



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Réseaux Electriques

Réf. :

Présenté et soutenu par :
FATTOUCHE Abdelkader

Le : dimanche 7 juillet 2019

Limitation du courant de défaut dans un réseau électrique

Jury :

Dr.	REZIG Mohamed	MCB	Université de biskra	Président
Dr.	KHENE Mohamed Lotfi	MCA	Université de biskra	Examineur
Pr.	ALLOUI Lotfi	Pr	Université de biskra	Rapporteur



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Réseaux Electriques

Présenté et soutenu par :
FATTOUCHE Abdelkader

Le : dimanche 7 juillet 2019

Limitation du courant de défaut dans un réseau électrique

Présenté par :
FATTOUCHE Abdelkader

Avis favorable de l'encadreur :
Pr. ALLOUI Lotfi *signature*

Avis favorable du Président du Jury

Dr. REZIG Mohamed

Signature

Cachet et signature

Résumé :

Les exploitants des réseaux électriques font face à des défis complexes qui menacent leur capacité à fournir un service fiable. Le court-circuit est considéré comme le défaut le plus fréquent et dangereux soit pour les équipements ou les êtres humains dans les réseaux électrique. Des nombreux outils sont utilisés afin de résoudre ou au moins minimiser les effets de cet ensemble complexe des problèmes. La transition rapide d'un supraconducteur de son état supraconducteur à leur état normal en cas de dépassement du courant critique ; peut-être l'outil le plus fiable utiliser comme limiteur de courant de court-circuit automatique à réponse rapide compétitifs par rapport aux systèmes conventionnels dans les réseaux électriques.

Le principe de fonctionnement d'un dispositif de limitation de courant supraconducteur est très simple. Un supraconducteur dans un système électrique est maintenu à une température inférieure à la valeur critique. Lorsqu'un court-circuit se produit, le matériau supraconducteur passe à son état normal, soit par déclenchement thermique, magnétique ou par dépassement de courant critique. En conséquence, une impédance élevée en série est insérée dans le circuit électrique, ce qui limite la valeur du courant de défaut.

Mots clé : court-circuit, supraconducteur, supraconductivité, limiteur de courant.

ملخص:

يواجه مشغلو الشبكات الكهربائية تحديات معقدة تهدد قدرتهم على تقديم خدمة موثوقة لزيابانهم. ويعتبر مشكل الدارة الكهربائية القصيرة الأكثر شيوعاً وخطورة بالنسبة للمعدات أو البشر. العديد من الأدوات تستخدم حالياً لحل أو على الأقل تقليل آثار هذه المجموعة المعقدة من المشاكل. إن الانتقال السريع للموصل الفائق من حالته الموصلة الفائقة إلى حالته الطبيعية عند تجاوز التيار الحرج؛ ربما يكون الأداة الأكثر موثوقية لاستخدامها كمحدد استجابة سريع للدوائر القصيرة أوتوماتيكياً وتنافسياً مع الأنظمة التقليدية في شبكات الطاقة الكهربائية.

يعتبر مبدأ تشغيل جهاز تحديد التيار الفائق الموصلية بسيط للغاية. حيث يتم الحفاظ على الموصل الفائق في النظام الكهربائي عند درجة حرارة أقل من القيمة الحرجة. عندما تحدث دارة كهربائية قصيرة، تنتقل المواد فائقة التوصيل إلى حالتها الطبيعية، إما عن طريق تجاوز القيمة الحرجة للحرارة، للمغطة أو للتيار الكهربائي. نتيجة لذلك، يتم إدراج مقاومة عالية على التسلسل في الدائرة الكهربائية، مما يحد من قيمة تيار الدارة الكهربائية القصيرة.

كلمات المفتاح: دارة كهربائية قصيرة، موصل فائق، موصلية فائقة، محدد التيار الكهربائي.

Abstract :

Electric network operators face complex challenges that threaten their ability to provide a reliable service to their customers. The problem of short circuit is the most common and dangerous for equipment and humans. Many tools have currently being used to solve or at least to minimize the effects of these complex problems. The fast transition of the superconductor from its superconducting state to its normal state when exceeding the critical current may be the most

reliable tool to be used as a rapid and an automatic response limiter to the short circuit and in competitive tool comparing with conventional systems in power grids.

The principle function of the current limiter superconductor device is very simple. The superconductor is maintained in the electrical system at a temperature below its critical value. When a short circuit occurs, superconductors move to their normal state, either by exceeding the critical value of heat, magnetization, or electric current. As a result, a high impedance is inserted into the sequence in the circuit, which limiting the value of the short circuit current.

Key words: short-circuit, superconductor, superconductivity, current limiter.

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail :

A mes parents,

Ma femme et mes petites filles

Mes frères et sœurs.

REMERCIEMENTS

Tous d'abord je veux remercier Allah qui m'a donné le pouvoir de terminer ce travail et ma donner l'occasion d'exprimer ma sincère gratitude au mon promoteur Pr. Alloui Lotfi pour leur soutien et leurs conseils au cours de ce travail.

Je remercie chaleureusement tous les enseignants de la Filière d'électrotechnique pour leurs conseils, encouragements ainsi que leurs qualités humaine.

Aussi un grand remerciement à mes parents, ma femme et collègues pour leurs encouragements, ainsi qu'aux toutes personnes qui ont contribué à ce modeste travail.

LISTE DES FIGURES

Fig.I.1. Les différents courts circuits et leurs courants.	4
Fig.I.2. Schéma simplifié d'un réseau.	4
Fig.I.3. Présentation graphique des deux cas extrêmes d'un courant de court-circuit, symétrique et asymétrique.	6
Fig.I.4. Variation du facteur K en fonction de R/X , ou R/L .	7
Fig.I.5. Système déséquilibré triphasé obtenu en additionnant les trois systèmes équilibrés.	7
Fig.I.6. Circuit équivalent des séquences.	9
Fig.I.7. Schéma de court-circuit triphasé.	9
Fig.I.8. Schéma de séquence pour un défaut triphasé.	10
Fig.I.9. Schéma de court-circuit biphasé isolé.	11
Fig.I.10. Schéma de séquence pour un défaut biphasé isolé.	11
Fig.I.11. Schéma de court-circuit biphasé à la terre.	12
Fig.I.12. Schéma de séquence pour un défaut biphasé à la terre.	13
Fig.I.13. Schéma de court-circuit monophasé à la terre.	14
Fig.I.14. Schéma de séquence pour un défaut monophasé à la terre.	14
Fig.I.15. Schéma de court-circuit monophasé à travers une impédance non nulle.	15
Fig.I.16. Schéma de séquence pour un défaut monophasé à travers une impédance non nulle.	16
Fig.II.1. Résistivité et température critique dans le mercure.	19
Fig.II.2. Comparaison de la réponse d'un conducteur parfait et d'un supraconducteur, à un champ magnétique appliqué.	21
Fig.II.3. Surface critique et ordres de grandeur de quelques Supraconducteurs	22
Fig.II.4. Caractéristique $B(H)$ d'un supraconducteur de type I.	23
Fig.II.5. Caractéristique $B(H)$ d'un supraconducteur de type II.	24
Fig.II.6. Distribution des vortex dans un supraconducteur.	24
Fig.II.7. Vortex dans un supraconducteur.	25
Fig.III.1. Schéma du réseau électrique modélisé.	38
Fig.III.2. Courant de la première phase dans le régime nominale.	39
Fig.III.3. Courant de la deuxième phase dans le régime nominale.	39
Fig.III.4. Courant de la troisième phase dans le régime nominale.	39

Fig.III.5. Courant de la première phase durant les deux régimes, assigné et au défaut dans le cas d'un défaut monophasé.	41
Fig.III.6. Courant de la deuxième phase durant les deux régimes, assigné et au défaut dans le cas d'un défaut monophasé.	41
Fig.III.7. Courant de la troisième phase durant les deux régimes, assigné et au défaut dans le cas d'un défaut monophasé.	41
Fig.III.8. Courant de la première phase durant les deux régimes, assigné et au défaut dans le cas d'un défaut biphasé.	42
Fig.III.9. Courant de la deuxième phase durant les deux régimes, assigné et au défaut dans le cas d'un défaut biphasé.	43
Fig.III.10. Courant de la troisième phase durant les deux régimes, assigné et au défaut dans le cas d'un défaut monophasé.	43
Fig.III.11. Courant de la première phase durant les deux régimes, assigné et au défaut dans le cas d'un défaut triphasé.	44
Fig.III.12. Courant de la deuxième phase durant les deux régimes, assigné et au défaut dans le cas d'un défaut triphasé.	44
Fig.III.13. Courant de la troisième phase durant les deux régimes, assigné et au défaut dans le cas d'un défaut triphasé.	45
Fig.III.14. Courant durant les phases, nominale, défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c = 1 \cdot 10^7$ A/mm ² pour un court-circuit monophasé.	48
Fig.III.15. Courant durant les phases, nominale, défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c = 1 \cdot 10^7$ A/mm ² pour un court-circuit biphasé.	48
Fig.III.16. Courant durant les phases, nominale, défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c = 1 \cdot 10^7$ A/mm ² pour un court-circuit triphasé.	49
Fig.III.17. Courant durant la phase de défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c = 2 \cdot 10^7$ A/mm ² pour un court-circuit monophasé.	50
Fig.III.18. Courant durant la phase de défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c = 2 \cdot 10^7$ A/mm ² pour un court-circuit biphasé.	51

Fig.III.19. Courant durant la phase de défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c = 2 \cdot 10^7$ A/mm ² pour un court-circuit triphasé.	51
Fig.III.20. Courant durant la phase de défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c = 3 \cdot 10^7$ A/mm ² pour un court-circuit monophasé.	54
Fig.III.21. Courant durant la phase de défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c = 3 \cdot 10^7$ A/mm ² pour un court-circuit biphasé.	54
Fig.III.22. Courant durant la phase de défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c = 3 \cdot 10^7$ A/mm ² pour un court-circuit triphasé.	55
Fig.III.23. Courant durant la phase de défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c = 4 \cdot 10^7$ A/mm ² pour un court-circuit monophasé.	55
Fig.III.24. Courant durant la phase de défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c = 4 \cdot 10^7$ A/mm ² pour un court-circuit biphasé.	56
Fig.III.25. Courant durant la phase de défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c = 4 \cdot 10^7$ A/mm ² pour un court-circuit triphasé.	56
Fig.III.26. Courant durant la phase de défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c = 5 \cdot 10^7$ A/mm ² pour un court-circuit monophasé.	57
Fig.III.27. Courant durant la phase de défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c = 5 \cdot 10^7$ A/mm ² pour un court-circuit biphasé.	57
Fig.III.28. Courant durant la phase de défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c = 5 \cdot 10^7$ A/mm ² pour un court-circuit triphasé.	58
Fig.III.29. Courant durant la phase de défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c = 6 \cdot 10^7$ A/mm ² pour un court-circuit monophasé.	58

Fig.III.30. Courant durant la phase de défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c = 6 \cdot 10^7$ A/mm ² pour un court-circuit biphasé.	59
Fig.III.31. Courant durant la phase de défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c = 6 \cdot 10^7$ A/mm ² pour un court-circuit triphasé.	59
Fig.III.32. Courant durant la phase de défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c = 7 \cdot 10^7$ A/mm ² pour un court-circuit monophasé.	60
Fig.III.33. Courant durant la phase de défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c = 7 \cdot 10^7$ A/mm ² pour un court-circuit biphasé.	60
Fig.III.34. Courant durant la phase de défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c = 7 \cdot 10^7$ A/mm ² pour un court-circuit triphasé.	61

LISTE DES TABLEAUX

Tableau III.1. Valeurs des courants maximales des trois phases (court- circuit monophasé).	40
Tableau III.2. Valeurs maximales des courants des trois phases pour un court- circuit biphasé.	42
Tableau III.3. Valeurs des courants sur les trois phases (court- circuit triphasé).	44
Tableau III.4. Taux de limitation de courant avec matériau de $J_c = 1 \cdot 10^7$ A/mm ² .	47
Tableau III.5. Taux de limitation de courant avec matériau de $J_c = 2 \cdot 10^7$ A/mm ² .	50
Tableaux III.6. Taux de limitation du courant avec matériau respectivement de $J_c = 3 \cdot 10^7$ au $J_c = 7 \cdot 10^7$ A/mm ² .	52

TABLE DES MATIERES

DEDICACE	I
REMERCIEMENTS	II
LISTE DES FIGURES	III
LISTE DES TABLEAUX	VII

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

CHAPITRE I : ANALYSE DE COURT-CIRCUIT

I.1. Définition	3
I.2. Caractéristique de court-circuit	3
I.3. Etablissement de l'intensité de court-circuit	4
I.4. Calcul de courant de court-circuit	5
I.5. Théorie des composants symétriques	7
I.6. Calcul des niveaux de défaut	9
I.6.1. Défaut triphasé symétrique	9
I.6.2. Défaut biphasé isolé	11
I.6.3. Défaut biphasé à la terre	12
I.6.4. Défaut entre phase et la terre	14
I.6.5. Défaut entre phase et la terre à travers une impédance ($Z_h \neq 0$)	15
I.7. Conclusion	17

CHAPITRE II : INTRODUCTION A LA SUPRACONDUCTIVITE

II.1. Définition	18
II.2. Historique de la supraconductivité	18
II.3. Propriétés des supraconducteurs	20
II.3.1. Résistivité nulle	20
II.3.2. Effet Meissner et Ochsensfeld ou diamagnétisme parfait	20
II.4. Classification des supraconducteurs	22
II.4.1. Supraconducteurs de type I	22
II.4.2. Supraconducteurs de type II	23

II.5. Caractéristiques du limiteur de courant supraconducteur et leur intégration dans le réseau électrique	25
II.6. La relation E-J	26
II.7. Applications des supraconducteurs en électrotechnique	27
II.7.1. Limiteurs de courant	27
II.7.2. Lignes de transport	28
II.7.3. Les systèmes de stockage de l'énergie	31
II.7.4. Les transformateurs	32
II.7.5. Les machines supraconductrices	33
II.7.6. Les aimants permanents supraconducteurs	34
II.7.7. Lévitacion et paliers magnétiques	35
II.8. Conclusion	35

CHAPITRE III : RESULTATS DES SIMULATIONS

III.1. Simulation du courant dans une ligne triphasée dans le régime nominale	38
III.2. Simulation des courants de court-circuit	40
III.2.1. Court-circuit monophasé	40
III.2.2. Court-circuit biphasé	42
III.2.3. Court-circuit triphasé	43
III.3. Simulation de limitation du courant de court-circuit par limiteur de courant supraconducteur	46
III.3.1. Résultat des simulations pour $J_c = 1 \cdot 10^7 \text{ A/mm}^2$	46
III.3.2. Résultat des simulations pour $J_c = 2 \cdot 10^7 \text{ A/mm}^2$	49
III.3.3. Résultat des simulations pour $J_c = 3 \cdot 7 \cdot 10^7 \text{ A/mm}^2$	52
III.4. Conclusion	62

Conclusion générale	63
----------------------------	----

Bibliographie	64
----------------------	----

Introduction générale :

Les systèmes de production d'électricité sont conçus de manière à ce que les impédances entre les sources de production et les charges soient relativement faibles. Cette configuration aide à maintenir une tension de système stable et fixe sur les charges. En raison de la connexion de nombreuses sources d'alimentation parallèles, l'impédance de court-circuit des réseaux peut être relativement faible ($< 2 - 5\%$ de l'impédance de charge), ce qui entraîne des valeurs très élevés de courants de défaut (des dizaines de fois du courant nominal).

Les effets dangereux de courant de défaut sur l'équipement de réseau électrique augmentent également avec l'augmentation du niveau de ce courant de défaut. Lorsque la valeur du courant de défaut augmente, les exigences en termes de stabilité électrodynamique et thermique des installations électriques, générateurs, transformateurs et disjoncteurs entraînent une augmentation significative de leur taille, poids et coût.

Dans le but d'éviter l'endommagement des installations électriques, la recherche des dispositifs capables de limiter la valeur importante de courant de court-circuit dans les systèmes de transmission et de distribution tout en restant électriquement invisibles dans des conditions nominales a été nécessaire. L'une des solutions les plus prometteuses est l'utilisation des matériaux supraconducteurs qui peuvent répondre aux exigences de performance des composants des systèmes électriques en exploitant leurs potentiels et qui s'agit d'augmenter rapidement leur impédance lorsque le courant dépasse une valeur donnée, appelé courant critique, limitant ainsi les courants de défaut élevés. Les limiteurs de courant de défaut supraconducteur exploitent deux propriétés remarquables des matériaux supraconducteurs : une conductivité presque parfaite (c'est-à-dire une résistance électrique nulle) en dessous d'un courant critique, et l'autre est une transition de phase non linéaire rapide à partir du supraconducteur état passant à l'état normal de conduction au-dessus du courant critique ou à un champ magnétique et une température suffisamment élevés.

Une simulation avec un code de calcul développé et implémenté sous environnement MATLAB a été réalisée, dédiés principalement à l'analyse de limitation de courant de court-circuit à l'aide des différents matériaux supraconducteurs. De type II. L'effet de différents grandeurs de supraconducteur (températures, champ magnétique et densité de courant critiques) sur la limitation de courant de défaut a été discuter. Alors que notre centre d'intérêt est l'effet des différentes densités de courant critique sur la limitation de courant de défaut. Pour cela, une

méthode numérique a été présenté pour calculer les de différents types de courant de court-circuit. Puis, une simulation en MATLAB de limitation de courant de défaut a été réalisée avec différents densités de courant critiques.

Cette thèse est structurée en trois chapitres :

Le premier chapitre commence par une étude des courts circuits qui peuvent apparaitre dans le réseau électrique avec un bref rappel sur le principe de base de calcul des courants de défaut. Il propose une méthode pour calculer le courant de défaut dans les différents types du court-circuit.

Le deuxième chapitre est consacré à une brève introduction sur les supraconducteurs, en particulier, les supraconducteur de type II en exposant leurs propriétés ainsi que leur classifications avec la citation de quelques applications récentes dans le domaine du génie électrique.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les résultats des simulations obtenus par les modèles mathématiques et numériques développés et implémenté sous environnement MATLAB. Dans un premier temps, les résultats présentons le calcul du courant nominal a été largement présenté dans un réseau radial simple. Dans un second temps, les résultats présentons les courants de court-circuit sont présentés. A la fin de ce chapitre, l'influence de la densité de courant critique sur la limitation des courants de défaut est largement discutée.

On terminera par donner des conclusions et des perspectives.

Ce chapitre expose une vision générale sur le problème de court-circuit, leur origines, caractéristiques, et conséquences ainsi que le calcul de différents types de leur courant. Cette vision discute les effets des défauts sur les systèmes d'énergie électrique, qui fait référence aux conditions dans lesquelles les phases d'un système d'alimentation peuvent mises à la terre soit par une, deux ou trois phases ou bien par la contacte entre deux ou plusieurs phases. Aussi, une méthodologie simple a été présentée dans ce chapitre pour le calcul de courant de court-circuit sur un réseau électrique.

