

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



**UNIVERSITE DE M'SILA**  
**FACULTE DE TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**

**MIMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE  
MASTER EN GENIE ELECTROTECHNIQUE**

**SPECIALITE: INGENIERIE DES SYSTEMES ELECTROMECHANIQUES**

**THEME**

---

**Etude analytique de phénomène de limitation de courant**

---

**Proposé et encadré par :**  
**MR. BELKHIRI Salah**

**Présenté par :**  
**GUECHI Charaf eddine**

**Année Universitaire 2013/2014**

**N° d'ordre :ISE\_ 111**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# Remerciements

*Au nom d' **ALLAH**, le tout miséricordieux, le très miséricordieux,  
Par de divinité à part lui, le vivant, celui qui subsiste par lui même.*

*Je remercie avant tous **ALLAH** pour son aide, ses  
Innombrables dons, **ALLAH** qui m'a donné la force, la volonté et  
Le moral pour accomplir mes études en master en électrotechnique.*

*je remercie mon encadreur **Mr : BELKHIRI Salah**.*

*Je remercie vont aussi au **président du jury** et aux **membres du  
Jury** examinateurs qui nous fait l'honneur de participer au jury de ce  
Travail.*

# Dédicace

*Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de  
m' avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce  
Travail malgré toutes les difficultés rencontrées.*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A ma mère et mon père*

*A mes très chers frères et mes sœurs.*

*A toute ma famille*

*A mes chers amis*

*A tous ceux que j'aime et qui m'aiment.*

*A tous ceux qui connaissent **Guechi Charaf eddine.***

*A tous les amis d'études surtout ceux D'électrotechnique Promotion  
2013/2014.*

## Sommaire

Table des figures	
Notations et symboles	
INTRODUCTION GENERALE.....	1

### Chapitre I : Généralité sur la supraconductivité

I.1. Introduction .....	4
I.2. Historique de la supraconductivité .....	4
I.2.1. Historique des LTS.....	4
I.2.2. Historique des HTS .....	4
I.3. Propriétés élémentaires des matériaux supraconducteurs .....	4
I.3.1. Résistivité électrique .....	4
I.3.2. Effet Meissner .....	5
I.3.3. Surface critique .....	6
I.4. Grandeurs critiques .....	7
I.4.1. Température critique.....	8
I.4.2. Champ magnétique critique .....	8
I.4.3. Densité de courant critique .....	10
I.4.4. Mobilité des vortex .....	11
I.5. Les types de supraconducteurs.....	12
I.5.1. Supraconducteurs de type I.....	12
I.5.1.1. Diagramme de phase.....	12
I.5.2. Supraconducteurs de type II .....	12
I.5.2.1. Diagramme de phase .....	12
I.5.3. Matériaux à haute température critique... ..	13
I.6. Transition de l'état supraconducteur à l'état normal.....	14
I.7. Conclusion .....	15

### Chapitre II : Modélisation des matériaux supraconducteurs

II.1. Introduction .....	17
II.2. Equations mathématiques régissent le phénomène physique(Edp) .....	17
II.2.1. Équation de maxwell .....	17
II.2.1.1. Relation B(H) .....	17
II.2.1.2. RelationE(J).....	18
II.3. Les lois de comportement .....	19
II.3.1. Loi de Bean .....	19
II.3.2. Loi de KIM .....	20
II.3.3. La loi de puissance .....	20
II.4. Principales applications des supraconducteurs .....	21
II.4.1. Applications en physique fondamentale .....	21
II.4.2. Applications en électrotechnique .....	21

II.4.2.1. Machines tournant.....	21
II.4.2.2. Câbles de transport .....	21
II.4.2.3. Stockage d'énergie .....	22
II.4.2.4. Limitation de courant .....	22
II.5. Conclusion .....	22
<b><u>Chapitre III : Limitation de courant</u></b>	
III.1. Introduction.....	24
III.2. Limitation de courant dans les réseaux électriques.....	24
III.2.1. Les réseaux et les courants de court-circuit.....	24
III.2.1.1. Les différents réseaux et leurs niveaux de tension.....	24
III.2.1.2. Les défauts.....	25
III.2.1.3. L'élimination des défauts .....	26
III.2.1.4. Les courant de défaut.....	28
III.2.2. Intégration dans les réseaux électriques.....	29
III.3. Fonctionnement de limiteur de court-circuit.....	30
III.3.1. Définition.....	30
III.3.2. Pourquoi limiter ?.....	30
III.3.2.1. Effet électromagnétique.....	30
III.3.2.2. Effets mécaniques.....	30
III.3.2.3. Effet thermique.....	31
III.3.3. Comment limiter ?.....	31
III.4. Intérêt du limiteur de courant de défaut.....	32
III.5. Limiteur de courant :solution classique.....	33
III.5.1. Arc électrique.....	33
III.5.2. Condensateur.....	33
III.5.3. Inductances.....	33
III.5.4. Réactance série.....	34
III.5.5. Limiteur commandé.....	34
III.5.6. Résistance variable.....	34
III.6. Caractéristiques spéciales du disjoncteur limiteur de courant.....	34
III.7. Limiteurs supraconducteurs de courant.....	36
III.7.1. Principes et réalisations des limiteurs supraconducteurs.....	36
III.7.2. Les types des limiteurs supraconducteurs.....	37
III.7.2.1. Limiteur résistif.....	37
III.7.2.2. Limiteur inductif.....	38
III.7.2.3. SCFCL de type noyau magnétique écranté.....	40
III.7.2.4. SCFCL de type pont redresseur.....	42
III.7.2.5. SCFCL de type contrôleur du courant de défaut.....	43
III.7.2.6. SCFCL de type noyaux magnétiques saturés.....	43
III.7.3. Emplacements d'un limiteur.....	44
III.7.4. Avantages et inconvénients propres aux supraconducteurs.....	47
III.8. Conclusion.....	48

## **Chapitre IV: Calcul des courants de court-circuit**

IV.1. Introduction.....	50
IV.2. Organigramme de calcul du courant de court-circuit .....	50
IV.3. Définitions.....	53
IV.4. Effets des courants de court-circuit.....	53
IV.5. Les principaux défauts de court-circuit.....	54
IV.5.1. Caractéristiques des courant de court-circuit.....	54
IV.6. Etablissement de l'intensité de court-circuit.....	55
IV.7. Normes et calculs des $I_{cc}$ .....	56
IV.7.1. Calcul le courant de court-circuit selon La norme CEI 60909.....	57
IV.8. Calcul des $I_{cc}$ par la méthode des impédances.....	60
IV.8.1. $I_{cc}$ Selon les différents types de court-circuit.....	60
IV.8.1.1. Court-circuit triphasé.....	60
IV.8.1.2. Court-circuit biphasé isolé.....	60
IV.8.1.3. Court-circuit monophasé isolé.....	60
IV.8.1.4. Court-circuit de la terre (monophasé et biphasé).....	61
IV.9. Relations entre les impédances des différents étages de tension d'une installation.....	62
IV.9.1. Impédances fonction de la tension.....	62
IV.9.1.1. Calcul des impédances relatives.....	62
IV.10. Comportement des matériels au court-circuit.....	63
IV.10.1. Caractérisation.....	63
IV.10.1.1. Matériels passifs.....	63
IV.10.1.2. Matériels actifs.....	63
IV.11. Spécificité de l'appareillage.....	65
IV.12. Exemple de calcul (analytique).....	65
IV.12.1. Problème.....	65
IV.12.1.1. Paramètres de problème.....	66
IV.12.2. calcul des impédances.....	67
IV.12.3. calcul les défauts.....	71
IV.13. Exemple de calcul (simulation).....	73
IV.13.1. Régime normal (sans défaut).....	74
IV.13.2. Régime de défaut (court-circuit).....	75
IV.13.2.1. Régime de défaut (court-circuit) sans limiteur de courant.....	75
IV.13.2.2. Régime de défaut (court-circuit) avec limiteur supraconducteur inductif.....	77
IV.14. Conclusion.....	79
Conclusion générale	
Références bibliographiques	
Résumé	

- Figure I.1 Résistivité d'un supraconducteur en fonction de la température
- Figure I.2 Différence entre un conducteur parfait et un supraconducteur
- Figure I.3 illustration de la dépendance fonctionnelle de l'état supraconducteur en ce qui  
Concerne le champ magnétique, la température et la densité de courant
- Figure I.4 Surfaces critiques des principaux supraconducteurs
- Figure I.5 Dépendance de la résistivité en fonction de la température
- Figure I.6 représentation les types de la supraconductivité en fonction du champ
- Figure I.7 Dépendance du champ magnétique en fonction de la température
- Figure I.8 Caractéristique  $E(J)$  d'un supraconducteur avec activation thermique
- Figure I.9 Diagramme de phase d'un supraconducteur de type I
- Figure I.10 Diagramme de phase d'un supraconducteur de type II
- Figure I.11 Structure de supraconducteurs à haute température critique
- Figure II.1 Caractéristique  $B(H)$  d'un supraconducteur
- Figure II.2 Caractéristique  $E(J)$  d'un supraconducteur.
- Figure II.3 Modèle de Bean.
- Figure III.2 Cycle OFOFOF pour une ligne aérienne
- Figure III.3 Cycle OFOF pour une ligne souterraine
- Figure III.4 Insertion de limiteurs dans un réseau
- Figure III.5 représentation des courants de court-circuit, présumé et limité
- Figure III.6 schéma de principe d'un circuit en défaut.
- Figure III.7 Limitation de courant par transformateur court-circuité.
- Figure III.8 Évolutions temporelles des courants (avec et sans limitation) et de la tension lors d'un court-circuit.
- Figure III.9 Limiteur résistif BTc.
- Figure III.10 Limiteur résistif : prototype Alcatel Alsthom Recherche.
- Figure III.11 Limiteur inductif à fort couplage.
- Figure III.12 Limiteur inductif à bobinage découplé.
- Figure III.13 Limiteur inductif à plusieurs déclencheurs.
- Figure III.14 Limiteur à trigger auto renforcé.
- Figure III.15 SCFCL de type noyau magnétique écrané.
- Figure III.16 Schéma équivalent du SCFCL de type noyau magnétique écrané.
- Figure III.17 SCFCL de type pont redresseur.
- Figure III.18 SCFCL de type contrôleur du courant de défaut.
- Figure III.19 SCFCL de type noyaux magnétiques saturés.
- Figure III.20 Limiteur entre deux boucles d'un réseau.
- Figure III.21 Emplacement très intéressant d'un limiteur.



Figure III.22 Exemple d'emplacement intéressant de limiteurs dans une sous-station.

Figure IV.1 procédure de calcul d' $I_{cc}$  pour la conception d'une installation électrique basse tension.

Figure IV.2 caractéristiques  $I^2.t$  d'un conducteur en fonction de la température ambiante.

Figure IV.3 protections d'un circuit par disjoncteur.

Figure IV.4 protection d'un circuit par fusible aM.

Figure IV.5 les différents courts-circuits et leurs courants.

Figure IV.6 schéma simplifié d'un réseau.

Figure IV.7 représentation graphique des grandeurs d'un court-circuit.

Figure IV.8 Courants de court-circuit : cas général.

Figure IV.9 Courants de court-circuit

Figure IV.10 les différents courants de court-circuit.

Figure IV.11 pouvoir de coupure assigné d'un disjoncteur en court-circuit

Figure IV.12 les principales contraintes associées.

Figure IV.13 le problème : calculer  $I_{cc3}$  et  $I_p$  aux points A, B, C et D.

Figure IV.14 variation du facteur  $\kappa$  en fonction de  $R / X$

Figure IV.15 Schéma électrique de montage.

Figure IV.16 La tension de la source en régime normal.

Figure IV.17 Courant de ligne a régime normal.

Figure IV.18 Schéma électrique de montage.

Figure IV.19 Tension de la source (régime de défaut de court-circuit ) a  $t=0.05$  s.

Figure IV.20 Courant de court-circuit a l'instant  $t = 0,05$  s.

Figure IV.21 Tension de la charge a régime de court-circuit.

Figure IV.22 Schéma électrique de montage avec limiteur de courant inductif.

Figure IV.23 La tension de la source avec limitation de courant.

Figure IV.24 Tension de la charge a régime de limitation.

Figure IV.25 Courant de court-circuit limité.

## Notations et symboles

---

$t$	[s]	Temps
$t_q$	[s]	Temps avant la transition du SHT
$T$	[K]	Température
$T_c$	[K]	Température critique
$V$	[V]	Tension
$\Phi$	[Wb]	Flux magnétique
$\Phi_0$	[Wb]	Quantum de Flux ( $2.667810 \times 10^{-15} \text{Wb}$ )
$\gamma$	[g/cm <sup>3</sup> ]	Masse volumique
$\eta$	[N.s/m]	Coefficient de frottement visqueux
$\lambda$	[W/(m.K)]	Conductivité thermique
$\mu_0$	[H/m]	Perméabilité magnétique du vide ( $4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ )
$\theta$	[rad]	Coordonnée suivant $\theta$ (en indice, signifie composante suivant $\theta$ )
$\rho$	[ $\Omega.m$ ]	Résistivité électrique
$\rho_{FF}$	[ $\Omega.m$ ]	Résistivité électrique de Flux Flow
$\rho_n$	[ $\Omega.m$ ]	Résistivité électrique à l'état normale
$\rho_{TAF}$	[ $\Omega.m$ ]	Résistivité électrique dans le régime TAF
$\sigma$	[S/m]	Conductivité électrique
$\tau$	[s]	Constante de temps de la décharge RLC
$\tau_{th}$	[s]	Constante de temps thermique
$\omega$	[rad/s]	Pulsation du courant de transport
$\Delta t$	[s]	Pas de temps
$A$	[A.H/m]	Vecteur potentiel magnétique
$B$	[T], [mT]	Induction magnétique
$B_0$	[T], [mT]	Constante utilisée dans les modèles $J_c(B)$ et $n(B)$
$B_a$	[T], [mT]	Induction magnétique est appliquée
$B_p$	[T], [mT]	Induction de pénétration complète
$B_p^*$	[T], [mT]	Induction de pénétration complète avec la loi de $J_c(B)$
$B_m$	[T], [mT]	Amplitude maximale de l'induction magnétique appliquée
$C_p$	[J/(Kg.K)]	Chaleur spécifique
$D$	[—]	Facteur démagnétisant
$E, E$	[V/m]	Champs électrique
$E_c$	[V/m]	Champs électrique pour lequel le courant critique est défini
$f$	Hz	Fréquence de courant de transport sinusoïdale
$F_L$	[N]	Force de Laplace
$F_p$	[N]	Force d'ancrage
$F_v$	[N]	Force de frottement visqueux
$h$	[ $\frac{W}{m^2.K}$ ]	Coefficient d'échange avec le fluide cryogénique
$H_a$	[A/m]	Champ magnétique appliqué

$H_m$	[A/m]	Amplitude maximale du champ magnétique appliqué
$i(t)$	[A]	Courant de transport sinusoïdal
$I$	[A]	Courant de transport continu
$I_c$	[A]	Courant critique
$J_c$	[A/m <sup>2</sup> ]	Densité de courant critique
$M$	[A/m]	Aimantation
$n$	[–]	Valeur de puissance de la loi $E - J$
$P_v$	[W/m <sup>3</sup> ]	Pertes volumiques
$P$	[W]	Pertes instantanées
$\bar{P}$	[W]	Pertes Moyennes
$r$	[m], [mm]	Coordonnée suivant $r$ (en indice, signifie composante suivant $r$ )
$R$	[ $\Omega$ ]	Résistance électrique
$I_{\text{ligne}}$	[A]	Courant de ligne
$U_n$	[V]	Tension nominale
$P_{\text{cc}}$	[W]	Puissance a court-circuit
$S_n$	[KVA]	Puissance apparent nominale
$Z$	[ $\Omega$ ]	Impédance
$C$	[–]	Capacité homopolaire du réseau MT
$U_n$	[V]	Tension entre phase
$V_n$	[V]	Tension entre phase - neutre
$Z_n$	[ $\Omega$ ]	Impédance de neutre
$\bar{I}_{\text{cc}}$	[A]	Courant de court-circuit
HTC		Haute température critique
AC		Courant Alternatif
Bi – 2223		Composé $B_{i_{1.8}}P_{b_{0.26}}S_{r_2}C_{a_2}C_{u_3}O_{10+x}$
BCS		Théorie de Bardeen, Cooper et Schrieffer
BSCCO		Supraconducteur à base de bismuth, de strontium, de calcium et d'oxydes de cuivre
EDP		Equations dérivées partielles
PFM		Pulsed Field Magnetization
SBT		Supraconducteur à basse température
SHT		Supraconducteur à Haut température
TAFF		Thermally Activated Flux Flow
TAFC		Thermally Activated Flux Creep
YBCO		Supraconducteur à base d'yttrium, de baryum et d'oxydes de cuivre
SMES		Le Supraconducting Magnetic Energy Storage
IRM		Imagerie par Résonance Magnétique
LHC		Large Hadron Collider
ITER		Thermonuclear Experimental Reactor

BT	Basse Tension
BTT	Basse Tension Terminale
HT	Haute Tension
MT	Moyenne Tension
THT	Très Haute Tension
LTS	Low Temperature Superconductors
HTS	High Temperature Superconductors
SFCL	Superconducting Fault Current Limiter
PdC	Pouvoir de coupure.
TGBT	Tableau général basse tension.
$\alpha$	Angle d'enclenchement (apparition du défaut par rapport au zéro de tension).
c	Facteur de tension.
$\cos \Phi$	Facteur de puissance (en l'absence d'harmoniques).
E	Force électromotrice instantanée.
E	force électromotrice (valeur efficace).
$\Phi$	Angle de déphasage (courant par rapport à la tension).
i	Courant instantané.
$i_{cA}$	Composante alternative sinusoïdale du courant instantané.
$i_{cc}$	Composante continue du courant instantané.
$i_p$	Valeur maximale du courant (première crête du courant de défaut).
I	Intensité (valeur efficace).
$I_b$	Courant de court-circuit coupé
$I_{cc}$	Courant de court-circuit permanent ( $I_{cc3}$ = triphasé, $I_{cc2}$ = biphasé, ...).
$I_k$	Courant de court-circuit permanent
$I''_k$	Courant de court-circuit symétrique initial.
$I_r$	Courant assigné de l'alternateur.
$I_s$	Courant de service.
$\lambda$	Facteur dépendant de l'inductance de saturation d'un alternateur.
k	Constante de correction (NF C 15-105)
K	Facteur de correction des impédances
$\kappa$	Facteur relatif au calcul de la valeur de crête du courant de court-circuit
$R_a$	Résistance équivalente du réseau amont.
RL	Résistance linéique des lignes.
S	Section des conducteurs.
$S_{cc}$	Puissance de court-circuit.
$S_n$	Puissance apparente du transformateur.
X	Réactance en % des machines tournantes.
$X_a$	Réactance équivalente du réseau amont.
$X_L$	Réactance linéique des lignes.

$X_{\text{subt}}$	Réactance subtransitoire de l'alternateur.
$Z_a$	Impédance équivalente du réseau amont.
$Z_{\text{cc}}$	Impédance amont du réseau sur défaut triphasé.
$Z_d$ ou $Z(1)$	Impédance directe
$Z_i$ ou $Z(2)$	Impédance inverse
$Z_0$ ou $Z(0)$	Impédance homopolaire
$Z_L$	Impédance de liaison.
CEI 60909	Calcul des courants de court-circuit dans les réseaux triphasés à courant alternatif.
NF C 15-100	Installations électriques à basse tension.
UTE C 15-105	Guide pratique. Détermination des sections de conducteurs et choix des dispositifs de protection.
$\lambda_L$	
$\varepsilon$ $\xi$	

d'un cœur de rayon  $\xi(T)$ ,

longueur  $\lambda(T)$

## **Introduction Générale**

La découverte en 1986 de la supraconductivité à haute température a fortement relancé l'intérêt des supraconducteurs. Toutefois, la plupart des applications de ces matériaux nécessitent une flexibilité et une résistance mécanique particulières, justifiant la récente mise en œuvre des conducteurs déposés.

Les applications des supraconducteurs en électrotechnique ne cessent d'évoluer et sont actuellement envisageables. 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 d'importants champs électriques dans leurs régimes de défauts. Les courants de court-circuit des réseaux électriques n'ont cessé de croître pour répondre à l'augmentation de la consommation mais également fournir 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.

De nouveaux schémas d'interconnexions, notamment par bus continus, sont en phase de développement. Les réseaux DC présentent de nombreux avantages par rapport aux réseaux alternatifs, mais ne bénéficient pas du passage par zéro de la tension pour couper les courants de défaut. 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 courant permettent de réduire les contraintes mécaniques et thermiques subies par le réseau avant l'isolement du défaut [1].

**Le travail est donc composé de la manière suivante:**

- ❖ *Le premier chapitre* : est consacrée aux aspects phénoménologiques de la supraconductivité nous présentons les principales définitions concernant le phénomène aussi nous donnons un bref historique de la supraconductivité, les Caractéristiques d'un supraconducteur, présentation des principales grandeurs qui permettent de définir l'état supraconducteur, et les Réseaux des vortex.

- ❖ ***Le deuxième chapitre*** : est consacrée aux équations électromagnétiques décrivant le comportement d'un supraconducteur et Le modèle supraconducteurs HTC aussi les théories qui expliquent ce phénomène et ces domaines d'application.
- ❖ ***Le troisième chapitre*** : présent le problème général de la limitation du courant et l'apport d'un limiteur sur un réseau. Plus particulièrement, les trois états dans lesquels peut se trouver un limiteur seront présentés: le régime nominal lorsque le courant de ligne est inférieur au courant critique, le régime de limitation durant la transition du supraconducteur, et le régime de récupération.
- ❖ ***Le quatrième chapitre*** : Ce chapitre porte sur l'étude de calcul de courant de court-circuit dans différents point de réseau électrique par une méthode analytique qui est la méthode des impédances suit par un exemple d'application de simulation d'un circuit électrique lors d'un défaut sans et avec limiteur de courant sous MATLAB/ SIMULINK.
- ❖ ***Conclusion générale*** : clôture le présent manuscrit commentant les différents chapitres et relatant les perspectives de continuation de ce travail.

***Chapitre I :***  
***Généralités sur la***  
***Supraconductivité***



## I.1. Introduction

Les matériaux supraconducteurs ont des propriétés électriques et magnétiques assez remarquables. La propriété la plus connue, et qui a donné le nom au phénomène, étant la disparition totale de toute résistivité en dessous d'une certaine température appelée température critique  $T_c$ .

Une autre propriété est le diamagnétisme parfait de ces matériaux ils expulsent totalement le champ magnétique en dehors de leur volume dans certaines conditions précises de champ.

## I.2. Historique de la supraconductivité

### I.2.1. Historique des LTS

C'est la liquéfaction de l'hélium à 4,2 K en 1908 par Kamer lingh Onnes qui lui permis en 1911 de découvrir l'état supraconducteur du mercure. Il fallut attendre 1954 pour découvrir la supraconductivité de type II dans un alliage de niobium et d'étain  $T_c=18$  K.

Les alliages à bases de niobium comme le Nb<sub>3</sub>Ge ( $T_c = 23$  K) découvert en 1973 furent long temps les supraconducteurs ayant les plus hautes  $T_c$ . Il était communément admis que la limite des 30 K ne serait jamais dépassée.

### I.2.2. Historique des HTS

L'apparition en 1986 des céramiques supraconductrices à bases d'oxyde de cuivre telles que le BaLaCuO ( $T_c = 38$  K) et une année plus tard l'YBaCuO ( $T_c = 93$  K) a permis de franchir la barrière des 30 K, c'est la découverte des HTS.

Ceci a fortement renforcé l'intérêt des supraconducteurs qui peuvent désormais dans certaines conditions être refroidis dans l'azote liquide (77 K), ce fluide étant beaucoup moins couteux et plus simple d'utilisation que l'hélium liquide. Ensuite de nouveaux HTS comme les composés à base de bismuth BiSrCaCuO ( $T_c = 110$  K) sont apparus, le record de température critique étant e HgBaCaCuO ( $T_c = 164$  K) en 1995.

## I.3. Propriétés élémentaires des matériaux supraconducteurs

### I.3.1. 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 [2].

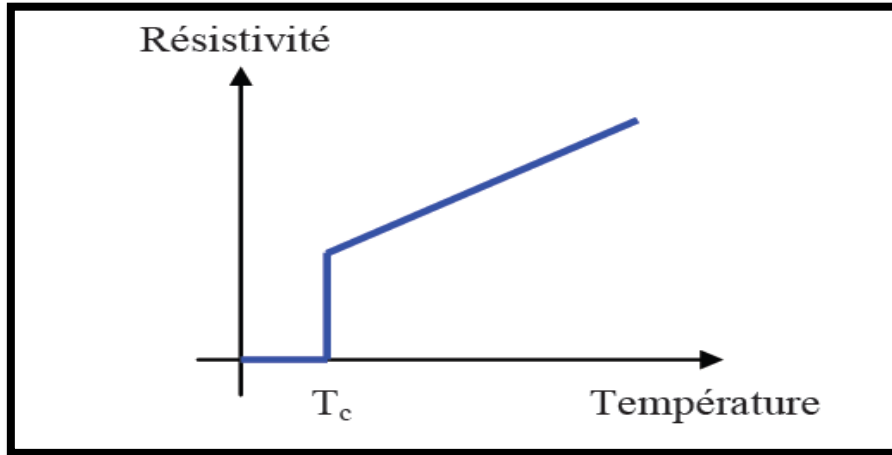


Figure I.1 Résistivité d'un supraconducteur en fonction de la température.

### I.3.2. Effet Meissner

Le conducteur parfait ( $R = 0$ ) implique qu'un changement de l'induction magnétique dans le matériau n'est un pas possible  $\frac{dB}{dt} = 0$ . Aussi, lorsqu'un conducteur parfait, sous champs nul à température ambiante, est refroidi en dessous de  $T_c$  puis soumis à un champ magnétique, alors des courants d'écrantage vont être induits pour conserver  $B = 0$  à l'intérieur du matériau, (Figure. I.2(a)).

Si au contraire, le conducteur parfait est soumis à un champ magnétique extérieur est ramené à zéro.  $dB/dt$  doit être conservé et des courant de piégeage seront induits pour piéger l'induction magnétique à l'intérieur, (Figure. I.2(b)).

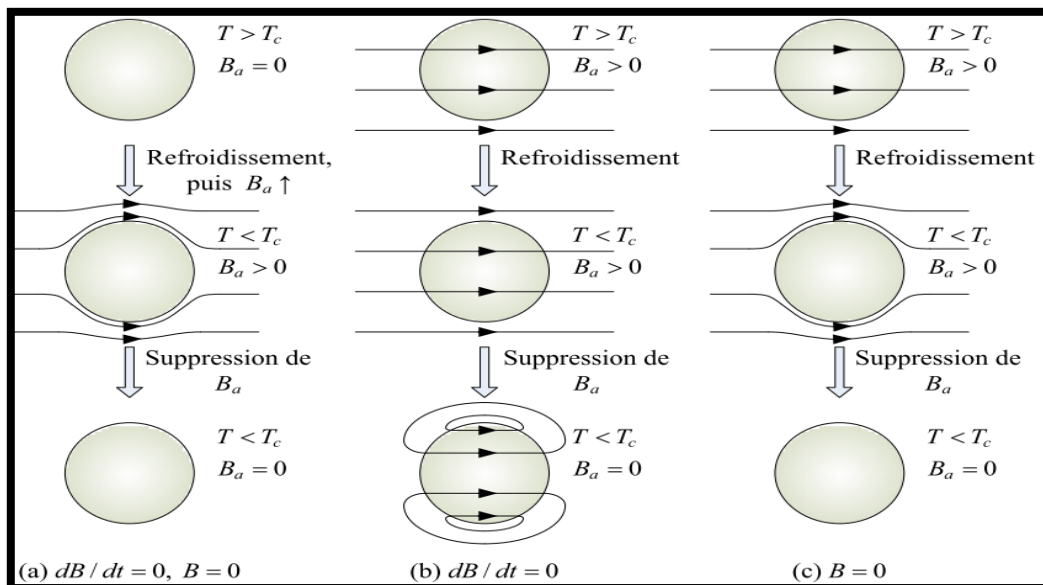


Figure I.2 Différence entre un conducteur parfait et un supraconducteur.

1. S'il n'existe aucun champ magnétique extérieur  $B_a = 0$  avant que le matériau soit refroidi chaque matériau possède un flux magnétique interne nul en dessous de  $T_c$ .
2. Un conducteur parfait piège le flux magnétique appliqué avant refroidissement  
$$\dot{B} = \frac{dB}{dt} = 0.$$
3. Le flux magnétique est toujours exclu par un supraconducteur en dessous de  $T_c$ , qu'un champ magnétique soit appliqué avant refroidissement ou non  $B = 0$ .

