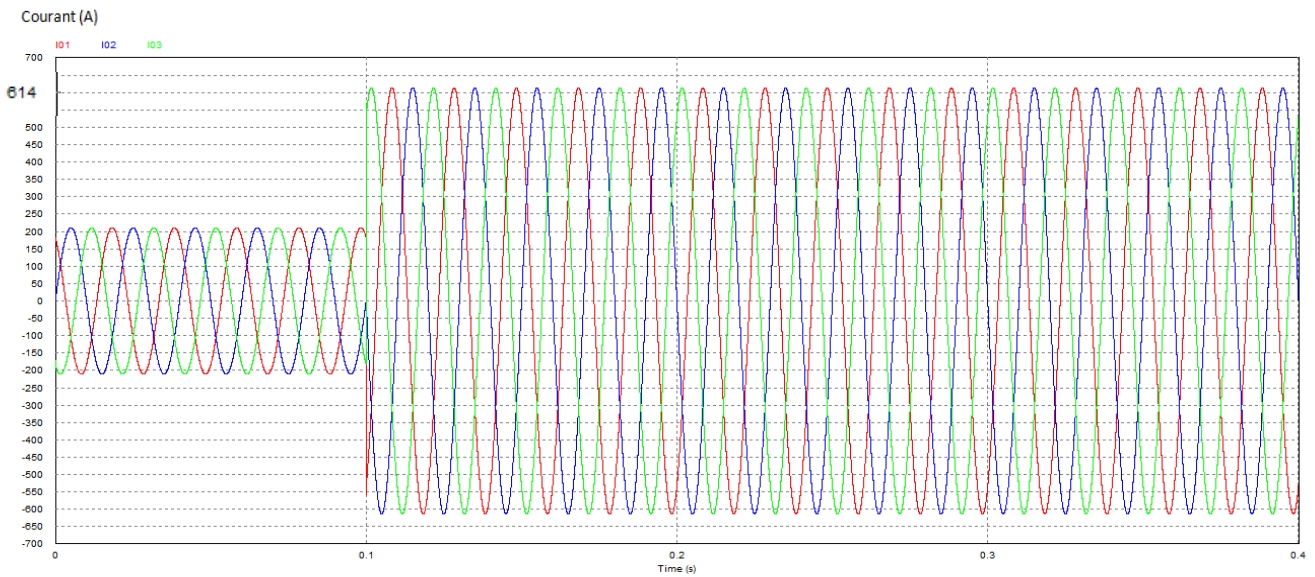


Figure VI.28 : L'allure des courants  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  de la ligne (4-7).