I.1. Définition :

Le terme court-circuit est utilisé par analogie pour désigner une connexion à impédance nulle entre deux nœuds. Cela oblige les deux nœuds à être à la même tension. Dans un court-circuit idéal, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de résistance et pas de chute de tension à travers ce court-circuit [1]. Un court-circuit entraîne généralement un courant très élevé dans les lignes et, en l'absence de protection adéquate, peut endommager les équipements et les appareils sur le réseau affecté.

I.2. Caractéristique de court-circuit : [16, 17]

Les caractéristiques principales de court-circuit sont les suivants :

1. Leurs type et durées : soit auto-extincteur, fugitif ou permanent.

2. Leurs origines :

Soit d'origines mécaniques (comme rupture de conducteurs ... etc.), à cause des surtensions électriques d'origine atmosphérique ou interne.

3. Leurs localisations : interne ou externe à un réseau ou une machine électrique.

Dans le réseau triphasé, comme il montre la fig.I.1, les différents types court-circuit peuvent être :

- a. Monophasés : entre une phase du réseau avec liaison à la terre qui représente la majorité des cas avec 80 %.
- b. Biphasés : représente 15 % des cas et qu'il est entre deux phases du réseau avec ou sans liaison à la terre.
- c. Triphasés : représente le moindre présent avec 5 % seulement des cas, mais le plus dangereux car il est celui provoquant généralement les courants les plus élevés qu'il est entre les trois phases du réseau avec ou sans liaison à la terre.

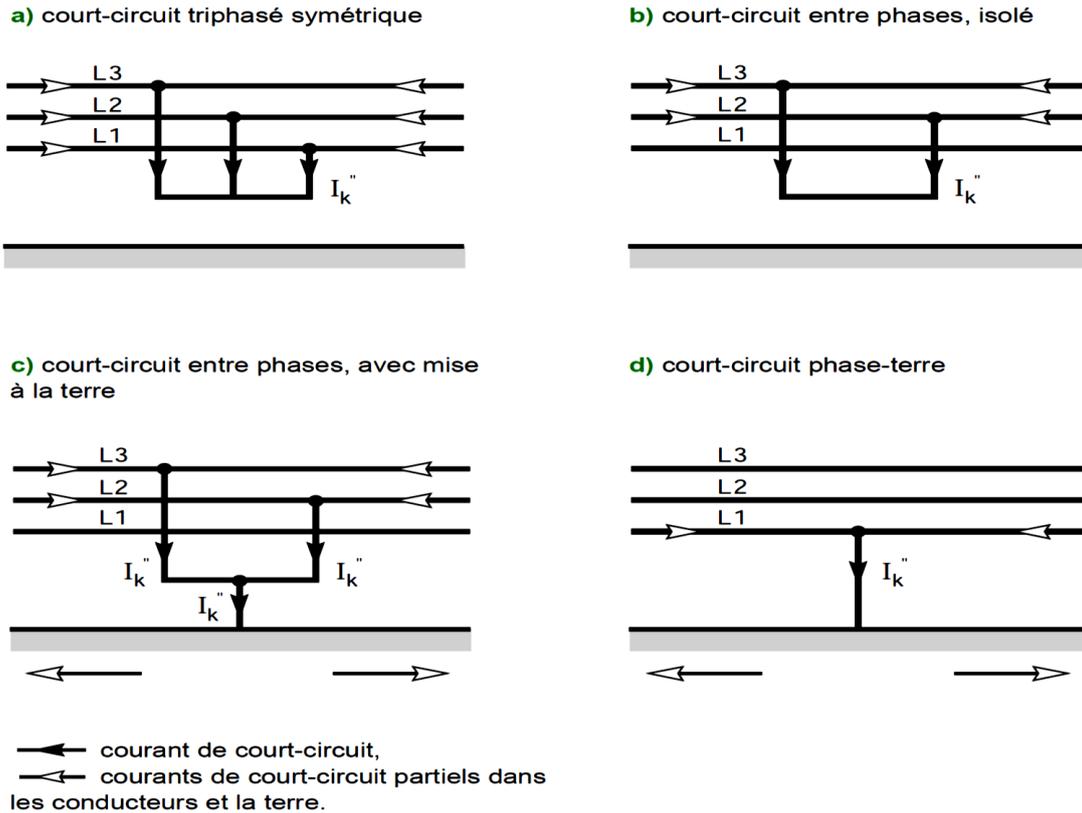


Fig.I.1. Les différents courts circuits et leurs courants.

I.3. Etablissement de l'intensité de court-circuit : [16, 17]

La fig.I.2 représente 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 .

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

$$Z_{cc} = \sqrt{R^2 + X^2} \tag{I.1}$$

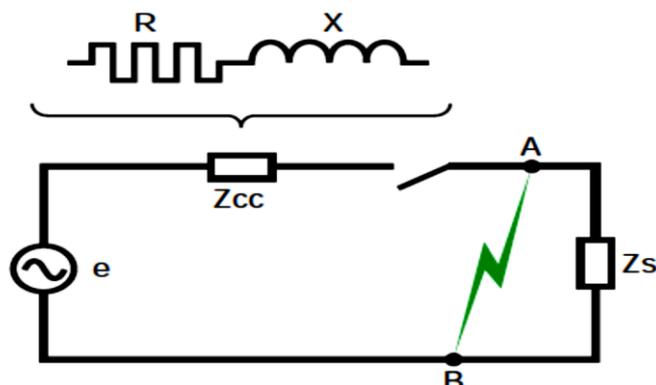


Fig.I.2. Schéma simplifié d'un réseau.

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 0,1 et 0,3. Il est pratiquement égal pour ces faibles valeurs au $\cos \varphi_{cc}$ (en court-circuit) soit :

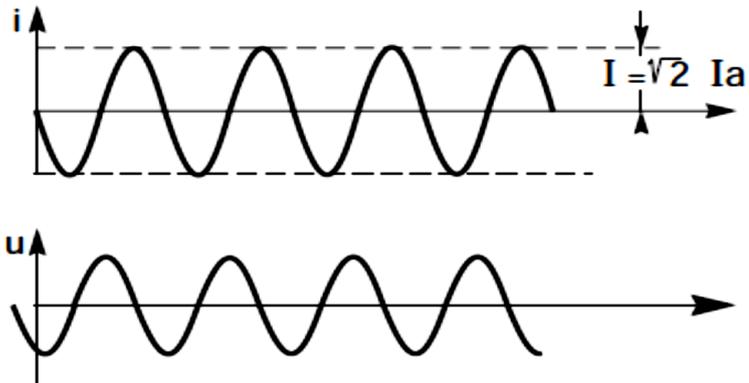
$$\cos \varphi_{cc} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad (\text{I.2})$$

I.4. Calcul de courant de court-circuit :

Parmi les types de courts circuits pouvant survenir dans les réseaux électriques, le court-circuit triphasé est symétrique, alors que les autres sont non symétriques voir la fig.I.3. Le calcul des courants de court-circuit (symétriques et non symétriques) est effectué à l'aide de la méthode des composants symétriques. Cette méthode nécessite l'utilisation de trois composants indépendants (direct, inverse et homopolaire), les relations entre eux étant imposées par le type de court-circuit. [7, 16, 17]

En fonction de la distance électrique entre l'emplacement du défaut et les générateurs sur réseau, deux types de courts circuits sont définis : proche du générateur et éloigné du générateur. Lors de l'apparition d'un court-circuit, les courants de phase ont des valeurs variables dans le temps dans un régime transitoire, le régime transitoire étant suivi par un état stable dans lequel les courants ont une amplitude constante. L'une des quantités importantes pour les régimes de court-circuit est le courant de court-circuit symétrique initial I''_k , qui est la valeur effective de la composante symétrique alternative et sert de base pour le calcul du courant de court-circuit asymétrique de crête, i_p , ainsi que le courant de rupture et la capacité [12].

a) symétrique



b) asymétrique

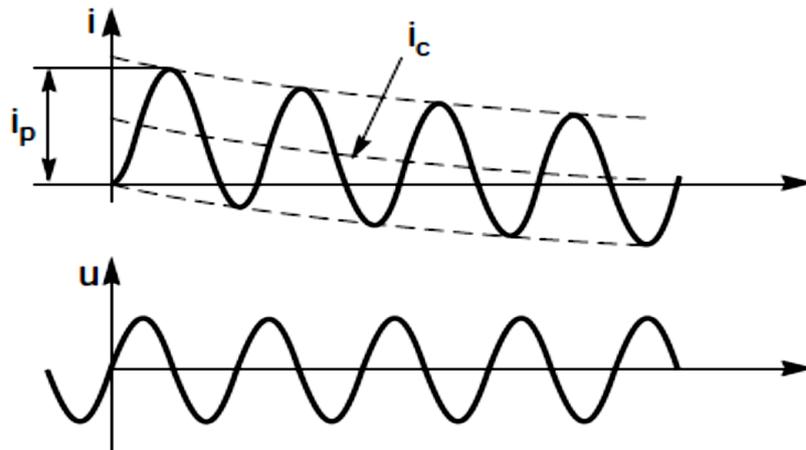


Fig.I.3. Présentation graphique des deux cas extrêmes d'un courant de court-circuit, symétrique et asymétrique.

Il est donc nécessaire de calculer i_p pour déterminer le pouvoir de fermeture des disjoncteurs à installer, mais aussi pour définir les contraintes électrodynamiques que devra supporter l'ensemble de l'installation.

Sa valeur se déduit de la valeur efficace du courant de court-circuit symétrique I_a par la relation :

$i_p = k \cdot \sqrt{2} \cdot I_a$, le coefficient K étant donné par la courbe de la fig.I.4 en fonction du rapport R/X , ou R/L .

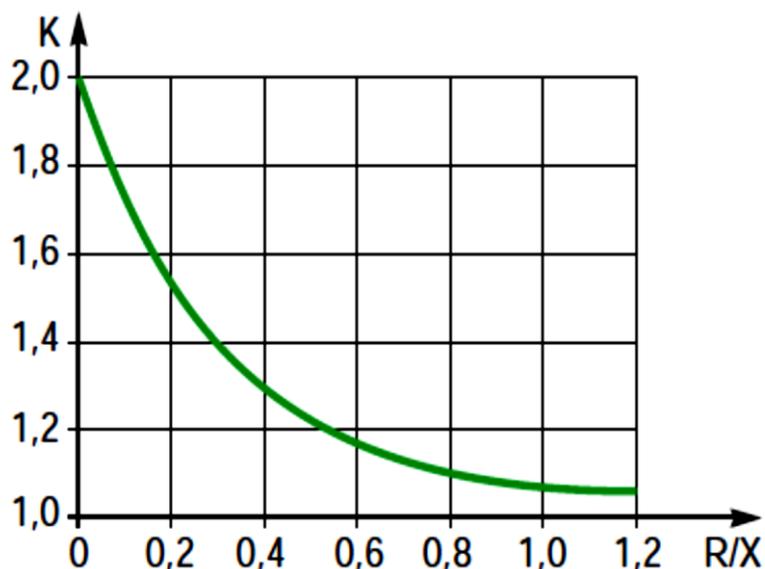


Fig.I.4. Variation du facteur K en fonction de R/X , ou R/L

I.5. Théorie des composants symétriques : [11, 7]

La définition des composantes symétriques repose sur l'équivalence entre un système triphasé déséquilibré, et la somme de trois systèmes triphasés équilibrés : direct, indirect et homopolaire (Fig.I.3).

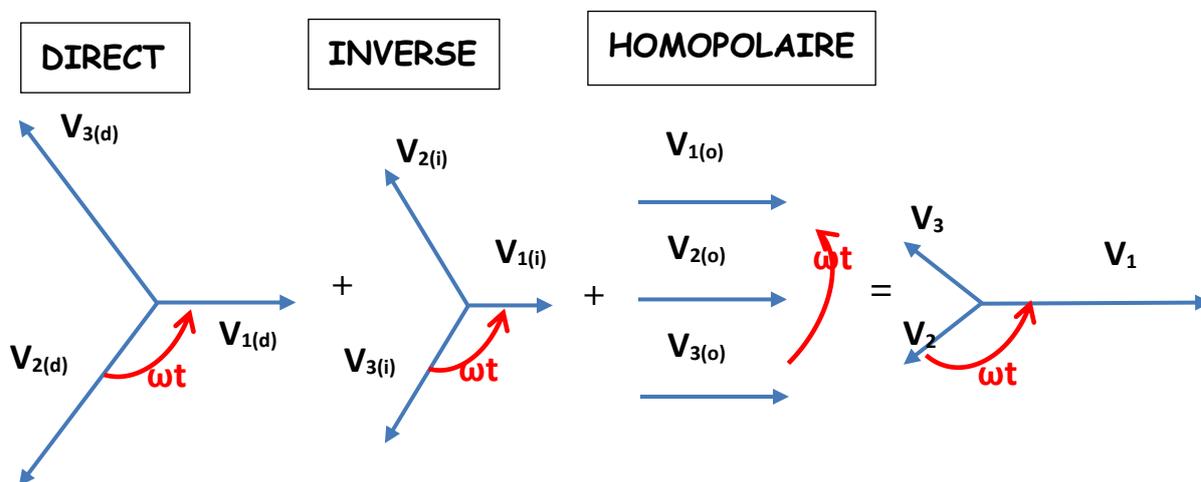


Fig.I.5. Système déséquilibré triphasé obtenu en additionnant les trois systèmes équilibrés

Le système Direct (Positif ou de séquence d'ordre 1) : consiste en trois vecteurs de même module déphasé de 120° et ayant la même séquence que le système d'origine.

En prenant le vecteur V_a comme référence et sachant que l'opérateur (a) :

$$a = -0,5 + j 0,866 = 1^{L+120^\circ} \tag{I.3}$$

Il vient alors :

$$\begin{cases} V_{a1} = V_1 \\ V_{b1} = V_1^{L240^\circ} = a^2 \cdot V_1 \\ V_{c1} = V_1^{L120^\circ} = a \cdot V_1 \end{cases} \quad (\text{I.4})$$

Le système Inverse (Négatif ou de séquence d'ordre 2) : consiste en trois vecteurs de même module déphasé de 120° mais de séquence opposée au système d'origine.

$$\begin{cases} V_{a2} = V_2 \\ V_{b2} = V_2^{L120^\circ} = a \cdot V_2 \\ V_{c2} = V_2^{L240^\circ} = a^2 \cdot V_2 \end{cases} \quad (\text{I.5})$$

Le système homopolaire (Zéro ou de séquence d'ordre 0) : ce système est formé de trois vecteurs ayant la même amplitude et le même angle de phase, ils tournent aussi dans le même sens et à la même vitesse que les vecteurs du système original, on leur attribue l'indice « 0 ».

$$V_{a0} = V_{b0} = V_{c0} = V_0$$

Autrement dit un système triphasé déséquilibré constitué de trois vecteurs V_a, V_b et V_c peut s'écrire en fonction des trois systèmes direct, inverse, homopolaire selon :

$$\begin{cases} V_a = V_1 + V_2 + V_0 \\ V_b = a^2 V_1 + a V_2 + V_0 \\ V_c = a V_1 + a^2 V_2 + V_0 \end{cases} \quad (\text{I.6})$$

Pour déterminer V_1, V_2 et V_0 en fonction de V_a, V_b et V_c et on a deux méthodes :

- ✓ 1^{er} méthode : utiliser la matrice inverse $[T]^{-1}$
- ✓ 2^{ème} méthode : utiliser $a^2 + a + 1 = 0$

On aura :

$$\begin{cases} V_1 = \frac{1}{3} [V_a + a V_b + a^2 V_c] \\ V_2 = \frac{1}{3} [V_a + a^2 V_b + a V_c] \\ V_3 = \frac{1}{3} [V_a + V_b + V_c] \end{cases} \quad (\text{I.7})$$

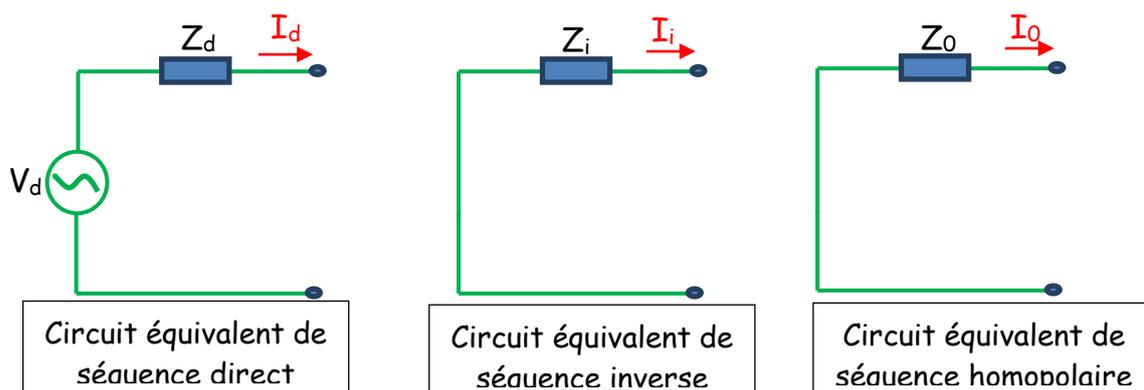


Fig.I.6. Circuit équivalent des séquences.

$$\begin{cases} V_d = V_d^P - Z_d \times I_d \\ V_i = 0 - Z_i \times I_i \\ V_o = 0 - Z_o \times I_o \end{cases} \quad (I.8)$$

Ou :

- ✓ V_d^P la tension préexistante au point de défaut
- ✓ Z_d, Z_i et Z_o les impédances équivalentes au réseau dans les trois systèmes.

I.6. Calcul des niveaux de défaut : [2, 10, 16]

I.6.1. Défaut triphasé symétrique :

La fig.I.7 représente le schéma de court-circuit triphasé, alors que la fig.I.8 indique leur schéma de séquence :

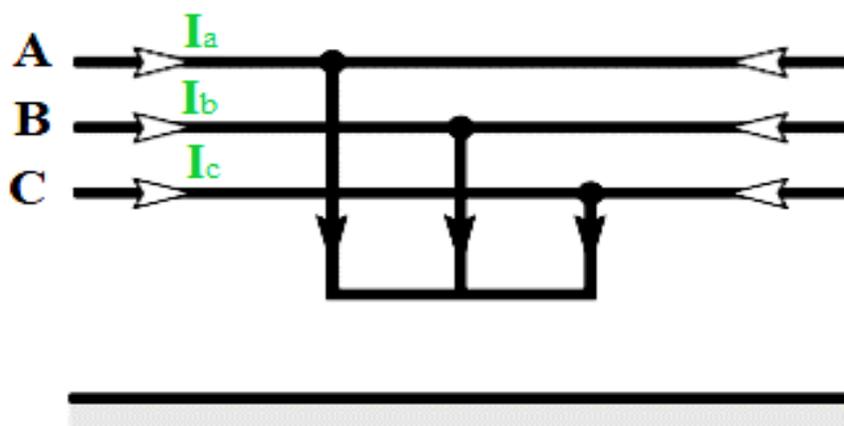


Fig.I.7. Schéma de court-circuit triphasé.