Différemment dans le cas d'un supraconducteur :

- Dans le premier cas, quand le champ magnétique est appliqué après refroidissement le conducteur parfait et le supraconducteur se comportent de manière identique car l'induction magnétique est toujours nulle dans le matériau, (Figure I.2(a)).
- Dans le second cas, l'induction magnétique est expulsée de l'intérieur du supraconducteur ( $B = 0$ ) dès qu'il est refroidit en dessous de sa température critique, voir (Figure I.2(c)).

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. 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 inférieur à leur valeur critique

$$T < T_c, H < H_c.$$

### I.3.3. 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.3) [3].

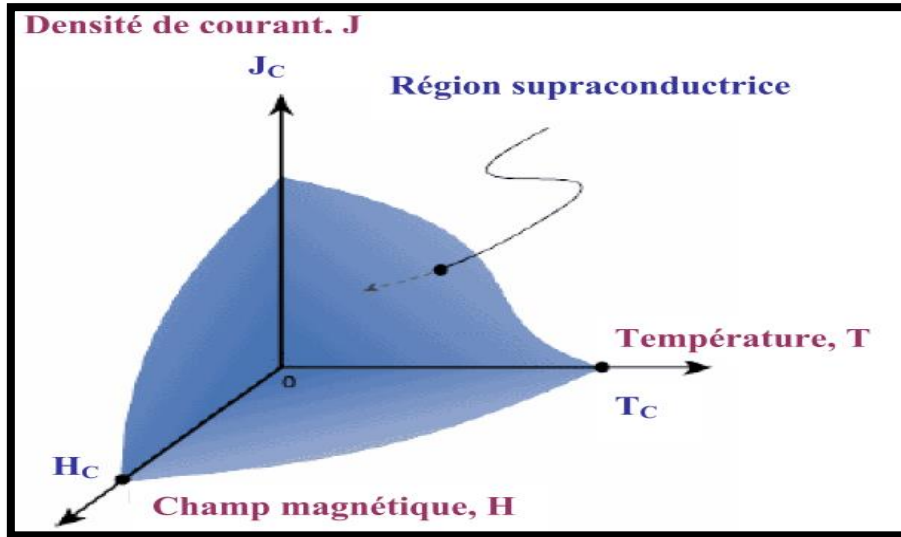


Figure I.3 Illustration de la dépendance fonctionnelle de l'état supraconducteur.

#### I.4. Grandeurs critiques

L'état supraconducteur est limité par trois grandeurs définissant une surface critique au-delà de laquelle le matériau transite vers un état dissipatif caractérisé par l'apparition d'un champ électrique.

La température critique ( $T_c$ ) et le champ magnétique d'irréversibilité ( $H$ ) sont des grandeurs intrinsèques au matériau, tandis que la densité de courant critique ( $J_c$ ) dépend du procédé de fabrication (Figure I.4) au-delà de  $T_c$  le supraconducteur se trouve dans un état normal caractérisé par une résistivité  $\rho_n$ .

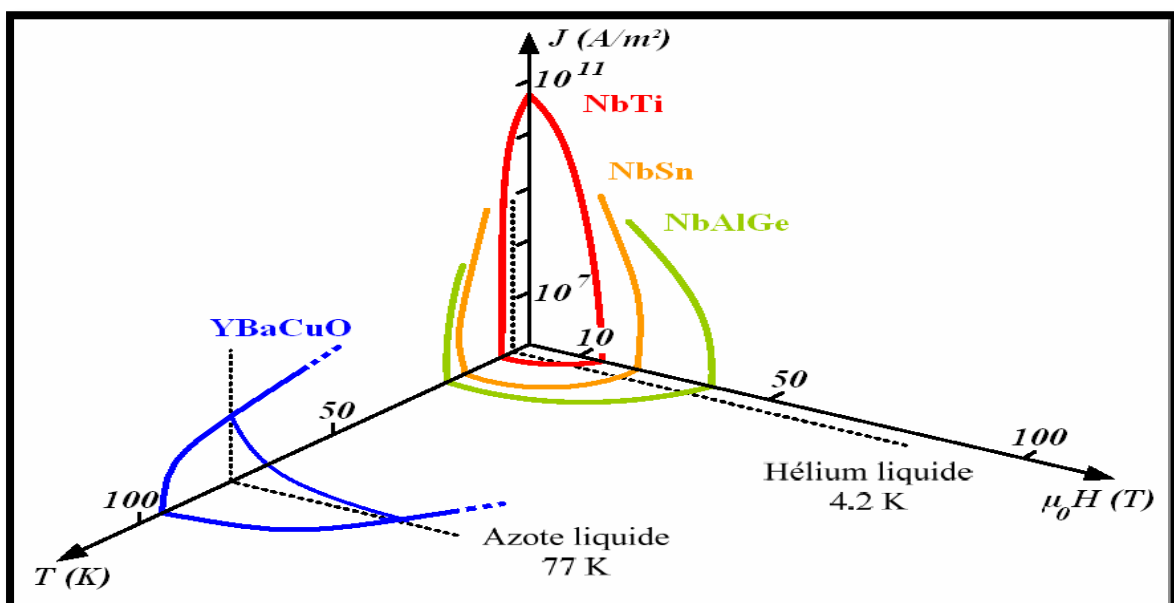


Figure I.4 Surfaces critiques des principaux supraconducteurs.

L'application des supraconducteurs à la limitation de courant fait essentiellement intervenir deux grandeurs critiques : la température  $T_c$  et la densité de courant  $j_c$  [4].

### I.4.1. Température critique

L'état de supraconductivité caractérise la plu part 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.

La supraconductivité est obtenue aux températures  $T_c$  plus élevées pour les métaux mauvais conducteurs dans l'état normal, comme 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.5).

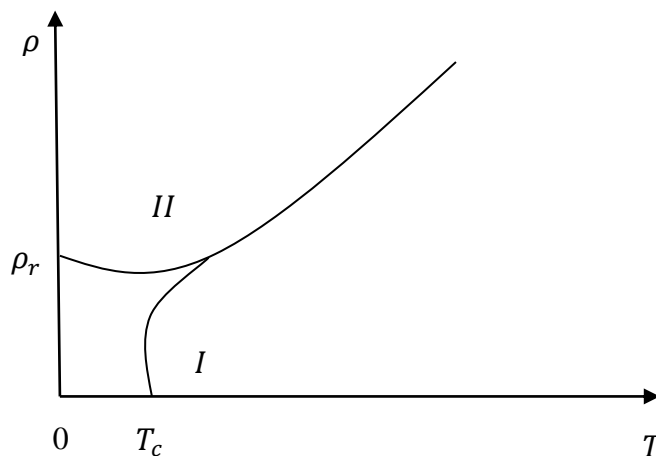


Figure I.5 Dépendance de la résistivité en fonction de la température.

La température a une influence importante sur les autres caractéristiques d'un matériau Supraconducteur comme le magnétique, la résistivité ou la profondeur de pénétration [4].

### I.4.2. 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 (a)). La courbe  $H_c(T)$  divise le Quadrant  $H_c > 0, T_c > 0$  en deux régions : supraconducteur et normale. La température Maximale à laquelle un matériau est supraconducteur est obtenue pour un champ extérieur nul. Les supraconducteurs se divisent en deux catégories : type I et type II. Ceux de type I sont Caractérisés par le fait que si le champ magnétique extérieur atteint

La valeur critique l'effet Meissner s'arrête brusquement. Le diamagnétisme est parfait pour  $H$  inférieurs à  $H_c$  et la dépendance avec la température est avec la température est parabolique (Figure. I.6 (a)):

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

Où  $H_0$  est la valeur du champ critique extrapolé à  $T = 0$  K. La résistivité augmente brusquement à la valeur correspondante à l'état normal quand le champ magnétique dépasse la valeur de  $H_c$ .

Aux supraconducteurs de type II, le diamagnétisme parfait disparaît progressivement à partir d'une valeur de champ magnétique  $H_{c1}$  et la disparition totale du diamagnétisme est produite pour un champ  $H_{c2}$ .

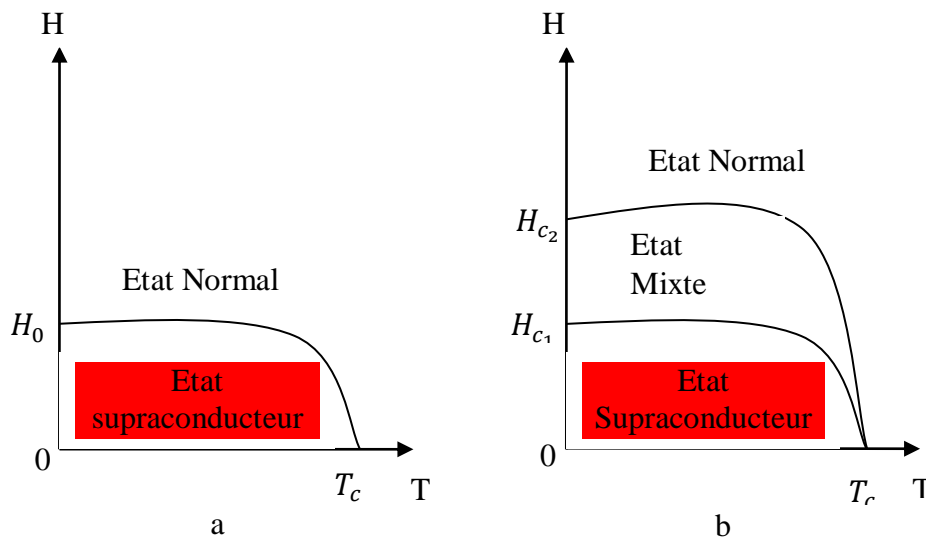


Figure I.6 représentation les types de la supraconductivité en fonction du champ.

La caractéristique  $H(T)$  des supraconducteurs de type II comporte plusieurs zones une première dans laquelle la résistivité électrique est nulle ; une deuxième zone, où  $\rho$  peut prendre la valeur nulle ou correspondante à l'état normal  $\rho_n$  ou encore une valeur intermédiaire dépendante de facteurs comme la concentration des impuretés, la densité de courant, la direction du champ magnétique, etc.; la quatrième zone correspond à l'état normal ( $\rho = \rho_n$ ). On peut considérer comme ordre de grandeurs les champs magnétiques  $H_{c1} = 10$  kA/m,  $H_{c2} = 10$  MA/m. Les supraconducteurs de type (II) sont constitués généralement des alliages ( $Nb - Zr, Nb - Ti$ ), des composants supraconducteurs ( $Nb_3Sn, V_3Ga$ ) et de métaux de transition avec une résistivité grande à l'état normal [5].

### I.4.3. Densité de courant critique

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

Pour les supraconducteurs de type I, la répartition du courant n'est pas homogène.

Le courant de transport circulaire uniquement à la surface, dans l'épaisseur de pénétration de London. Pour les supraconducteurs de type (II) la densité de courant critique est fortement dépendante de l'induction B donc de la présence de vortex dans la structure du matériau. Pour une induction transverse, dans l'état mixte, un supraconducteur idéal présente une densité de courant nulle. Le courant de transport réagit avec les vortex et ceux-ci se déplacent lorsque la force créée de Lorentz  $J_c(B)$  est supérieure aux forces d'ancrage (ou de pinning), entraînant une dissipation dans le matériau. Lorsque la densité de courant dépasse une valeur critique  $J_c$  les vortex sont arrachés. C'est le régime de flux-flow. Libérés, les vortex se déplacent. Un champ électrique est créé, proportionnel à  $J - J_c$ . Dans le régime de flux flow une résistivité dépendante de l'induction magnétique apparaît et elle est noté  $\rho_f$ .

$$\rho_f = \rho_n \frac{B}{\mu_0 H_{c2}} \quad \mu_0 H_{c1} \leq B \leq \mu_0 H_{c2} \quad (I.2)$$

Pour obtenir des grandes densités de courant critique les vortex doivent être solidement ancrés dans le matériau ou au moins quelques-uns d'entre eux.

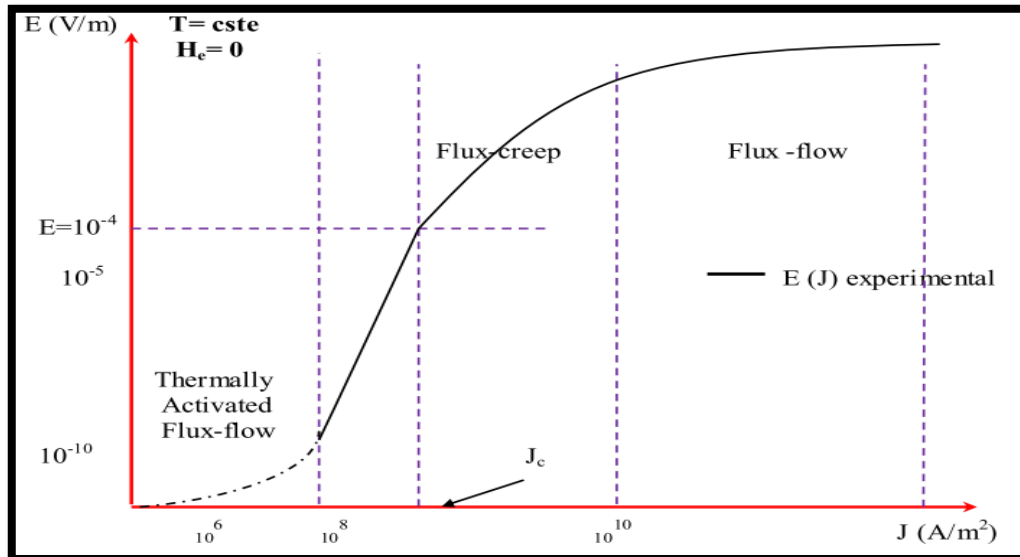


Figure I.7 Dépendance du champ magnétique en fonction de la température.

La courbe expérimental  $E(J)$  représentée (Figure .I.7) donne une image classique d'un comportement de supraconducteur HTc. Sur cette courbe, on peut distinguer trois régimes de dépendance de la valeur de  $J$  : le thermally activated flux-flow (TAFF), le

flux-creep et le flux flow. Ces régimes se différencient par un comportement magnétique du supraconducteur différent qui est fonction de la force de Lorentz et donc du courant appliqué [03].

Un premier régime appelé flux-flow pour des courants supérieurs au courant critique où la force de Lorentz est très supérieure aux forces d'ancrages des vortex, laissant ainsi les vortex se déplacer librement dans la même direction dans un mouvement collectif.

Un second régime situé autour du courant critique, appelé flux-creep. La densité de vortex est assez forte. Des vortex interagissent entre eux. Si l'un d'eux se décroche (Force de Lorentz plus la probabilité de saut), par interaction d'autres vortex vont se déplacer.

Un dernier régime, très controversé (en pointillé sur la (Figure .I.7)), pour de faibles courants appelés TAFF où les vortex sauteraient en moyenne tous dans la même direction d'un point d'ancrage à un autre de manière désordonnée. Ce régime n'est pas encore bien défini et dépend de la température (à basse température, le réseau de vortex serait "gelé" et il n'y aurait donc plus aucune dissipation. On passe donc directement en régime de flux-creep). Les pertes en régime TAFF sont totalement négligeables devant les pertes en régime de flux creep. Le régime de flux-flow est le plus dissipatif [5].

#### I.4.4. Mobilité des vortex

Il est important de bien comprendre les lois qui régissent la mobilité des vortex, celle-ci étant à l'origine de la transition des supraconducteurs de type II. Cette mobilité fait appel à deux types de mouvements appelés : flux flow et flux-creep (Figure I.8) [6].

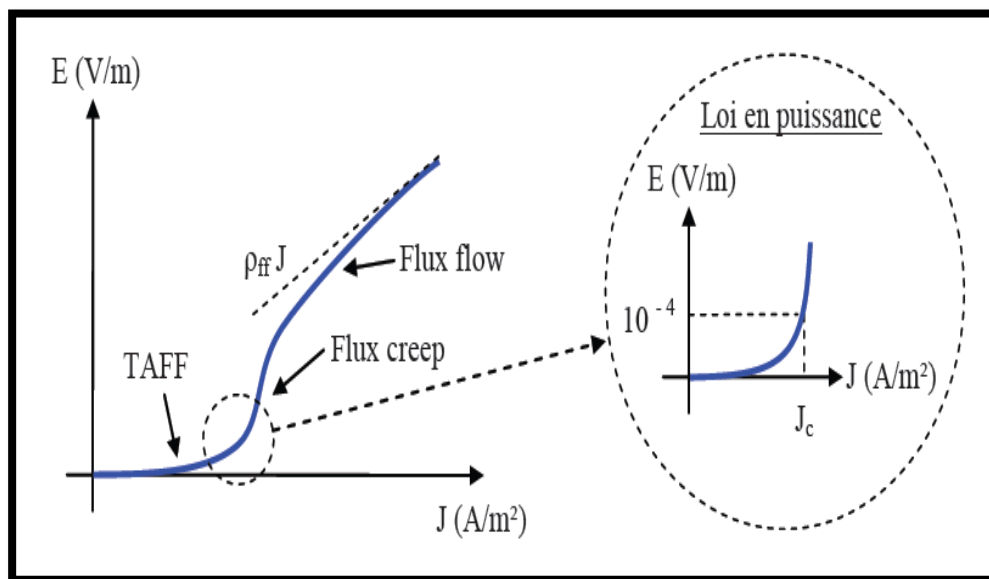


Figure I.8 Caractéristique E(J) d'un supraconducteur avec activation thermique.



## I.5. Les types de supraconducteurs

### I.5.1. Supraconducteurs de type I

#### I.5.1.1. Diagramme de phase

Jusque dans les années soixante, les scientifiques étaient persuadés que tous les supraconducteurs agissaient de la même façon en présence d'un champ magnétique.

Ils savaient que la supraconductivité allait disparaître si le matériau est soumis à un champ magnétique plus intense qu'un champ critique  $H_c$ , et que la valeur de ce champ critique dépend de la température. Ainsi, le matériau pouvait se trouver soit dans l'état normal, soit dans l'état supraconducteur, selon la valeur de la température et du champ magnétique appliqué. Aujourd'hui, on qualifie les matériaux se comportant de cette façon de supraconducteur de première espèce ou de type I (Figure. I.9) [03].

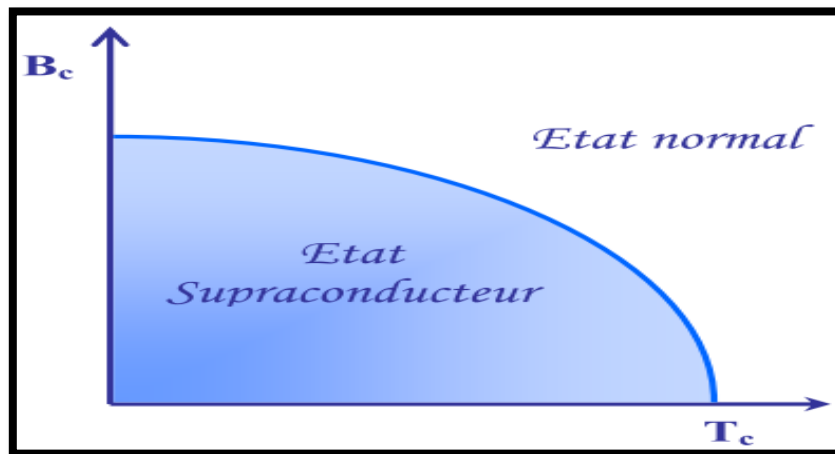


Figure I.9 Diagramme de phase d'un supraconducteur de type I.

### I.5.2. Supraconducteurs de type II

#### I.5.2.1. Diagramme de phase

Pendant, tel n'est pas le cas pour tous les supraconducteurs. En 1962 un deuxième type de supraconducteurs a été découvert. Ces matériaux de deuxième espèce possèdent deux champs magnétiques critiques ( $H_{c1} = B_{c1}$ ) et ( $H_{c2} = B_{c2}$ ) dépendant de la température. Ainsi, ils peuvent se trouver dans trois états : l'état normal, l'état supraconducteur et l'état mixte. Sous  $H_{c1}$ , le matériau est complètement à l'état supraconducteur. Lorsqu'il franchit ce champ magnétique critique, il se trouve à l'état mixte, c'est-à-dire que le flux magnétique commence à pénétrer dans le matériau à travers de minces faisceaux appelés vortex. Le centre de chacun des vortex est caractérisé par une

Conductivité normale, et le flux les traversant est gardé constant par des Boucles de courant persistant se formant sur leur circonférence. La densité des vortex augmente en proportion du champ appliqué. Si ce champ dépasse  $H_{c2}$ , le matériau atteint l'état normal, de la même façon que s'il avait outrepassé la température critique sans être soumis à un quelconque champ magnétique extérieur. Figure (I.10) [03].

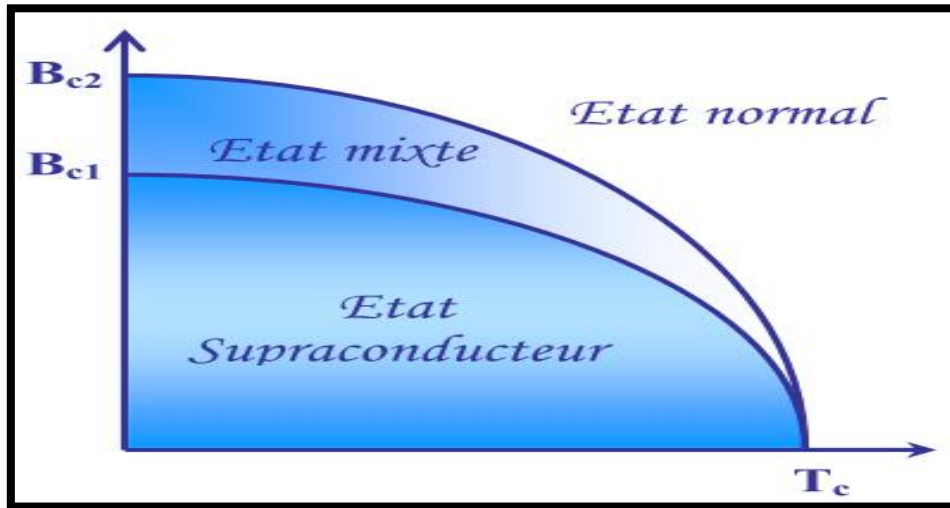


Figure I.10 Diagramme de phase d'un supraconducteur de type II.

### 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 **Nb3Sn**. Leur structure est de type pérovskite. Ce sont des oxydes de cuivre ou **cuprates** formés de  $n$  plans **CuO2** (les plans  $ab$ ), séparés par des atomes d'yttrium (ou une autre terre rare) ou de calcium (figure I.11) et intercalés entre deux blocs identiques d'extrémité qui contiennent des métaux ou des terres rares et de l'oxygène [7].

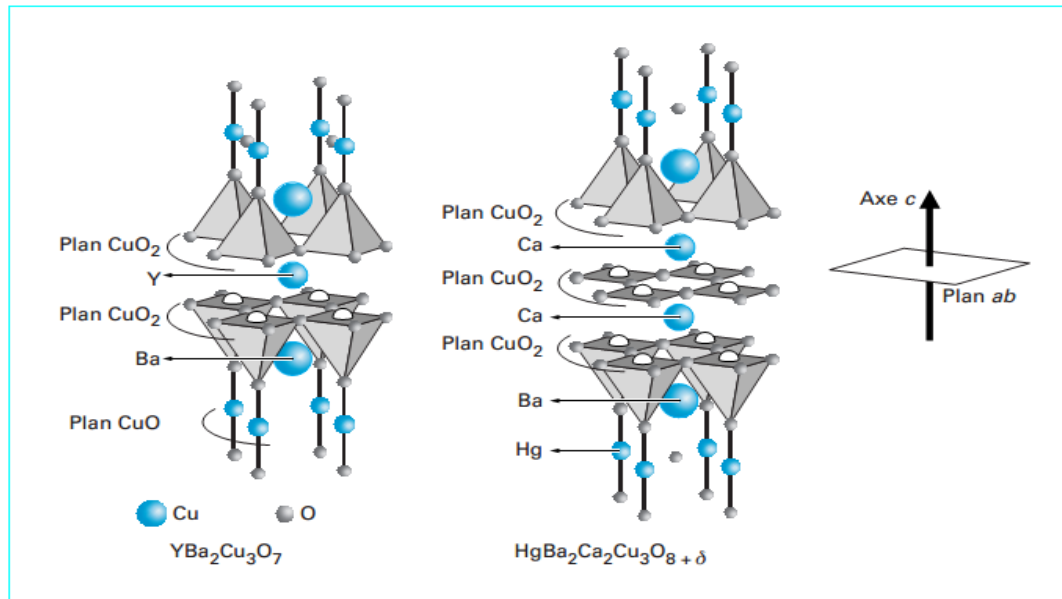


Figure I.11 Structure de supraconducteurs à haute température critique.

## I.6. 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.

- **$T > T_c$**

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.

- **$H > H_c$**

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 (BTc), 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 HTc composé BSCCO 2223 :

(BiPb)<sub>2</sub> Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>10</sub> ), dont la caractéristique  $J_c(B)$  est très sensible à l'induction magnétique  $B$ .

- **$J > J_c$**

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 BTc), conduisant, après un certain délai, à la situation  $T > T_c$  [7].

## **I.7. Conclusion**

Dans cette partie nous avons présenté un aperçu historique sur les matériaux supraconducteurs, ainsi que leurs comportements magnétique. On a conclu que l'inconvénient majeur pour les matériaux supraconducteurs reste toujours la température critique qui est très basse.

La mise en place des modèles électromagnétiques régissant le comportement de ces matériaux fera l'objet de la partie suivante.

*Chapitre II :*  
*Modélisation des*  
*Matériaux*  
*Supraconducteurs*

## II.1. Introduction

L'étude d'un dispositif électromagnétique nécessite la connaissance des champs électromagnétiques dans ce dispositif et donc les valeurs du flux, les forces magnétiques, etc. Le calcul du champ magnétique nécessite une résolution des équations électromagnétiques décrivant le comportement d'un supraconducteur. L'induction magnétique  $B$  à l'intérieur d'un matériau en fonction du champ externe  $H$ , courant-tension sur un échantillon, on peut déduire la caractéristique  $V(I)$  qui se met habituellement sous la forme d'une loi de puissance [8].

## II.2. Equations mathématiques régissent le phénomène physique (Edp)

### II.2.1. Équation de Maxwell

Macroscopiquement, les équations de *MAXWELL* restent valables pour décrire les phénomènes électromagnétiques qui se produisent dans un supraconducteur. En se plaçant en régime quasi-stationnaire (les courants de déplacement sont considérés comme nuls), elles s'écrivent

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{div}(\vec{B}) = 0 \quad \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{H}) = \vec{J} \quad (\text{II.1})$$

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

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad \vec{J} = \sigma \vec{E} \quad \vec{E} = \rho \vec{J} \quad (\text{II.2})$$

Dans les équations (II.1) et (II.2) :

- $\vec{E}$  est le champ électrique (en  $\text{Vm}^{-1}$ ).
- $\vec{B}$  est le champ d'induction magnétique (en T).
- $\vec{H}$  est le champ magnétique (en  $\text{Am}^{-1}$ ).
- $\vec{J}$  est la densité de courant électrique (en  $\text{Am}^{-2}$ ).
- $\sigma$  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  $\text{Hm}^{-1}$ ).

#### II.2.1.1. Relation B(H)

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

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M = (1 + \chi) \mu_0 H = \mu_0 \mu_r H \quad (\text{II.3})$$

Nous avons vu qu'un supraconducteur était diamagnétique, c'est à dire que  $B$  est nul à l'intérieur du matériau, lorsque  $H < H_{c1}$ . Ceci entraîne que  $M = -H$  et  $\chi = -1$ .

En revanche, lorsque le champ  $H_{c1}$  est supérieur à  $H$ , le matériau supraconducteur n'est plus diamagnétique. Comme le champ critique  $H_{c1}$  d'un supraconducteur de type II est de valeur faible, l'induction  $B$  auquel il est soumis lors de son utilisation est en général supérieure à  $\mu_0$ . Il peut donc être considéré comme macroscopiquement non magnétique. On peut alors écrire  $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$  (Figure. II.1) [8].