## ❖ Les tensions de la ligne (4-7) :

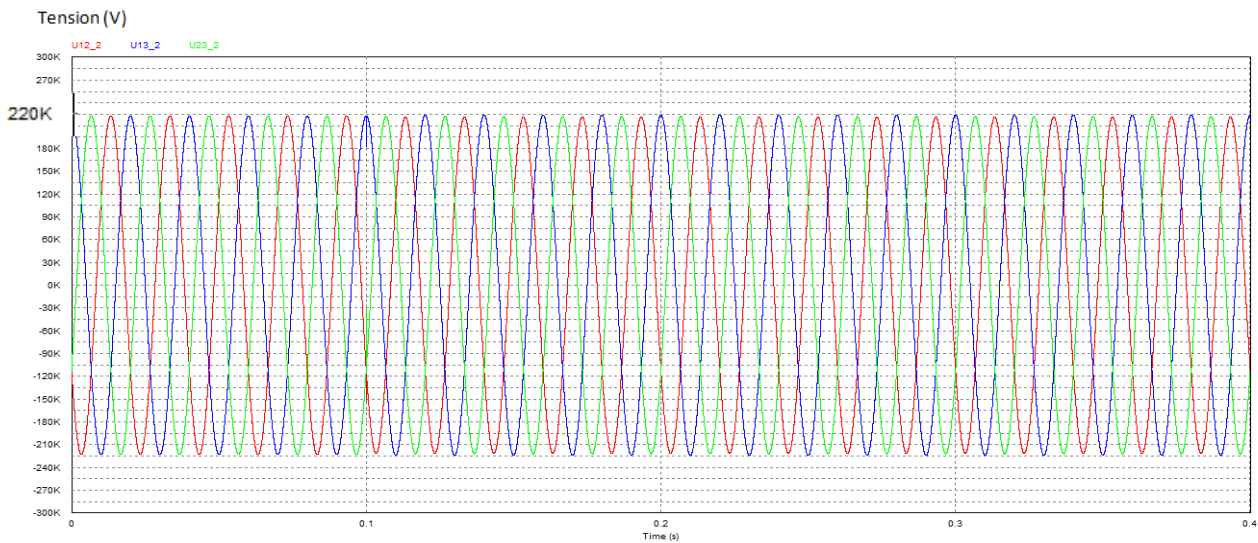


Figure IV.29 : L'allure des tensions  $U_{12}$ ,  $U_{23}$ ,  $U_{13}$  de la ligne (4-7).

**Interprétation des résultats:** Après avoir intégré le limiteur supraconducteur dans le circuit on constate clairement que, les courants pendant la période de défaut à  $t \leq 0,1$  s,  $I_n = 204$  A. à  $t \geq 0,1$  s  $I_L = 614$  A, les courants de court-circuit sont réduit d'un facteur important à cause de l'intervention du limiteur.

## ❖ Les courants de la ligne (7-8) :

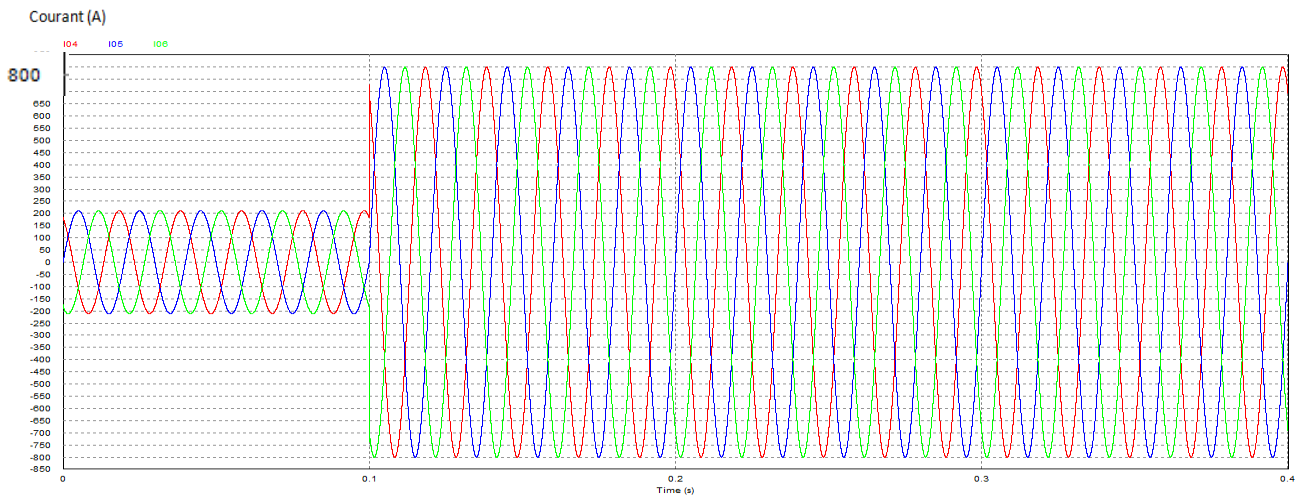


Figure IV.30 : L'allure des courants  $I_4$ ,  $I_5$ ,  $I_6$  de la ligne (7-8).