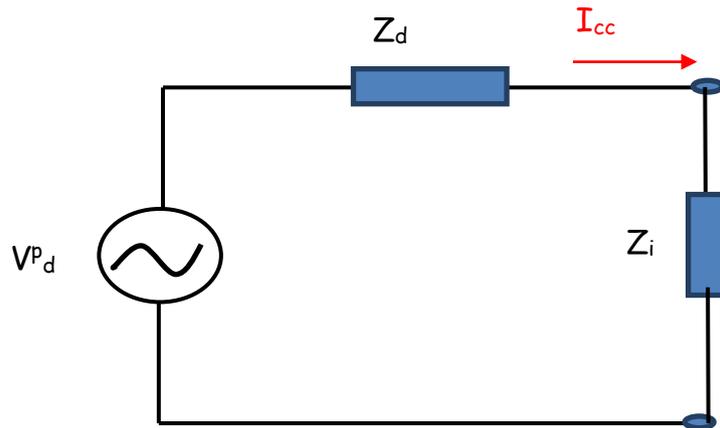


Fig.I.8. Schéma de séquence pour un défaut triphasé.

❖ Expression du défaut

$$V_a = V_b = V_c = \mathbf{0} \text{ (Phases en défaut)}$$

❖ Traduction en grandeurs symétriques

$$V_d = V_i = V_h = \mathbf{0}$$

$$I_d = \frac{V_d^P}{Z_d}$$

$$I_i = I_h = \mathbf{0}$$

❖ Valeur du courant de défaut triphasé :

$$I_{mcc} = I_{3\phi cc} = I_d = \frac{V_d^P}{Z_d} \tag{I.9}$$

❖ Retour aux grandeurs de phase

$$V_a = V_b = V_c = \mathbf{0}$$

$$\begin{cases} I_a = \frac{V_d^P}{Z_d} \\ I_b = a^2 \frac{V_d^P}{Z_d} \\ I_c = a \frac{V_d^P}{Z_d} \end{cases} \tag{I.10}$$

I.6.2. Défaut biphasé isolé :

La fig.I.9 représente le schéma de court-circuit biphasé isolé, alors que la fig.I.10 indique leur schéma de séquence :

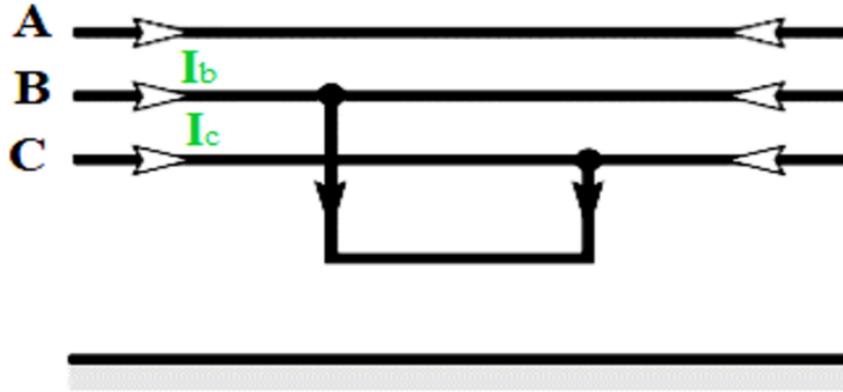


Fig.I.9. Schéma de court-circuit biphasé isolé.

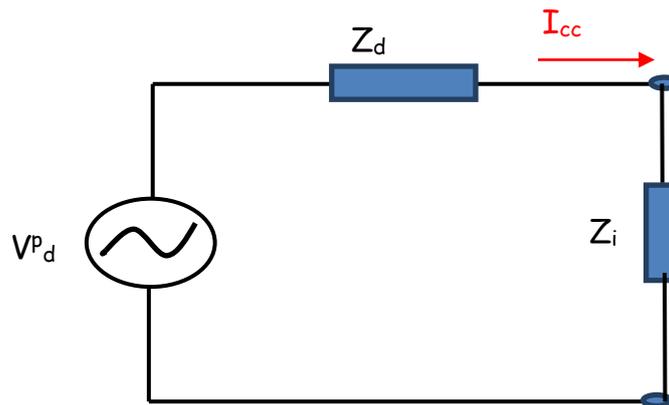


Fig.I.10. Schéma de séquence pour un défaut biphasé isolé.

❖ Expression du défaut

$$V_b = V_c, V_{bc} = 0 \text{ et } I_a = 0 \text{ (Phase sain)}$$

$$I_b = -I_c \text{ (Phases en et défaut)}$$

❖ Traduction en grandeurs symétriques

$$V_{bc} = V_{bn} = V_{nc}$$

$$V_{bc} = (a^2 \cdot V_d + a \cdot V_i + V_h) - (a \cdot V_d + a^2 \cdot V_i + V_h) = 0$$

$$V_{bc} = (a^2 - a) \cdot V_d + (a - a^2) \cdot V_i + (1 - 1)V_h = 0$$

$$\rightarrow (a^2 - a) \cdot V_d = -(a - a^2) \cdot V_i \rightarrow V_d = V_i \tag{I.11}$$

Implique que :

$$\begin{aligned}
 V_d^P - Z_d \cdot I_d &= -Z_i \cdot I_i \\
 \begin{cases} I_d = \frac{1}{3} (a^2 \cdot I_c + a \cdot I_b + I_a) = \frac{1}{3} (a - a^2) \cdot I_b = j \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} I_b \\ I_i = \frac{1}{3} (a \cdot I_c + a^2 \cdot I_b + I_a) = \frac{1}{3} (a^2 - a) \cdot I_b = -j \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} I_b \\ I_h = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c) = 0 \end{cases} & \quad (I.12)
 \end{aligned}$$

Donc :

$$I_d = -I_i$$

Alors que :

$$\begin{aligned}
 V_d^P - Z_d \cdot I_d &= -Z_i \cdot I_i \\
 I_d = \frac{V_d^P}{Z_d + Z_i} & \quad (I.13)
 \end{aligned}$$

❖ Retour aux grandeurs de la phase :

$$\begin{cases} I_a = 0 \\ I_b = -j \cdot \sqrt{3} \frac{V_d^P}{Z_d + Z_i} \\ I_c = j \cdot \sqrt{3} \frac{V_d^P}{Z_d + Z_i} \end{cases} \quad (I.14)$$

I.6.3. Défaut biphasé à la terre :

La fig.I.11 représente le schéma de court-circuit biphasé à la terre, alors que la fig.I.12 indique leur schéma de séquence :

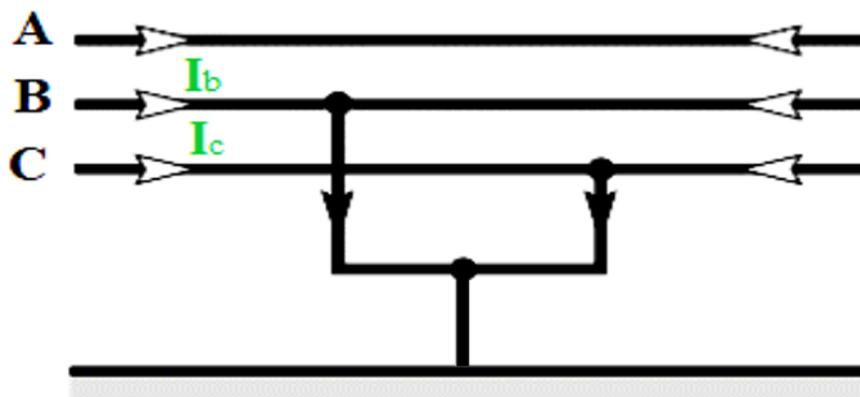


Fig.I.11. Schéma de court-circuit biphasé à la terre.

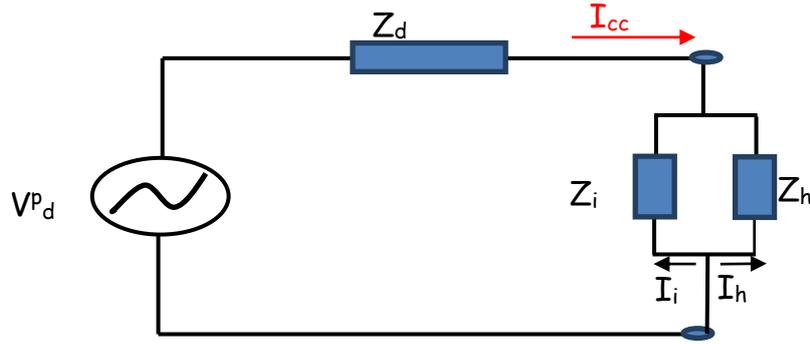


Fig.I.12. Schéma de séquence pour un défaut biphase à la terre.

❖ Expression du défaut

$$V_b = V_c = 0, I_b = -I_c \text{ (Phases en défaut)}$$

$$I_a = 0 \text{ (Phase sain)}$$

❖ Traduction en grandeurs symétriques

$$\begin{cases} V_d = \frac{1}{3} (a^2 \cdot V_c + a \cdot V_b + V_a) = \frac{1}{3} \cdot V_a \\ V_i = \frac{1}{3} (a \cdot V_c + a^2 \cdot V_b + V_a) = \frac{1}{3} \cdot V_a \\ V_h = \frac{1}{3} (V_a + V_b + V_c) = \frac{1}{3} \cdot V_a \end{cases} \quad (\text{I.15})$$

$$\text{Donc : } V_d = V_i = V_h$$

Alors :

$$\begin{cases} I_i = -\frac{V_i}{Z_i} = -\frac{V_d}{Z_d} = -\frac{V_h}{Z_h} \\ I_h = -\frac{V_h}{Z_h} = -\frac{V_d}{Z_d} = -\frac{V_i}{Z_i} \end{cases}$$

Donc :

$$\begin{cases} I_i = -\frac{(V_d^p - Z_d \cdot I_d)}{Z_i} \\ I_h = -\frac{(V_d^p - Z_d \cdot I_d)}{Z_h} \end{cases} \quad (\text{I.16})$$

$$I_a = I_d + I_i + I_h = 0$$

On trouve que :

$$\begin{cases} I_d = \frac{V_d^p (Z_i + Z_h)}{Z_d Z_i + Z_d Z_h + Z_i Z_h} \\ I_i = \frac{V_d^p Z_h}{Z_d Z_i + Z_d Z_h + Z_i Z_h} \\ I_h = \frac{V_d^p Z_i}{Z_d Z_i + Z_d Z_h + Z_i Z_h} \end{cases} \quad (\text{I.17})$$

Retour aux grandeurs de la phase on trouve :

$$\begin{cases} I_b = \frac{1}{3} (a^2 \cdot I_d + a \cdot I_i + I_h) = \frac{\sqrt{3} \cdot V_d^P \cdot (Z_h^{<-90^\circ} + Z_i^{<-150^\circ})}{Z_d Z_i + Z_d \cdot Z_h + Z_i Z_h} \\ I_c = \frac{1}{3} (a \cdot I_d + a^2 \cdot I_i + I_h) = \frac{\sqrt{3} \cdot V_d^P \cdot (Z_h^{<+90^\circ} + Z_i^{<+150^\circ})}{Z_d Z_i + Z_d \cdot Z_h + Z_i Z_h} \end{cases} \quad (I.18)$$

Et le courant dans le neutre est :

$$I_n = I_b + I_c = \left| \frac{3 \cdot V_d^P}{Z_d Z_i + Z_d \cdot Z_h + Z_i Z_h} \right| \quad (I.19)$$

I.6.4. Défaut entre phase et la terre :

La fig.I.13 représente le schéma de court-circuit monophasé (entre phase et terre), alors que la fig.I.14 indique leur schéma de séquence :

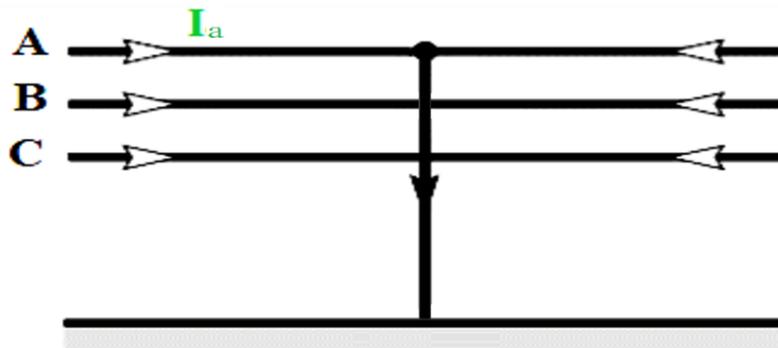


Fig.I.13. Schéma de court-circuit monophasé à la terre.

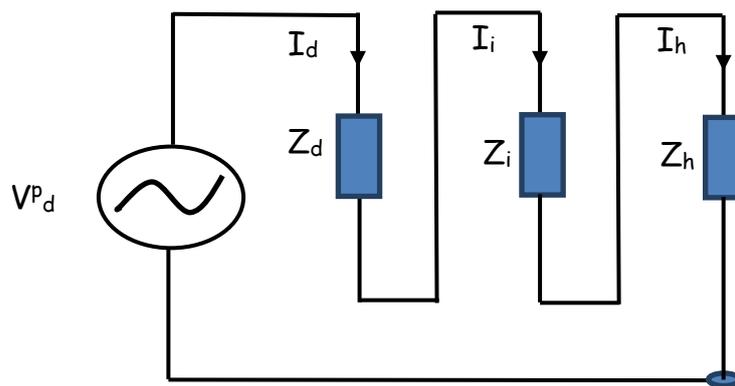


Fig.I.14. Schéma de séquence pour un défaut monophasé à la terre.

❖ Expression du défaut

$V_a = 0$, (Phases en défaut)

$I_c = I_b = 0$, (Phases saines)

❖ Traduction en grandeurs symétriques

$$V_d = V_i = V_h \quad \text{et} \quad I_d = I_i = I_h$$

Alors :

$$I_d = I_i = I_h = \frac{V_d^P}{Z_d + Z_i + Z_h} \quad (\text{I.20})$$

$$\begin{cases} V_d = \frac{Z_i + Z_h}{Z_d + Z_i + Z_h} \\ V_i = \frac{Z_i}{Z_d + Z_i + Z_h} \\ V_h = -\frac{Z_i + Z_h}{Z_d + Z_i + Z_h} \end{cases} \quad (\text{I.21})$$

❖ Retour aux grandeurs de phase

$$\begin{cases} V_a = 0 \\ V_b = \frac{(a^2 - a) \cdot Z_i + (a^2 - 1) Z_h}{Z_d + Z_i + Z_h} \cdot V_d^P \\ V_c = \frac{(a - a^2) \cdot Z_i + (a - 1) Z_h}{Z_d + Z_i + Z_h} \cdot V_d^P \end{cases} \quad (\text{I.22})$$

$$\begin{cases} I_a = \frac{3 \cdot V_d^P}{Z_d + Z_i + Z_h} \\ I_b = I_c = 0 \end{cases} \quad (\text{I.23})$$

I.6.5. Défaut entre phase et la terre à travers une impédance ($Z_h \neq 0$) :

La fig.I.15 représente le schéma de court-circuit monophasé à travers une impédance non nulle, alors que la fig.I.16 indique leur schéma de séquence :

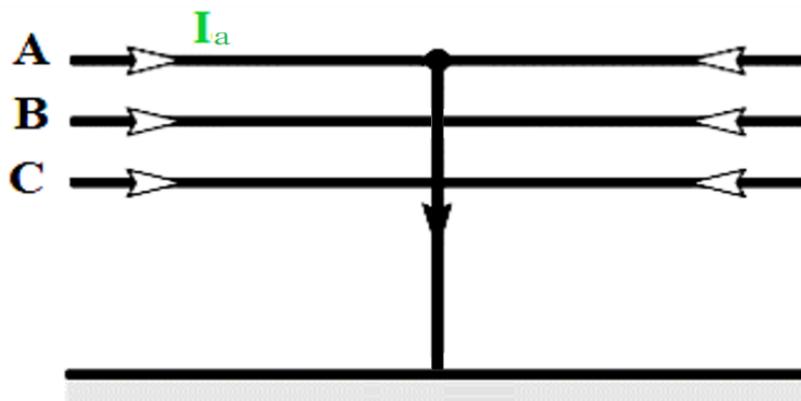


Fig.I.15. Schéma de court-circuit monophasé à travers une impédance non nulle.

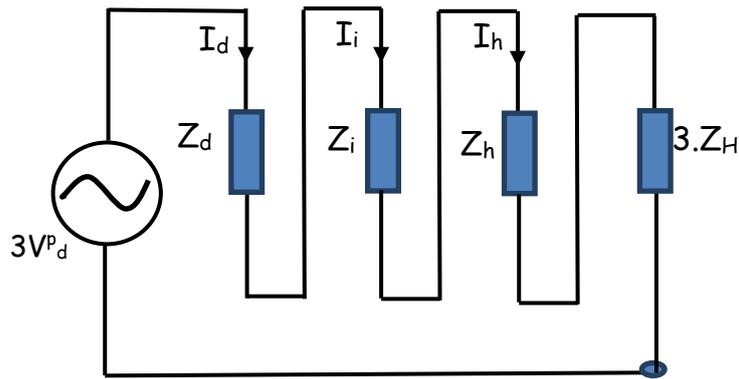


Fig.I.16. Schéma de séquence pour un défaut monophasé à travers une impédance non nulle.

Dans ce cas la tension au point du défaut n'est pas nulle.

❖ Expression du défaut

$V_a \neq 0$, (Phases en défaut)

$I_b = I_c = 0$, (Phases saines)

❖ Traduction en grandeurs symétriques

$$\begin{cases} I_d = \frac{1}{3} (a^2 \cdot I_c + a \cdot I_b + I_a) = \frac{1}{3} \cdot I_a \\ I_i = \frac{1}{3} (a \cdot I_c + a^2 \cdot I_b + I_a) = \frac{1}{3} \cdot I_a \\ I_h = \frac{1}{3} (a^2 \cdot I_c + a \cdot I_b + I_a) = \frac{1}{3} \cdot I_a \end{cases} \quad (\text{I.24})$$

$$I_d = I_i = I_h$$

Avec :

$$V_a = V_d + V_i + V_h = Z_H \cdot I_a$$

$$V_d = -(V_i + V_h) + Z_H \cdot I_a$$

Soit donc :

$$V_d^P - Z_d \cdot I_a = \frac{1}{3} \cdot Z_h \cdot I_a + \frac{1}{3} \cdot Z_i \cdot I_a + \frac{1}{3} \cdot Z_H \cdot I_a \quad (\text{I.25})$$

❖ Retour aux grandeurs de phase :

$$I_a = \frac{3 \cdot V_d^P}{Z_d + Z_i + Z_h + 3 \cdot Z_H} \quad (\text{I.26})$$

I.7. Conclusion :

Ce chapitre présente l'importance de l'étude et l'analyse de court-circuit, leurs origines, caractéristiques, et conséquences. Le calcul des courants de court-circuit donne une vue d'ensemble des composants des systèmes électriques et de protection en ce qui concerne leurs caractéristiques techniques, ainsi que leurs tailles et emplacements. Le chapitre explique également comment utiliser le système de composants symétriques (direct, inverse et homopolaire) pour analyser les différents types de courts circuits.