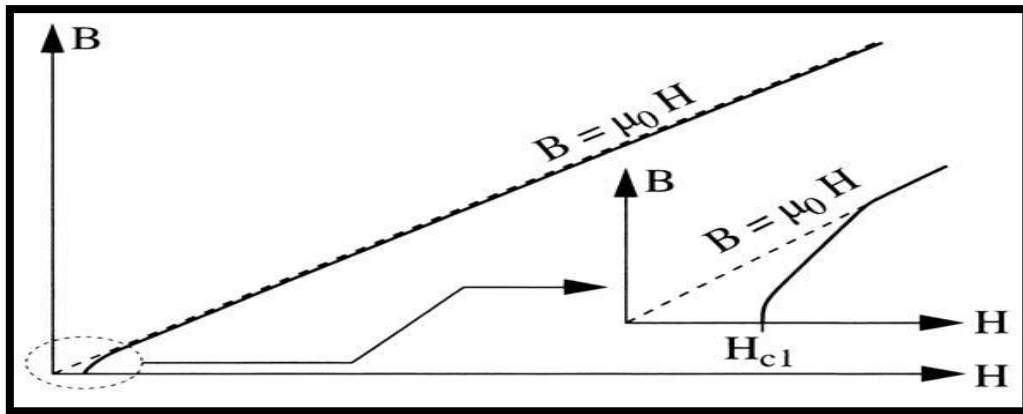


Figure II.1 Caractéristique  $B(H)$  d'un supraconducteur.

### II.2.1.2. Relation $E(J)$

À partir de mesures courant-tension sur un échantillon, on peut déduire la caractéristique expérimentale  $V(I)$  qui se met habituellement sous la forme d'une loi de puissance. Si l'on admet que cette caractéristique reste valable pour la densité de courant, la relation  $E(J)$  s'écrit :

$$E = E_c \left( \frac{J}{J_c} \right)^n \quad (\text{II. 4})$$

Dans l'équation (II. 4), 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. 4) 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. Alors, ce paramètre peut être considéré comme infini. Cette hypothèse conduit au modèle de l'état Critique que nous développons ci-après [8].

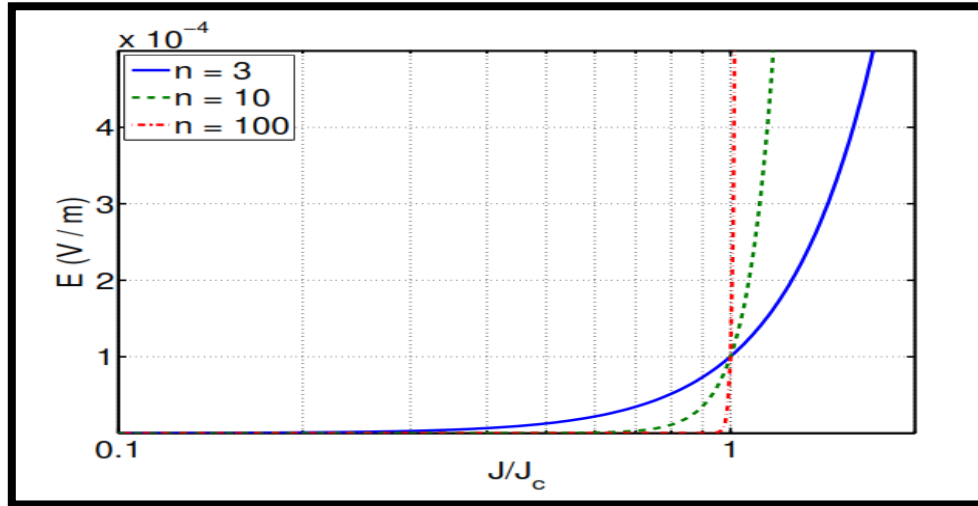


Figure II.2 Caractéristique  $E(J)$  d'un supraconducteur.

## II.3. Les lois de comportement

### II.3.1. Loi de Bean

Le modèle de Bean a l'avantage d'être simple mathématiquement et de ce fait permet sur des exemples simples de bien comprendre la supraconductivité d'un point de vue macroscopique. La (Figure II.3) montre comment en tout point du supraconducteur, la densité de courant est liée au champ électrique. Le paramètre  $E_c$  est une valeur empirique du champ électrique à partir de laquelle le matériau devient résistif.

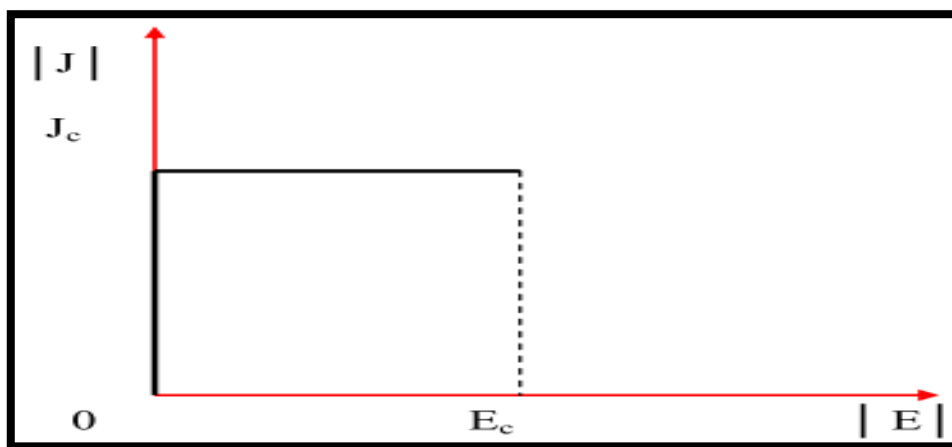


Figure II.3 Modèle de Bean.



Ce modèle a été étudié dans le cas d'un problème monodimensionnel. Il a permis à partir de calculs analytique d'obtenir des résultats satisfaisants. En revanche, il est difficilement exploitable dans le cas de problème bidimensionnel pour une approche numérique.

La relation liant  $J$  et  $E$  par le modèle de Bean n'est pas un graphe fonctionnel, ce qui rend sa modélisation mathématique difficile.

Lorsque le champ électrique est nul, la valeur absolue de la densité de courant peut prendre toutes les valeurs entre 0 et  $J_c$  [8].

### II.3.2. 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 donné par Kim sont. :

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

C'est le modèle le plus utilisé pour la modélisation de la dépendance de la densité de courant critique avec l'induction magnétique. [4]

### II.3.3. la loi de puissance

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

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

C'est un modèle qui modélise bien (voir la partie  $J = J_c$  dans la (Figure I.7) le comportement des supraconducteurs HTC autour de  $J_c$ . 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 courbe  $E(J)$  de sorte qu'on peut modéliser un conducteur normal pour  $N = 1$  (loi de comportement linéaire) jusqu'à avoir une courbe raide comme dans le modèle de l'état critique pour un  $N > 100$  [8].

- **Flux-flow**

Considérons un vortex libre (sans force de piégeage) dans une matrice supraconductrice, il peut ainsi se déplacer sous l'action de forces extérieures.

Par exemple le passage d'un courant dans le matériau engendre une force de Lorentz sur les vortex tandis qu'une induction magnétique extérieure crée une force de Laplace sur les lignes de flux. Le vortex va alors se déplacer avec une certaine viscosité.

Ce mouvement engendre un champ électrique et une résistivité dite de flux flow notée  $\rho_{ff}$  égale en première approche à (II.8):

$$\rho_{ff} = \frac{H}{H_c^2} \times \rho_n \quad (\text{II.8})$$

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

- **Flux-creep**

Lorsque la force de piégeage est du même ordre que la force de Lorentz créée par le courant appliqué au supraconducteur, le mouvement libre des vortex est contrarié.

La viscosité ainsi que la résistivité associée à l'écoulement des vortex n'est plus celle du flux flow. Les vortex se déplacent alors d'un site de piégeage à l'autre. Un mécanisme thermiquement activé (TAFV) confère aux vortex une probabilité non nulle de franchir les barrières de potentiel associées aux centres de piégeage et de sauter de site en site ce mouvement engendre un champ électrique et une résistance dans le matériau appelée résistance de flux creep.

## II.4. Principales applications des supraconducteurs

### II.4.1. Applications en physique fondamentale

Beaucoup de systèmes nécessitant la création de champs magnétiques intenses utilisent des supraconducteurs. Les grands instruments pour la recherche, comme le Large Hadron Collider (LHC) de Genève ou le projet International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) de Cadarache, utilisent les supraconducteurs comme aimants d'accélération, de guidage et de confinement du plasma.

### II.4.2. Applications en électrotechnique

#### II.4.2.1. Machines tournantes

L'utilisation des supraconducteurs dans les cryoalternateurs est à l'origine de nombreux prototypes. Le remplacement des bobinages en cuivre par des enroulements supraconducteurs permet un gain de masse grâce aux grandes densités de courant du fil et à la disparition du circuit magnétique. Le fort couple massique de ces machines en fait une application intéressante pour les systèmes embarqués [9].

#### II.4.2.2. Câbles de transport

Les supraconducteurs créant nettement moins de pertes que les câbles classiques, ils sont très intéressants pour les applications de transport d'énergie. Cependant le problème

de la cryogénie sur de grandes longueurs peut s'avérer difficile à résoudre. Une solution consiste à faire circuler un fluide cryogénique dans un tube au centre du câble et à enrouler le fil supraconducteur autour. Avec l'accroissement de la demande en énergie, certaines lignes électriques nécessitent d'être renforcées. Cependant l'espace nécessaire à la pose de nouveaux câbles n'est pas toujours suffisant, dans ce cas les supraconducteurs offrent une solution intéressante.

#### **II.4.2.3. Stockage d'énergie**

Le principal inconvénient de l'énergie électrique est qu'elle est difficilement stockable. Le Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES).

Permet de stocker de l'énergie sous forme magnétique, cette dernière pouvant être restituée avec un très bon rendement. Son fonctionnement consiste à court-circuiter une bobine supraconductrice, permettant ainsi au courant de se reboucler indéfiniment.

Le SMES peut servir comme réservoir d'énergie pour réguler les réseaux électriques, il peut également être utilisé comme source d'énergie Pulsionnelle pour les lanceurs électromagnétiques ou le formage magnétique.

#### **II.4.2.4. Limitation de courant**

Le limiteur supraconducteur permet de protéger le réseau électrique des courants de court-circuit en agissant comme un régulateur naturel de courant. C'est le sujet de notre étude, son fonctionnement est détaillé dans les prochains chapitres [10].

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

Dans cette partie nous avons présenté les différentes théories et les Modèles sur les supraconducteurs, les équations électromagnétiques décrivant le comportement d'un supraconducteur, et le classement de leurs applications en quatre groupes sont également exposées.

Dans le prochain chapitre, on va voir comment peut-on présenter le phénomène de limitation de courant de défaut dans les circuits électriques, dont l'objectif est de limiter l'appel important de courant.

***Chapitre III:***  
***Limitation de courant***

### III.1. Introduction

Dans les réseaux électriques, les problèmes liés aux courants de court-circuit sont récurrents. Ceci est d'autant plus vrai avec l'insertion de génération distribuée.

Les courants de défaut ne sont limités que par l'impédance de court-circuit. Ils sont interrompus par un disjoncteur. Dans certains cas, il n'existe pas actuellement de disjoncteur étant capable d'ouvrir un courant suffisamment important. Un limiteur de courant pourrait être une solution technologique à ces situations. Dans d'autres cas, l'ouverture du circuit électrique lors d'un défaut est possible avec les disjoncteurs actuels. Le limiteur de courant peut permettre d'augmenter la durée de vie des disjoncteurs en réduisant les contraintes qu'ils subissent. Dans certains cas, les gestionnaires du réseau sont très demandeurs de limiteurs de courant et sont prêts à le payer deux à cinq fois plus cher qu'un disjoncteur.

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

#### III.2.1. Les réseaux et les courants de court-circuit

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  $U_n$ ).

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 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 [11].

##### III.2.1.1. 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 en trois 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 schématise l'agencement des différents niveaux de tension pour le transport et la distribution de l'électricité. Voir la figure (III.1) [11].

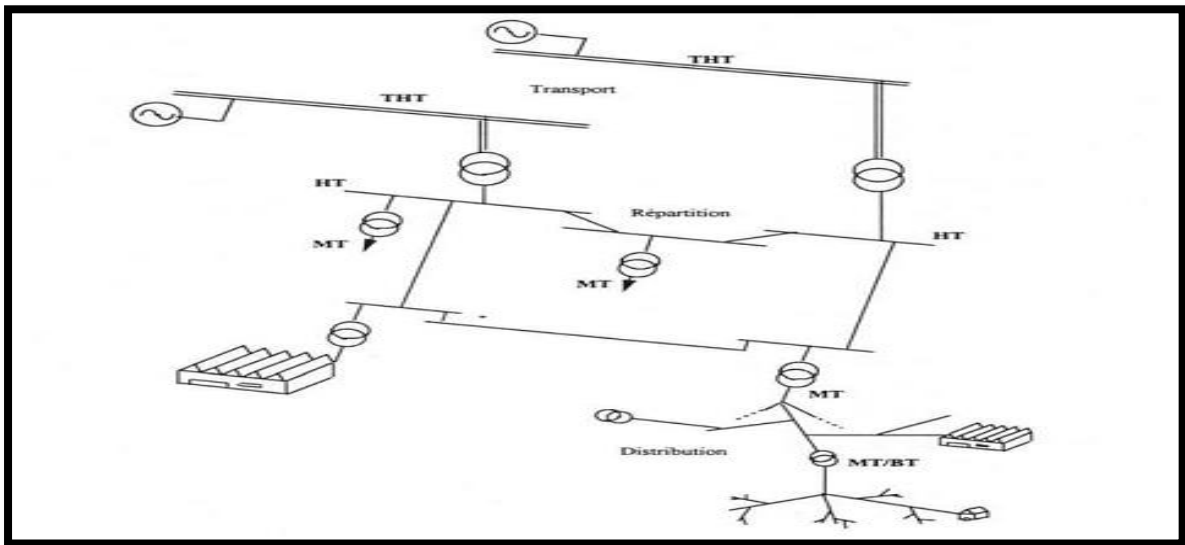


Figure III.1 Hiérarchisation par niveau d'un réseau de transport et de distribution d'électricité.

La représentation schématique d'un réseau de distribution aérien MT (Figure III.1) permet de présenter les composants principaux des réseaux de distribution [11].

### III.2.1.2. Les défauts

La qualité de la fourniture d'électricité devient une nécessité de plus en plus forte de la part du monde industriel qui utilise un nombre croissant de matériels ou procédés sensibles. Ainsi les clients des réseaux de distribution attendent une qualité dans la fourniture de l'électricité: les creux de tension doivent être inférieurs à 10% et la continuité de service la meilleure possible. A court-circuit, la perturbation peut varier du simple creux de tension en passant par la microcoupure jusqu'à l'interruption complète de la fourniture électrique. 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. Selon le type du défaut, les dégâts causés sur le matériel seront plus ou moins importants.

Les plans de protections mis en place par les distributeurs doivent donc en tenir compte. Pour déterminer les mesures de protections à prendre, les facteurs les plus importants sont: le temps du défaut, sa nature (monophasé ou triphasé) et le lieu du défaut.

Ce dernier est approximativement trouvé grâce à la sélectivité des appareils de protection qui sont réglés de manière à ce que la plus petite portion possible du réseau en défaut soit mise hors tension. La sélectivité permet à l'exploitant du réseau de définir dans quelle branche a eu lieu le court-circuit afin d'ouvrir les protections le plus près de celui-ci pour gêner le moins de clients possibles. Les appareils de limitation du courant trouveront donc un créneau important sur le réseau MT et devront être adaptés pour éliminer des défauts fugitifs. Ces 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 provoquent des 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 intéressant 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.2.1.3. 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 désioniser 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:

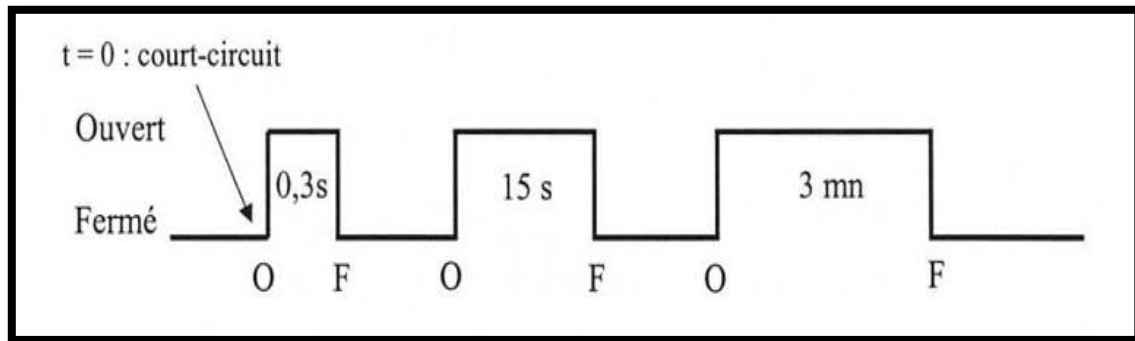


Figure III.2 Cycle OFOFOF pour une ligne aérienne.

Lors de l'apparition d'un défaut, ouverture de la ligne pendant 0,3 s. Si le défaut persiste, nouvelle ouverture pendant 15 s. Enfin, 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) :

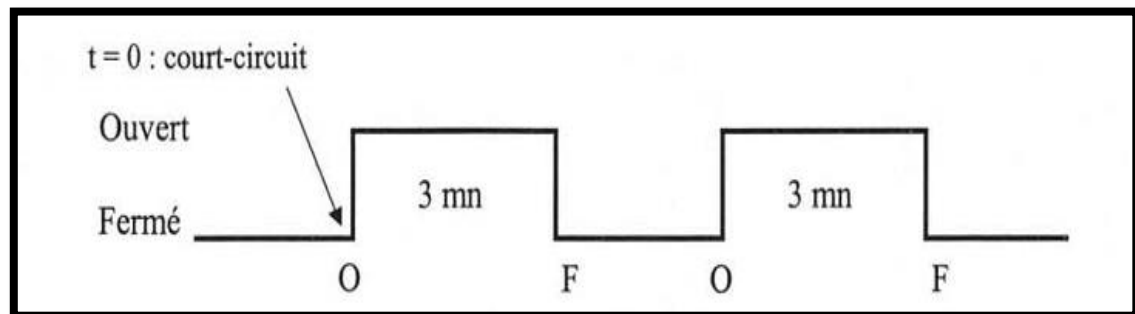


Figure III.3 Cycle OFOF pour une ligne souterraine.

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 [12].

#### III.2.1.4. 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 [12].

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 :

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

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:

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

Pour un défaut monophasé:

$$\bar{I}_{cc} = \frac{\bar{V}_n}{Z_n} + 3jCw\bar{V}_n \quad (\text{III.5})$$

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

### III.2.2. Intégration dans les réseaux électriques

L'insertion d'un limiteur permet, d'une part, d'assumer une augmentation des puissances transmissibles dans un réseau existant sans modifier ses composants ni sa structure, d'autre part de dimensionner différemment les réseaux futurs (Figure III.4).

Les limiteurs de courant se justifient en fonction du niveau de tension envisagé : pour les moyennes tensions (quelques kV), les courants de défaut peuvent être très importants ; pour les plus hautes tensions (quelques centaines de kV) le coût élevé des disjoncteurs peut rendre attractif l'insertion d'un limiteur.

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.

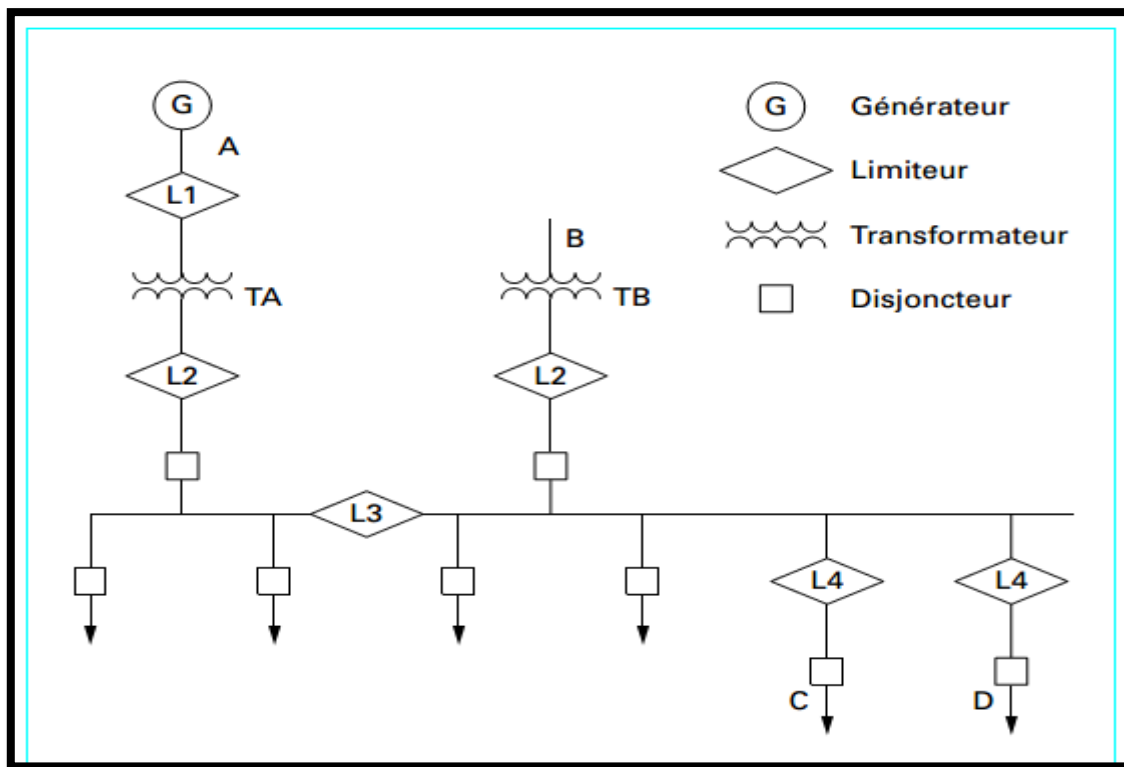


Figure III.4 Insertion de limiteurs dans un réseau.

### III.3. Fonctionnement de limiteur de court-circuit

#### III.3.1. Définition

Un dispositif est limiteur lorsque le courant qu'il laisse passer, sur court-circuit, est nettement inférieur en amplitude au courant présumé (figure III.5). Dans le cas d'un disjoncteur limiteur, il y a simultanément, à cette réduction d'amplitude une réduction de la durée  $T$  de passage de courant par rapport au temps de passage du courant de court-circuit d'un disjoncteur non limiteur.

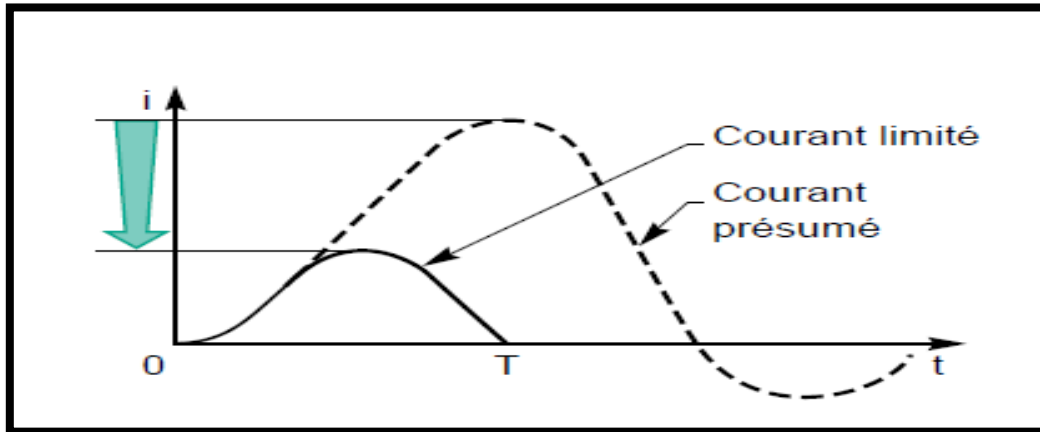


Figure III.5 représentation des courants de court-circuit, présumé et limité.

#### III.3.2. Pourquoi limiter ?

Pour réaliser des disjoncteurs plus économiques, surtout dans les faibles intensités nominales. L'appareil limiteur n'est traversé que par le courant limité beaucoup plus réduit que le courant présumé, et il n'a à couper que ce courant limité.

Pour minimiser les effets du courant de défaut dans une installation électrique. Quels sont ces effets ?

##### III.3.2.1. Effet électromagnétique

A une distance  $d$  d'un conducteur parcouru par un courant d'intensité  $I$ , il y a dans l'air une induction magnétique  $B$  de valeur :

$$B = 2 \times 10^{-7} \times \frac{I}{d} \quad (\text{III.6})$$

Conséquence possible : perturbation des dispositifs électroniques situés à proximité de conducteurs électriques parcourus par un courant de court-circuit.

##### III.3.2.2. Effets mécaniques

Si à la distance  $d$  d'un conducteur parcouru par un courant  $I$  se trouve un autre conducteur parallèle au premier de même longueur  $L$ , et parcouru par un courant  $I'$ , ce conducteur est soumis à un effort  $F$  (d'attraction si  $I$  et  $I'$  sont de même sens, de répulsion dans le cas contraire) qui vaut par unité de longueur :

$$\frac{F}{L} = B \times I \quad (\text{III.7})$$

Conséquence possible : déformation ou rupture de pièces. Dans tout appareillage, les contacts séparables, maintenus en contact par des ressorts, tendent à s'ouvrir sous l'effet d'une force électrodynamique dite de répulsion. Efforts qu'il faut parfois équilibrer par des systèmes de «compensation ».

### III.3.2.3. Effet thermique

Lors d'un court-circuit, il y a un échauffement adiabatique  $\Delta\theta$  des conducteurs de section S s'élevant :

$$\Delta\theta = \frac{K}{S^2} \int T I^2 dt \quad (\text{III.8})$$

### III.3.3. Comment limiter ?

Soit un circuit alternatif monophasé de puissance apparente S et de tension E, débitant dans une charge Z à travers un dispositif de protection a présentant une impédance négligeable avant son entrée en action avec pour l'ensemble : source + ligne + défaut

R = résistance équivalente.

L = inductance équivalente. (figure III.6).

Quand apparaît un court-circuit aux bornes de la charge Z, avant intervention de A (donc  $U_a$  négligeable) le réseau est alimenté par une force électromotrice (f .e. m.) telle que :

$$e = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (\text{III.9})$$

Donc le courant s'établit avec une dérivée initiale égale à :

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_0 = \frac{e}{L} \quad (\text{III.10})$$

Cette dérivée est maximale lorsque le court-circuit se produit à l'instant du maximum de tension du réseau, ce qui correspond, pour des facteurs de puissance inférieurs à 0,25, à un courant présumé pratiquement symétrique [13].

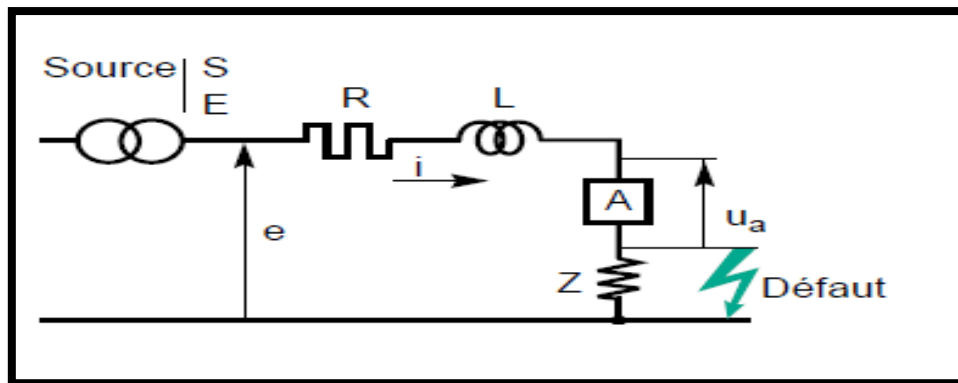


Figure III.6 schéma de principe d'un circuit en défaut.

### III.4. Intérêt du limiteur de courant de défaut

Les courants de défaut restent un problème mal résolu dans les réseaux électriques alternatifs haute tension. Les courants de défaut ne sont pas limités, mais seulement coupés lors d'un passage par zéro par un disjoncteur. Ce problème est encore plus délicat en courant continu car le courant, ne passant plus par zéro, est extrêmement difficile à couper. Comme les courants de défaut ne sont pas limités en amplitude, mais seulement en durée, tous les appareils doivent être surdimensionnés en conséquence pour résister notamment aux efforts électrodynamiques proportionnels au carré du courant. Les courants de défaut peuvent être considérables : 20 fois le courant normal assigné et ils induisent donc des forces 400 fois plus élevées qu'en régime normal. Le réseau est conçu pour que les courants de défaut ne soient pas trop importants et ne dépassent pas les capacités de coupure des disjoncteurs. Un réseau se représente très schématiquement par une source de tension  $E$  en série avec l'impédance de ligne  $Z_{cc}$  et la charge. En court-circuit, le courant de défaut est seulement limité par l'impédance de la ligne :

$$I_{cc} = I_{Défaut} = \frac{E}{Z_{cc}} \quad (\text{III.11})$$

Par contre, si l'impédance de ligne réduit favorablement le courant de défaut, elle introduit une chute de tension ( $Z_{cc} \cdot I$ ) préjudiciable en régime permanent, puisqu'elle entraîne une variation de l'amplitude de la tension. La qualité de tension (amplitude constante) augmente avec la puissance de court-circuit ( $S_{cc} = 3E S_{cc} = 3 E^2 / Z_{cc}$ ). Celle-ci est limitée par la tension réseau  $E$  et la capacité de coupure des disjoncteurs  $I_{cc}$ .