## ❖ Les tensions de la ligne (7-8) :

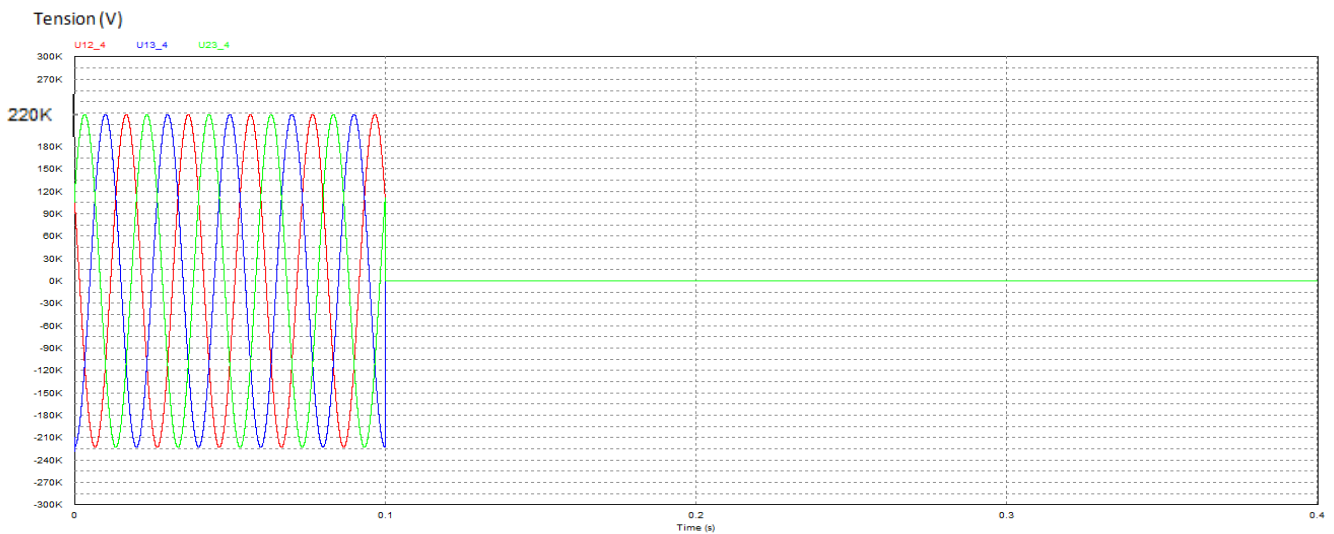


Figure IV.31 : L'allure des tensions  $U_{12}$ ,  $U_{23}$ ,  $U_{13}$  de la ligne (7-8).

**Interprétation des résultats:** Après avoir intégré le limiteur supraconducteur dans le circuit on constate clairement que, les courants pendant la période de défaut à  $t \leq 0,1$  s  $I_n = 204$  A. à  $t \geq 0,1$  s  $I_L = 800$  A, les courants de court-circuit sont réduit d'un facteur important à cause de l'intervention du limiteur.

## **IV.5 Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons exposé l'interface graphique des calculs du courant de court de circuit et la tension à l'aide du logiciel PSIM. Grâce à ce dernier nous avons pu présenter les résultats de simulation du courant de défaut dans un réseau à neuf jeux de barres et de voir le comportement et l'intérêt du limiteur supraconducteur à travers la simulation avec et sans l'insertion du limiteur. Les résultats de simulation ont montré l'efficacité de ce modèle pour la limitation du courant de défaut par rapport le courant nominale, qui présente une marge de sécurité très importante par rapport au courant de court-circuit sans limiteur, qui peut atteindre des valeurs extrêmement élevées.



**CONCLUSION  
GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE :

Les investissements humains et matériels affectés aux réseaux électriques sont énormes. Pour cela, le réseau électrique doit répondre à trois exigences essentielles : stabilité, économie et surtout continuité du service. Les lignes et les câbles de distribution d'énergie électrique moyenne et haute tension constituent une partie essentielle d'un réseau électrique qui doit assurer la continuité de l'alimentation en électricité aux consommateurs HT et BT. Ce qui n'est pas toujours le cas, car ces lignes sont souvent exposées à des incidents ou défauts qui peuvent interrompre ce service et engendrer des pertes financières importantes pour les industriels et des désagréments pour les simples consommateurs.

Le court-circuit, surtout polyphasés souvent sont proches des centrales de production, entraînent une diminution du couple résistant ( $C_r$ ) des machines et donc une rupture de l'équilibre entre celui-ci et le couple moteur ( $C_m$ ), s'ils ne sont pas éliminés rapidement, ils peuvent conduire à la perte de stabilité de groupes générateurs et à des fonctionnements hors synchronisme préjudiciables aux matériels.