Un algorithme de calcul simple et efficace pour les courants de court-circuit peut être développé. Cet algorithme est de but de développer un code sous l'environnement MATLAB pour étudier d'autres phénomènes liés de ce problème de court-circuit.

Ce chapitre examine la technologie de limiteur de courant de défaut supraconducteur et décrit les efforts en cours pour les utiliser dans les réseaux électriques. Cette partie de mémoire est considérée comme une brève introduction sur les supraconducteurs ; alors il ne présente pas tous les aspects liés à la supraconductivité.

Le chapitre donne une description compréhensive de la méthode importante que le supraconducteur peut influencer sur les réseaux électriques. Il introduit les points fondamentaux et les notions de base des supraconducteurs comme : c'est quoi un supraconducteur ? Leur propriétés fondamentales (température critique, résistance nulle, effet Meisner et densité de courant critique...etc.), ainsi que leur classification et applications en électrotechnique.

Il discute aussi, les différentes applications des matériaux supraconducteurs au domaine d'électrotechnique

II.1. Définition :

Un supraconducteur est un matériau qui perd sa résistance électrique lorsqu'il est refroidi en dessous d'une température caractéristique appelée température critique. De nombreux éléments, alliages et composés sont supraconducteurs. Cet état de résistivité nulle s'appelle l'état supraconducteur. Un supraconducteur a non seulement cette propriété, mais aussi un diamagnétisme parfait. C'est-à-dire que lorsqu'une densité de flux magnétique est appliquée à un supraconducteur, la densité de flux magnétique interne est nulle. Lorsque la température est supérieure à la température critique, le supraconducteur est dans un état normal et considéré comme conducteur avec une résistance non nulle. [18]

II.2. Historique de la supraconductivité : [6, 14, 15]

En 1911, Onnes, un physicien néerlandais, a été découvert la supraconductivité en refroidissant le mercure à une température extrêmement basse 4,2K (-452F, -269C) et en observant que celui-ci ne présentait aucune résistance au courant électrique. La Fig.II.1 illustre la relation entre la résistivité et la température dans le mercure.

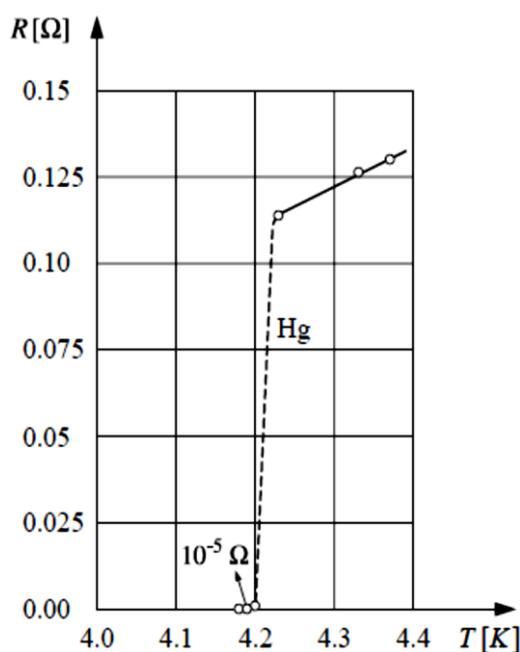


Fig.II.1. Résistivité et température critique dans le mercure.

Avant 1973, de nombreux autres métaux et alliages de métaux étaient supraconducteurs à des températures inférieures à 23,2K. Celles-ci sont désormais connues sous le nom de matériaux supraconducteurs à basse température. Depuis les années 1960, un alliage Niobium-Titane (Ni-Ti) est le matériau de choix pour les aimants supraconducteurs du commerce. Plus récemment, un matériau intermétallique fragile au Niobium-Étain est apparu comme une excellente alternative pour obtenir une intensité de champ magnétique encore plus élevée. En 1986, J. G. Bednorz et K. A. Müller ont découvert des matériaux céramiques à base d'oxydes présentant des propriétés supraconductrices pouvant aller jusqu'à 35K. Ceci a été rapidement suivi au début de 1997 par l'annonce par C. W. Chu d'un supraconducteur en Cuprate fonctionnant au-dessus de 77K, point d'ébullition de l'azote liquide. Depuis lors, des recherches approfondies dans le monde entier ont permis de découvrir de nombreux autres supraconducteurs à base d'oxydes offrant des avantages potentiels en termes de fabricabilité et des températures critiques pouvant atteindre 135K. Un matériau supraconducteur ayant une température critique supérieure à 23,2K est connu sous le nom de supraconducteur à haute température, malgré le besoin permanent de réfrigération cryogénique pour toute application.

II.3. Propriétés des supraconducteurs :

II.3.1. Résistivité nulle :

Cette propriété revêt une importance primordiale, car elle ouvre une opportunité décisive pour l'efficacité du réseau électrique en éliminant la perte Joule d' I^2R , le fléau des équipements électriques conventionnels. Il faut s'empresse d'ajouter que les supraconducteurs génèrent des pertes en présence de courants alternatifs, bien qu'avec une conception appropriée, ces pertes puissent être minimisées. De plus, le phénomène de fluage de flux (flux creep) génère une faible tension dans le supraconducteur de haute température, même en DC, mais moins dans la plage de température de l'azote liquide, cet effet est si faible que la faible résistance résultante a toujours une valeur considérable. [5]

Il existe un deuxième impact majeur et pratique lié à la faible résistance qui est parfois négligé. La faible résistance permet une densité de courant supraconducteur énorme (plusieurs MA/cm²), des ordres des amplitudes supérieurs à ceux tolérables pour le cuivre, qui peut affecter par le chauffage I^2R . La densité de courant élevée permet de concevoir des systèmes plus compacts que les systèmes conventionnels correspondants, ce qui permet des câbles de plus grande capacité, des transformateurs à plus faible inductance et des équipements tournants plus denses en puissance. Partout où la taille et le poids sont critiques, les équipements supraconducteurs présentent un avantage significatif. [5, 9]

II.3.2. Effet Meissner et Ochsensfeld ou diamagnétisme parfait :

En 1933, Walter Meissner et Robert Ochsenfeld ont découvert un phénomène magnétique qui montrait que les supraconducteurs ne sont pas simplement des conducteurs parfaits. La Fig.II.2 illustre une expérience qui met en évidence cette différence. Imaginons que le conducteur idéal et le supraconducteur soient au-dessus de leur température critique, T_c . Autrement dit, ils sont tous deux dans un état conducteur normal et ont une résistance électrique. Un champ magnétique, \mathbf{B} , est ensuite appliqué. Le résultat est que le champ pénètre les deux matériaux. Les deux échantillons sont ensuite refroidis pour que le conducteur idéal ait maintenant une résistance nulle. On constate que le supraconducteur expulse le champ magnétique de l'intérieur, tandis que le conducteur idéal conserve son champ intérieur. Notez que le supraconducteur a besoin d'énergie pour expulser le champ magnétique. Cette énergie provient de la transition supraconductrice exothermique.

La disparition du champ magnétique induit des courants dans le conducteur idéal qui empêchent les modifications du champ magnétique à l'intérieur de celui-ci selon la loi de Lenz. Cependant,

le supraconducteur revient à son état initial, c'est-à-dire qu'il n'ya pas de champ magnétique à l'intérieur ou à l'extérieur de celui-ci. [8, 9]

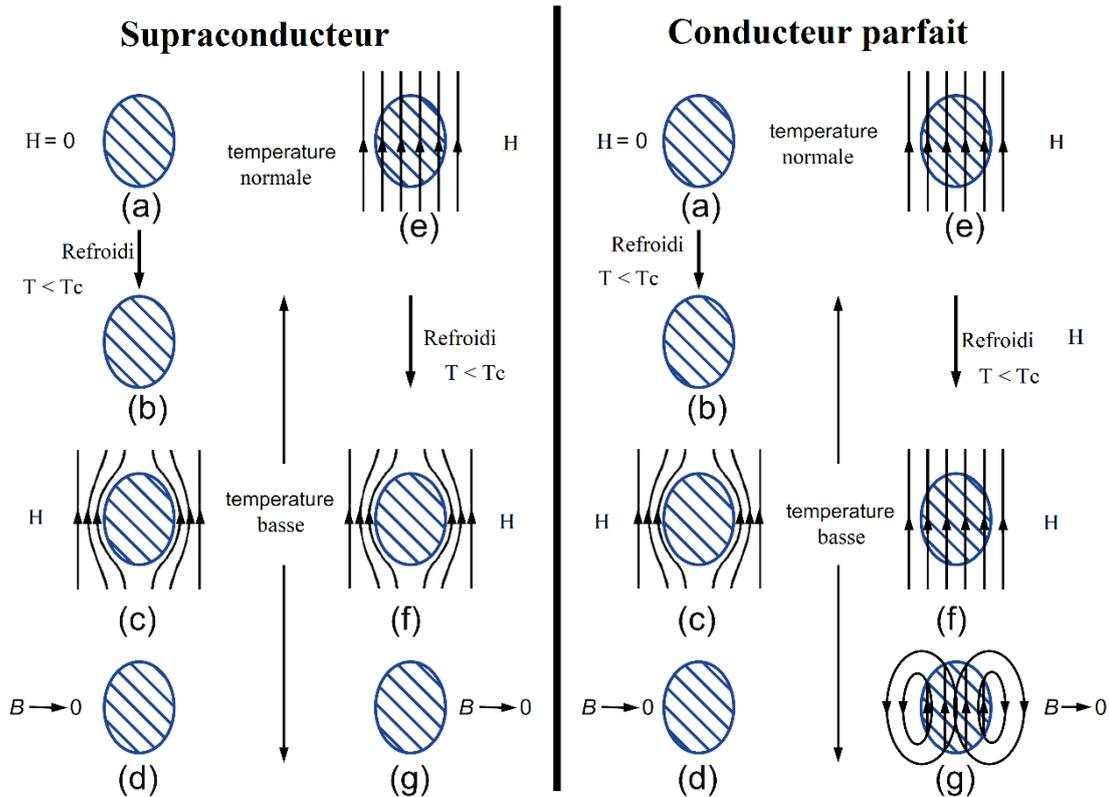


Fig.II.2. Comparaison de la réponse d'un conducteur parfait et d'un supraconducteur, à un champ magnétique appliqué.

Cette effet s'agit de l'expulsion de toute induction magnétique de l'intérieur du supraconducteur sauf sur une très fine épaisseur, λ_L ($\approx 10^{-7}$ - 10^{-8} m), appelée longueur de London, à la surface du métal. 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 tous points inférieurs à leur valeur critique $T < T_c$ et $H < H_c$. L'épaisseur λ_L augmente avec la température de manière que pour T proche de T_c , λ_L tend vers l'infini. Ainsi pour T supérieur à T_c le comportement est non magnétique (aimantation nulle), par contre pour T inférieur à T_c il est parfaitement diamagnétique (aimantation négative) si le champ magnétique extérieur n'est pas très élevé. Pour des fréquences élevées, en infrarouge (10^{12} ... 10^{14} Hz), le métal devient non supraconducteur même pour des températures très basses, ($T < T_c$). Les théories classiques qui expliquent ces propriétés sont basées sur les équations de Maxwell London. [9]

II.4. Classification des supraconducteurs :

L'état supraconducteur non dissipatif est conditionné par trois grandeurs, appelées grandeurs critiques, au-delà desquelles le matériau passe dans un état fortement dissipatif. Il s'agit de la densité de courant critique J_c , de la température critique T_c et du champ magnétique critique H_c .

Ces trois grandeurs sont fonction les unes des autres et forment ainsi une surface critique (Fig.II.3.) au-delà de laquelle le matériau cesse d'être non dissipatif. [5, 9]

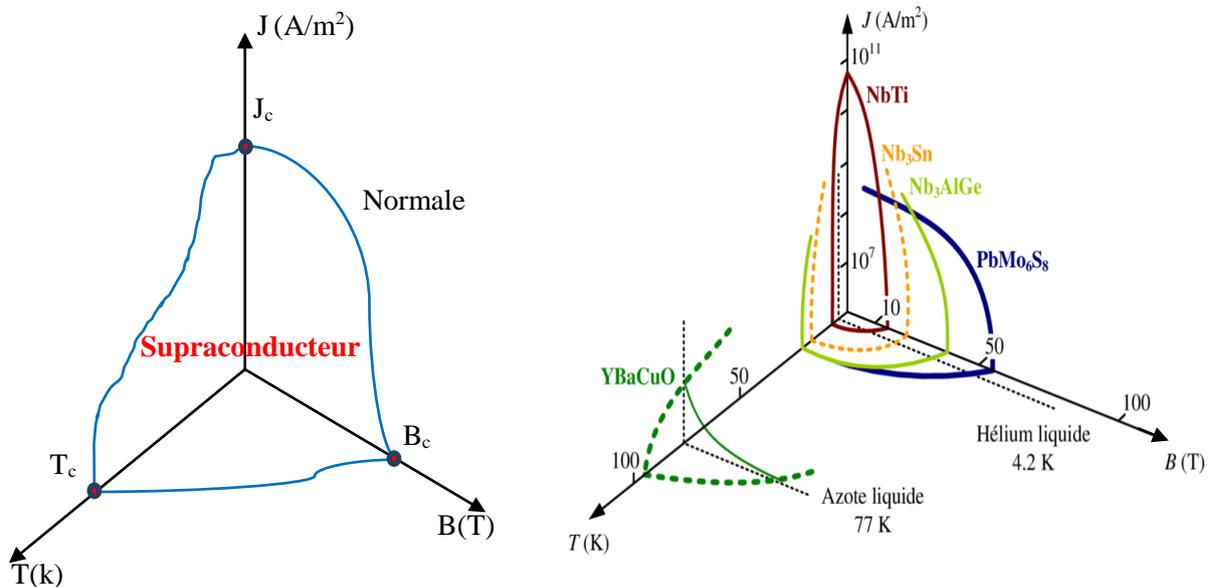


Fig.II.3. Surface critique et ordres de grandeur de quelques Supraconducteurs

Tous les éléments purs supraconducteur sont de type I sauf le niobium and vanadium. Alors que, les alliages, les composés chimiques et les oxydes avec haute température critique sont de type II. A cause de la très faible valeur de champ critique B_c , les supraconducteurs de type I ne sont pas utilisé comme limiteur de courant de défaut. Au contraire, la valeur élevée de B_{c2} des supraconducteurs de type II permet leurs utilisations pour limitation de courant de court-circuit.

II.4.1. Supraconducteurs de type I :

Ces types de supraconducteur ne possèdent qu'un seul champ critique H_c . Le champ magnétique développe des super-courants à cause de leur pénétration sur une épaisseur appelée Longueur de pénétration. Le comportement des supraconducteurs de type I est plus simple avec l'existence de deux états. La valeur élevée de la résistance du matériau supraconducteur

correspond à l'état normal de ce dernier. Alors que, l'état supraconducteur correspond à un diamagnétisme presque parfait. Dans un supraconducteur de type I, la supraconductivité s'annule abruptement à une valeur critique H_c du champ. Ce champ est toujours petit, avec $\mu_0 H_c$ pas plus de 0,1 tesla. La Fig.II.4 représente la caractéristique $B(H)$ d'un supraconducteur du type I. [8, 9]

Ce type des supraconducteurs n'ont aucune application industrielle à l'heure actuelle.

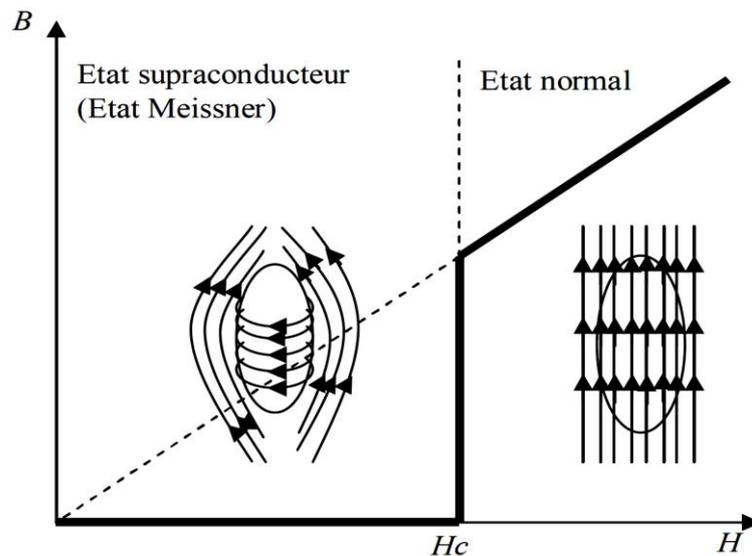


Fig.II.4. Caractéristique $B(H)$ d'un supraconducteur de type I.

II.4.2. Supraconducteurs de type II : [8, 9, 15]

Contrairement aux supraconducteurs de type I, le diagramme de phase des supraconducteurs de type II est caractérisé par deux lignes de transition $H_{c1}(T)$ et $H_{c2}(T)$ (H_{c2} peut atteindre des dizaines de Teslas), se terminant à la même température de transition T_c dans un champ nul. Ces lignes divisent l'état supraconducteur en deux régions, correspondant à deux phases distinctes appelées «phase MEISSNER» et «phase SHUBNIKOV» (également appelée «état mixte»).

Dans la phase MEISSNER ($H < H_{c1}$), la magnétisation M est égale à $-H$, comme dans un supraconducteur de type I. Le matériau se comporte comme un diamagnétique parfait et le champ magnétique est totalement exclu du volume ($B = 0$), sauf dans une profondeur de pénétration de la surface.

Dans la phase de SHUBNIKOV ($H_{c1} < H < H_{c2}$), le supraconducteur reste diamagnétique mais ne l'est plus parfait. La magnétisation moyenne de l'échantillon ($-M$) diminue avec H , l'effet

MEISSNER est incomplet et le champ magnétique moyenné sur l'ensemble de l'échantillon diffère de zéro ($B \neq 0$).