Un compromis doit être trouvé entre la qualité de tension et les courants de défaut.

La multiplication des chemins d'alimentation d'un consommateur sécurise son alimentation, mais avec comme conséquence l'augmentation du courant de défaut. Il est en effet la somme des courants de défauts des différentes sources (loi de nœuds). Tant pour la qualité de tension du réseau que pour sa sécurisation, deux demandes actuelles fortes, un limiteur de courant de défaut est par conséquent l'appareil rêvé pour un réseau.

Il permet une puissance de court-circuit « infinie », mais un courant de défaut limité. Celui-ci réduit en plus les contraintes sur tous les dispositifs classiques de la ligne, donc leur surdimensionnement lié au courant de défaut. Malheureusement, cet appareil idéal n'existe pas encore dans les réseaux haute tension, mais la supraconductivité pourrait apporter une solution.

### **III.5. Limiteur de courant : solution classique**

Peu de solutions classiques permettent de limiter naturellement les courants de court-circuit. Le fusible et le fusible pyrotechnique sont des solutions classiques utilisées jusqu'à des tensions de quelques dizaines de kV mais ils présentent l'inconvénient majeur de ne pas être réutilisables et de nécessiter une intervention humaine pour la remise sous tension du système. Les autres solutions de l'augmentation de leur impédance apparente lors d'une montée de courant.

#### **III.5.1. Arc électrique**

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

(En imposant un certain cheminement).

#### **III.5.2. Condensateur**

En commutant le courant à limiter dans un condensateur, on obtient une tension  $V$  limite bien le courant. Malheureusement la valeur de capacité nécessaire est importante et le courant limité reste significatif. Cette piste reste pourtant exploitable en basse tension. Un autre problème est que la commutation doit se faire en quelques microsecondes.

Pour cela il est possible d'utiliser des disjoncteurs statiques, mais dans tous les cas la synchronisation des dispositifs semi-conducteurs de commutation est délicate.

Ces systèmes de commutation rapide restent difficiles à appliquer à la haute tension et présentent des chutes de tension non négligeables à l'état passant (quand le courant est inférieur ou égal au courant nominal).

#### **III.5.3. Inductances**

Une inductance insérée en série dans le réseau limite le courant de court-circuit mais dégrade la stabilité transitoire si l'inductance est à proximité des générateurs, et introduit des surtensions transitoires durant les séquences de refermeture des appareils de coupure.

De plus la chute de tension, les pertes en régime nominal et l'encombrement sont loin d'être négligeables sauf pour de très faibles courants nominaux. De fait, cette solution introduit une composante inductive qui peut être gênante pour certains types de réseau[13].

### III.5.4. Réactance série

L'insertion permanente de réactances en série dans les réseaux permet de limiter les courants de défauts mais introduisent des surtensions transitoires durant les séquences de refermeture des disjoncteurs. De plus, les chutes de tensions en régime nominal et l'encombrement n'étant pas négligeable, cette solution n'est pas applicable pour tous les réseaux [14].

### III.5.5. Limiteur commandé

Pour limiter ces inconvénients, il est préférable d'introduire ces composants au moment du défaut. Un des dispositifs de référence est le transformateur série court-circuité par des thyristors (Figure III.7). 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 [15].

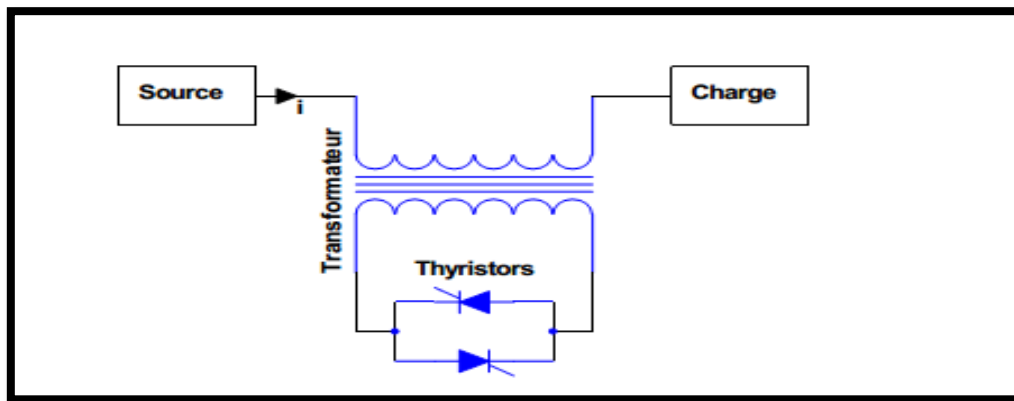


Figure III.7 Limitation de courant par transformateur court-circuité.

### III.5.6. Résistance variable

Enfin, une solution élégante et efficace est l'utilisation d'une résistance variable insérée dans le circuit. Cette variation provient en général soit d'un changement de phase, soit d'un changement d'état du matériau de la résistance. Dans le cas d'un changement d'état, s'il n'est pas homogène, la concentration de puissance dans une région limitée en courage la destruction du matériau [16].

### III.6. Caractéristiques spéciales du disjoncteur limiteur

Afin de réduire les contraintes thermiques et mécaniques (dues à des forces électrodynamiques) exercées sur l'objet à protéger, il faut couper le courant dès le début du court-circuit, avant que la valeur totale possible soit atteinte (comme par exemple pour éviter la soudure des bornes du contacteur).

- **On y parvient grâce à ce qui suit**
- L'ouverture rapide des contacts principaux.

Le développement rapide d'une haute tension d'arc (détourner rapidement l'arc des pointes des contacts et le guider vers la chambre d'extinction).

- **Les effets de la réduction des valeurs de l'énergie passante sont**
  1. La réduction des forces électrodynamiques sur les barres collectrices (comme par exemple un espacement croissant entre les supports).
  2. La réduction des contraintes thermiques. Il est possible d'empêcher la soudure des bornes des contacteurs. Le surdimensionnement des contacteurs peut être évité ou du moins limité raisonnablement.

Le résultat figure dans les tableaux de coordination des courts-circuits démarreur de petite dimension composé d'éléments choisis surtout en fonction de leurs courants assignés.

Les disjoncteurs limiteurs de courants sont utilisés dans une large gamme d'applications.

Il n'est plus nécessaire d'effectuer des calculs compliqués du courant de court-circuit à chacun des endroits du réseau où est installé un disjoncteur. La coordination du court-circuit nécessite aussi peu de travail de planification qu'avec les fusibles.

Le disjoncteur devrait être construit de manière à pouvoir couper un courant de court-circuit dans toutes les situations possibles sans aucun problème.

- **Les caractéristiques qui font que la planification avec les disjoncteurs est aussi facile qu'avec les fusibles sont**

1. Le pouvoir de coupure élevé rend superflu le calcul du courant de court-circuit :

Dans des applications réelles, le niveau de défaut (courant de court-circuit présumé), à l'endroit où les disjoncteurs des circuits de branchement des moteurs sont installés, est surtout de l'ordre de 1...20 kA. Si le pouvoir de coupure du disjoncteur est supérieur, il n'est pas nécessaire de faire d'autre calcul.

Il est possible d'utiliser les disjoncteurs à n'importe quel endroit de l'installation sans avoir à calculer leurs encombrements, comme c'est le cas avec les fusibles à pouvoir de coupure élevé.

2. Les valeurs de l'énergie passante sont basses: les contacteurs raccordés en aval sont Moins sollicités à mesure que les disjoncteurs limitent le courant de court-circuit de façon sensible.

La coordination des court-circuit est simplifiée et il n'est pas nécessaire de consulter les tableaux de coordination de courts-circuits [17].



### III.7. Limiteurs supraconducteurs de courant

#### III.7.1. Principes et réalisations des limiteurs supraconducteurs

La caractéristique intrinsèque fortement non linéaire du champ électrique en fonction du courant dans un supraconducteur est à la base du limiteur supraconducteur des courants de défaut. En régime normal, les pertes dans l'élément supraconducteur sont très faibles (pertes AC), voire pratiquement nulles en DC. Par contre, dès que le courant dépasse un seuil prédéfini, l'élément supraconducteur développe instantanément un fort champ électrique qui équilibre la tension du réseau et limite le courant à une valeur prédéterminée, facile à couper par un disjoncteur. Le disjoncteur reste indispensable pour isoler le défaut entre autres (Figure III.8).

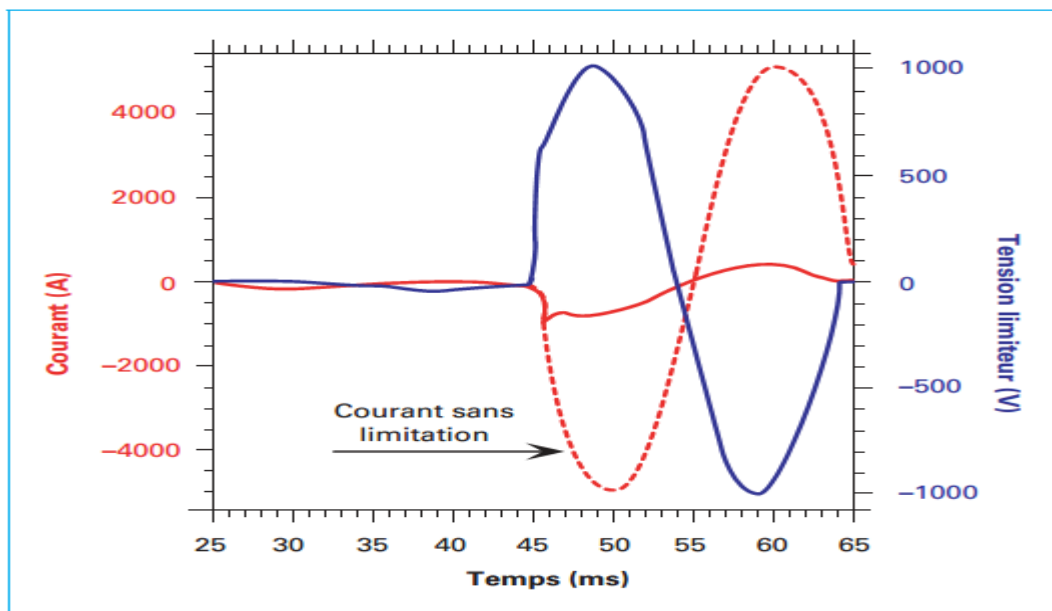


Figure III.8 Évolutions temporelles des courants (avec et sans limitation) et de la tension lors d'un court-circuit.

Après avoir été isolé par le disjoncteur, l'élément supraconducteur se refroidit progressivement et retrouve l'état supraconducteur après un certain temps. C'est la récupération. Si la limitation est extrêmement rapide ( $\mu\text{s}$ ), la récupération est nettement plus lente (seconde à minutes) et peut poser des problèmes de continuité de service dans certaines configurations.

Il existe deux grands types de limiteurs supraconducteurs en excluant ceux qui utilisent de l'électronique de puissance comme un pont redresseur :

- **Le limiteur résistif** : reste le plus simple le courant est limité par la résistance développée par le supraconducteur.

– **Le limiteur inductif** : le supraconducteur déclenche seulement la limitation, mais n'assure pas la limitation ; celle-ci est réalisée par une inductance.

Si le limiteur inductif présente quelques atouts, il reste très désavantagé par le circuit magnétique lourd et encombrant et les études actuelles portent essentiellement sur le limiteur résistif.

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 [18].

### III.7.2. Les types des limiteurs supraconducteurs

#### III.7.2.1. Limiteur résistif

Dès les années 70, les conducteurs ne supportant pas à cette époque les courants alternatifs l'utilisation des supraconducteurs dans un limiteur de courant a été envisagée à partir de films minces de NbN en commutant le courant de défaut dans une résistance parallèle de limitation.

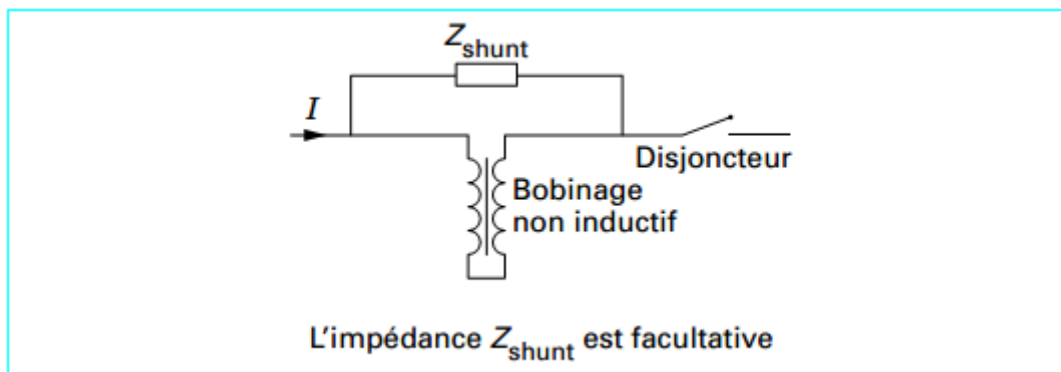


Figure III.9 Limiteur résistif BTc.

Le plus simple des concepts (Figure III.9) est de monter en série sur la ligne à protéger un bobinage non inductif supraconducteur pour limiter les chutes de tension à l'état passant. après transition, la forte résistance insérée naturellement dans la ligne limite le courant.

Un disjoncteur en série, rapide, mais de faible pouvoir de coupure, permet d'isoler le défaut et protège le limiteur contre une excursion en température excessive.

Un limiteur résistif de résistance  $R$  présente une dissipation en régime de défaut égale à  $R^{-1}$  puisque le limiteur est soumis en régime de défaut à la tension du réseau.

**La structure non inductive a par ailleurs les avantages :**

- les champs 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.

Parmi les réalisations significatives actuelles, il faut citer le prototype d'Alcatel Alsthom Recherche (figure III.10) et celui à HTc de Siemens (1 kV, 100 A).

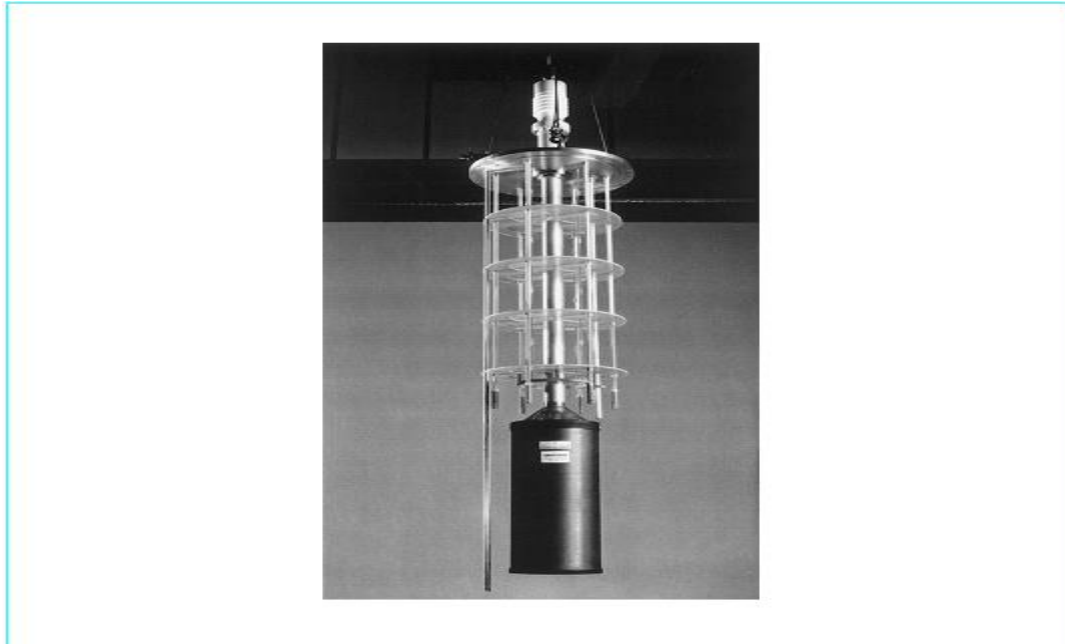


Figure III.10 Limiteur résistif : prototype Alcatel Alsthom Recherche.

### III.7.2.2. Limiteur inductif

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

Le concept le plus simple consiste à coupler antiparallèlement deux solénoïdes réalisés avec des conducteurs de courants critiques différents (figure III.11). En cas de défaut, un seul des deux bobinages (Bobinage déclencheur) transite à l'état normal, l'essentiel du courant est transféré à la bobine qui n'a pas transité et l'impédance est pratiquement l'inductance de celle-ci. Le dimensionnement du déclencheur, en particulier la longueur de supraconducteur nécessaire, est le même que celui d'un bobinage limiteur résistif de même résistance  $R$  et la dissipation en régime de défaut reste proche de  $R^{-1}$  puisque le déclencheur est soumis en régime de défaut à la tension du réseau.

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

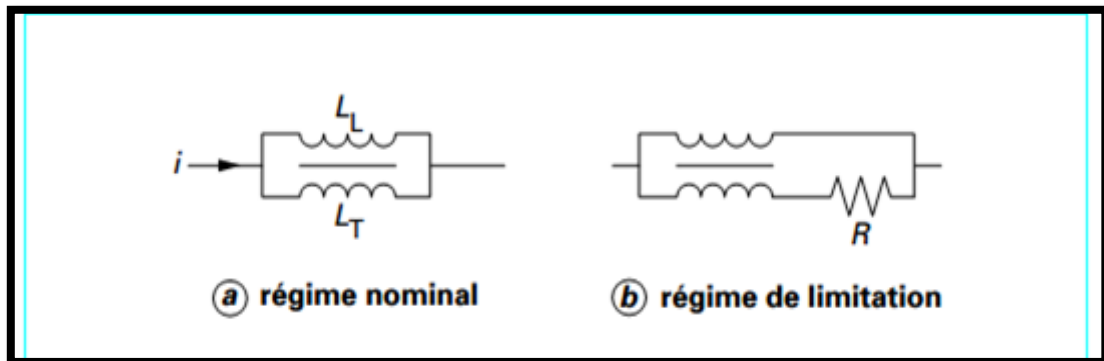


Figure III.11 Limiteur inductif à fort couplage.

Le bon fonctionnement de ce dispositif est lié au couplage entre les deux bobinages qui doit être excellent, ce qui est incompatible avec un bon découplage thermique des deux bobinages. Pour réduire cet inconvénient, on peut mettre en parallèle une inductance de limitation avec un bobinage supraconducteur déclencheur non inductif (figure III.12).

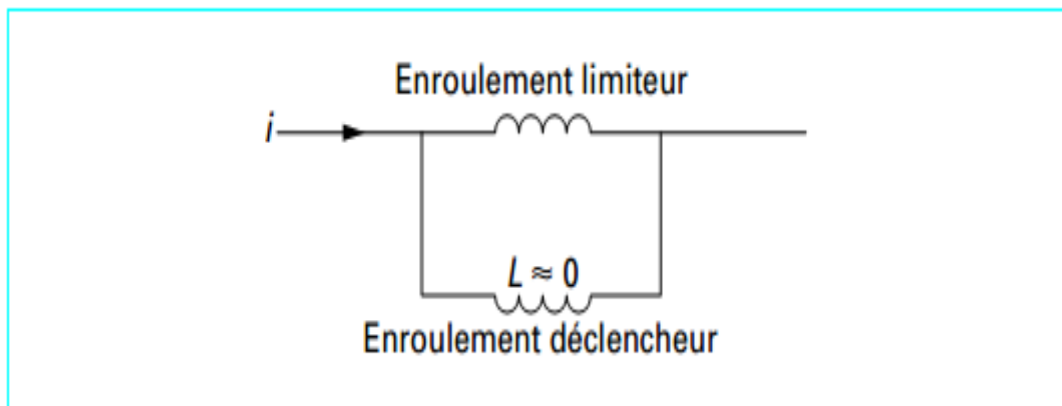


Figure III.12 Limiteur inductif à bobinage découplé.

- **Application**

Sur une conception analogue, deux prototypes de Toshiba 6,6 kV/1,5 kA, l'un avec un enroulement de limitation en cuivre et l'autre avec un enroulement de limitation supraconducteur ont été réalisés.

L'utilisation de deux enroulements déclencheurs permet d'avoir des temps de récupération très rapides (quelques ms) (Figure III.13).

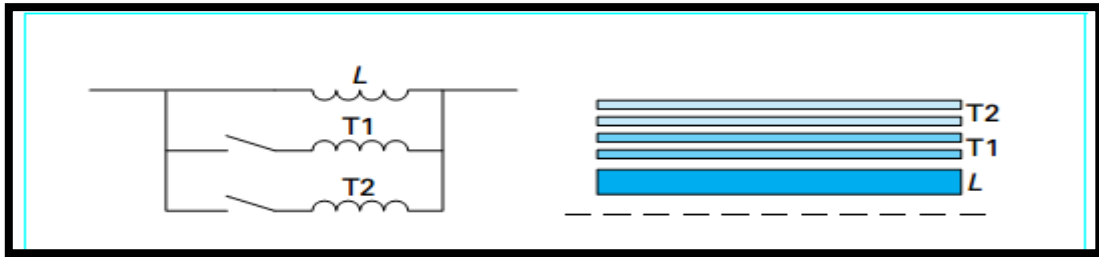


Figure III.13 Limiteur inductif à plusieurs déclencheurs.

Les bobinages sont des solénoïdes coaxiaux, les bobinages déclencheurs T1 et T2 sont non inductifs et assurent le passage du courant nominal ; en cas de court-circuit, le courant est transféré dans la bobine de limitation, supraconductrice ou résistive.

Parmi les réalisations significatives actuelles, il faut citer le prototype commandé utilisant un conducteur HTc BSCCO gainé Ag de Lockheed Martin Co-South Cal Utility (2,4 kV; 2,2 kA) qui utilise une détection classique pour insérer une inductance supraconductrice de limitation sans tirer partie de sa transition.

Une configuration originale de limiteur inductif à déclencheur HTc permet d'auto renforcer l'effet de limitation par application d'un champ magnétique (figure III.14) [19].

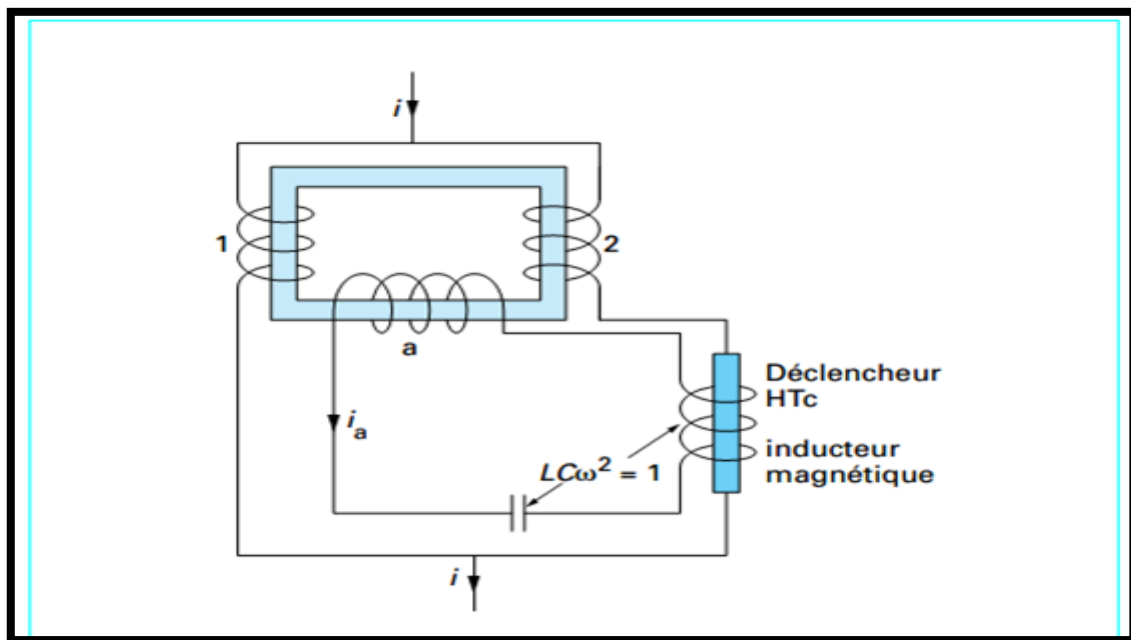


Figure III.14 Limiteur à trigger auto renforcé. [19]

### III.7.2.3. SCFCL de type noyau magnétique écrané

Ce type de limiteur est souvent appelé SCFCL inductif, il est composé d'un enroulement primaire conventionnel bobiné autour d'un noyau magnétique entre les quels ce trouve un cylindre supraconducteur (Figure III.15).

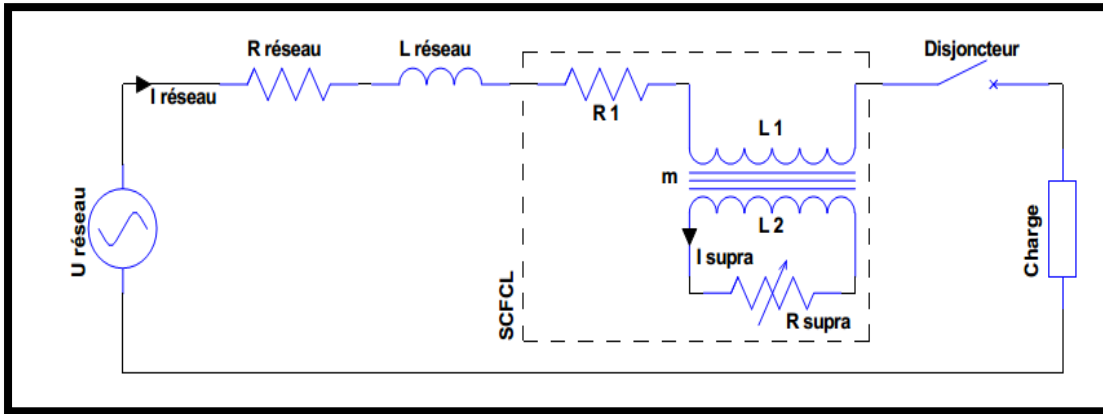


Figure III.15 SCFCL de type noyau magnétique écranté.

Son principe de fonctionnement est semblable à un transformateur avec un rapport de transformation «  $m$  » et un enroulement secondaire court-circuité (Figure III.16) [20].

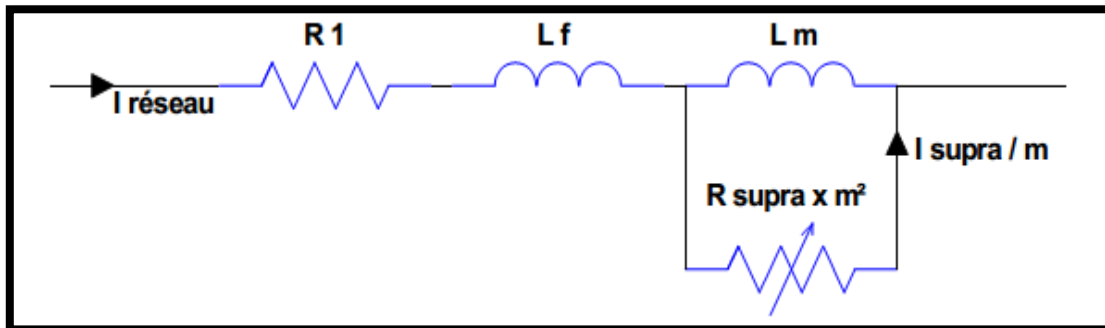


Figure III.16 Schéma équivalent du SCFCL de type noyau magnétique écranté.

En régime assigné, le courant induit dans le cylindre supraconducteur est inférieur à son courant critique et fonctionne comme un parfait écran magnétique pour l'enroulement primaire, ainsi le flux dans le noyau magnétique est négligeable. La faible impédance apparente du SCFCL équivaut à la résistance  $R_1$  de l'enroulement primaire et à l'inductance de fuite  $L_f$  entre l'enroulement primaire et le cylindre supraconducteur.

En régime de défaut, le courant dans le supraconducteur excède sa valeur critique et le cylindre développe une résistance  $R_{supra}$ . Le flux pénètre alors le noyau magnétique, générant ainsi une impédance de limitation constituée par la mise en parallèle de l'inductance magnétisante  $L_m$  et de la résistance  $R_{supra}$  ramenée au primaire soit  $R_{supra} \times m^2$ . Ainsi la conception du dispositif détermine si l'impédance de court-circuit est principalement résistive ou inductive.