La Commission Electrotechnique Internationale (C.E.I) définit la protection comme l'ensemble des dispositions destinées à la détection des défauts et des situations anormales des réseaux afin de commander le déclenchement d'un ou de plusieurs disjoncteurs et, si nécessaire d'élaborer d'autres ordres de signalisations. On définit le limiteur du courant de défaut comme étant un dispositif de protection et de limitation de fort appel du courant de court-circuit. Ce dernier le limiteur est réalisé par le profite de la transition naturelle très rapide du matériau supraconducteur de l'état supraconducteur vers l'état normal, cet avantage nous a donné la possibilité de limiter le courant de défaut à un temps opportun, et par conséquent de protéger l'installation électrique. A travers la modélisation du matériau supraconducteur à haute température critique, nous avons intégré le limiteur sur un réseau triphasé dont l'objectif est de voir son importance sur la limitation du courant de défaut. Vu la difficulté de maîtriser un tel logiciel accepte la modélisation de ce type du matériau (supraconducteur), nous avons modélisé ce dernier comme étant une résistance variable, tout ça à l'aide du logiciel PSIM qui nous a aidé la simulation et la comparaison des résultats avec et sans limiteur supraconducteur, et avec et sans défaut biphasé et triphasé.

Les résultats de simulation ont montré l'efficacité de ce modèle pour la limitation du courant de défaut par rapport le courant nominale, qui présente une marge de sécurité très importante par rapport au courant de court-circuit sans limiteur, qui peut atteindre des valeurs extrêmement élevées.

L'absence de courant en dessus d'une certaine valeur, bien inférieure au courant présumé de court-circuit, permet de réduire les contraintes électriques et thermiques mais également la taille et le coût des dispositifs de protection. En régime assigné, les pertes dans l'élément supraconducteur sont pratiquement nulles.

Dans ce travail on a essayé de présenter les matériaux supraconducteurs, leurs caractéristiques, modélisation et les principaux avantages. Nous sommes arrivés à mettre en évidence les résultats de simulation qui sont très satisfaisants à partir de l'utilisation de ce type de limiteur. Pour la continuité de ce travail et afin de voir une meilleure gamme d'utilisation du limiteur supraconducteur, on propose l'étude des impacts de ce type de limiteur sur la stabilité des réseaux notamment les réseaux de distributions.