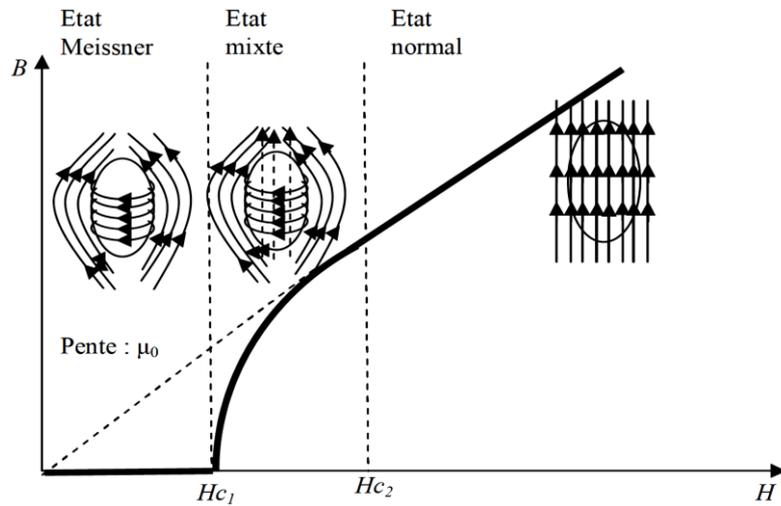


Fig.II.5. Caractéristique $B(H)$ d'un supraconducteur de type II.

L'état mixte se présente comme un ensemble de cœurs à l'état normal qui emplissent le matériau supraconducteur à partir de H_{c1} (Fig.II.6), chacun contenant un quantum de flux ($2,07 \times 10^{-15}$ weber) et entouré d'un vortex de courants supraconducteurs (Fig.II.7). Lorsque le champ magnétique augmente, le réseau se densifie jusqu'à combler complètement le matériau supraconducteur à H_{c2} . A partir de cette valeur ($H > H_{c2}$), le flux magnétique pénètre complètement et toute la supraconductivité disparaît. La résistivité à l'état normal est élevée devant celle des conducteurs classiques. [9]

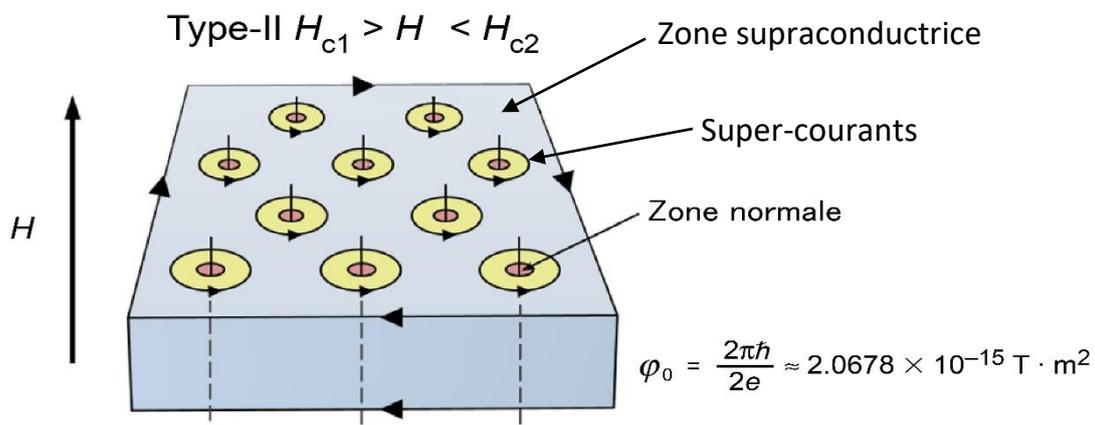


Fig.II.6. Distribution des vortex dans un supraconducteur.

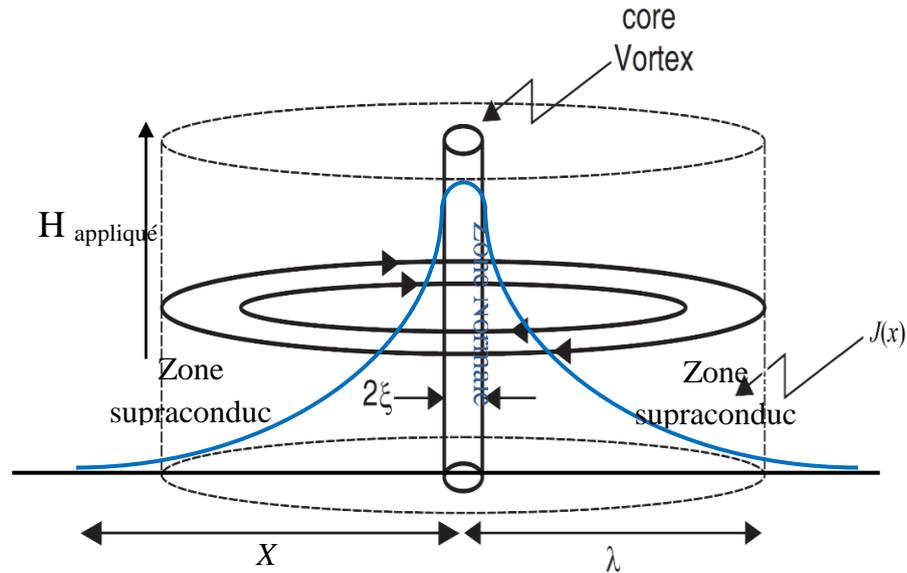


Fig.II.7. Vortex dans un supraconducteur.

Le rayon du vortex est d'ordre λ et ; parce que λ est beaucoup plus grand que ζ dans les matériaux supraconducteurs, le vortex actuel provient d'une énergie de surface positive avec l'échelle de longueur correspondante λ et d'une énergie de surface négative avec l'échelle de longueur correspondante ζ . Le champ magnétique externe appliqué pénètre dans la majeure partie du supraconducteur sous la forme d'une ligne de flux portant un quantum de flux, qui est maintenu par un courant persistant circulant J . De plus, le champ magnétique créé par le courant persistant J s'étend sur un rayon λ . En outre, le noyau normal s'étend sur un rayon ζ , le trou dans le nombre n d'électrons supraconducteurs s'étendant également sur un rayon ζ qui s'étendant bien au-delà du petit noyau normal. La valeur du flux magnétique alimentant le cœur normal est quantifiée en unités discrètes données par $\Phi_0 \approx 2,07 \times 10^{-7}$ G.cm.

L'effet Meissner et l'état mixte sont les propriétés fondamentales des matériaux supraconducteurs type II. Ils jouent un rôle très important aux applications de ce type de matériau supraconducteur. Les lignes de flux n'ont pas été expulsées totalement dans un supraconducteur de type II. Les courants circulent dans les zones supraconductrices se forment, et le champ magnétique peut pénétrer dans les zones de l'état (Fig.II.7). Les vortex sont les zones, où pénètre un flux magnétique, puisqu'ils sont les courants de type supraconducteurs qui circulent autour d'elles et stabilisent le champ magnétique.

L'état mixte d'un matériau de type II ne doit pas être confondu avec l'état intermédiaire, qui peut exister dans l'un ou l'autre type de supraconducteur. L'apparence de l'état intermédiaire dépend uniquement de la forme du corps supraconducteur et est causée par le champ démagnétisant qui modifie l'intensité du champ magnétique relatif dans l'ensemble de l'échantillon. L'état mélangé,

cependant, est une propriété intrinsèque d'un supraconducteur de type II et apparaît même si un corps n'a pas de facteur démagnétisant (par exemple, une tige longue et mince). L'état mixte apparaît dans les supraconducteurs de type II en raison de leur énergie de surface négative. En outre, la structure de l'état intermédiaire présente des caractéristiques et des dimensions très grossières qui peuvent être visibles à l'œil. Les dimensions de l'état mixte ont une échelle beaucoup plus fine (largeur 10^{-5} cm). [9]

II.5. Caractéristiques du limiteur de courant supraconducteur et leur intégration dans le réseau électrique :

L'intégration d'un limiteur de courant supraconducteur dans un réseau électrique doit être planifiée avec l'utilisation des nombreux éléments. Ces éléments lient au niveau de protection et les caractéristiques de réseau en question, ci-dessous quelques éléments :

- La durée maximale du défaut en fonction de la valeur du courant limité et supporté par le limiteur.
- Le rapport X/R sur le réseau électrique en défaut.
- Les types et l'architectures et de supraconducteurs utilisés.
- Température critique de supraconducteur.
- La densité de courant critique le déclenchement du limiteur et des protections.
- La durée maximale de supraconducteur pour supporter le défaut pour la coordination avec les dispositifs de protection dans le réseau.

II.6. La relation E-J :

En ce qui concerne les propriétés électriques du matériau supraconducteur résistif, on utilise la relation $E-J$ non linéaire appelée aussi loi de puissance, ce que définir les matériaux supraconducteurs de type II : [3]

$$\rho_{LP}(J) = \frac{E_c}{J_c} \left(\frac{|J|}{J_c}\right)^{n-1} \quad (\text{II.1})$$

Pour calculer la résistance du matériau supraconducteur il faut connaître leur longueur et section avec la relation suivante :

$$R_{sup} = \rho_{LP}(J) \frac{l}{S} \quad (\text{II.2})$$

II.7. Applications des supraconducteurs en électrotechnique :

La technologie de supraconducteur pourrait profiter aux équipements auxiliaires pour le bon fonctionnement du réseau électrique ; Des exemples de telles applications sont le stockage d'énergie électromagnétique supraconducteur (SMES) et les limiteurs de courant de défaut. En plus d'améliorer l'efficacité du système, les supraconducteurs réduisent la taille et le poids des équipements. Les transformateurs sont les premiers candidats à l'emploi de la technologie Haute Température Supraconducteur car ils constituent l'équipement le plus utilisé dans un réseau électrique. La majeure partie de l'énergie est générée en courant alternatif à des tensions relativement basses et est utilisée à des tensions encore plus basses, mais la plus grande partie de l'énergie est transmise des points de production aux points de consommation à des tensions très élevées.

II.7.1. Limiteurs de courant : [4, 9]

Parmi les nombreux principes possibles du fonctionnement du limiteur de courant de défaut supraconducteur, le plus connu consiste à exploiter la grande résistance non linéaire qui se développe lorsque le courant dépasse le courant critique du supraconducteur, provoquant une transition supraconducteur résistif. Cette transition, instantanée sur l'échelle du temps alternatif, transforme un fil supraconducteur en résistance, limitant immédiatement le courant de défaut. Une configuration typique d'un limiteur de courant autonome consiste en un empilement des bobines supraconductrices à enroulement bifilaire. L'enroulement bifilaire (avec le sens du courant alternant d'une couche à l'autre) assure une faible inductance et donc une impédance de grille négligeable en fonctionnement normal. Les bobines supraconductrices peuvent être connectées en parallèle et en série de manière à répondre aux exigences de courant et de tension. Le module est immergé dans de l'azote liquide, qui peut être mis sous pression pour un fonctionnement sous haute tension. Le problème le plus difficile en matière de conception consiste à éviter la surchauffe et l'endommagement des bobines dans leur état résistif avant qu'un disjoncteur coupe le courant. Ces défis ont été relevés avec le lancement d'un certain nombre de démonstrations et de premières installations commerciales en Europe. Bien sûr, il existe de nombreux moyens de limiter le courant. Les disjoncteurs sont largement utilisés, mais prennent un temps fini pour agir et doivent eux-mêmes être protégés lorsque les courants de défaut sont trop élevés. Les fusibles sont les plus simples et les moins coûteux, mais la plupart nécessitent une intervention manuelle, car ils sont détruits à chaque événement, et la gestion de la haute tension n'est pas primordiale. Par rapport aux fusibles, les limiteurs du courant supraconducteur ont l'avantage de permettre une

réinitialisation relativement rapide une fois que les bobines supraconductrices ont refroidi. Des limiteurs de courant électroniques de puissance sont également en cours d'élaboration, mais les limiteurs de courant de défaut supraconducteurs ont l'avantage de pouvoir se déclencher automatiquement et sont sûrs, car ils répondent de manière quasi instantanée sans recourir à une activation électronique de puissance. L'ajout d'inducteurs dans le réseau peut réduire les courants de défaut, mais cela augmente la chute de tension et aggrave la stabilité du système et la récupération transitoire, tandis que les limiteurs de courant de défaut supraconducteurs peuvent être conçus avec une très faible inductance et une très faible chute de tension.

L'un des progrès les plus importants en matière de limitation du courant de défaut consiste à utiliser les fils supraconducteurs déjà intégrés dans les câbles et les transformateurs pour le design des câbles et des transformateurs limiteurs de courant. L'avantage de cette approche est qu'elle évite le recours à un équipement supplémentaire, le limiteur de courant de défaut autonome, et offre des fonctionnalités uniques.

Plusieurs travaux ont étudié les limiteurs supraconducteurs. Tel que, au laboratoire CNRSCRTBT/LEG, un limiteur de 1 kV a été réalisé. Le limiteur testé a montré l'intérêt de l'*YbaCuO* mono-domaine dans ce type d'application, et les performances peuvent encore être améliorées. Une étude sur les limiteurs de courant continu et une comparaison avec les limiteurs en courant alternatif a été établie.

II.7.2. Lignes de transport : [5]

Les lignes de transport composer de deux types essentiel quels sont les suivants :

A. Les câbles AC : ils sont les applications les plus avancées du réseau électrique supraconducteur, avec de nombreuses démonstrations réussies dans le monde entier et les premières installations véritablement commerciales et expecter dans la future proche. Ces câbles sont conçus pour une utilisation souterraine, reliant des sous-stations dans des environnements urbains ou suburbains.

La mise sous terrain, soit par des câbles conventionnels ou supraconducteurs, offre des avantages importants : une exposition moindre aux tempêtes ou aux attaques terroristes, ainsi qu'une réduction des perturbations dans les emprises et une esthétique améliorée. De plus, les câbles supraconducteurs présentent de nombreux avantages par rapport aux câbles conventionnels, notamment :

- 1. Capacité de puissance** : Grâce à la capacité de transport de courant élevée des fils supraconducteurs, ces câbles peuvent supporter des courants beaucoup plus importants, généralement de 2 - 4 kA, dans la même section que les câbles classiques de 1 kA. C'est leur avantage principal par rapport aux câbles conventionnels, ce qui permet d'augmenter la puissance sur le réseau électrique urbaine.
- 2. Facilité d'installation** : leur couche de blindage de bandes supraconductrices exploite la propriété de filtrage ou d'exclusion de flux des supraconducteurs et élimine les ondes électromagnétiques qui pourraient perturber les câbles de communication à proximité. Contrairement aux câbles conventionnels, les câbles supraconducteurs ne dégagent aucune chaleur dans leur environnement immédiat et pèsent beaucoup moins par unité de longueur que leurs homologues classiques. Ces propriétés permettent aux câbles supraconducteurs d'être installés beaucoup plus facilement et à moindre coût que les câbles conventionnels. Ils peuvent être placés à proximité d'autres câbles sans interférence ou, si nécessaire, ils peuvent être creusés profondément dans le sol. En revanche, pour assurer une dissipation adéquate de la chaleur, les câbles de grande puissance classiques doivent être situés près de la surface, souvent entourés de sable spécial thermiquement conducteur et à un mètre ou plus des infrastructures souterraines voisines. Les câbles supraconducteurs compacts peuvent également être installés ultérieurement dans les conduits existants, ce qui améliore considérablement la capacité de puissance.
- 3. Fonctionnement à basse tension** : La capacité de courant élevée du supraconducteur permet un fonctionnement à des tensions inférieures à celles des câbles en cuivre de calibre équivalent. En milieu urbain ou suburbain, il s'agit d'une sécurité majeure mais aussi d'un avantage, car les retards dans l'achat de câbles haute tension peuvent être très longs et coûteux.
- 4. Limitation du courant de défaut** : Une autre option importante dans la conception d'un câble supraconducteur consiste à introduire une fonctionnalité de limitation du courant de défaut directement dans le câble. Ceci est particulièrement utile, car il permet la liaison de poste à poste à la tension de distribution en milieu urbain, où les courants de défaut se rapprochent déjà de leur limite acceptable. Sans la fonction de limitation, ces liaisons réduiraient l'impédance résiduelle du réseau et augmenteraient dangereusement l'intensité des courants de défaut. Les liaisons de limitation de courant de défaut offrent de multiples avantages : elles fournissent des sources d'alimentation alternatives en cas de défaillance de l'alimentation haute tension de la sous-station. Parce que dans des nombreux réseaux urbains, des quartiers entiers dépendent d'une sous-station donnée, de telles liaisons entre sous-stations augmentent la fiabilité de l'alimentation électrique de quartier. Protéger de cette manière des actifs essentiels. La source

d'alimentation alternative permet également aux services publics de réduire le nombre de transformateurs supplémentaires installés dans chaque sous-station en cas de défaillance du transformateur.

5. **Faible impédance** : La faible impédance inductive des câbles supraconducteurs provient de leur compacité et du confinement étroit du champ magnétique dans la coque étroite entre le conducteur interne et la couche de blindage. Lorsque de tels câbles se trouvent en parallèle avec des câbles conventionnels dans un réseau, ils supporteront plus de charge et déchargeront un circuit classique autrement surchargé. En outre, lorsque ces câbles sont couplés à un dispositif disponible dans le commerce appelé régulateur de phase (PAR), la puissance transmise par le câble peut être contrôlée directement et de manière pratique. Les réseaux électriques sont des grands réseaux d'impédances à travers lesquels les flux de courant sont dictés par les lois de Kirchoff. Bien sûr, les flux de courant peuvent être changés brusquement en activant et désactivant les liens avec des disjoncteurs. Cependant, la combinaison supraconducteur / câble / PAR permet de composer les flux de courant avec un contrôle beaucoup plus précis. Ce serait une étape importante vers un réseau intelligent dans lequel les flux de courant pourraient être contrôlés par les opérateurs plutôt que simplement par les lois de Kirchoff. Un tel contrôle du flux de courant a été possible avec des systèmes électroniques de puissance, tels que l'UPFC, mais le système supraconducteur / câble / PAR promet d'être plus économique et fiable. Une faible impédance de câble est essentielle à cet égard, car elle permet un contrôle avec des ajustements d'angle de phase beaucoup plus petits et donc des PAR beaucoup moins coûteux. Ce nouveau concept de contrôle du flux de puissance a été proposé et modélisé mais n'a pas encore été testé sur le réseau.

6. **Augmentation de la longueur de charge capacitive** : Une limite des câbles souterrains conventionnels provient de la capacité entre le conducteur et le blindage et du courant dit de charge de ligne, qui doit circuler à chaque cycle de courant pour charger cette capacité. Etant donné que la capacité du câble est proportionnelle à sa longueur, cet effet fixe une limite, appelée longueur de charge capacitive, sur la longueur pratique sur laquelle le câble peut fonctionner, qui se situe dans la plage de 20 milles pour les circuits de 230 ou 345 kV et généralement plus courte pour les circuits avec des tensions inférieures. Les dimensions plus compactes des câbles supraconducteurs signifient une capacité plus faible et leur capacité en courant plus élevée permet de supporter des courants de charge de ligne plus élevés, ce qui conduit à des longueurs de charge capacitives considérablement plus longues et, partant, à la possibilité de longueurs de câbles souterraines considérablement plus longues entre les sous-stations. Bien que les systèmes de câbles AC supraconducteurs soient plus complexes et que

les câbles eux-mêmes coûtent plus cher au kilomètre que la dernière génération de câbles conventionnels.