Ce type de SCFCL est avantageux car le supraconducteur n'est pas directement connecté au réseau et il n'y a pas d'amenées de courant à basse température. En régime de défaut le supraconducteur est soumis à une tension faible correspondant à la tension du réseau atténué par le rapport de transformation «  $m$  ». Les principaux inconvénients de ce type de

SCFCL sont le volume et le poids qui sont semblables à un transformateur de même puissance. Il est également nécessaire de respecter un temps de récupération avant d'utiliser de nouveau le SCFCL [20].

#### III.7.2.4. SCFCL de type pont redresseur

Ce type de SCFCL (Figure III.17) est composé d'un pont redresseur à diodes ou thyristors, d'une bobine supraconductrice  $L_{supra}$  et d'une source de tension continue  $U_{Dc}$ .

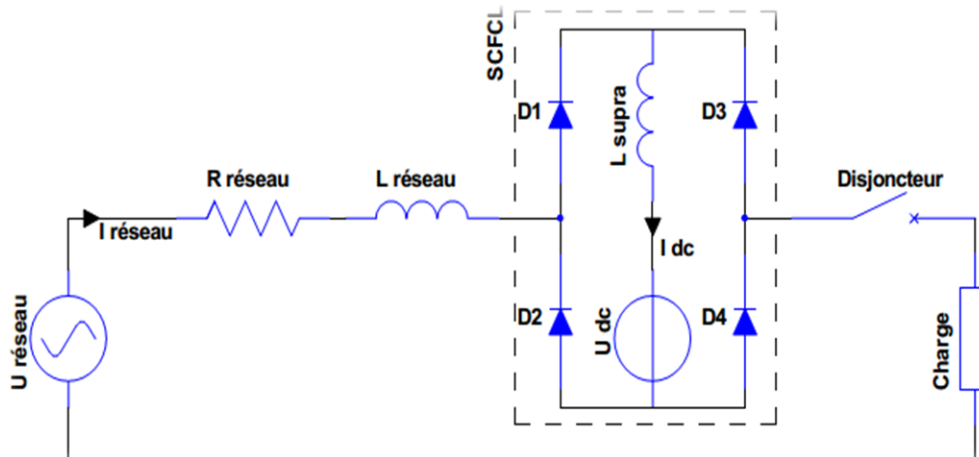


Figure III.17 SCFCL de type pont redresseur.

Un courant continu  $I_{dc}$  traversant une bobine supraconductrice  $L_{supra}$  est délivrée par une source de tension  $U_{dc}$ . en régime assigné le courant  $I_{réseau}$  étant inférieur au courant  $I_{dc}$ , les diodes sont passantes et le courant  $I_{réseau}$  ne traverse pas l'inductance  $L_{supra}$ . Dans ce cas l'impédance du SCFCL est faible et seule l'électronique de puissance génère des pertes. Si le courant  $I_{réseau}$  excède le courant  $I_{dc}$ , 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  $I_{réseau}$  dans la bobine  $L_{supra}$  qui limite le courant par sa forte inductance.

En principe la bobine peut être non-supraconductrice, mais ceci augmente les pertes par effet Joule et implique également un enroulement plus grand. 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  $I_{dc}$  et 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 [20].

### III.7.2.5. SCFCL de type contrôleur du courant de défaut

Un composant d'électronique de puissance comme le thyristor, peut par son ouverture aiguiller un courant dans une impédance de limitation. La possibilité d'ajuster le seuil de déclenchement de la commande fait de ce type de SCFCL un contrôleur de courant de court-circuit. 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.18).

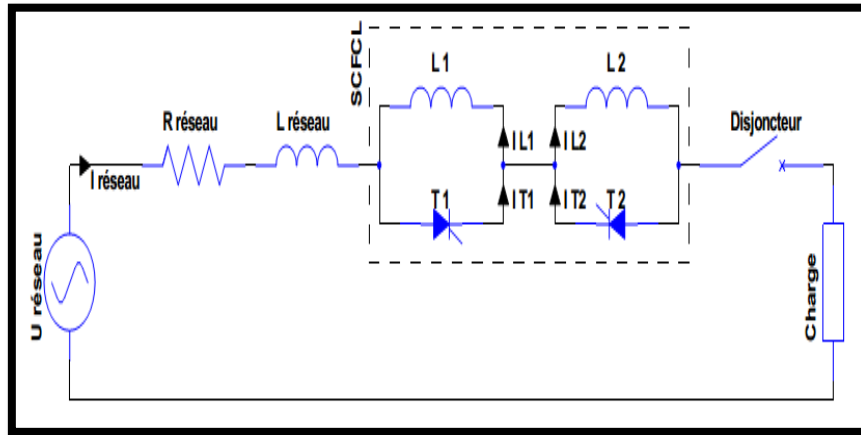


Figure III.18 SCFCL de type contrôleur du courant de défaut.

Pour amorcer le fonctionnement du système, il est nécessaire de connecter une charge au réseau puis de commander alternativement les Thyristors T1 et T2 pour faire circuler un courant continu d'amplitude  $I_{dc}$  dans les bobines supraconductrices L1 et L2.

En régime assigné l'amplitude du courant  $I_{réseau}$  étant inférieur à  $I_{dc}$ , les thyristors conduisent en permanence et l'impédance du SCFCL correspond à la chute de tension des thyristors. En régime de défaut le courant  $I_{réseau}$  dépasse  $I_{dc}$ , ceci bloque alternativement les thyristors et aiguille ainsi le courant dans les inductances qui leur 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 SCFCL avec pont redresseur mais exige une source de tension et de l'électronique de puissance en moins.

### III.7.2.6. SCFCL de type noyaux magnétiques saturés

Pour limiter le courant de court-circuit, une impédance non-linéaire peut être obtenue en reliant les enroulements L1 et L2 de deux noyaux magnétiques saturés par des bobines supraconductrices  $L_{supra1}$  et  $L_{supra2}$  parcourues par des courants continus.

(Figure III.19).



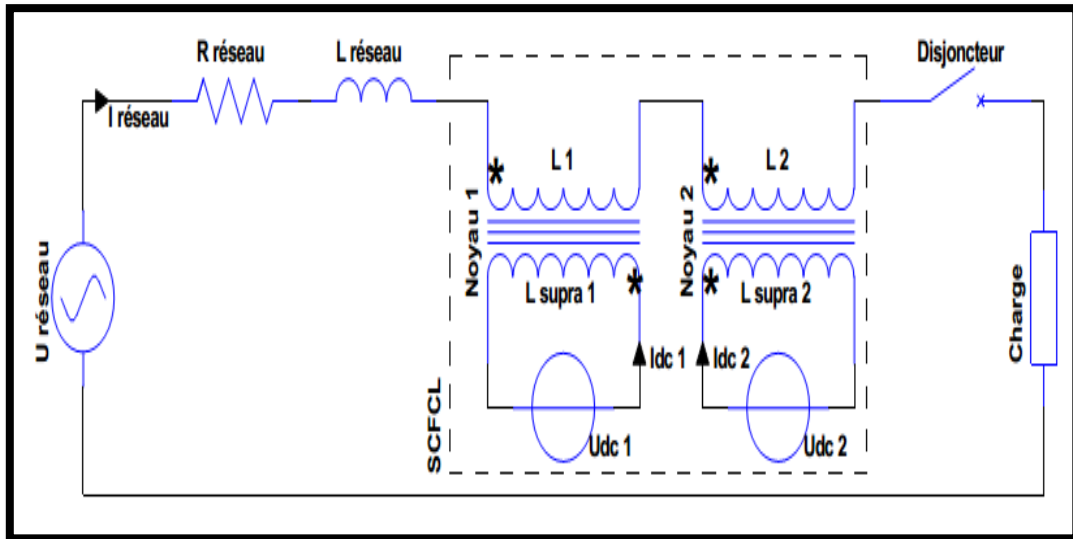


Figure III.19 SCFCL de type noyaux magnétiques saturés.

Les deux noyaux étant saturés, l'inductance apparente du SCFCL est faible et correspond à la somme des résistances et des réactances de  $L_1$  et  $L_2$ . En régime assigné,  $I_{réseau}$  est assez bas pour maintenir les noyaux entièrement saturés, assurant ainsi la faible impédance du SCFCL. Dans le cas d'un défaut, l'augmentation de  $I_{réseau}$  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 SCFCL, 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 [20].

### III.7.3. Emplacements d'un limiteur

❖ **Un limiteur de courant peut être placé :**

- **En sortie de tranche ou de sous-station;** on peut protéger ainsi le générateur et le transformateur qui peuvent être dimensionnés en fonction du courant de limitation et non plus en fonction du courant de court-circuit.
- **Dans les sections d'entrée des sous-stations;** pour des réseaux existants, cela permet de maintenir l'interconnexion des sections en aval.
- **Dans une branche d'interconnexion;** ce qui permet, d'une part, d'isoler la portion en défaut tout en assurant la continuité d'exploitation avec les autres sources et, d'autre part, d'améliorer les marges de stabilité et la qualité des systèmes. Par ailleurs, le

- Limiteur peut être utilisé comme régulateur sélectif permettant d'équilibrer la charge dans des branches en parallèle [21].

Les limiteurs doivent être calibrés pour ne fonctionner qu'en régime de défaut et pas sur les surcharges momentanées et être compatibles avec les systèmes de protection existants. Dans les applications en ligne, la majorité des défauts étant fugitifs (90 % sur les lignes aériennes) la refermeture automatique (cycle OFO) du disjoncteur est employée: les systèmes classiques, qui ne changent pas d'état, acceptent cette procédure ; par contre tout ou partie des dispositifs supraconducteurs, notamment les limiteurs à basse température critique, devront être dupliqués pour assurer cette fonction. cette duplication n'est pas indispensable en interconnexion, où un délai de quelques minutes avant refermeture est acceptable. Dans le cas des matériaux HTc, à haute température critique, la faible dissipation peut permettre d'envisager des temps de récupération compatibles avec les cycles OFO. 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 limité, temps de récupération ... ). Ainsi, en fonction de son emplacement, le matériau supraconducteur utilisé pour le limiteur pourra être différent, ce qui permettrait d'utiliser au mieux les particularités de chaque type de supraconducteur. Une première place très intéressante pour installer un limiteur se situe entre deux jeux de barres (Figure III.20) afin d'augmenter le maillage du réseau (toujours dont le but 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 [21].

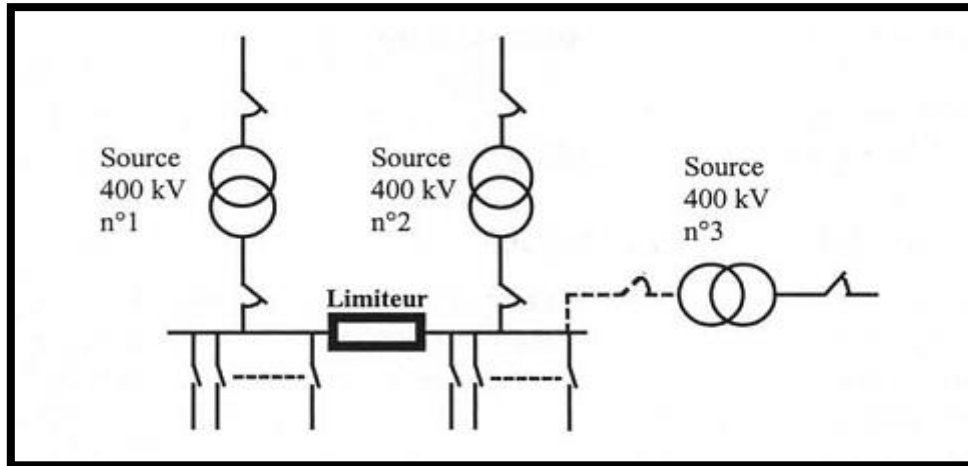


Figure III.20 Limiteur entre deux boucles d'un réseau.

Les limiteurs de courant peuvent être placés en différents endroits d'un réseau électrique classique. Deux exemples vont être donnés :

Dans la (figure III. 21), le limiteur supraconducteur relie deux parties du réseau non interconnectables actuellement. Cette liaison conduit en effet à des courants de court-circuit dépassant les capacités de coupure des disjoncteurs actuels. Par contre, cette liaison sécurise avantageusement le réseau et améliore la qualité de tension. La remise en service du limiteur après une limitation n'a pas à être rapide puisque l'isolation conduit à l'état actuel du réseau non interconnecté, comme en cas d'incident sur le limiteur.

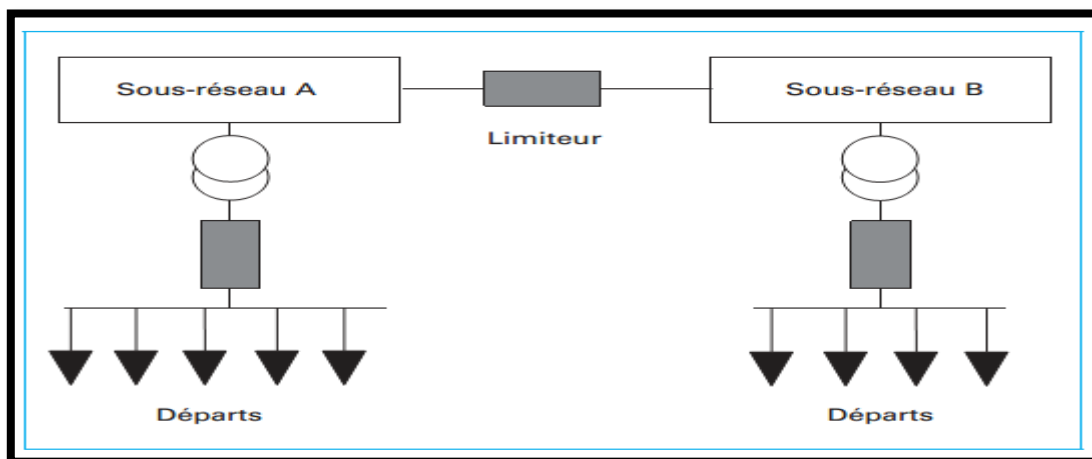


Figure III.21 Emplacement très intéressant d'un limiteur.

La (figure III.22) donne un autre exemple d'emplacement très intéressant d'un limiteur dans une sous-station en Allemagne. Les 2 sous-réseaux **110 kVA** et B sont alimentés chacun par 2 transfo de **1000 MVA** A1/A2 et B1/B2 pour satisfaire à la règle n- 1 de dimensionnement des réseaux électriques. Ce critère n- 1 signifie que le réseau doit fonctionner avec la perte d'un élément, ici un transformateur. Si l'un des 2 transformateurs alimentant un sous-réseau est hors d'usage, l'autre assure la continuité de service, mais au

prix d'un appareil de **1 000 MVA** avec tous les accessoires, notamment les organes de coupure associés. L'utilisation de 2 limiteurs de courant de défaut permettrait de s'affranchir de 2 transformateurs de **1 000 MVA** tout en assurant le critère  $n-1$ .

En cas d'indisponibilité du seul transformateur alimentant le sous-réseau, celui-ci est alimenté par l'autre sous-réseau via le limiteur. La liaison entre les 2 sous-réseaux **110 kV** n'est pas possible sans limiteur car elle conduirait à des courants de défaut trop élevés. Les évaluations conduisent à une réduction de 50 % des coûts d'investissement et d'exploitation [22].

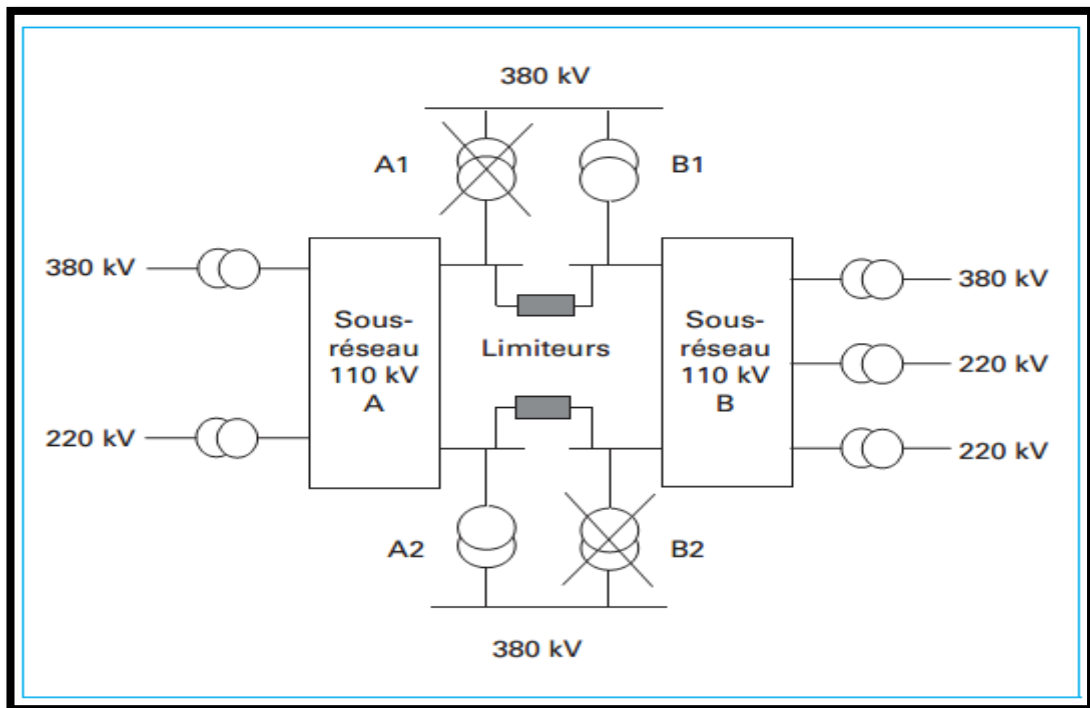


Figure III.22 Exemple d'emplacement intéressant de limiteurs dans une sous-station.

### III.7.4. Avantages et inconvénients propres aux supraconducteurs

Les avantages attendus par rapport aux systèmes classiques sont :

- Une limitation immédiate et non différée du courant, ce qui garantit la protection des matériels contre les efforts électromagnétiques intenses qu'occasionnent les sur-courants.
- Une fonctionnalité nouvelle sans équivalent classique.
- Un fonctionnement autonome et naturel.
- Une intégration des dispositifs de détection et de limitation.
- Un faible chute de tension et de faibles pertes en régime normal.
- Une masse et un volume réduits.

- Un fonctionnement répétitif, la transition de l'état supraconducteur à l'état normal étant non destructive si elle est bien maîtrisée.
- Une autoprotection en cas de dysfonctionnement automatique puisque, en cas de panne. cryogénique par exemple, le supraconducteur se trouve naturellement dans l'état normal résistif.
- Une bonne tenue diélectrique pour les applications en haute tension.
- Une réponse possible aux besoins accrus de la qualité de la fourniture d'énergie électrique.

**Les inconvénients qu'il convient de minimiser par des dispositifs sa adaptés sont :**

- Les pertes cryogéniques.
- Le temps de récupération.
- La compatibilité et la connectique avec le réseau (amenées de courant).
- Les besoins de maintenance [22].

### **III.8. Conclusion**

Nous avons décrit dans ce chapitre les différents types de limiteurs et leurs configurations dans un réseau électrique, l'étude de limitation de courant nécessite de décomposer ce chapitre en deux parties: l'une sur l'étude des supraconducteurs en vue de la limitation du courant, l'autre sur la réalisation d'un appareil autonome. En effet, afin d'utiliser des supraconducteurs massifs 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 leurs influence sur le réseau électrique sans et avec limiteurs de courant fera l'objet du chapitre suivant [22].

***Chapitre IV:***  
***Calcul des courants de***  
***court-circuit***

## IV.1. Introduction

Toute installation électrique doit être protégée contre les courts-circuits et ceci, sauf exception chaque fois qu'il y a une discontinuité électrique, ce qui correspond le plus généralement à un changement de section des conducteurs. L'intensité du courant de court-circuit est à calculer aux différents étages de l'installation ceci pour pouvoir déterminer les caractéristiques du matériel qui doit supporter ou couper ce courant de défaut.

Dans cette partie nous avons présenté la détermination du courant de court-circuit triphasé au niveau d'un nœud quelconque d'un réseau électrique par les deux méthodes (analytiquement et la méthode de simulation) [23].

## IV.2. Organigramme de calcul du courant de court-circuit

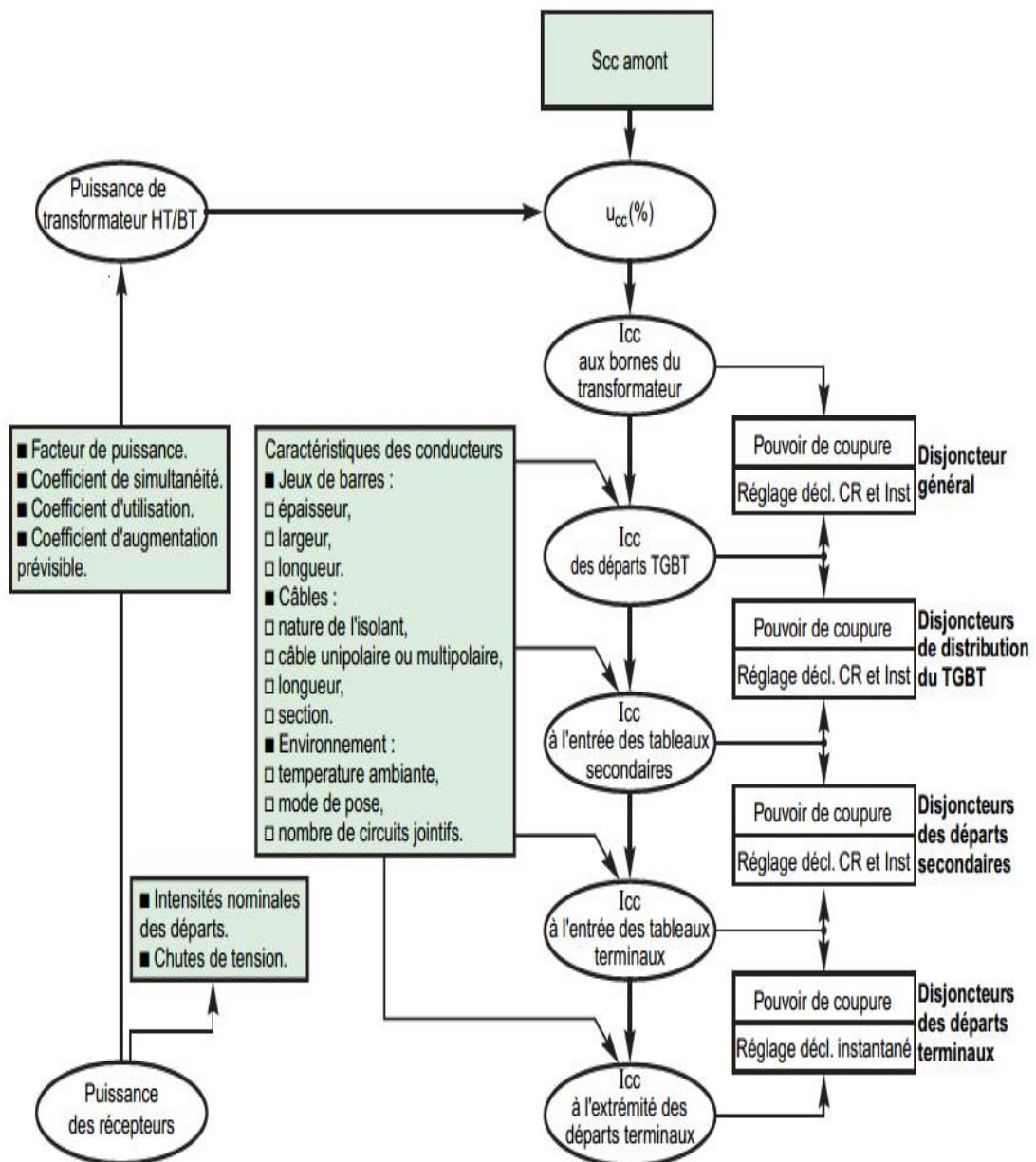


Figure IV.1 procédure de calcul d' $I_{cc}$  pour la conception d'une installation électrique basse tension.

L'organigramme de la figure IV.1 montre l'approche qui conduit aux différents courants de court-circuit et les paramètres qui en résultent pour les différents dispositifs de protection d'une installation.

Pour choisir et régler convenablement les protections, on utilise les courbes du courant en fonction du temps (figure IV.2 et IV.3 et IV.4 2). Deux valeurs du courant de court-circuit doivent être connues :

❖ le courant maximal de court-circuit qui détermine :

- 1- Le pouvoir de coupure -PdC- des disjoncteurs.
- 2- le pouvoir de fermeture des appareils.
- 3- la tenue électrodynamique des canalisations et de l'appareillage.

Il correspond à un court-circuit à proximité immédiate des bornes aval de l'organe de protection.

Il doit être calculé avec une bonne précision (marge de sécurité).

❖ le courant minimal de court-circuit indispensable au choix de la courbe de déclenchement des disjoncteurs et des fusibles, en particulier quand :

- 1- a longueur des câbles est importante et/ou que la source est relativement impédante (générateurs-onduleurs)
- 2- la protection des personnes repose sur le fonctionnement des disjoncteurs ou des fusibles, c'est essentiellement le cas avec les schémas de liaison à la terre du neutre TN ou IT. Rappelons que dans tous les cas, quel que soit le courant de court-circuit (du minimal au maximal) la protection doit éliminer le court-circuit dans un temps ( $t_c$ ) compatible avec la contrainte thermique que peut supporter le câble protégé :

$$\int i^2 . dt \leq K^2 . S^2 \quad (IV.1)$$

Selon les figures suivant :

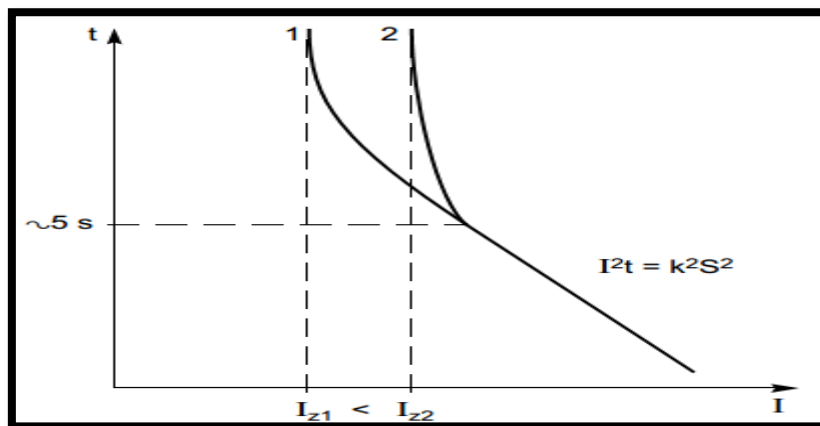


Figure IV.2 caractéristiques  $I^2.t$  d'un conducteur en fonction de la température ambiante.



1 et 2 représentent la valeur efficace du courant dans le conducteur à des températures différentes  $\theta_1$  et  $\theta_2$  avec  $\theta_1 > \theta_2$  :  $I_z$  étant la limite du courant admissible en régime permanent [23].

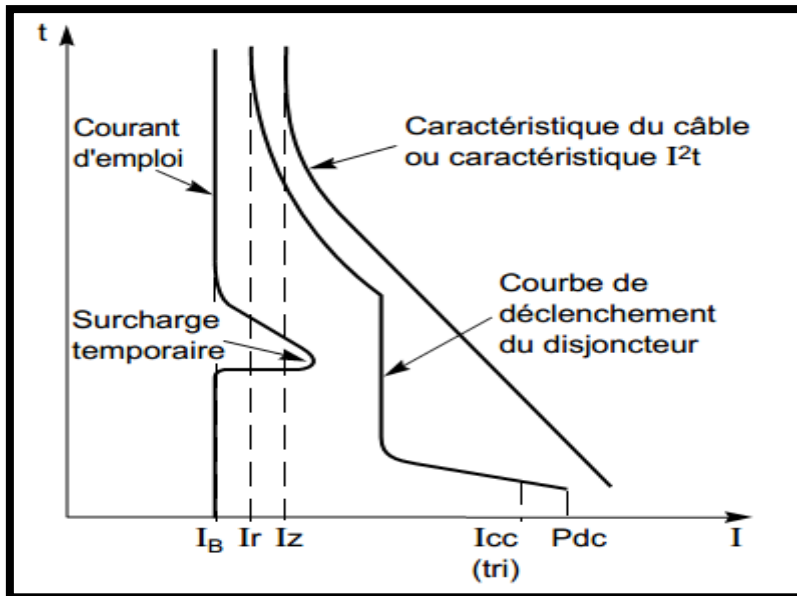


Figure IV.3 protections d'un circuit par disjoncteur.