**References**  
**Bibliographies**

## References Bibliographiques

- [1] **H.K Onnes**, "Further experiments with liquid helium", Communication from the Physical Laboratory of the University of Leiden, (1911)
- [2] **W. Meissner and R. Ochsenfeld**, "Kurse original rnitteilungen", Naturwiss 21, (1933) p.787
- [3] **J. Bardeen, I. N. Cooper and J. R. Schrieffer**, "*Theory of superconductivity*", Phys. Rev. 108 (1957) 329
- [4] **J. G. Bednorz and K. A. Müller**, "Possible high Tc superconductivity in the BaLaCuO system", Phys. B. Cond. Matter64 (1986) 189
- [5] **J. Bardeen, L.N. Cooper, and J.R. Schrieffer**. *Phys. Rev.* **108**, 1175 (1957).
- [6] **H. Frohlich**. "*Phys. Rev.* **79**, 845 (1950).
- [7] **K. BEN ALIA** ETUDE DES SYSTEMES DE GUIDAGE MAGNETIQUE A BASE DE SUPRACONDUCTEUR HTc Thèse de Doctorat en Sciences Spécialité : Electrotechnique 2013
- [8] **G. Male**, «Etude d'une structure d'inducteur supraconducteur à modulation de champ magnétique», Thèse de doctorat, l'Université de Lorraine, Nancy-I.
- [9] **J. Baixeras**, "Les Supraconducteurs", Editions Eyrolles et CNRS Ed., Paris, 1998
- [10] **C. Kittel**, " physique de l'état solide", pp. 357-360, Ed. Dunod, Paris, (1983).
- [11] **P.Tixador**, « Les Supraconducteurs », 39, Edition Hermès Paris, 1995.
- [12] **PH. Mangen** "Supraconductivité un condensât de physique " école des mines de Nancy, séminaire IFR matériaux (juin 2003).
- [13] **Y. Brunet, Pascal Tixadore** , « Supraconducteurs - Environnement et applications», N°d3662, Techniques de l'Ingénieur, 01/12/ 2012.
- [14] **R. Moulin** : "dimensionnements et essais de moteurs supraconducteurs ",thèse doctorat, l'université Henri Poincare, Nancy-I 2010.
- [15] **G. Male**, «Etude d'une structure d'inducteur supraconducteur modulation de champ magnétique», Thèse de doctorat, l'Université de Lorraine, Nancy-I
- [16] **N. Saad**, «Modélisation et Simulation du limiteur de courant supraconducteur», Thèse de Doctorat, 2013
- [17] **Y. Cointe**, « Limiteur supraconducteur de courant continu», Thèse de Doctorat, L'institut national polytechnique de Grenoble, 2007.
- [18] **H. Daffix , P .Tixador**, « Design of a fully super conductor synchronous motor, Electric Machines and Power Systems », 25227-245, 1997.
- [19] **C.P. Bean**. "Magnetization of high-field superconductors", Reviews of modern physics, 31:39, January 1964
- [20] **J. K. Sykulski , R.L. Stoll and A. E. Mahdi**, "Modeling HTc Superconductors for AC Power Loss Estimation ", IEEE Transactions on magnetics. vol. 33, No. 2, March 1997.

- [21] **I.Klutsch, G.Meunier, P.Labie, C.Guerin, P. Tixador**, “ Modélisation des supraconducteurs enaxisymétrique’’, Conférence Matériau Génie Electrique (MGE) 2-3 avril 2003 Grenoble
- [22] **N. Takeda, M.Uesaka and K.Miya**, “Computation and experiments on the static and dynamic characteristics of high Tc superconducting levitation’’, *Cryogenics* 1994, vol. 34, Number 9.
- [23]**R. F. Giese, M. Runde**, "Assessment study of superconducting fault-current limiters operating at 77 K," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 8, pp. 1138-1147, July. 1993
- [24] **X. J. Zheng et al**, “Influence of flux creep dynamic behaviour of magneti levitation systems with a high-Tc superconductor,’’ *IEEE Trans on Applied superconductivity*, vol. 15, no. 3, pp. 1574-1577, September. 2005
- [25] **E. ailam**: “machine synchrone à plots supraconducteurs : étude et réalisation’’, thèse doctorat, laboratoire g2elab,2010.
- [26] **J. BAIXERAS** “Les supraconducteurs Applications à l’électronique et à l’électrotechnique ” Edition CNRS, octobre 1998
- [27] **B. DOUINE** “Etude des pertes dans les supraconducteurs à haute température critique” Thèse de Doctorat 7 novembre 2001
- [28] **P. masson** : “étude d’écrans supraconducteurs a haute température critique massifs. Application a la réalisation d'une machine électrique de conception originale’’, thèse doctorat, groupe de recherche en électrotechnique et électronique de Nancy, 2002.
- [29] **F.C.MOON** “superconducting levitation applications to bearings and magnetic transportation’’, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 1994
- [30] **B. Richard, C. Jérôme**, «Les supraconducteurs », 2005.
- [31] **B. Bellin, P.Tixador**, « Contribution à l’étude des bobinages supraconducteurs : le projet DGA du SMES HTS impulsif », Thèse de l’INPG
- [32]**B. Freiha**, «Etude Numérique d’un Limiteur de courant de défaut», Mémoire de master en Réseau électrique, Université de M’sila, 2015.
- [33]**Y. BRUNET, P. TIXADOR**, « Supraconducteurs - Environnement et applications », N°d3662, Techniques de l’Ingénieur, 01/12/ 2012.
- [34] **S.Palanichamy, P.Chinnasamy**, "Semiconductor fault current limiters", *IEEE Proc.* 131-3 94 (1984).
- [35] **G.C.Karady**, "Concept of a combined short-circuit limiter and series compensator", *IEEE Trans. Pow. Del.* 6-3 1031, (1991).
- [36] **Y.Brunet, P.Tixador**, "Limiters supraconducteurs", *Techniques de l’Ingénieur* D 3 662, 1-18, (1997)