7. Les câbles DC : En plus des applications de câbles AC, les câbles DC offrent des avantages importants dans plusieurs applications. L'un est le transport de plusieurs gigawatts d'énergie sur de longues distances, des sources d'énergie renouvelables aux centres de charge. Dans sa version la plus prestigieuse, ce concept a été appelé Super-grid, fournissant une redondance à l'ensemble de l'infrastructure électrique, permettant l'énergie d'une région de servir une autre si la source primaire locale est perturbée. L'élimination des pertes résistives dans les câbles DC Supraconducteur constitue un avantage majeur, mais elle doit être combinée à une excellente isolation thermique pour limiter les pertes thermiques. Comme pour les autres câbles souterrains, le droit de passage étroit obtenu en ensevelissant ces liens sous terre constitue un autre avantage majeur. Cela réduit les coûts d'acquisition et d'installation des terrains, évite les problèmes esthétiques et les risques pour la santé perçus, et augmente la sécurité contre les tempêtes et autres perturbations. Bien entendu, le câble DC longue distance doit concurrencer les lignes aériennes et DC aériennes longue distance, qui offrent une technologie à faible coût bien optimisée. Une autre application intéressante proposée pour les câbles DC Supraconducteur consiste à une liaison ultra-haute puissance entre des réseaux asynchrones. La liaison est faite avec des liaisons AC-DC-DC-AC afin de transporter l'énergie renouvelable d'une région à l'autre en réponse aux déséquilibres de l'offre et de la demande. Cela nécessitera plusieurs gigawatts de capacité, ce qui est réalisable en toute sécurité avec un câble DC Supraconducteur.

Bien que les câbles DC Supraconducteur semblent encore éloignés, les travaux de développement initiaux ont débuté avec une démonstration réussie de 200 m au Japon et des extensions prévues de 500 m et éventuellement de 2 km.

II.7.3. Les systèmes de stockage de l'énergie : [4, 5, 9]

Jusqu'en 2012 - 2014, l'un des premiers projets commerciaux de limiteur de courant supraconducteur aux États-Unis, le seul produit réellement commercial du supraconducteur pour le réseau électrique était un système SMES de Superconductivity Inc. et d'American Superconductor, qui résolvait les problèmes de qualité d'alimentation en compensant la tension creux et fléchissements. Le système utilisait un aimant de 2,6 MJ basé sur le LTS (fil *NbTi*) et plus de 10 unités ont été installées dans diverses applications aux États-Unis et dans le monde.

Cependant, la valeur de cette application a été assez controversée et American Superconductor a finalement renoncé à ce produit au profit d'un système électronique de puissance appelé D-VAR, un type de STATCOM qui utilise des transistors de puissance sans aucun stockage d'énergie pour la compensation réactive et qui est devenu un système leader mondial dans la compensation des creux et des baisses de tension.

Néanmoins, le développement des SMES se poursuit dans le monde entier, principalement axé sur les applications nécessitant des injections de puissance réelle. L'intérêt initial avait été porté sur le stockage d'énergie électrique journalier, ce qui nécessiterait des giga-joules de stockage d'énergie, mais l'énormité d'un tel projet et son coût en font une perspective improbable. Le stockage de l'énergie est un besoin intermédiaire qui aide à lisser la production d'énergie provenant de sources intermittentes, telles que l'énergie éolienne et solaire, et un projet est en cours aux États-Unis pour le développement de la technologie SMES.

En effet, le rendement d'un système supraconducteur de stockage d'énergie peut atteindre 97% alors que ce rendement ne dépasse pas 70% pour un système de barrage à pompe. Avec tous ces avantages, il faut noter que la densité volumique l'énergie stockée n'est pas très importante, $4kWh/m^3$ pour une valeur d'induction de 6 T.

Le contrôle des oscillations de fréquence est une autre application dans le réseau électrique. Il existe également des applications militaires intéressantes, telles que la fourniture de rafales d'énergie aux pistolets de chemin de fer. Etant donné que le stockage d'énergie est déterminé par $\int(B^2/2\mu_0)dV$, des champs élevés sont souhaitables. Dans ce cas, les champs critiques et d'irréversibilité élevés des matériaux supraconducteurs offrent un avantage indéniable.

Une autre application de la supraconductivité au stockage d'énergie concerne les volants d'inertie suspendus grâce aux propriétés de piégeage de flux des supraconducteurs. Dans l'ensemble, la commercialisation des supraconducteurs SMES est une perspective intéressante mais encore lointaine.

II.7.4. Les transformateurs : [5]

Les supraconducteurs peuvent aussi être utilisés dans des transformateurs en lieu et place des enroulements classiques en cuivre ou en aluminium permettant des gains intéressants, en poids et en volume. En effet, les études effectuées ont montré des performances remarquables de ce type de transformateurs, par rapport à un transformateur conventionnel, les pertes peuvent diminuer de

30 %, le volume de 50 % et le poids de 70 %. La société SIEMENS a réalisé et testé avec succès un transformateur de 1 MVA.

II.7.5. Les machines supraconductrices : [5]

Les moteurs et générateurs supraconducteurs constituent une opportunité importante pour les applications commerciales. Les grands générateurs basés sur des machines tournantes fournissent la majeure partie de l'énergie électrique au réseau. Moteurs supérieurs à 1000 chevaux, la gamme la plus avantageuse pour les applications supraconductrices. Les condensateurs synchrones dynamiques constituent une autre opportunité : il s'agit de générateurs sans source d'énergie mais pouvant fournir une puissance réactive permettant d'atténuer les creux et les baisses de tension dans le réseau. Aux États-Unis, des importantes démonstrations de grandes machines supraconductrices en rotation ont déjà été réalisées et la technologie semble prête pour une application commerciale.

La conception typique des machines à rotation synchrone supraconductrice implique un rotor avec des bobines supraconductrices fonctionnant sur une base quasi-continue et un stator avec des bobines de cuivre connectées au réseau. Des machines tout supraconductrices avec supraconducteur dans les bobines de rotor et de stator ont été proposées ; ceux-ci auraient d'autres avantages si un fil à perte alternative suffisamment faible était disponible. Malheureusement, les bobines de stator subissent des courants alternatifs et des champs magnétiques importants dans la plage de Tesla, ce qui générerait une perte de courant alternatif encore plus importante que dans les transformateurs de puissance, où les champs sont dans la plage de 0,1T ; par conséquent, le problème de l'obtention d'une faible perte AC dans les stators de machine tournante semble décourageant. Néanmoins, la conception «semi-supraconducteur» avec supraconducteur uniquement dans le rotor présente de nombreux avantages, notamment :

1. **Efficacité accrue**: du fait que les bobines de champ de stator fonctionnent essentiellement en courant continu, avec une petite ondulation dans la plupart des conceptions, leur perte en courant alternatif est faible et facilement gérée par des systèmes cryogéniques standard tels que les réfrigérateurs Gifford-McMahon, associés à une boucle d'hélium gazeux ou à un système thermosiphon système. avec l'élimination des pertes par résistances et courants des bobines de rotor en cuivre conventionnelles classiques, les machines supraconductrices réduisent les pertes totales de près de la moitié par rapport aux machines équivalente, conventionnelles. Cet avantage est encore amélioré en fonctionnement à charge partielle.

2. **Taille et poids réduits** : comme dans les câbles et les transformateurs, la densité de courant élevée des fils supraconducteurs permet des conceptions beaucoup plus compactes et légères que les machines conventionnelles. Par exemple, le moteur de propulsion de navire de 36,5 MW présenté pour la US Armée pesait un quart d'une machine conventionnelle en termes de manière équivalente, y compris tous les composants de base, tels que la réfrigération. À bord des navires de transport, de tels avantages en termes de taille et de poids sont évidemment importants, mais ils sont également utiles dans les centrales de production restreintes dans l'espace. Les générateurs supraconducteurs légers sont également essentiels pour obtenir de meilleures évaluations d'éoliennes en mer (offshore).
3. **Réduction des vibrations et du bruit** : cet avantage du supraconducteur provient à la fois de la taille réduite et de la suppression des couples de serrage provenant de la commutation magnétique des dents de stator en fer conventionnelles. Ceci est particulièrement important pour les applications sensibles.
4. **Durée de vie améliorée des bobines** : le cycle de charge thermique des bobines de cuivre, un mode de défaillance majeur des machines tournantes classiques, est éliminé dans les bobines refroidies des machines supraconductrices.
5. **Large plage de stabilité dynamique** : Les différents avantages des machines tournantes supraconductrices sont appliqués aux condensateurs dynamiques synchrones, qui peuvent injecter une puissance réactive dans le réseau pour compenser les diverses perturbations du réseau. La faible réactance synchrone de ces machines leur confère une large plage de stabilité dynamique. Alors qu'un système supraconducteur 8-MVAR a été testé de manière exhaustive et avec succès dans le réseau, la compensation des perturbations de tension provenant d'un four à arc dans une aciérie exige une compétitivité économique beaucoup plus grande qui n'a pas encore été construite.

II.7.6. Les aimants permanents supraconducteurs : [9]

La propriété remarquable des matériaux supraconducteurs de pouvoir piéger un champ magnétique, permet de concevoir des aimants permanents supraconducteurs. Un supraconducteur massif peut être utilisé comme aimant permanent. En refroidissant à champ nul, un supraconducteur à haute température critique, puis en l'exposant à une variation rapide du champ magnétique, il va piéger le champ magnétique. Le champ piégé dans le supraconducteur est lié à des courants induits par la loi de Lenz. Ces courants se développent comme dans un métal normal, à partir de la surface extérieure, mais contrairement aux matériaux résistifs, ils ne s'amortissent pas puisque la résistivité est nulle. Lorsque le champ extérieur diminue, la répartition des courants

change pour s'opposer à cette nouvelle variation et tendre à piéger l'induction. Pour que le supraconducteur piège efficacement le champ magnétique il faut que le champ extérieur atteigne une valeur appelée champ de pénétration H_p .

Les aimants permanents supraconducteurs présentent l'avantage de pouvoir fournir des valeurs de champ magnétique beaucoup plus importantes par rapport à celle fournie par les aimants permanents conventionnels, surtout à basses température. Cette propriété des supraconducteurs haute température critique peut être exploitée comme source de champ à la place des aimants permanents conventionnels qui sont limités en valeurs de champ. La réalisation des moteurs supraconducteurs avec des supraconducteurs haute température critique massifs comme pôles magnétiques dans une machine tournante à entrefer axial à l'université des sciences et de technologies marines de Tokyo en fait un bon exemple.

II.7.7. Lévitacion et paliers magnétiques : [9]

Les supraconducteurs de type II peuvent être utilisés pour réaliser la sustentation magnétique d'objets de masse éventuellement très élevée. L'une des applications la plus importante et la plus prometteuse dans ce domaine est la réalisation des trains à lévitation magnétique ou train Maglev (Magnetic Levitation). Le Maglev est équipé des boucles de matériaux supraconducteurs qui lui permettent de léviter sous l'action des aimants placés sur la voie. Le train ne touche donc pas les rails : il reste suspendu à quelques centimètres du sol. Ce dispositif présente de nombreux avantages, la plupart étant liée à l'absence de contact avec le sol : grande vitesse ou bien très grande vitesse (le train expérimental Japonais Yamanashi a pu atteindre la vitesse de 580 Km/h), sécurité (car le train ne peut, dans aucun cas, quitter son rail), véhicule peu bruyant (en raison de l'absence de bruits de frottement et de roulement), consommation d'énergie réduite grâce aux supraconducteurs et enfin une maintenance réduite.

La lévitation magnétique peut être aussi mise en œuvre dans des dispositifs afin de réaliser des paliers et des suspensions magnétiques. Le principe des paliers magnétiques est basé sur des interactions magnétiques. Ces interactions peuvent être générées par des électroaimants dans le cas des paliers actifs, ou par des aimants permanents dans le cas des paliers passifs. Ces derniers (paliers passifs) ne demandent pas de source d'énergie contrairement à leurs homologues actifs, Cette absence de source d'énergie extérieure pour faire fonctionner le dispositif est très intéressante en terme de pertes et de fiabilité.

Le théorème d'Earnshaw nous démontre qu'une suspension magnétique classique ne peut être entièrement passive sans la présence d'un matériau diamagnétique : un degré de liberté au minimum doit être contrôlé par un électroaimant dont le courant est asservi à la position. Cette obligation introduit des pertes (électroaimant et électronique) et des problèmes de sécurité et de fiabilité. Les matériaux supraconducteurs par leur propriété diamagnétique sont les seuls matériaux qui permettent des suspensions magnétiques performantes entièrement passives et naturellement stables (paliers passifs). L'effet Meissner (Effet diamagnétique) des matériaux supraconducteurs entraîne le phénomène de la lévitation magnétique, cependant, les supraconducteurs de type II permettent une lévitation nettement meilleure par rapport aux supraconducteurs de type I. La lévitation d'un supraconducteur de type I, n'est pas très performante. Elle est instable latéralement et seul une géométrie bien adaptée permet son stabilisation, alors que dans le cas des supraconducteurs de type II, l'état intermédiaire, essentiellement responsable pour la stabilité transversale du système, caractérisé par l'apparition des vortex ancrés qui agissent comme des ressorts de rappel. En effet, toute variation du champ magnétique appliqué entraîne un mouvement dissipatif des vortex et les pertes hystérétiques associées donnent naissance à des forces de rappel verticales ou latérales assurant ainsi, la stabilité du système en lévitation.

Les suspensions magnétiques avec supraconducteurs peuvent être de deux types : simple ou hybride. Dans le cas des structures simples, toutes les forces (verticales et transversales) sont générées par interaction aimant permanent-supraconducteurs mais les performances en lévitation sont limitées. La configuration hybride est constituée par une judicieuse association de paliers à aimants permanents et de paliers supraconducteurs dont le rôle est en outre de stabiliser les premiers. Les performances en lévitation, dans le cas de la structure hybride, sont meilleures.

II.8. Conclusion :

Dans ce chapitre, une description générale sur les supraconducteurs a été présentée ainsi que leurs classifications et propriétés fondamentales et essentielles (résistance zéro, effet Meisner, température critique, courant critique et champs critiques). Ces propriétés est la clé pour l'application des supraconducteurs en électrotechnique.

Plusieurs applications des supraconducteurs en électrotechnique a été cité dans ce chapitre : câbles à courant alternatif et continu, limiteurs du courant de défaut, transformateurs, machines tournantes, stockage d'énergie magnétique supraconducteur Les aimants permanents supraconducteurs et Lévitacion et paliers magnétiques. Dans l'ensemble, bien que des problèmes liés aux coûts, à la fiabilité et à la normalisation, les perspectives de commercialisation à grande échelle de cette technologie dans le domaine d'électricité sont de plus en plus prometteuses.

Ce chapitre est dédié à la simulation de la limitation du courant de court-circuit dans un réseau électrique de distribution à l'aide d'un limiteur de courant supraconducteur résistif de type II. Dans un premier temps, les résultats du calcul des différents types des courants de court-circuit dans un réseau triphasé sont largement présentés. Ceci est suivi par la présentation du comportement électrique du matériau supraconducteur supposé de type II où nous présentons l'influence de certains paramètres liés aux propriétés du supraconducteur, tel-que, la densité de courant traversant le limiteur de courant.

Les résultats des simulations sont obtenus à partir d'un code de calcul développé et implémenté sous environnement MATLAB. Pour le calcul du courant de court-circuit, les trois composantes du courant, direct, inverse et homopolaire sont prisent en compte. Aussi, un modèle monodimensionnel est développé où la loi de puissance a été adoptée pour décrire la relation qui liée la densité de courant J en champ électrique E .

III.1. Simulation du courant dans une ligne triphasée dans le régime nominale :

Dans la partie ci-dessous, nous présentons les résultats des simulations du courant circulant dans un réseau électrique dans son régime assigné. Le réseau modélisé est considéré comme ligne de distribution parfaitement symétrique avec les paramètres suivants :

Source : $E = 220 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$.

Lignes triphasé :

$$R_{L1} = R_{L2} = R_{L3} = 2 \Omega. \quad X_{L1} = X_{L2} = X_{L3} = 3.5 \Omega.$$

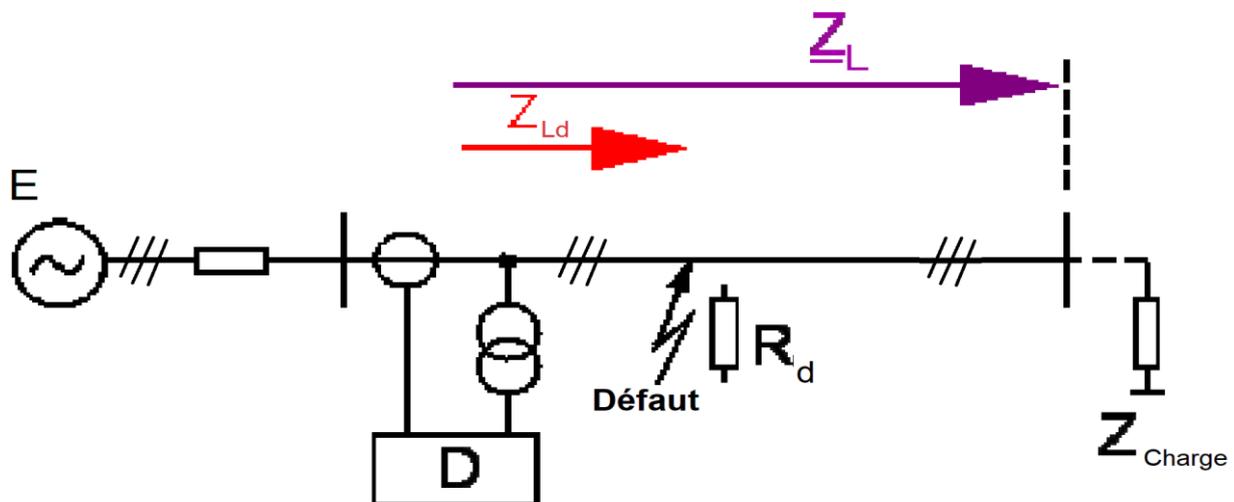


Fig.III.1. Schéma du réseau électrique modélisé.