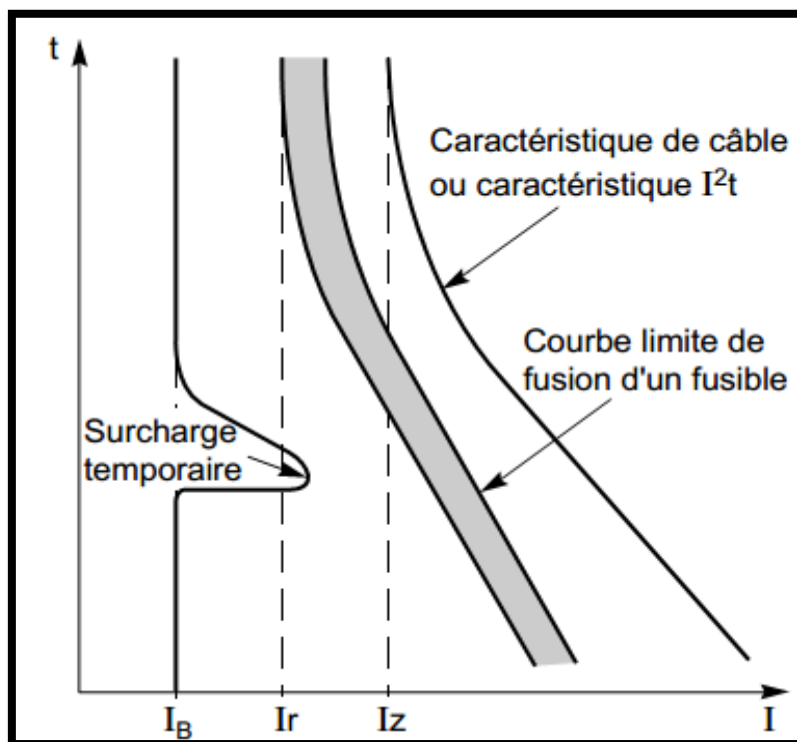


Figure IV.4 protection d'un circuit par fusible aM.

### IV.3. Définitions

- Un court-circuit est une liaison accidentelle entre conducteurs à impédance nulle (Court-circuit franc) ou non (court-circuit impédant).
- Un court-circuit peut être interne s'il est localisé au niveau d'un équipement, ou Externe s'il se produit dans les liaisons.
- La durée d'un court-circuit est variable : auto extincteur si le défaut est trop court Pour déclencher la protection; fugitif lorsque éliminé après déclenchement et réenclenchèrent de la protection ; permanent s'il ne disparaît pas après déclenchement de la protection.
- Les causes de court-circuit sont d'origines mécaniques (coup de pelle, branche Électrique), (dégradation d'isolant, surtension), humaine (erreur de l'exploitant) [24].

### IV.4 Effets des courants de court-circuit

Les conséquences des courts-circuits sont souvent graves sinon dramatiques :

- le court-circuit perturbe l'environnement du réseau autour du point de défaut par le creux de tension brutal qu'il entraîne.
- Il contraint à mettre hors service, par le jeu des protections appropriées, une partie souvent importante du réseau.
- Tous les matériels et liaisons (câbles, lignes) traversés par le court-circuit subissent une forte contrainte mécanique (efforts électrodynamiques) qui peut entraîner des ruptures, une contrainte thermique pouvant entraîner la fusion des conducteurs et la destruction des isolants.
- Au point de défaut se manifeste le plus souvent un arc électrique de forte énergie, dont les effets destructeurs sont très importants, et qui peut se propager très rapidement.

Malgré la probabilité de plus en plus faible d'apparition d'un court-circuit dans les installations modernes, bien conçues et bien exploitées, les conséquences graves qui peuvent en résulter incitent à tout mettre en œuvre pour détecter et éliminer très rapidement tout court-circuit.

La connaissance de la valeur du courant de court-circuit en différents points du réseau est une donnée indispensable pour définir les câbles, jeux de barres et tous matériels d'interruption et de protection ainsi que leurs réglages [23].

## IV.5. Les principaux défauts de court-circuit

Dans les installations électriques différents courts-circuits peuvent se produire.

### IV.5.1. Caractéristiques des courts-circuits

Ils sont principalement caractérisés par :

- ❖ **Leurs durées** : auto-extincteur, fugitif ou permanent.
- ❖ **leurs origines** :
  - Mécaniques (rupture de conducteurs, liaison électrique accidentelle entre deux conducteurs par un corps étranger conducteur tel que outils ou animaux).
  - surtensions électriques d'origine interne ou atmosphérique.
  - ou à la suite d'une dégradation de l'isolement, consécutive à la chaleur, l'humidité ou une ambiance corrosive.
- ❖ **leurs localisations** : interne ou externe à une machine ou à un tableau électrique.

Outre ces caractéristiques, les courts-circuits peuvent être :

- ❖ **monophasés**: 80 % des cas.
- ❖ **biphasés**: 15 % des cas. Ces défauts dégénèrent souvent en défauts triphasés.
- ❖ **triphasés**: 5 % seulement dès l'origine.

Ces différents courants de court-circuit sont présentés sur la Figure IV.5 [23].

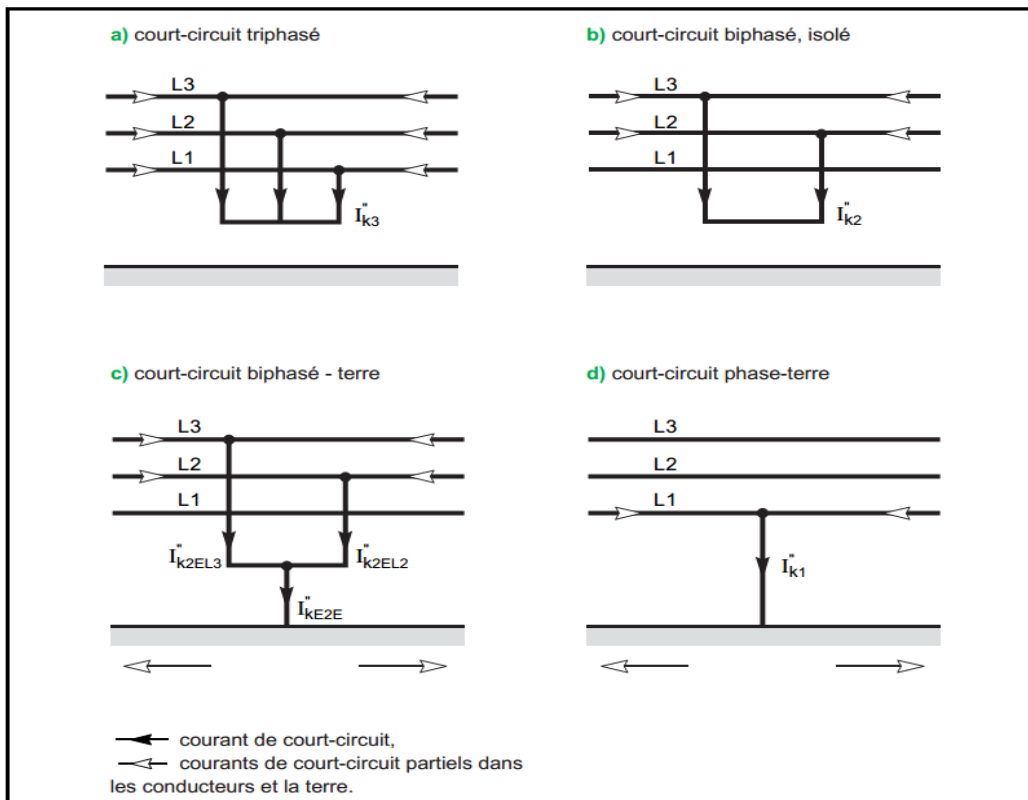


Figure IV.5 les différents courts-circuits et leurs courants.

## IV.6. Etablissement de l'intensité de court-circuit

Un réseau simplifié se réduit à une source de tension alternative constante, un interrupteur et une impédance  $Z_{cc}$  représentant toutes les impédances situées en amont de l'interrupteur, et une impédance de charge  $Z_s$  (**Figure IV.6**).

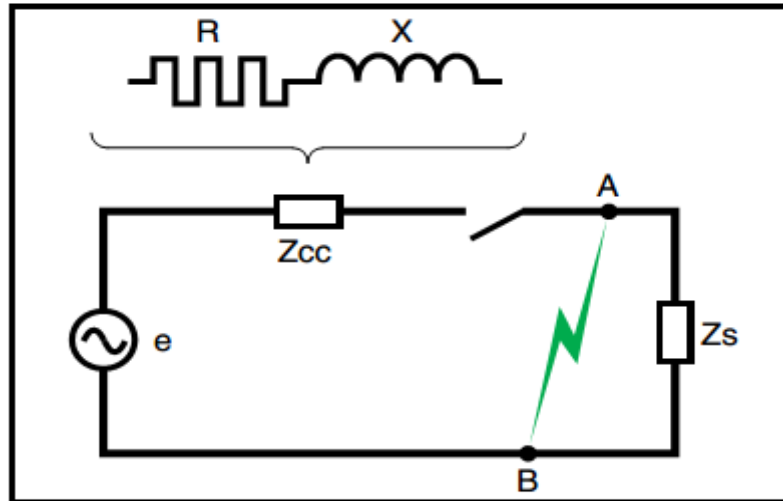


Figure IV.6 schéma simplifié d'un réseau.

Dans la réalité, l'impédance de la source est composée de tout ce qui est en amont du court-circuit avec des réseaux de tensions différentes (HT, BT) et des canalisations en série qui ont des sections et des longueurs différentes.

Sur le schéma de la Figure IV.6, l'interrupteur étant fermé, hors défaut l'intensité  $I_s$  du courant de service circule dans le réseau.

Un défaut d'impédance négligeable apparaissant entre les points A et B donne naissance à une Intensité de court-circuit très élevée  $I_{cc}$ , limitée uniquement par l'impédance  $Z_{cc}$ .

L'intensité  $I_{cc}$  s'établit suivant un régime transitoire en fonction des réactances X et des résistances R composant l'impédance  $Z_{cc}$  :

$$Z_{cc} = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (\text{IV.2})$$

En distribution de puissance, la réactance  $X = L \omega$  est généralement bien plus élevée que la résistance R et le rapport  $R / X$  se situe entre 0,10 et 0,3.

Il est pratiquement égal pour ces faibles valeurs au  $\cos \phi$  (en court-circuit) soit :

$$\cos \phi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad (\text{IV.3})$$

Cependant, le régime transitoire d'établissement du courant de court-circuit diffère suivant l'éloignement du point de défaut par rapport aux alternateurs. Cet éloignement n'implique

pas nécessairement une distance géographique, mais sous-entend que les impédances des alternateurs sont inférieures aux impédances de liaison entre ces derniers et le point de défaut.

#### IV.7. Normes et calculs des $I_{cc}$

Plusieurs méthodes sont proposées par les normes.

❖ Le guide pratique C 15-105, qui complète la NF C 15-100 (installations BT Alimentées en courant alternatif), présente les trois méthodes suivantes :

- celle des «impédances», qui permet de calculer les courants de défaut en tout point D'une installation avec une bonne précision. Elle consiste à totaliser séparément les différentes résistances et réactances de la boucle de défaut, depuis et y compris la source, jusqu'au point considéré; puis à calculer l'impédance correspondante. L' $I_{cc}$  est enfin obtenu par l'application de la loi d'Ohm :

$$I_{cc} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \sum(Z)} \quad (\text{IV.4})$$

Toutes les caractéristiques des différents éléments de la boucle de défaut doivent être connues (sources et canalisations).

- Celle «**de composition**» utilisable quand les caractéristiques de l'alimentation ne sont pas connues. L'impédance amont du circuit considéré est calculée à partir de l'estimation du courant de court-circuit à son origine. Le  $\cos \Phi \approx R / X$  est considéré comme identique à l'origine du circuit comme au point du défaut. En d'autres termes cela consiste à admettre que les impédances élémentaires de deux tronçons successifs de l'installation possèdent des arguments suffisamment voisins pour justifier le remplacement des additions vectorielles par des additions algébriques des impédances. Cette approximation permet d'obtenir la valeur du module des courants de court-circuit, avec une précision suffisante pour ajouter un circuit.

- celle dite «conventionnelle» qui permet sans connaître les impédances ou les  $I_{cc}$  de la partie d'installation en amont du circuit considéré, de calculer les courants de court-circuit minimal et les courants de défaut à l'extrémité d'une canalisation.

Elle est basée sur l'hypothèse que la tension à l'origine du circuit est égale à 80 % de la tension nominale de l'installation pendant la durée du court-circuit ou du défaut. L'influence de la réactance des conducteurs est négligée pour les sections inférieures à  $150\text{mm}^2$ . Il est tenu compte de l'influence des réactances des conducteurs pour les fortes

Sections en augmentant la résistance de 15 % pour la section de  $150\text{mm}^2$  et 20 % pour la section de  $185\text{mm}^2$ , 25 % pour  $240\text{mm}^2$ , et 30 % pour  $300\text{mm}^2$ .

Cette méthode est essentiellement utilisée pour les circuits terminaux dont l'origine est suffisamment éloignée de la source d'alimentation.

Elle n'est pas applicable dans les installations alimentées par un alternateur.

❖ La norme CEI 60909 (VDE 0102) s'applique à tous les réseaux, radiaux et maillés, Jusqu'à 550 kV.

Basée sur le théorème de Thevenin, elle consiste à calculer une source de tension équivalente au point de court-circuit pour ensuite déterminer le courant en ce même point. Toutes les alimentations du réseau et les machines synchrones et asynchrones sont remplacées par leurs impédances (directe, inverse et homopolaire). Avec cette méthode, toutes les capacités de ligne et les admittances en parallèle des charges non tournantes, sauf celles du système homopolaire, sont négligées [23].

#### IV.7.1. Calcul le courant de court-circuit selon La norme CEI 60909

Les règles de calcul des courants de court-circuit dans les installations électriques ont été définies dans la norme CEI 60909 éditée en 2001. Le calcul effectif des courants de court-circuit en divers points d'un réseau peut rapidement devenir un travail laborieux lorsque l'installation est complexe. L'utilisation de logiciels spécialisés permet d'effectuer ces calculs plus rapidement. Cette norme, applicable à tous les réseaux triphasés radiaux ou maillés, 50 ou 60 Hz et jusqu'à 550 kV, est générale et précise par excès. Elle permet de traiter les différents types de courts-circuits, symétriques ou dissymétriques, pouvant se produire dans une installation :

- Court-circuit triphasé – réunion des trois phases – en général le plus pénalisant.
- Court-circuit biphasé – défaut entre deux phases – plus faible que le triphasé.
- Court-circuit biphasé terre – défaut entre deux phases et la terre.
- Court-circuit monophasé – défaut entre une phase et la terre – le plus fréquent (80 % des cas).

A l'apparition d'un défaut, le courant d'établissement du court-circuit dans le circuit est fonction du temps et comprend deux composantes (Figure IV.7) :

- **l'une alternative**, décroissante jusqu'à sa valeur établie, due aux différentes Machines tournantes et fonction de la combinaison de leurs constantes de temps,
- **l'autre continue**, décroissante jusqu'à zéro, due à l'établissement du courant et fonction des impédances du circuit.

Pratiquement, on définit les grandeurs de court-circuit utiles à la détermination des matériels et du système de protection :

$I''_k$  : valeur efficace du courant symétrique initial.

$I_b$  : valeur efficace du courant symétrique coupé par l'appareil de manœuvre à la séparation du premier pôle à l'instant  $t_{min}$  (retard minimal).

$I_k$  : valeur efficace du courant symétrique permanent.

$I_p$  : valeur instantanée maximale du courant à la première crête.

IDC : valeur continue du courant.

Ces courants sont indicés par 3, 2, 2E, 1, selon la nature du court-circuit respectivement triphasé, biphasé, biphasé terre, monophasé.

Le principe de la méthode, basée sur le théorème de superposition de Thevenin et la décomposition en composantes symétriques, est d'appliquer au point de court-circuit une source de tension équivalente pour ensuite déterminer le courant ; le calcul se déroule en trois étapes :

- Définir la source de tension équivalente appliquée au point en défaut ;

Elle représente la tension existant juste avant le court-circuit : c'est la tension nominale corrigée d'un facteur qui tient compte des variations de la source, des changeurs de prises transformateurs, du comportement subtransitoire des machines.

- Calculer les impédances, vues du point en défaut, de chaque branche arrivant en ce Point ; le calcul se fait en négligeant, pour les systèmes directs et inverses, les capacités de ligne et les admittances des charges non tournantes en parallèle.

- Connaissant la tension et les impédances, calculer les valeurs caractéristiques Maximales et minimales des courants de court-circuit.

Les différentes grandeurs de courant au point de défaut sont calculées selon :

- des formules données.
- et une loi de sommation des courants transitant dans les branches connectées à ce

Nœud :

$I''_k$  : voir les formules de calcul de  $I''_k$  dans les tableaux ci-contre avec :

$c$  : facteur de tension défini par la norme ; sommation géométrique ou algébrique.

$i_p = \kappa \cdot 2 \cdot I''_k$  : avec  $\kappa$  facteur majorant inférieur à 2, dépendant du rapport  $R/X$  de l'impédance directe de la branche considérée ; sommation des crêtes.

$I_b = \mu \cdot q \cdot I''_k$  : avec  $\mu$  et  $q$  facteurs inférieurs à 1, dépendant des générateurs et moteurs, ainsi que du temps mort minimal de coupure du disjoncteur ; sommation algébrique.

$I_k = I''_k$  lorsque l'on est éloigné du générateur.

$I_k = \lambda \cdot I_r$  dans le cas d'une génératrice, avec  $I_r$  courant nominal du générateur et  $\lambda$  facteur dépendant de son inductance de saturation ; sommation algébrique [24].

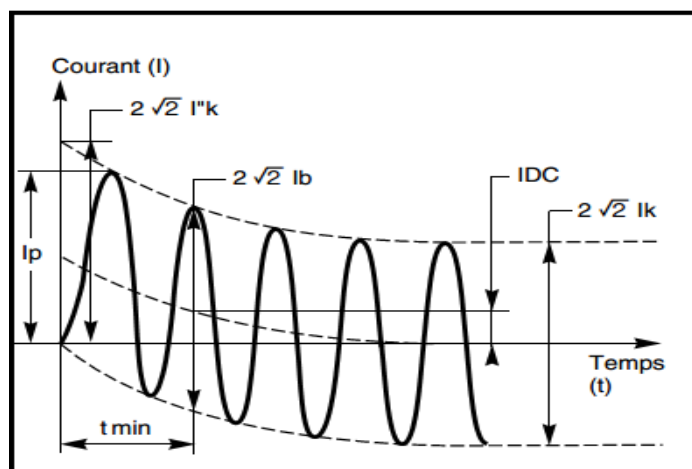


Figure IV.7 représentation graphique des grandeurs d'un court-circuit.

Type de court-circuit	$I''_k$
Triphasé	$\frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_d}$
Biphasé isolé	$\frac{c \cdot U_n}{Z_d + Z_i}$
Biphasé terre	$\frac{c \cdot U_n \cdot \sqrt{3} \cdot Z_i}{Z_d \cdot Z_i + Z_i \cdot Z_0 + Z_d \cdot Z_0}$
Monophasé	$\frac{c \cdot U_n \cdot \sqrt{3}}{Z_d + Z_i + Z_0}$

Figure IV.8 Courants de court-circuit : cas général.

Type de court-circuit	$I''_k$
Triphasé	$\frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_d}$
Biphasé isolé	$\frac{c \cdot U}{2 \cdot Z_d}$
Biphasé terre	$\frac{c \cdot U_n \cdot \sqrt{3}}{Z_d + 2Z_0}$
Monophasé	$\frac{c \cdot U_n \cdot \sqrt{3}}{2Z_d + Z_0}$

Figure IV.9 Courants de court-circuit : cas de défaut éloigné [24].



## IV.8. Calcul des $I_{cc}$ par la méthode des impédances

### IV.8.1. $I_{cc}$ Selon les différents types de court-circuit

#### IV.8.1.1. Court-circuit triphasé

C'est le défaut qui correspond à la réunion des trois phases. L'intensité de court-circuit  $I_{cc}$  est :

$$I_{cc} = \frac{U/\sqrt{3}}{Z_{cc}} \quad (\text{IV.5})$$

Avec  $U$  (tension composée entre phases) correspondant à la tension à vide du transformateur, laquelle est supérieure de 3 à 5% à la tension aux bornes en charge.

- **Exemple :** dans les réseaux 390 V, la tension composée adoptée est  $U = 410$  V, avec comme tension simple  $U/3 = 237$  V.

Le calcul de l'intensité de court-circuit se résume alors au calcul de l'impédance  $Z_{cc}$ , impédance équivalente à toutes les impédances parcourues par l' $I_{cc}$  du générateur jusqu'au point de défaut de la source et des lignes. C'est en fait l'impédance «directe» par phase :

$$Z_{cc} = \sqrt{(\sum R)^2 + (\sum X)^2} \quad (\text{IV.6})$$

Avec :  $\sum R$  = somme des résistances en série.

$\sum X$  = somme des réactances en série.

Selon la figure IV.10 :

Le défaut triphasé est généralement considéré comme celui provoquant les courants de défaut les plus élevés. En effet, le courant de défaut dans le schéma équivalent d'un système polyphasé, n'est limité que par l'impédance d'une phase sous la tension simple du réseau. Le calcul d' $I_{cc}$  est donc indispensable pour choisir les matériels (intensités et contraintes électrodynamiques maximales à supporter).

#### IV.8.1.2. Court-circuit biphasé isolé

Il correspond à un défaut entre deux phases, alimenté sous une tension composée  $U$ . L'intensité  $I_{cc}$  débitée est alors inférieure à celle du défaut triphasé:

$$I_{cc} = \frac{U}{2 \cdot Z_{cc}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{cc\ 3\sim} = 0.86 \cdot I_{cc\ 3\sim} \quad (\text{IV.7})$$

#### IV.8.1.3. Court-circuit monophasé isolé

Il correspond à un défaut entre une phase et le neutre, alimenté sous une tension simple  $V = \frac{U}{\sqrt{3}}$

L'intensité  $I_{cc}$  débitée est alors :

$$I_{cc} = \frac{U / \sqrt{3}}{Z_{cc} + Z_{Ln}} \quad (IV.8)$$

Dans certains cas particuliers de défaut monophasé l'impédance homopolaire de la source est plus faible que  $Z_{cc}$  (par exemple aux bornes d'un transformateur à couplage étoile-triangle ou d'un alternateur en régime subtransitoire). L'intensité monophasée peut être alors plus élevée que celle du défaut triphasé [23].

#### IV.8.1.4. Court-circuit à la terre (monophasé ou biphasé)

Ce type de défaut fait intervenir l'impédance homopolaire  $Z_0$ . Sauf en présence de machines tournantes où l'impédance homopolaire se trouve réduite, l'intensité  $I_{cc}$  débitée est alors inférieure à celle du défaut triphasé. Son calcul peut être nécessaire, selon le régime du neutre (schéma de liaison à la terre), pour le choix des seuils de réglage des dispositifs de protection homopolaire (HT) ou différentielle (BT). (La Figure IV.10).

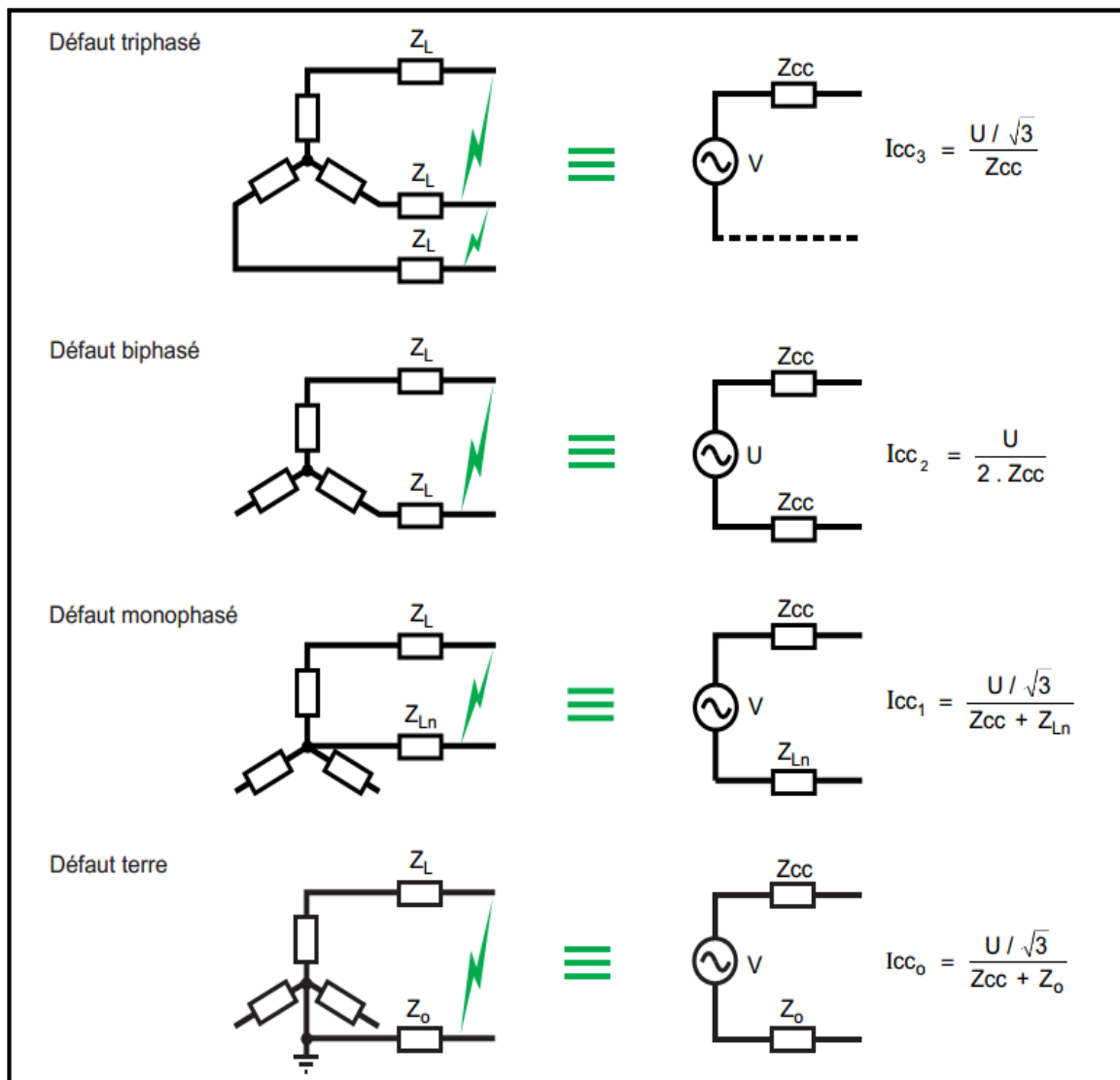


Figure IV.10 les différents courants de court-circuit.

## IV.9. Relations entre les impédances des différents étages de tension d'une installation

### IV.9.1. Impédances fonction de la tension

La puissance de court-circuit  $S_{cc}$  en un point déterminé du réseau est définie par :

$$S_{cc} = I \cdot U \cdot \sqrt{3} = \frac{U^2}{Z_{cc}} \quad (\text{IV.9})$$

Cette expression de la puissance de court-circuit implique par définition que  $S_{cc}$  est invariable en un point donné du réseau, quelle que soit la tension.

Et l'expression :

$$I_{cc} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_{cc}} \quad (\text{IV.10})$$

Implique que toutes les impédances doivent être calculées en les rapportant à la tension du point de défaut, d'où une certaine complication, source d'erreurs dans les calculs concernant des réseaux à deux ou plusieurs niveaux de tension. Ainsi, l'impédance d'une ligne HT doit être multipliée par le carré de l'inverse du rapport de transformation, pour le calcul d'un défaut côté BT du transformateur :

$$Z_{BT} = Z_{HT} \cdot \left(\frac{U_{BT}}{U_{HT}}\right)^2 \quad (\text{IV.11})$$

#### IV.9.1.1. Calcul des impédances relatives

Il s'agit d'une méthode de calcul permettant d'établir une relation entre les impédances des différents étages de tension d'une installation électrique.

Cette méthode repose sur la convention suivante : les impédances (en ohms) sont divisées par le carré de la tension composée (en volts) à laquelle est porté le réseau au point où elles sont en service ; elles deviennent des impédances relatives (ZR).

❖ **Pour les lignes et les câbles** : les résistances et les réactances relatives sont :

$$R_{CR} = \frac{R}{U^2} \quad \text{et} \quad X_{CR} = \frac{X}{U^2} \quad (\text{IV.12})$$

Avec : R et X en ohms et U en volts.