- [37] **J.Skindhoj**, "Repetitive current limiter based on polymer PTC resistor", *IEEE Trans. Pow. Del.* 951, (1997)
- [38] **M.Noë, M.Steurер**, "High-temperature superconductor fault current limiters concepts, application and development status", *Supercond. Sci. Technol.* 20 R15-R29 (2007).
- [39] **S.Elschner, F.Breuer, M.Noë, T.Rettelbach, H.Walter, J.Bock**, "Manufacturing and testing of MCP 2212 bifilar coils for a 10 MVA fault current limiter", *IEEE Trans. ApplSupercond.* 13 1980-3, (2003)
- [40] **P.TIXADOR**, "SC current limiters-some comparisons and influential parameters", *IEEE Trans Appl SC*, 4-4, 190 (1994).
- [41] **J. Leveque**, "Limiteur supraconducteur de courant structure hybride originale", Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble (1993)
- [42] **K.Kajikawa, K.Kaiho, N.Tamada, T.Onishi**, "Magnetic-shield type superconducting fault current limiter with high-T<sub>c</sub> superconductors", *Electr. Eng. Japan* 115 1026–31, (1995)
- [43] **H.J.Boenig, D.A.Paice**, "Fault current limiter using a superconducting coil", *IEEE, Trans. Magn.* 19 1051–3, (1983)
- [44] **H.J.Boenig**, "Solid-state circuit breaker with current limiting characteristic using a superconducting coil", United States Patent Specification 4, 490,769, (1984)
- [45] **G.Kuperman, K.P.Juengst**, "Current limiter with electric valves for limiting the short-circuit current in an electric power circuit", *US Patent Specification* 2002003687, (2002)
- [46] **M.Noë, M.Steurер**, "High-temperature superconductor fault current limiters, concepts, application and development status", *Supercond. Sci. Technol.* 20 R15-R29 (2007)

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

**SPECIALITE : Réseaux Electriques**

Présenté par : **DOUMIR Souheyb**  
**DAHMANI Hamza**

**THEME :**

**Modélisation des matériaux supraconducteurs application à la  
limitation de courant de défaut dans un réseau électrique à neuf  
(9) jeux de barres.**

**Résumé :**

La présence des courants de défaut dans les grands réseaux électriques augmente l'intérêt pour les limiteurs de courant. Les limiteurs supraconducteurs de courant peuvent limiter quasi- instantanément, sans contrôle ni détection de défaut, les courants de court-circuit. Ceci permet de réduire les contraintes à supporter par les installations électriques situées en amont du défaut. L'objectif principal de ce travail est la modélisation des supraconducteurs, que nous appliquons particulièrement à la modélisation du limiteur de courant. Le développement d'un modèle de simulation qui décrit le comportement du limiteur de courant Supraconducteur à été implanté dans un réseau à neuf (09) jeux de barres.

**Mots clés :** Matériau supraconducteur type I, type II, Réseau Electrique, limiteur de courant, vortex, résistivité, jeu de barre.

**ملخص العمل:**

الهدف من العمل المقدم في هذه المذكرة هو دراسة المواد الفائقة و تطبيقاتها في الشبكات الكهربائية ذات تسعة قضبان توصيل.

النمذجة الرياضية للخصائص الأساسية للمواد الفائقة التوصيل واستعمال برنامج المحاكاة لملاحظة تأثير استعمال هذه المواد في الحماية ضد تيارات الدارات القصيرة، كما قدمنا مقدمة حول المواد فائقة الناقلية مع تطبيقاتها في مختلف المجالات.

**الكلمات المفتاحية :** مواد فائقة الناقلية النوع الأول، مواد فائقة الناقلية النوع الثاني، الحالة العادية ، الحالة فائقة الناقلية، الحالة المختلطة، الدوامات الناقلية، قضبان التوصيل.