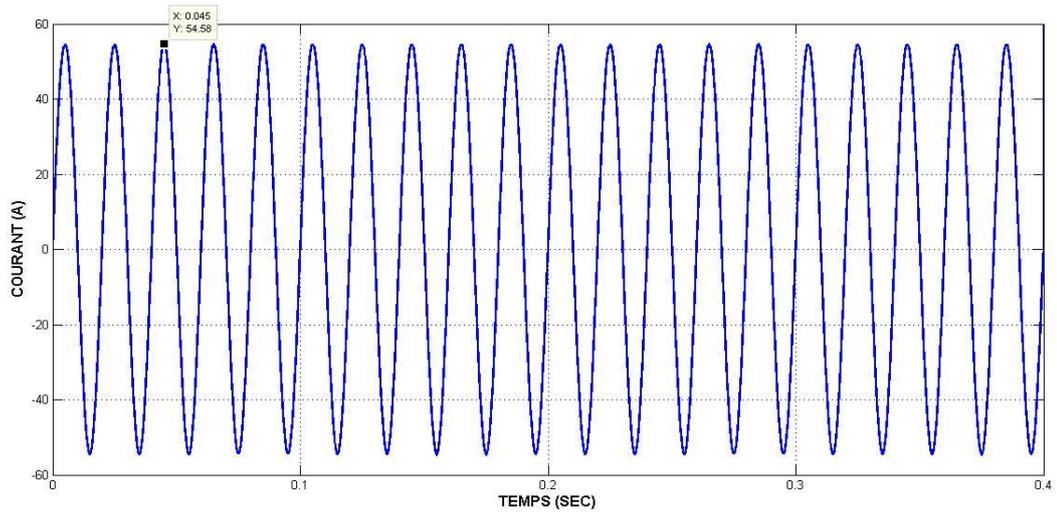


Fig.III.2. Courant de la première phase dans le régime nominal.

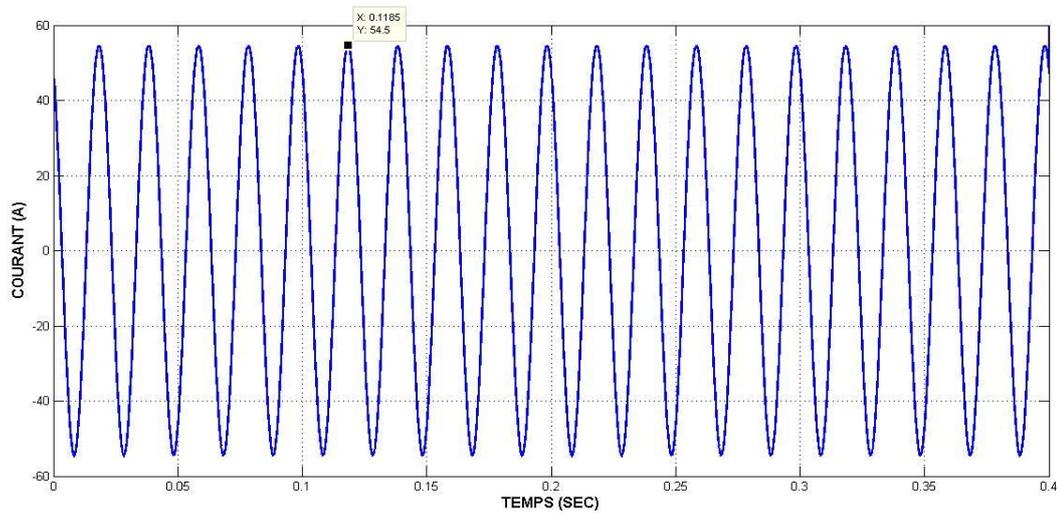


Fig.III.3. Courant de la deuxième phase dans le régime nominal.

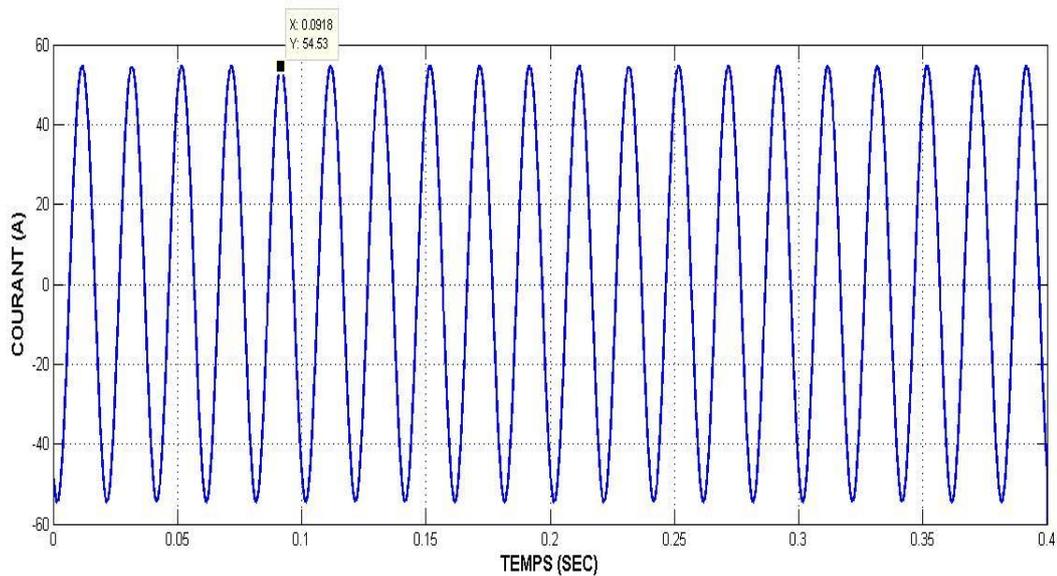


Fig.III.4. Courant de la troisième phase dans le régime nominal.

III.2. Simulation des courants de court-circuit :

Ci-dessous nous présentons les allures des courants du court-circuit où nous allons présenter les courants dans le cas d'un court-monophasé, biphasé et enfin dans le cas d'un court-circuit triphasé.

III.2.1. Court-circuit monophasé :

Dans cette simulation, un court-circuit monophasé a été réalisé entre la première phase et la terre. Ce court-circuit est déclenché à l'instant $t = 0.2s$. L'emplacement et les paramètres du court-circuit dans le réseau électrique sont choisis comme suit :

$$Z_d = Z_i = Z_o = Z_n = 0.000001 \Omega.$$

Dans le calcul du courant du court-circuit présenté, nous avons supposé que la phase 1 comporte le défaut et qui consiste à un court-circuit franc entre phase et terre. Le tableau (Tab.III.1.) résumé les valeurs maximales du courant dans chacune des phases concernées. Selon les résultats présentés, on constate que le courant maximal dans la phase 1 est considéré comme très important ou il atteint une valeur maximale de 1.16×10^6 soit un rapport de par rapport aux autres valeurs dans les autres phases :

Tableau III.1. Valeurs des courants maximales des trois phases (court- circuit monophasé)

Numéro de ligne	$I_{L1 \max}(A)$	$I_{L2 \max}(A)$	$I_{L3 \max}(A)$
Valeur du courant	$6,35 \times 10^7$	54,5	54,5

Les courants du court-circuit sont représentés dans les figures Fig.III.5-7. Selon les allures présentés on peut dire que le courant dans la phase 1 subit une grande fluctuation à partir de l'instant de l'apparition du défaut provoqué à $t = 0.2s$. Pour les autres phases, le courant ne semble pas être influé par la présence du défaut.

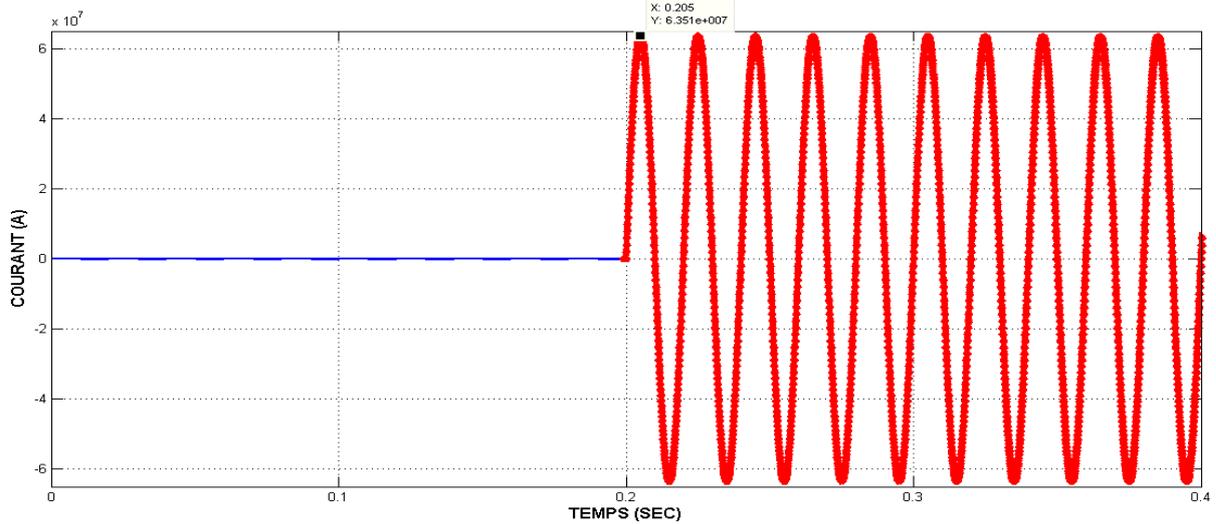


Fig.III.5. Courant de la première phase durant les deux régimes, assigné et au défaut dans le cas d'un défaut monophasé.

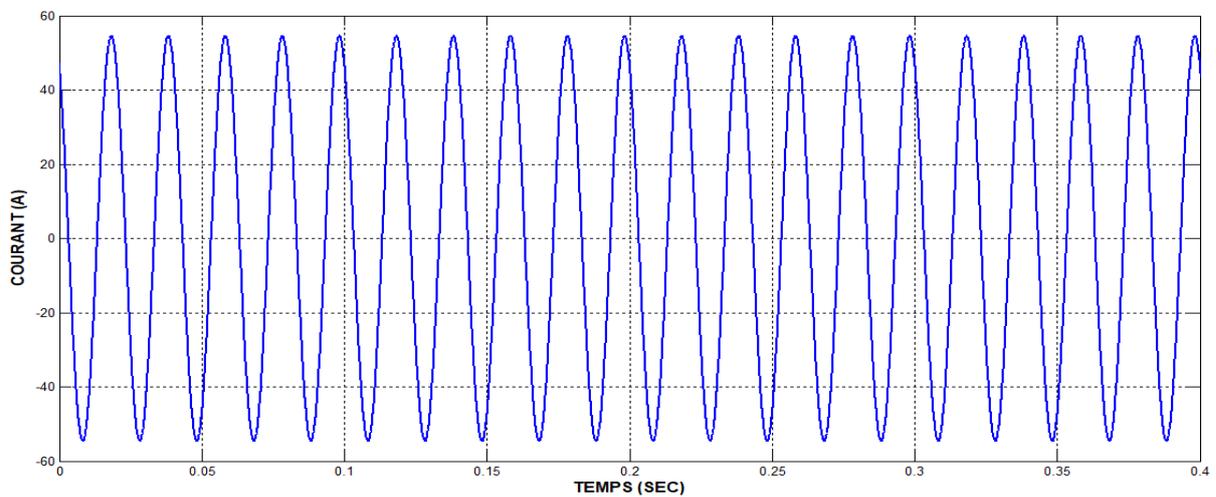


Fig.III.6. Courant de la deuxième phase durant les deux régimes, assigné et au défaut dans le cas d'un défaut monophasé.

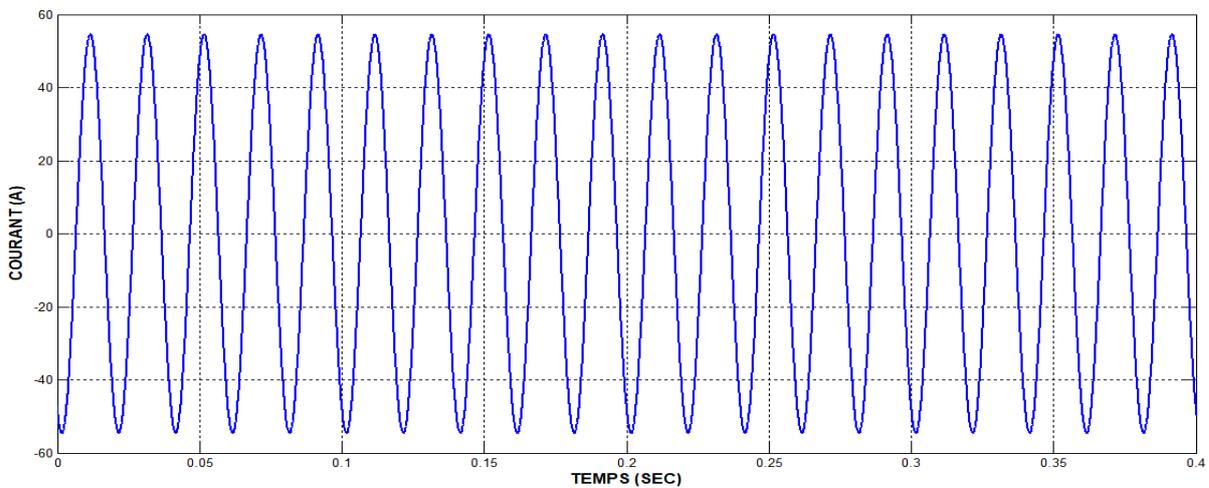


Fig.III.7. Courant de la troisième phase durant les deux régimes, assigné et au défaut dans le cas d'un défaut monophasé.

III.2.2. Court-circuit biphasé :

Dans cette partie nous présentons la simulation d'un court-circuit biphasé qui a été réalisée entre la première et la deuxième phase. Ce court-circuit est déclenché à l'instant $t = 0.2s$. L'emplacement et les paramètres de court-circuit sur ce réseau électrique choisis comme suit :

$$Z_d = Z_i = Z_o = Z_n = 0.000001 \Omega.$$

Le Tableau (Tab.III.2.) résume les valeurs maximales des courants du court-circuit biphasé dans chacune des phases concernées. Les phases 1 et 2 sont considérées comme phases qui sont concernées par le défaut et qui consiste soit à un court-circuit franc entre chaque phase et terre ou entre phase et phase. Selon les résultats présentés on peut dire que la valeur maximale du courant de court-circuit des deux phases affecté est la même où elle atteint une grande valeur estimé à $1,27 \times 10^8$ A soit un rapport de 2.33×10^6 par rapport à la valeur maximale du courant dans le régime assigné.

Tableau III.2. Valeurs maximales des courants des trois phases pour un court- circuit biphasé

Numéro de ligne	I _{L1} max(A)	I _{L2} max(A)	I _{L3} max(A)
Valeur du courant	$1,27 \times 10^8$	$1,27 \times 10^8$	54,5

Les courants au régime assigné et au régime du défaut pour les trois phases sont représentés respectivement dans les figures Fig.III.8-10.

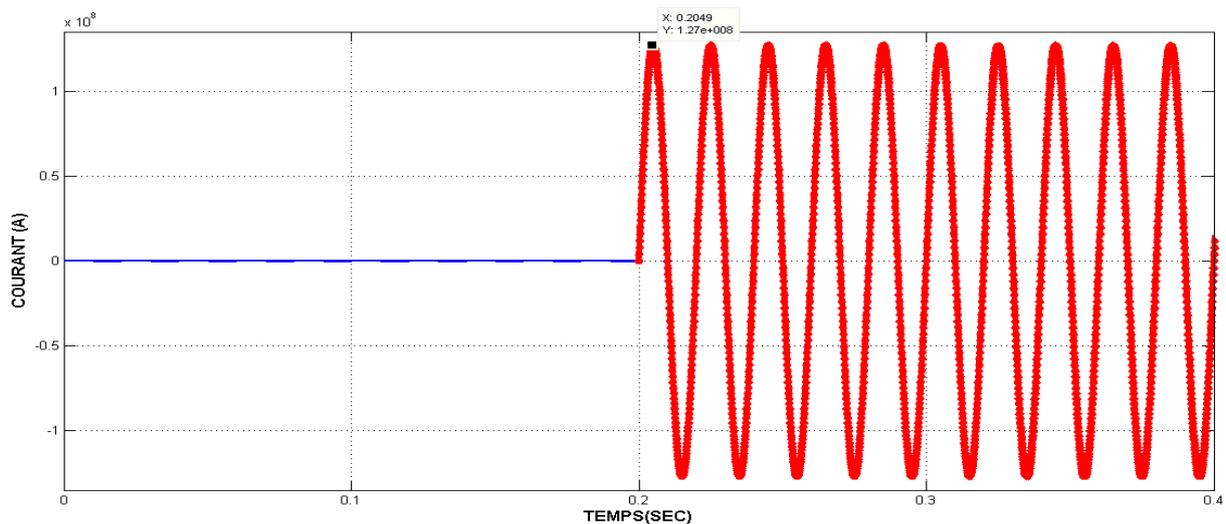


Fig.III.8. Courant de la première phase durant les deux régimes, assigné et au défaut dans le cas d'un défaut biphasé.

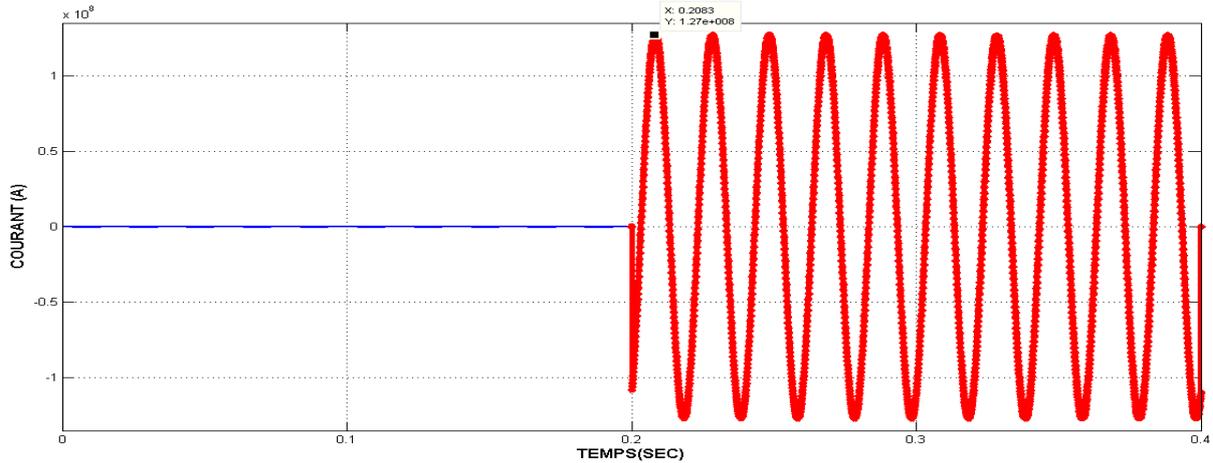


Fig.III.9. Courant de la deuxième phase durant les deux régimes, assigné et au défaut dans le cas d'un défaut biphasé.