❖ **Pour les transformateurs** : l'impédance s'exprime à partir de leurs tensions de court-circuit  $U_{cc}$  et de leurs puissances nominales  $S_n$  :

$$Z_{TR} = \frac{1}{S_n} \cdot \frac{U_{cc}}{100} \quad (\text{IV.13})$$

- ❖ **Pour les machines tournantes :** la formule est identique, X représente l'impédance exprimée en % :

$$Z_{MR} = \frac{1}{S_n} \cdot \frac{X}{100} \quad (\text{IV.14})$$

- ❖ Pour l'ensemble, après avoir composé toutes les impédances relatives, la puissance de court-circuit s'établit d'après :

$$S_{cc} = \frac{1}{\sum Z_R} \quad (\text{IV.15})$$

D'où l'on déduit l'intensité de défaut  $I_{cc}$  au point de tension U :

$$I_{cc} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \sum Z_R} \quad (\text{IV.16})$$

$\sum Z_R$  : représente la composition (et non pas la somme) de toutes les impédances relatives des éléments en amont du défaut.

Donc  $\sum Z_R$  est l'impédance relative du réseau amont vue du point de tension U.

Ainsi,  $S_{cc}$  est la puissance de court-circuit en VA au point de tension U [23].

## IV.10. Comportement des matériels au court-circuit

### IV.10.1. Caractérisation

On distingue 2 types de matériels de réseau, suivant qu'ils ont ou non à intervenir au moment du défaut.

#### IV.10.1.1. Matériels passifs

Dans cette catégorie, rentrent tous les matériels destinés par leur fonction à véhiculer aussi bien le courant normal que le courant de court-circuit.

Ce sont les câbles, lignes, jeux de barres, sectionneurs, interrupteurs, transformateurs, réactances et condensateurs, transformateurs de mesure.

Pour ces matériels, on définit la faculté de supporter le passage d'un court-circuit sans dommage par :

- **la tenue électrodynamique** (exprimée en kA crête) qui caractérise leur résistance mécanique aux contraintes électrodynamiques.
- **la tenue thermique** (exprimée en kA eff. pendant 1 à 5 secondes) qui caractérise l'échauffement maximal admissible.

#### IV.10.1.2. Matériels actifs

Dans cette catégorie, sont classés les matériels destinés à éliminer le courant de court-circuit : disjoncteurs et fusibles. Cette propriété est quantifiée par le pouvoir de coupure et, si besoin, par le pouvoir de fermeture sur défaut.

❖ **Pouvoir de coupure** (Figure IV.11)

Cette caractéristique essentielle d'un appareil d'interruption est le courant maximal (en kA eff.) qu'il est capable de couper dans des conditions spécifiques; il s'agit généralement de la valeur efficace de la composante alternative du courant de court-circuit ; parfois, on spécifie pour certains appareils la valeur efficace de la somme des 2 composantes, alternative et continue ; c'est alors le "courant asymétrique".

Le pouvoir de coupure dépend de conditions complémentaires :

- tension.
- rapport R/X du circuit coupé.
- fréquence propre du réseau.
- nombre de coupures au courant maximal.
- état de l'appareil après essais.

Le pouvoir de coupure apparaît donc comme une caractéristique assez complexe à définir ; il n'est donc pas surprenant que le même appareil se voit attribuer un pouvoir de coupure différent suivant la norme qui le définit.

❖ **Pouvoir de fermeture sur court-circuit**

Généralement, cette caractéristique est implicitement définie par le pouvoir de coupure : un appareil doit être capable de fermer sur un court-circuit qu'il est capable de couper. Parfois, le pouvoir de fermeture doit être plus élevé, par exemple pour les disjoncteurs d'alternateur. On définit le pouvoir de fermeture en kA crête, car c'est la première crête asymétrique qui est la plus contraignante au point de vue électrodynamique.

❖ **Courant de court-circuit présumé "couper"**

Certains appareils ont la propriété de "limiter" le courant qu'ils ont à couper. Leur pouvoir de coupure est défini comme le courant maximal présumé couper, qui se développerait dans un court-circuit franc établi aux bornes amont de l'appareil.

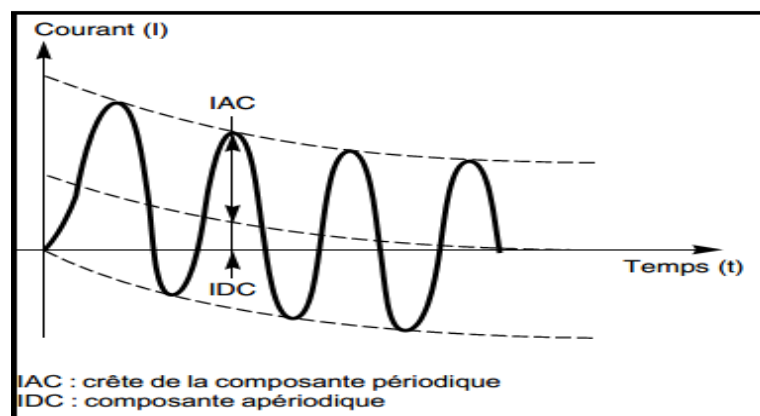


Figure IV.11 pouvoir de coupure assigné d'un disjoncteur en court-circuit [23].

## IV.11. Spécificité de l'appareillage

Les fonctions remplies par les différents appareils de coupure, ainsi que les principales contraintes associées sont résumées dans le tableau suivant [24].

Appareil	Fonction isolement	Fonction de manœuvre de courants		Contraintes principales
		En service	Sur défaut	
sectionneur	oui	non	non	Tenue de franchissement entrée-sortie Sectionneur de terre : pouvoir de fermeture sur défaut
interrupteur	non	oui	non	Coupe et établissement de courant normal de charge Pouvoir de fermeture sur court-circuit En association avec fusible : pouvoir de coupure dans la zone de non-fusion du fusible
contacteur	non oui, si débrochable	oui	non	Pouvoirs nominaux de coupure et de fermeture Pouvoirs maximaux de charge en coupure et en fermeture Caractéristiques de service et endurance
disjoncteur	non oui, si débrochable	oui	oui	Pouvoir de coupure sur court-circuit Pouvoir de fermeture sur court-circuit
fusible	non	non	oui	Pouvoir de coupure minimal sur court-circuit Pouvoir de coupure maximal sur court-circuit

Figure IV.12 les principales contraintes associées.

## IV.12. Exemple de calcul (analytique)

### IV.12.1. Problème

Soit un réseau **20 kV** qui alimentent par une ligne aérienne de **2 km** un poste **HT / BT**, et un alternateur de **1 MVA** qui alimente en parallèle le jeu de barres de ce poste. Deux transformateurs de **1000 kVA** en parallèle débitent sur un jeu de barres **BT** sur lequel sont connectés 20 départs, tel celui du moteur M.

Ces **20** moteurs de **50 kW** sont tous raccordés par des câbles identiques, et sont tous en service au moment du défaut.

$I_{cc3}$  Et  $I_p$  doivent être calculés aux différents points de défaut précisés sur le schéma du réseau : figure IV.13.

- En A sur le JdB HT, d'impédance négligeable.
- En B sur le JdB BT à 10 m des transformateurs.

- En C sur le JdB d'un tableau secondaire BT.
- En D sur les bornes d'un moteur M.

Calculé les courants de défaut en C et B, puis en D et A [23].

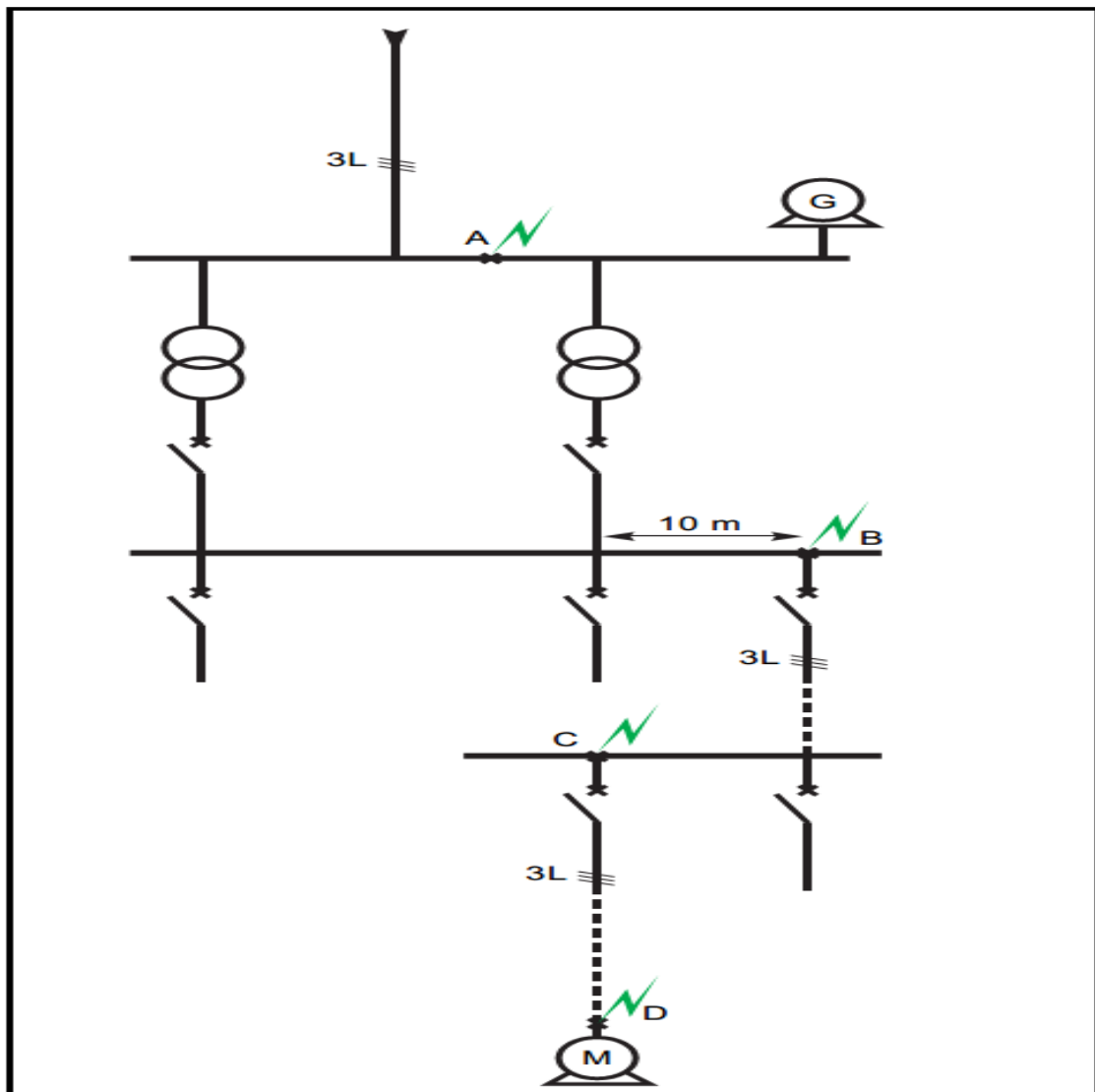


Figure IV.13 le problème : calculer  $I_{cc3}$  et  $I_p$  aux points A, B, C et D.

#### IV.12.1.1. Paramètres de problème

- Réseau amont

$U_1 = 20 \text{ kV}$

$S_{cc} = 500 \text{ MV}$

- Liaison aérienne

3 câbles,  $50 \text{ mm}^2$ , cuivre.

Longueur = 2 km.

- Alternateur

1 MVA.  $X_{subt} = 15 \%$ .

- **2 transformateurs**

1000 kVA

Secondaire 237/410 V.

$U_{cc} = 5 \%$ .

- **TGca**

Jeu de barres

3 barres, 400 mm<sup>2</sup>/ph, cuivre.

Longueur = 10 m.

- **Liaison 1**

3 câbles unipolaires, 400mm<sup>2</sup>, aluminium.

Espacés en nappe.

Longueur = 80 m.

- **Tableau BT divisionnaire**

Longueur du jeu de barres négligée.

- **Liaison 2**

3 câbles unipolaires 35mm<sup>2</sup>, cuivre, triphasé

Longueur = 30 m

- **Moteur**

50 kW (rendement = 0,9 ; cos Φ=0,8).

x = 25 %.

#### IV.12.2. calcul des impédances

Dans cet exemple, les réactances X et les résistances R sont calculées sous leur tension d'installation la méthode des impédances relatives n'est pas utilisée.

- **Réseau amont**

U1 = 20 kV

$S_{cc} = 500 \text{ MV}$

- L'impédance équivalente du réseau amont :  $Z_a = \frac{U^2}{S_{cc}} = \frac{(20 \times 10^3)^2}{500 \times 10^6} = 0,8 \Omega$ .

- La réactance équivalente du réseau amont :  $X_a = \sqrt{(Z_a)^2 + (R_a)^2}$  et

$$\frac{X_a}{Z_a} = \sqrt{1 - \left(\frac{R_a}{Z_a}\right)^2}$$

La résistance et la réactance amont se déduisent à partir de  $R_a / Z_a$  en HT par :



Pour 20 KV :  $\frac{R_a}{Z_a} = 0,2$  ; donc  $\frac{X_a}{Z_a} = \sqrt{1 - (0,2)^2} = 0,98$  ;  $X_a = \sqrt{1 - (0,2)^2} \times 0,8 = 0,78 \Omega$ .

- La résistance équivalent du réseau amont :  $R_a = 0,2 \times Z_a = 0,2 \times 0,8 = 0,16 \Omega$ .

$Z_a = 0,8 \Omega$
$X_a = 0,78 \Omega$
$R_a = 0,16 \Omega$

- **Liaison aérienne**

3 câbles,  $50 \text{ mm}^2$ , cuivre.

Longueur = 2 km.

**1- La réactance de liaison :  $X_{ca}$**

$X_{ca} = 0,4 \times 2 = 0,8 \Omega$  / avec  $X = 0,4 \Omega / \text{km}$  : la valeur moyenne de la réactance (lignes HTA ou HTB) et **2 Km** : la longueur de cette liaison, donc :

$X_{ca} = 0,8 \Omega$
-----------------------

**2- la résistance de liaison :  $R_{ca}$  :**

$$R_{ca} = \rho \times \frac{L}{S} \quad \text{avec :} \quad L : \text{la longueur [m].}$$

$$S : \text{la surface [mm}^2\text{].}$$

$\rho$  : résistivité des conducteurs à 20 °C :  $0,01851 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$  pour le cuivre.

$$\text{Donc : } R_{ca} = 0,01851 \times \frac{2000}{50} = 0,72 \Omega.$$

$R_{ca} = 0,72 \Omega$
------------------------

- **Alternateur**

1 MVA.

$X_{subt} = 15 \%$ .

**1- La réactance d'un alternateur :**

$$X_A = \frac{X_{subt}}{100} \times \frac{U_1^2}{S_n} = \frac{15}{100} \times \frac{(20 \cdot 10^3)^2}{10^6} = 60 \Omega.$$

$X_A = 60 \Omega$
-------------------

**2-La résistance  $R_A$  :**

$$R_A = 0,1 \times X_A = 0,1 \times 60 = 6 \Omega.$$

De plus, le  $R / X$  étant faible, de l'ordre de 0,05 à 0,1 en HT et 0,1 à 0,2 en BT.

$R_A = 6 \Omega$
------------------

• **Défaut A :**

1- **2 transformateurs :** 1000 KVA Secondaire 237/410 V.  $U_{cc} = 5 \%$ . [23].

$Z_T$  Ramenée en BT :

Impédance interne du transformateur L'impédance se calcule à partir de la tension de court-circuit  $U_{cc}$  exprimée en % :

$$Z_T = \frac{U_{cc}}{100} \times \frac{U^2}{S_n}$$

U = tension composée à vide du transformateur.

$S_n$  = puissance apparente du transformateur.

$U \times \frac{U_{cc}}{100}$  : tension qu'il faut appliquer au primaire du transformateur pour que le secondaire

soit parcouru par l'intensité nominale  $I_n$ , les bornes secondaires BT étant court-circuitées.

$$Z_T = \frac{5}{100} \times \frac{410^2}{10^6} \times \frac{1}{2} = 4,2 \Omega.$$

$$Z_T = X_T = 4,2 \Omega.$$

En général  $R_T \ll X_T$ , de l'ordre de 0,2.  $X_T$ , et l'impédance interne des transformateurs peut être assimilée à la réactance  $X_T$  .donc :

$$R_T = 0,2. X_T = 0,84 \Omega.$$

$Z_T = 4,2 \Omega$
$X_T = 4,2 \Omega$
$R_T = 0,84 \Omega$

**2-Disjoncteur :**

$X_d = 0,15$  pour les disjoncteurs BT, une valeur de 0,15 m  $\Omega$  pour la réactance est correcte, la résistance étant négligée.

**3- TGca :**

Jeu de barres

3 barres, 400  $mm^2$ /ph, cuivre.

Longueur = 10 m.

$$X_B = 0,15 \times 10^{-3} \times 10 = 1,5 \text{ m}\Omega.$$

$$R_B = 0,023 \times \frac{10}{400} = 0,57 \text{ m}\Omega.$$

Avec la résistivité des conducteurs à 20 °C : 0,023  $\Omega mm^2/m$  pour le cuivre [23].

$X_B = 1,5 \text{ m}\Omega$
$R_B = 0,57 \text{ m}\Omega$

• **Défaut B :**

**1-Disjoncteur :**

$X_d = 0,15 \text{ m}\Omega$  pour les disjoncteurs BT, une valeur de  $0,15 \text{ m}\Omega$  pour la réactance est correcte, la résistance étant négligée.

**2-Liaison 1 :**

3 câbles unipolaires,  $400\text{mm}^2$ , aluminium.

Espacés en nappe.

Longueur = 80 m.

$$X_{c1} = 0,15 \times 10^{-3} \times 80 = 12 \text{ m}\Omega.$$

$$R_{c1} = 0,036 \times \frac{80}{400} = 7,2 \text{ m}\Omega.$$

$\rho$  : résistivité des conducteurs à  $20^\circ\text{C}$  :  $0,036 \text{ }\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$  pour le cuivre [23].

$X_{c1} = 12 \text{ m}\Omega$
$R_{c1} = 7,2 \text{ m}\Omega$

• **Défaut C :**

**1-Disjoncteur :**

$X_d = 0,15 \text{ m}\Omega$  pour les disjoncteurs BT.

**2-Liaison 2 :**

3 câbles unipolaires  $35\text{mm}^2$ , cuivre, triphasé

Longueur = 30 m.

$$X_{c2} = 0,09 \times 10^{-3} \times 30 = 2,7 \text{ m}\Omega.$$

Réactance linéique valeurs recommandées :  $0,09 \text{ }\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ .

$$R_{c2} = 0,023 \times \frac{30}{35} = 19,3 \text{ m}\Omega.$$

$\rho$  : résistivité des conducteurs à  $20^\circ\text{C}$  :  $0,023 \text{ }\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$  pour le cuivre.

$X_{c2} = 2,7 \text{ m}\Omega$
$R_{c2} = 19,3 \text{ m}\Omega$

• **Défaut D :**

**Moteur :**

50 kW (rendement = 0,9 ;  $\cos \Phi = 0,8$ ).  $x = 25 \%$ .

$$X_m = \frac{X}{100} \times \frac{U^2}{S_n} = \frac{25}{100} \times \frac{410^2}{\left(\frac{50}{0,9} \times 0,8\right) \times 10^3} = 605 \text{ m}\Omega.$$

$$R_m = 0,2 X_m = 121 \text{ m}\Omega.$$

$$X_m = 605 \text{ m}\Omega$$

$$R_m = 121 \text{ m}\Omega$$

### IV.12.3. calcul les défauts

#### I - Défaut en A (JdB HT)

L'impédance « réseau + ligne » est en parallèle avec celle de l'alternateur ; mais cette dernière, beaucoup plus grande, peut être négligée :

$$X_A = 0,78 + 0,8 \approx 1,58 \Omega.$$

$$R_A = 0,15 + 0,72 \approx 0,87 \Omega.$$

$$Z_A = \sqrt{(X_A)^2 + (R_A)^2} = 1,80 \Omega.$$

$$I_A = \frac{20 \times 10^3}{1,80 \times \sqrt{3}} = 6415 \text{ A.}$$

$I_A$  Est l'« $I_{cc}$  permanent », et pour calculer  $i_{PA}$  (maximum asymétrique) :

$$\frac{R_A}{X_A} = 0,55 \text{ qui donne } \kappa = 1,2 \text{ sur la courbe de la Figure IV.14, et donc } i_{PA} :$$

$$i_{PA} = 1,2 \times \sqrt{3} \times 6415 = 10887 \text{ A.}$$

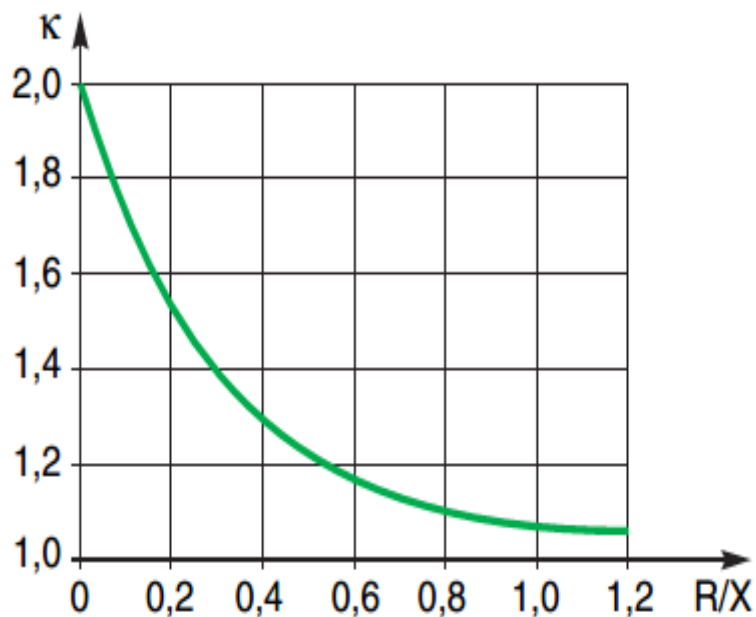


Figure IV.14 variation du facteur  $\kappa$  en fonction de  $R/X$  [23].

$$I_A = 6415 \text{ A}$$

$$i_{PA} = 10887 \text{ A}$$

## II - Défaut en B (JdB TGca)

Les réactances X et les résistances R calculées en HT doivent être «ramenées» sur le réseau BT par multiplication avec le carré du rapport des tensions Selon l'équation

(IV.11) :

$$Z_{BT} = Z_{HT} \cdot \left(\frac{U_{BT}}{U_{HT}}\right)^2 \quad \text{Donc :}$$

$$(410/20000)^2 = 0,42 \cdot 10^{-3} \quad \text{D'où :}$$

$$X_B = [(R_A \cdot 0,42) + 4,2 + 0,15 + 1,5] \times 10^{-3} = 6,51 \text{ m}\Omega.$$

$$X_B = 6,51 \text{ m}\Omega.$$

$$R_B = [(R_A \cdot 0,42) + 4,2 + 0,84 + 0,57] \times 10^{-3} = 1,77 \text{ m}\Omega.$$

$$R_B = 1,77 \text{ m}\Omega.$$

Ce calcul permet d'observer, d'une part l'importance réduite de la réactance amont HT, par rapport à celle des deux transformateurs en parallèle, et d'autre part que l'impédance des dix mètres de JdB en BT n'est pas négligeable.

$$Z_A = \sqrt{(R_B)^2 + (X_B)^2} = 6,75 \text{ m}\Omega.$$

$$I_B = \frac{20 \times 10^3}{6,75 \times \sqrt{3} \times 10^{-3}} = 35070 \text{ A.}$$

$$\frac{R_B}{X_B} = 0,27 \quad \text{qui donne } \kappa = 1,46 \text{ sur la courbe de la figure 9, et donc } i_{PB}:$$

$$i_{PB} = \sqrt{2} \times 35070 = 72400 \text{ A.}$$

$I_B = 35070 \text{ A}$
$i_{PB} = 72400 \text{ A}$

## III - Défaut en C (JdB tableau secondaire BT)

Les réactances et les résistances du disjoncteur et des câbles sont à ajouter à  $X_B$  et  $R_B$ .

$$X_C = [X_B + 0,15 + 12] \times 10^{-3} = 18,67 \text{ m}\Omega.$$

$$X_C = 18,67 \text{ m}\Omega.$$

$$R_C = [R_B \cdot 0,42] + 7,2] \times 10^{-3} = 9,0 \text{ m}\Omega.$$

$$R_C = 9,0 \text{ m}\Omega.$$

Ces valeurs permettent de comprendre l'importance de la limitation des  $I_{cc}$  due aux câbles.

$$Z_C = \sqrt{(R_C)^2 + (X_C)^2} = 20,7 \text{ m}\Omega.$$

$$I_C = \frac{410}{20,7 \times \sqrt{3} \times 10^{-3}} = 11400 \text{ A.}$$

$$\frac{R_C}{X_C} = 0,48 \quad \text{qui donne } \kappa = 1,25 \text{ sur la courbe de la figure 9, et donc } i_{PC}:$$

$$i_{PC} = \sqrt{2} \times 11400 = 20200 \text{ A.}$$

$I_C = 11400 \text{ A}$
-------------------------

$i_{PC} = 20200 \text{ A}$
----------------------------

#### IV - Défaut en D (moteur BT)

Les réactances et les résistances du disjoncteur et des câbles sont à ajouter à  $X_C$  et  $R_C$  [23].

$$X_D = [X_C + 0,15 + 2,7] \times 10^{-3} = 21,52 \text{ m}\Omega.$$

$$X_D = 21,52 \text{ m}\Omega$$

$$R_D = [R_C + 19,2] \times 10^{-3} = 28,2 \text{ m}\Omega.$$

$$R_D = 28,2 \text{ m}\Omega.$$

$$Z_D = \sqrt{(R_D)^2 + (X_D)^2} = 35,5 \text{ m}\Omega.$$

$$I_D = \frac{410}{35,5 \times \sqrt{3} \times 10^{-3}} = 6700 \text{ A.}$$

$\frac{R_D}{X_D} = 1,31$  qui donne  $\kappa = 1,04$  sur la courbe de la figure IV.14, et donc  $i_{PD}$ :

$$i_{PD} = 1,04 \times \sqrt{2} \times 6700 = 9900 \text{ A [23].}$$

$I_D = 6700 \text{ A}$
------------------------

$i_{PD} = 9900 \text{ A}$
---------------------------

#### IV.13. Exemple de calcul (simulation)

L'exemple représenté ici est un circuit électrique comporte une source de tension  $V_s = 110 \text{ V}$  alimente une charge:  $R_{charge} = 430 \Omega$  et appareillage de protection disjoncteur en série avec la charge. Crée un défaut de courant de court-circuit aux bornes de la charge :  $R_{charge} = 430 \Omega$ , et déterminé les résultats de calcul de courant de court-circuit, et les courbes des résultats de simulation, sous MATLAB /SIMULINK, deux régimes peuvent se présentés :

1-régime normale.

2-régime de défaut.

- Sans limiteur de courant.
- Avec limiteur de courant.

Déterminez les résultats de simulation (les courbes de courant de ligne, tension de la charge, tension de la source) [25].

### IV.13.1. Régime normal (sans défaut)

Le limiteur supraconducteur est considéré comme un conducteur d'impédance nulle.

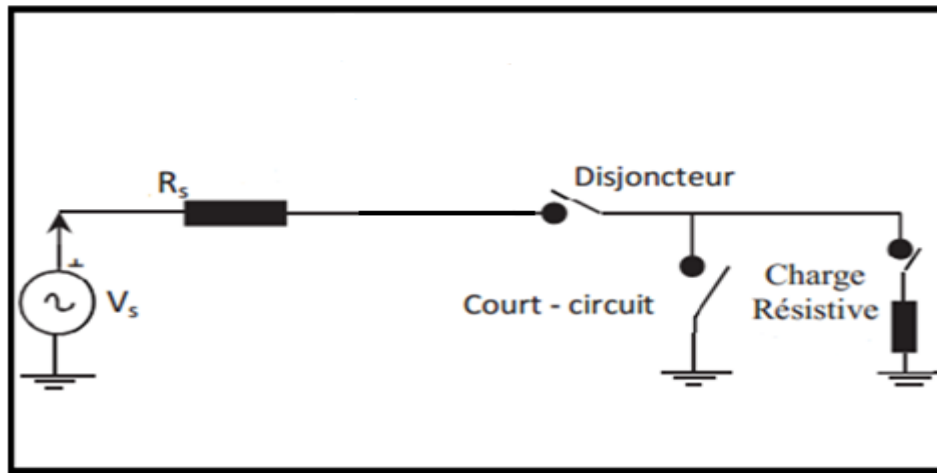


Figure IV.15 Schéma électrique de montage [25].

#### Paramètres

1- La source :

$$V_s = 110 \text{ V.}$$

$$f = 60 \text{ Hz.}$$

$$R_s = 3,6 \ \Omega.$$

2- La charge :

$$\text{Charge résistive : } R_{charge} = 430 \ \Omega.$$

#### Résultats

I : la tension de la source (régime normal)

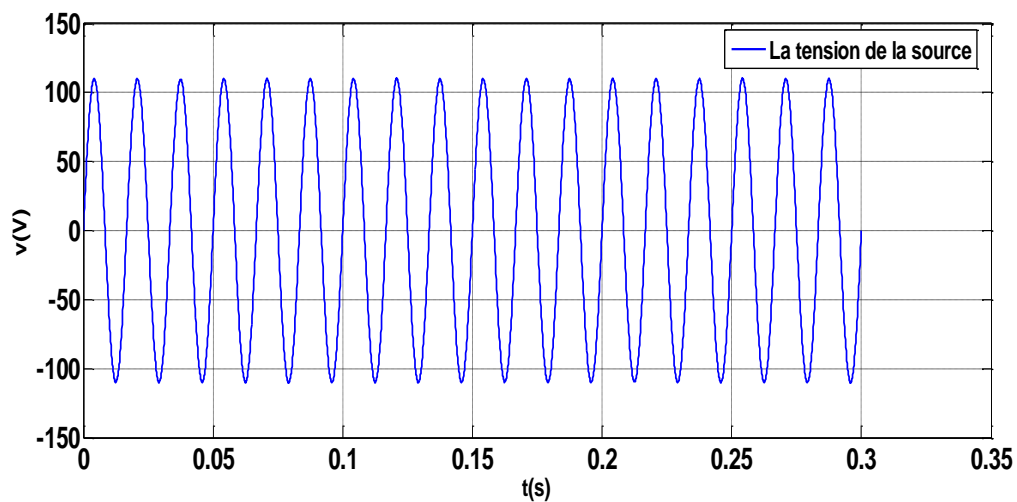


Figure IV.16 La tension de la source en régime normal.

## II. Courant de ligne (régime normal)

Courant de ligne en régime normale  $I_{ligne}$  :

$$I_{ligne} = I_n = \frac{V_s}{\Sigma R} = \frac{110}{433,6} = 0,25 \text{ A.}$$

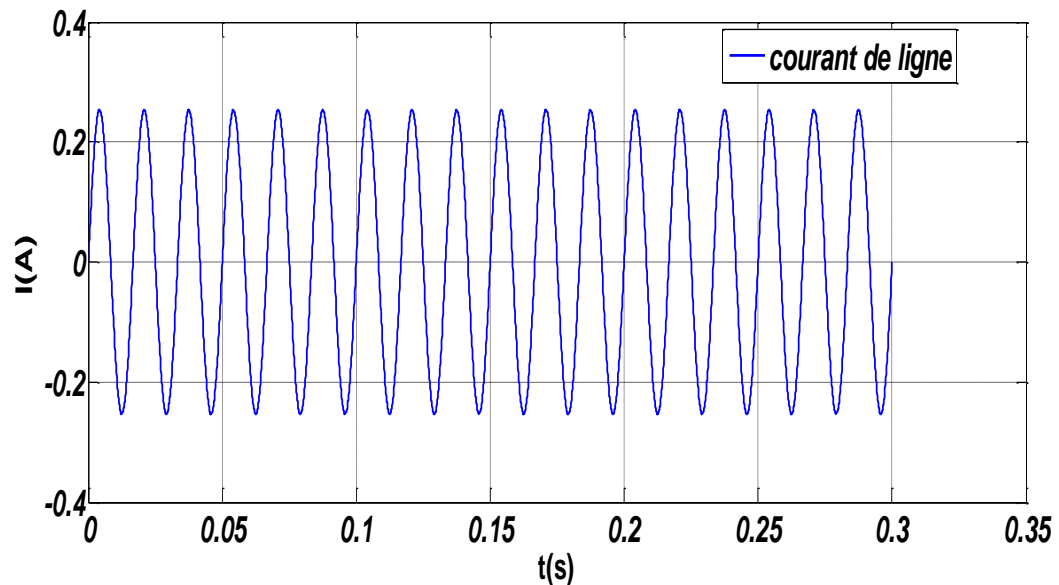


Figure IV.17 Courant de ligne a régime normal.

## IV.13.2. Régime de défaut (court-circuit)

### IV.13.2.1. Régime de défaut (court-circuit) sans limiteur de courant

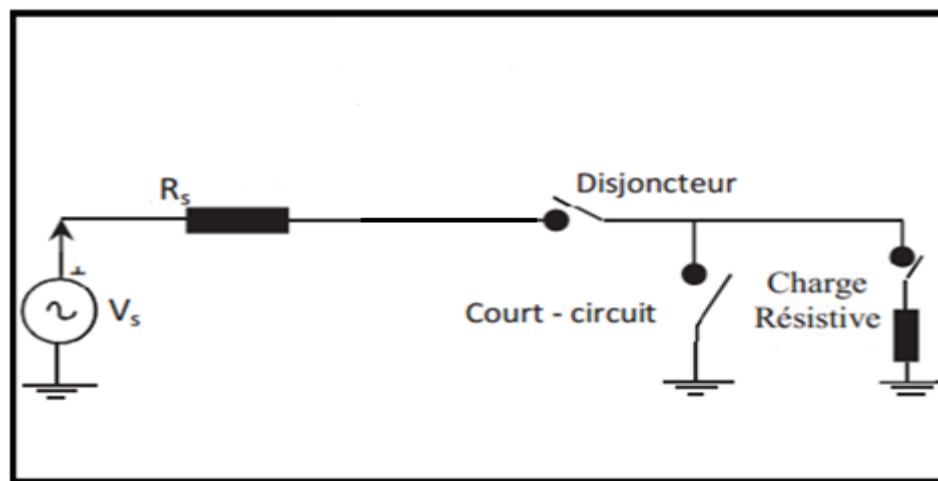


Figure IV.18 Schéma électrique de montage.

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

Le court-circuit aux bornes de la charge est produit à l'instant  $t = 0,05 \text{ s}$  [25].



Voilà donc Les courbes de résultats de simulation.

## Résultats

### I : la tension de la source (régime de défaut)

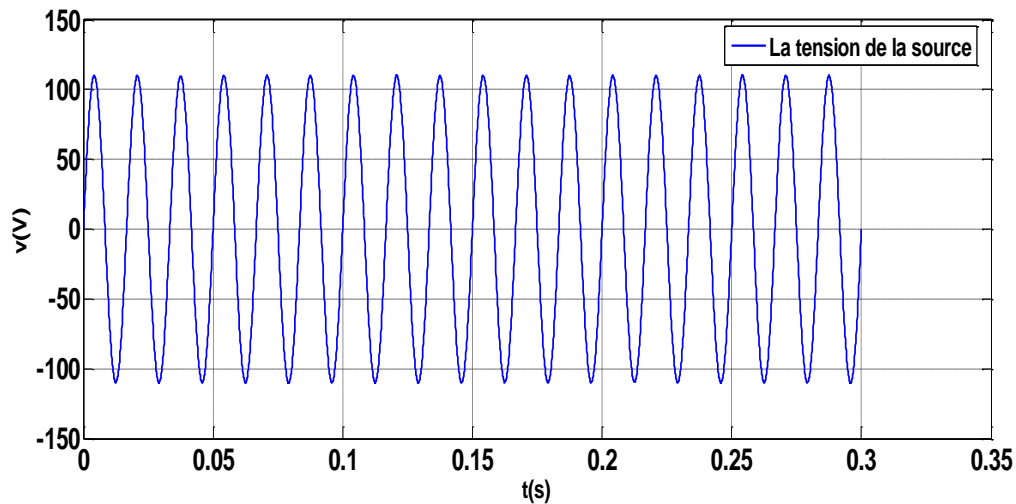


Figure IV.19 Tension de la source (régime de défaut de court-circuit) a  $t=0,05$  s.

### II. courant de court-circuit

A l'instant  $t = 0,05$  s un court-circuit est survenant aux bornes de la charge de valeur  $I_{cc} = 30,5$  A  $= 142 \times I_n$  c'est une valeur très importante et par conséquent, ce courant de court-circuit est très dangereux sur l'installation et même l'élément de protection (disjoncteur) qui nécessite un pouvoir de coupure élevé, donc il faut limiter ce courant de court-circuit à une valeur acceptable pour que soit contrôlé par le disjoncteur.

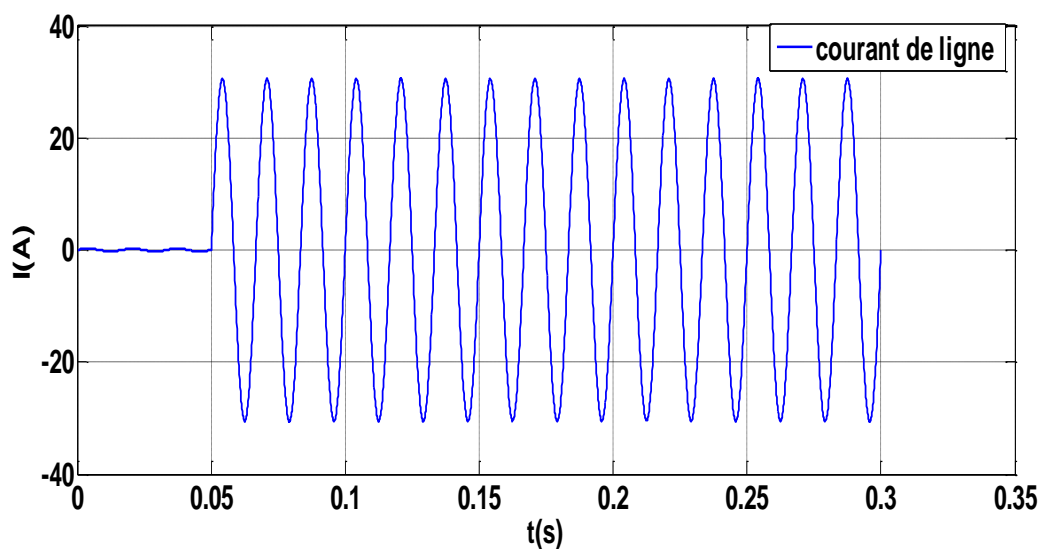


Figure IV.20 Courant de court-circuit à l'instant  $t = 0,05$  s.

### III. tension aux bornes de la charge

Sur la figure (IV.21) on a représenté la tension aux bornes de la charge, on voit clairement que cette tension est nulle pendant la période de défaut à  $t \leq 0,05$  s

$V_{charge} = 110$  V. à  $t \geq 0,05$  s  $V_{charge} = 0$  V [25].

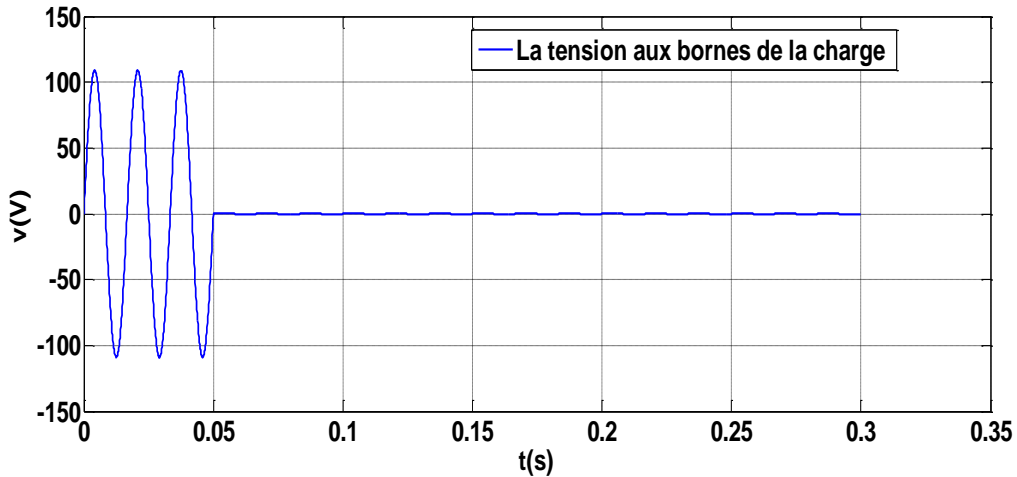


Figure IV.21 Tension aux bornes de la charge a régime de court-circuit.

#### IV.13.2.2. Régime de défaut (court-circuit) avec limiteur supraconducteur inductif

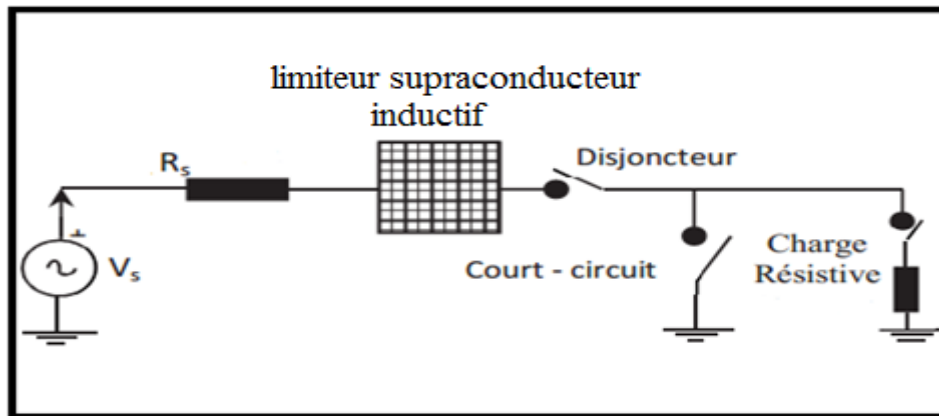
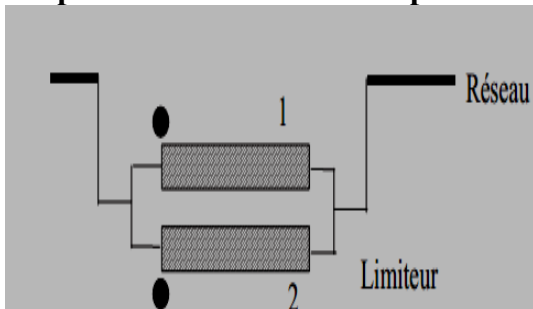


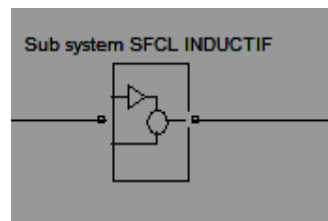
Figure IV.22 Schéma électrique de montage avec limiteur de courant inductif.

Après avoir intégré un limiteur supraconducteur inductif dans le circuit on a les résultats suivants :

Les paramètres de limiteur supraconducteur inductif sont :



Modèle électrique du limiteur inductif



## Résultats

### I : la tension de la source (régime de Limitation)

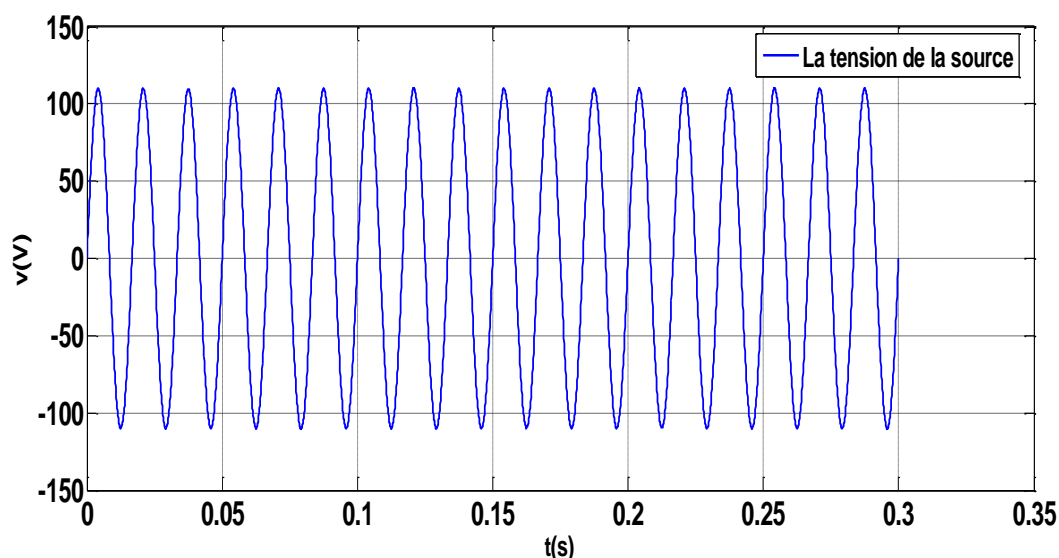


Figure IV.23 La tension de la source avec limitation de courant.

### II : la tension aux bornes de la charge (régime de Limitation)

La tension aux bornes de la charge à  $t \leq 0,05$  s  $V_{charge} = 110$  V, à  $t \geq 0,05$  s  $V_{charge} = 0$  V.

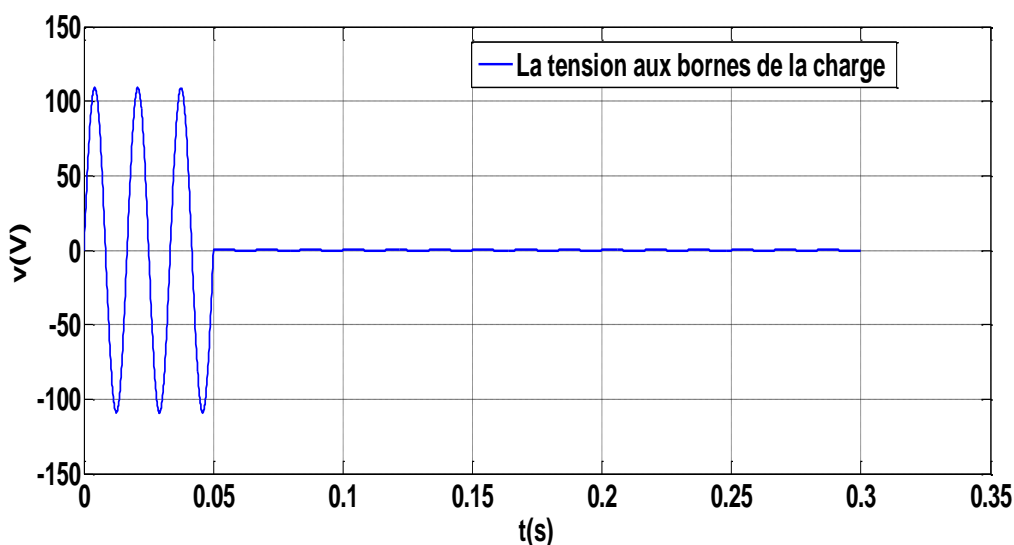


Figure IV.24 Tension aux bornes de la charge au régime de limitation.

### III : Le courant de court –circuit

❖ **En régime nominal  $J < J_c$**  : l'élément supraconducteur est vu en tant qu'élément négligeable en fonctionnement normale [25].

$t \leq 0,05$  s : pas de défaut donc :  $I_{ligne} = I_n = \frac{V_s}{\Sigma R} = \frac{110}{433,6} = 0,25$  A [25].

❖ En régime de court –circuit et limitation  $J > J_c$  :

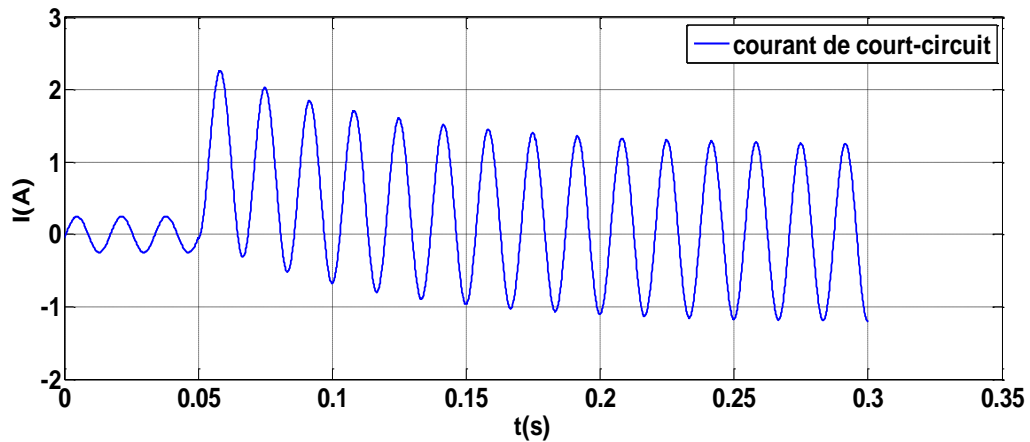


Figure IV.25 Courant de court-circuit limité.

Le limiteur de courant doit être limité le courant de court-circuit maximale  $I_{cc} = 30,5$  A à une nouvelle valeur  $I_{lim} = 1,25$ A.

$t > 0,05$  s : lorsqu'un défaut intervient donc le courant de défaut est réduit d'un facteur 24,4 fois moins que le courant sans limitation.

Donc  $I_{cc} = 24,4 \times I_{lim}$  [25].

#### IV.14. Conclusion

Pour le calcul du courant de court-circuit il ya plusieurs méthodes qu'ont été conçues de telle sorte que le courant de court-circuit puisse être calculé à la main ou à l'aide d'un moyen informatique.

La méthode analytique est une méthode très précise mais nécessite un temps de calcul important. L'utilisation de la méthode de simulation sous MATLAB/SIMULINK à l'avantage d'être rapide de configurer les défauts de court-circuit sans et avec limitation.

## **V. Conclusion générale**

Les supraconducteurs offrent des fonctions uniques ou des gains substantiels voire considérables, dans un certain nombre de dispositifs dans des domaines comme l'énergie électrique, les procédés industriels, le transport, les applications médicales, les grands instruments de la physique seule la supraconductivité permet de véritables bonds en avant pour réduire les masses et les encombrements et améliorer le rendement. ces caractéristiques font que les supraconducteurs sont une des réponses possibles au développement durable. Il s'agit aussi des solutions (limiteurs de courants de défaut) pour améliorer la sécurisation et la qualité de l'énergie électrique ainsi que pour certains équipements pour de nouveaux concepts de réseaux électriques.

La coupure des courants de défaut dans les réseaux électriques est un problème mal résolu, L'absence de courant en dessous 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. Le fonctionnement des limiteurs supraconducteurs est basé sur la transition de l'état supraconducteur vers l'état normal de ces matériaux. Cette transition en un temps très bref fait des supraconducteurs de bons limiteurs. En présence d'un court-circuit dans le réseau électrique, le courant augmente rapidement et dépasse le courant critique du supraconducteur. Ce dernier en transitant à l'état normal voit sa résistance augmenter ce qui entraîne une limitation du courant de court-circuit. L'avantage des limiteurs supraconducteurs par rapport aux dispositifs conventionnels de protection est leurs temps de réponse et la possibilité d'être utilisés pour des niveaux de tensions très élevées. L'objectif principal de ce travail est la modélisation de supraconducteur à haute température critique, et plus particulièrement, la modélisation du limiteur de courant supraconducteur dont le but est d'explorer l'impact des SFCL et de préciser leurs avantages pour l'optimisation des réseaux électriques. Raison pour laquelle nous avons exposé dans la première partie de ce travail, une méthode analytique de calcul de courant de court-circuit, dans la 2ème partie nous avons intégré le SFCL dans un réseau monophasé ; les résultats de simulation sous MATLAB/SIMULINK ont montré l'efficacité de ce modèle pour la limitation du courant de défaut, qui présente une marge de sécurité très importante par rapport au courant de court-circuit sans SFCL, qui peut atteindre des valeurs extrêmement élevées, comme perspective à notre travail, on peut envisager l'emploi de la méthode des éléments finis (MEF) pour exposer bien le phénomène de limitation de courant et d'étudier d'autres formes de court-circuit.

## **Références bibliographiques**

- [1] Yannick COINTE, « Limiteur supraconducteur de courant continu », Thèse de Doctorat, L'institut national polytechnique de Grenoble, 2007.
- [2] K. Onnes, « Further experiments with liquid helium, Communication from the physical », laboratory of the University of Leiden, 1911.
- [3] C. Souheila, « Etude des effets du dopage par du zinc sur les propriétés de la céramique supraconductrice  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  », Mémoire de magistère, Université de Constantine, 2006.
- [4] P.Tixador, « Les Supraconducteurs », 39, Edition Hermès Paris, 1995.
- [5] I.Klutsch, « Modélisation des supraconducteur et mesures », Thèse de Doctorat, L'institut national polytechnique de Grenoble, 2003.
- [6] P.W.Anderson, « Theory of flux creep in hard superconductors », Lett309, PhysRev, 1962.
- [7] Yves BRUNET, Pascal TIXADOR, « Supraconducteurs - Environnement et applications », N°d3662, Techniques de l'Ingénieur, 01/12/ 2012.
- [8] B. Salah, « Etude de l'évolution des frontières libres de conduction dans les matériaux Supraconducteurs de type II » Université de M'sila, 2013.
- [9] H. Daffix , P.Tixador, « Design of a fully super conductor synchronous motor, Electric Machines and Power Systems », 25227-245, 1997.
- [10] B.Bellin, P.Tixador, « Contribution à l'étude des bobinages supraconducteurs : le projet DGA du SMES HTS impulsif », Thèse de l'INPG, 2006.
- [11] P. Carer and coll, « Cahier des charges fonctionnel, analyse de la valeur et fiabilité, méthodes d'optimisation appliquées au matériel EDF-MT », Service Matériel Electrique, 2003.
- [12] P. FeiTacci, « Etude des régimes transitoires à l'établissement d'un défaut monophasé sur réseau d'énergie triphasé moyenne tension à neutre compensé », Thèse de l'Université Paris XI Orsay, 1995.
- [13] Y.Brunet, P.Tixador, « Limiteurs supraconducteurs », Techniques de l'Ingénieur, 1997.
- [14] Pierre.Schueller, « limitation de courant » page4,5 ,N°163 ,Cahier Technique Schneider,1998.
- [15] P. Barkan, « Reliability implication in the design of fault current limiter and series compensator », IEEE PAS 99, 1980.

- [16] S.Palanichamy, P.Chinnasamy, « Semi conductor fault current limiters », IEEE Proc, 1984.
- [17] W. Chen, « A new approach to suppress arcing in CUITent interruption », Proceedings of IEEE conference on electrical contacts, 1998.
- [18] P. FeITacci, rapport interne Schneider Electric.
- [19] Yves BRUNET, Pascal TIXADOR, « Limiteurs supraconducteurs », N°d3662, Techniques de l'Ingénieur, 2012.
- [20] Yannick COINTE, « Limiteur supraconducteur de courant continu », Thèse de Doctorat, L'institut national polytechnique de Grenoble, 2007.
- [21] V. Meerovich, « Application of inductive HTSC cuitent limiters in distribution networks », EUCAS'97, 1997.
- [22] Yves BRUNET, Pascal TIXADOR, « Limiteurs supraconducteurs », N°d3662, Techniques de l'Ingénieur, 2012.
- [23] METZ-NOBLAT, Frédéric DUMAS, Christophe POULAIN, « Calcul des courants de court-circuit », CT 158 édition N°158, Cahier Technique Schneider Electric, septembre 2005.
- [24] Schneider Electric, « Protection des réseaux électriques », cg 0021fr, Guide de la protection, 2008.
- [25] CHARLES Haberk Kom, JEAN Leveque, « Modélisation et impact de limiteurs supraconducteurs de courant sur les réseaux électriques », article ,université de Nancy – cedex –France, novembre 2013.

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DE  
DIPÔLME  
MASTER EN GENIE ELECTRIQUE  
SPECIALITE :  
INGENIERIE DES SYSTEMES ELECTROMECHANIQUES**

**PROPOSE ET DIRIGE PAR : Mr .BELKHIRI. Salah**

**PRESENTE PAR: GUECHI. Charaf Eddine**

**Thème:**

**Etude analytique de phénomène de limitation de courant.**

**Résumé**

Les courants de court-circuit n'ont cessé de croître sur les réseaux de distribution électrique pour répondre à l'augmentation de la consommation et pour pénétrer de fournir une meilleure qualité de service grâce à la plus grande interconnexion du réseau.

Les limiteurs supraconducteurs de courant permettent, par le dépassement d'un courant critique, de limiter le courant de défaut à une valeur prédéfinie, inférieure à la valeur calculé du court-circuit.

Les limiteurs de courant supraconducteurs apportent une solution sans aucun équivalent classique pour réduire, avant l'ouverture des protections ces courants de défauts.

Un limiteur de courant peut être dans trois états différents, en fonction du courant qui le traverse: état passant, état de limitation ou état de récupération.

**Mots clés :**

**Matériaux supraconducteurs, limiteur de courant supraconducteur, Grandeurs critiques, Court-circuit, réseau électrique, MATLAB/SIMILINK.**

**N° d'ordre :ISE\_111**