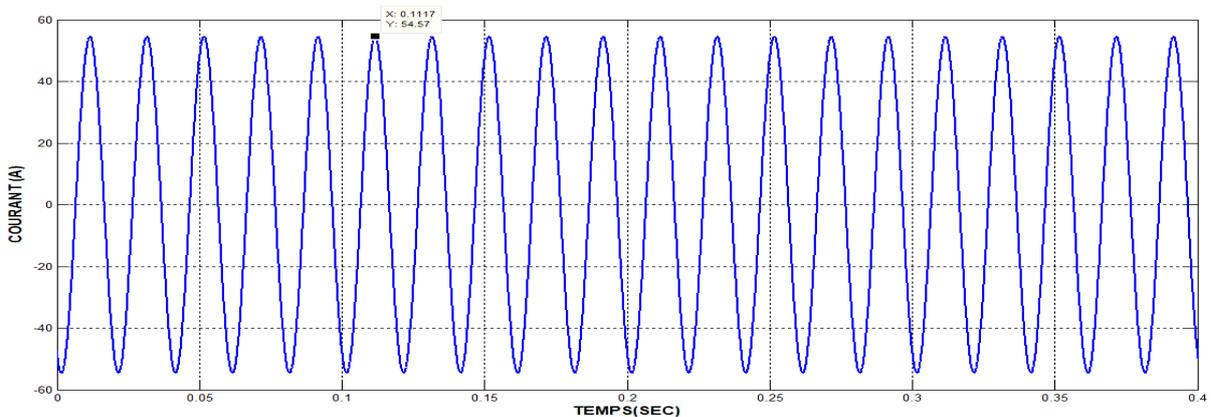


Fig.III.10. Courant de la troisième phase durant les deux régimes, assigné et au défaut dans le cas d'un défaut monophasé.

III.2.3. Court-circuit triphasé :

Cette partie représente les simulations des courants du court-circuit provoqué entre les trois phases. Ce court-circuit est déclenché à l'instant $t = 0,2$ s. L'emplacement et les paramètres de court-circuit sur ce réseau électrique choisis comme suit :

$$Z_d = Z_i = Z_o = Z_n = 0.000001 \Omega.$$

Le Tableau (Tab.III.3.) représente les valeurs maximales des courants dans chaque phase du réseau et qui sont concernés chacune par un court-circuit franc entre phase et terre. La valeur maximale du courant dans chacune des phases concernées est identique où elle atteint une valeur de $1,27 \times 10^8$ A. cette valeur est considéré comme très importante par rapport à celle qui circule dans le réseau dans son régime nominal.

Tableau III.3. Valeurs des courants sur les trois phases (court-circuit triphasé)

Numéro de ligne	$I_{L1 \max}(A)$	$I_{L2 \max}(A)$	$I_{L3 \max}(A)$
Valeur du courant	$1,27 \times 10^8$	$1,27 \times 10^8$	$1,27 \times 10^8$

Les Figures Fig.III.11-13 représentent les allures des courants du court-circuit durant les régimes, nominale et du défaut.

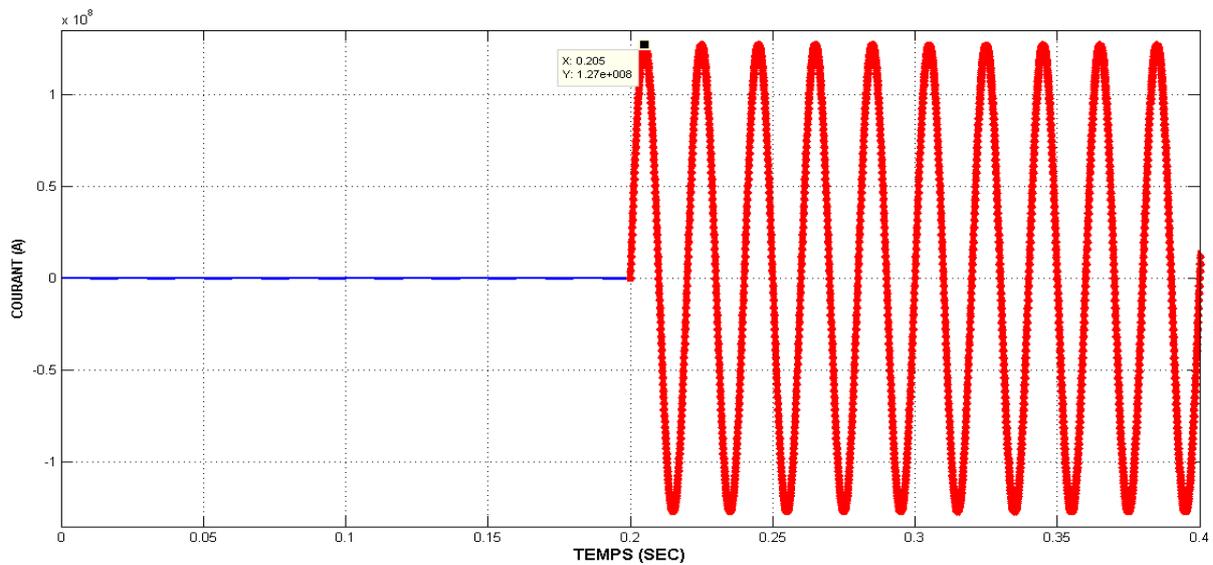


Fig.III.11. Courant de la première phase durant les deux régimes, assigné et au défaut dans le cas d'un défaut triphasé.

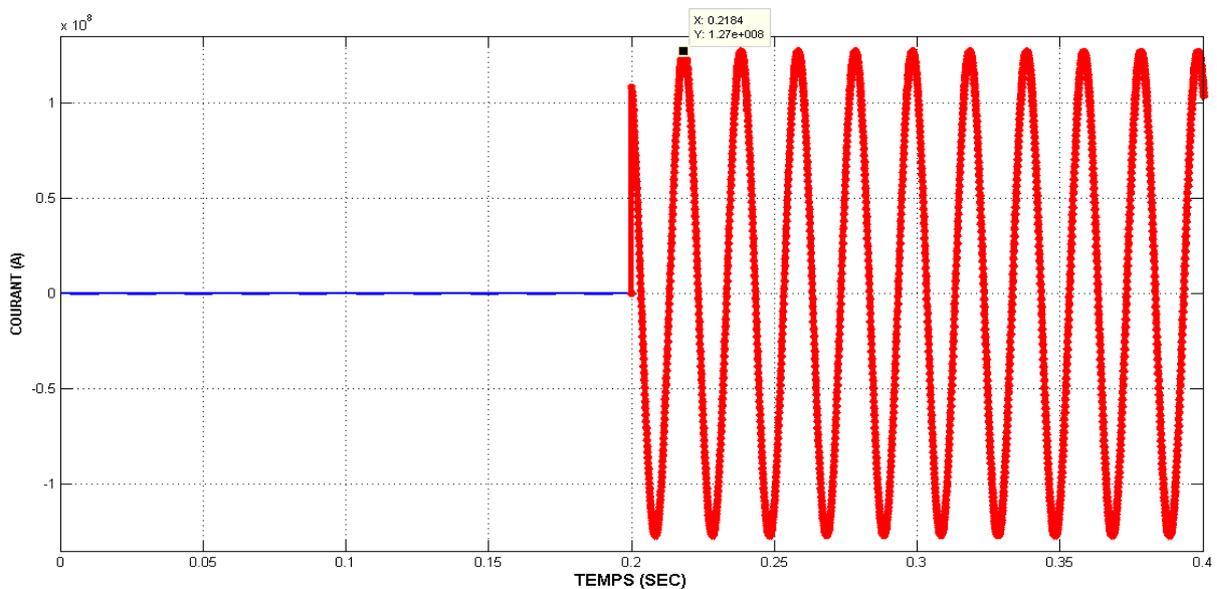


Fig.III.12. Courant de la deuxième phase durant les deux régimes, assigné et au défaut dans le cas d'un défaut triphasé.

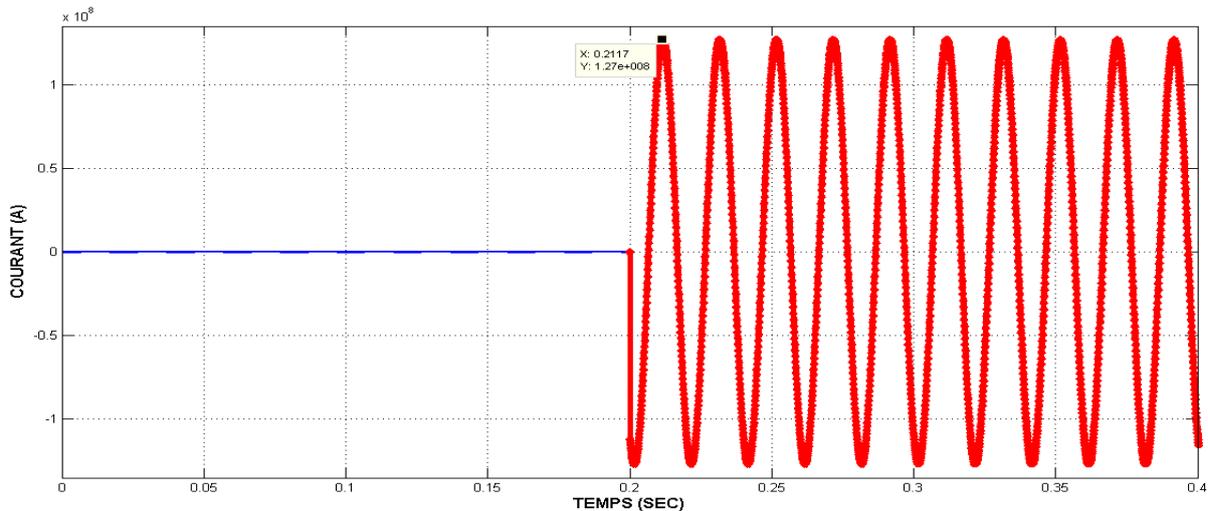


Fig.III.13. Courant de la troisième phase durant les deux régimes, assigné et au défaut dans le cas d'un défaut triphasé.

Selon les résultats présentés ci-dessus et représentons l'évolution temporelle du courant durant les phases du défaut, on peut dire que le courant atteint des valeurs très importantes durant les régimes de défaut. Il est nécessaire alors de prédire des moyens de limitation du courant durant ces phases de défaut. Parmi ces moyens, on peut utiliser soit les moyens conventionnels et qui procèdent à la coupure totale du courant. Cette technique présente des inconvénients principalement elle ne peut assurer la continuité du service et elle nécessite une intervention manuelle et qui peut prendre un temps très important, dans ces conditions, les éléments du réseau doivent supporter ces courants même pour un temps réduit. D'autres techniques peuvent être utilisées et qui consistent à adopter les limiteurs de courant. Le limiteur de courant supraconducteur semble le plus favorable pour la limitation du courant de défaut. En effet, celui-ci peut être invisible dans le réseau durant le régime assigné avec une résistance parfaitement nulle durant son régime supraconducteur ou il peut offrir une grande résistance avec l'apparition du défaut. Cette résistance augmente avec l'augmentation du courant de défaut. Celui-ci, se comporte alors comme une varistance avec un temps de réponse très réduit et qui peut largement protéger les éléments liés au réseau. Ce type de limiteur adopte généralement les supraconducteurs de type II.

Pour prédire correctement le bon fonctionnement d'un limiteur de courant supraconducteur, il est nécessaire de modéliser leur comportement électrique durant les phases de limitation. Dans ce contexte, nous présentons dans la partie ci-dessous les résultats des simulations du comportement électrique d'un limiteur de courant supraconducteur implémenté dans un réseau électrique pour imiter les courants des défauts provenant par les trois types de court-circuit présentés.

III.3. Simulation de limitation du courant de court-circuit par un limiteur de courant supraconducteur :

Nous présentons dans cette partie les résultats des simulations des courants circulant dans le réseau électrique mais avec l'insertion d'un limiteur de courant conçu à partir d'un matériau supraconducteur supposé de type II. Le but est de déterminer les allures des courants durant les régimes, assigné et du défaut. Il est nécessaire alors de déterminer la valeur de la résistance additionnelle provenant principalement du limiteur de courant durant le régime du défaut. Dans les résultats présentés, nous allons présenter dans un premier temps, le courant circulant durant le régime assigné et durant le régime de défaut. Régime du défaut est supposé composé de deux phases, avant et après intervention du limiteur de courant. Le régime assigné est supposé maintenu entre 0s et 0.2 s, le défaut provenant d'un court-circuit apparait entre 0.2s et 0,4 s et l'intervention du limiteur de courant supraconducteur est supposé à l'instant $t = 0.4s$.

Afin de limiter la présentation des résultats et selon la symétrie des courants dans les phases concernés par le défaut, nous allons présenter les résultats des simulations pour une seule phase choisie et qui consiste dans la première phase.

Dans la présentation des résultats des simulations, nous allons prendre en considération les paramètres caractéristiques du supraconducteur où nous allons prendre en compte l'influence de la densité du courant critique sur le comportement électrique du limiteur. Les résultats seront présentés pour les trois types des courts circuits et pour une valeur précise de la densité du courant critique du matériau supraconducteur adopté pour concevoir le limiteur du courant.

III.3.1. Résultat des simulations pour $J_c = 1 \cdot 10^7 \text{ A/mm}^2$:

Dans cette partie nous présentons les résultats des simulations des courants circulants dans le réseau électrique durant le régime nominal et durant le régime de défaut avant et au cours de l'intervention du limiteur du courant ; les propriétés physiques du limiteur de courant adopté dans la limitation du courant sont :

$$J_c = 1 \cdot 10^7 \text{ A/mm}^2; E_c = 1 \cdot 10^{-4} \text{ V/mm}; S = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2; l = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m}.$$

Le tableau (Tab III.4) résume les valeurs maximales du courant du défaut avant et après intervention du limiteur de courant pour les trois types de défaut et qui sont respectivement, un court-circuit monophasé, biphasé et triphasé.

Tableau III.4. Taux de limitation de courant avec matériau de $J_c = 1 \cdot 10^7$ A/mm².

	$I_{LL \max}(A)$ court-circuit	$I_{LL \max}(A)$ limité	Taux de limitation (%)
Valeur du courant de court-circuit monophasé	$6,35 \times 10^7$	$1,96 \cdot 10^7$	69,14
Valeur du courant de court-circuit biphasé	$1,27 \cdot 10^8$	$1,97 \cdot 10^7$	84,49
Valeur du courant de court-circuit triphasé	$1,27 \cdot 10^8$	$1,98 \cdot 10^7$	84,49

Selon les résultats présentés dans le Tab.III.4 on remarque que le courant maximal circulant dans le réseau atteint des valeurs très importantes avant la limitation du courant c'est-à-dire avant l'intervention du limiteur du courant. Cette valeur sera considérablement limitée pour atteindre un maximum de presque de $1,96 \cdot 10^7$ A à $1,98 \cdot 10^7$ A selon le type de défaut avec un taux de limitation de 69.14% pour un défaut monophasé, et de 84.49% pour les défauts, biphasé et triphasé. La limitation du courant est plus importante alors pour les cas, biphasé et triphasé.

La densité de courant permise à la circulation dans le réseau et celle égale à deux fois à la valeur de la densité de courant critique du supraconducteur.

L'évolution temporelle des courants durant les phases, nominale, avec défaut sans et avec limitation pour les trois types du courant circuit et pour $J_c = 1 \cdot 10^7$ A/mm² sont présentés dans les Fig.III.14-16. Selon les résultats présentés on peut dire que le limiteur du courant supraconducteur a pu assurer un bon fonctionnement pour la limitation du courant de défaut où il intervient à l'instant $t = 0.4s$ par l'insertion d'une grande résistance additionnel à la résistance du réseau dans le but est de limiter le courant de défaut.

Bien que le limiteur du courant ne peut assurer un courant nominal durant la phase d'intervention, mais il réduit considérablement le courant de défaut. Ceci peut être avantageux de point de vu dimensionnement du réseau durant les régimes du défaut et de prédire des disjoncteurs ayant un pouvoir de coupure très réduits et moins couteux. Aussi et avec l'extension du réseau, la charge augmente mais avec l'insertion des limiteurs de courant supraconducteur, ont préservé toujours les même dispositifs de coupure quel que soit la charge de nouveau réseau.

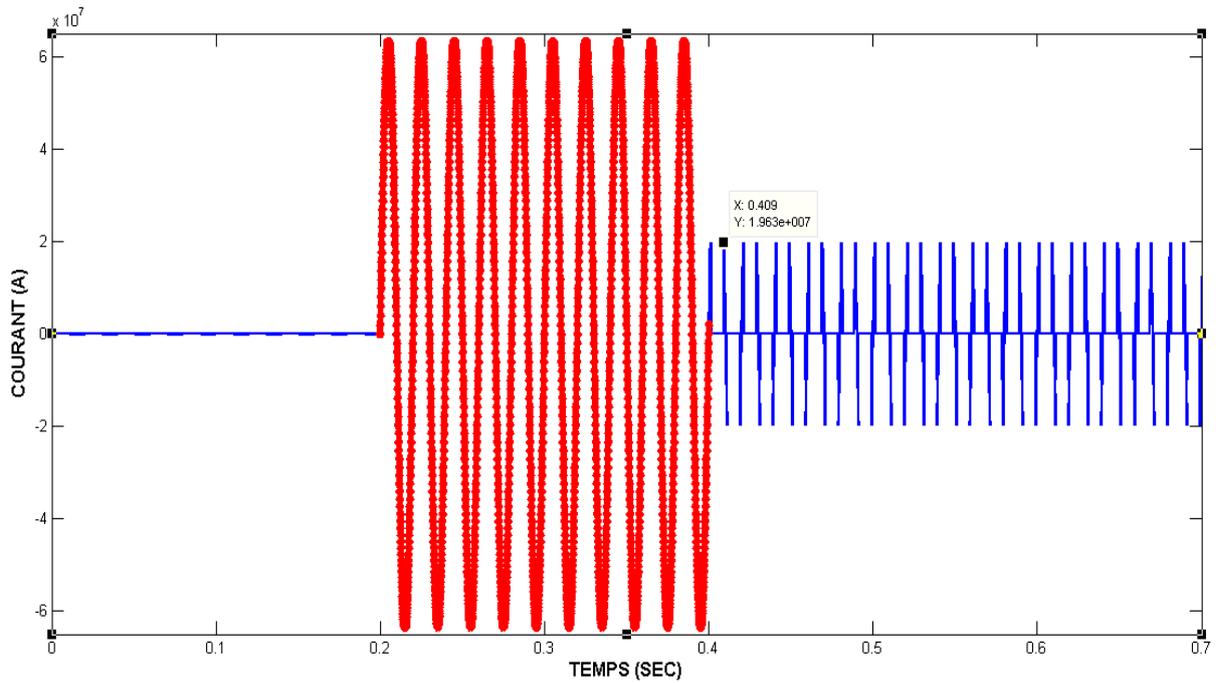


Fig.III.14. Courant durant les phases, nominale, défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c = 1 \cdot 10^7$ A/mm² pour un court-circuit monophasé.

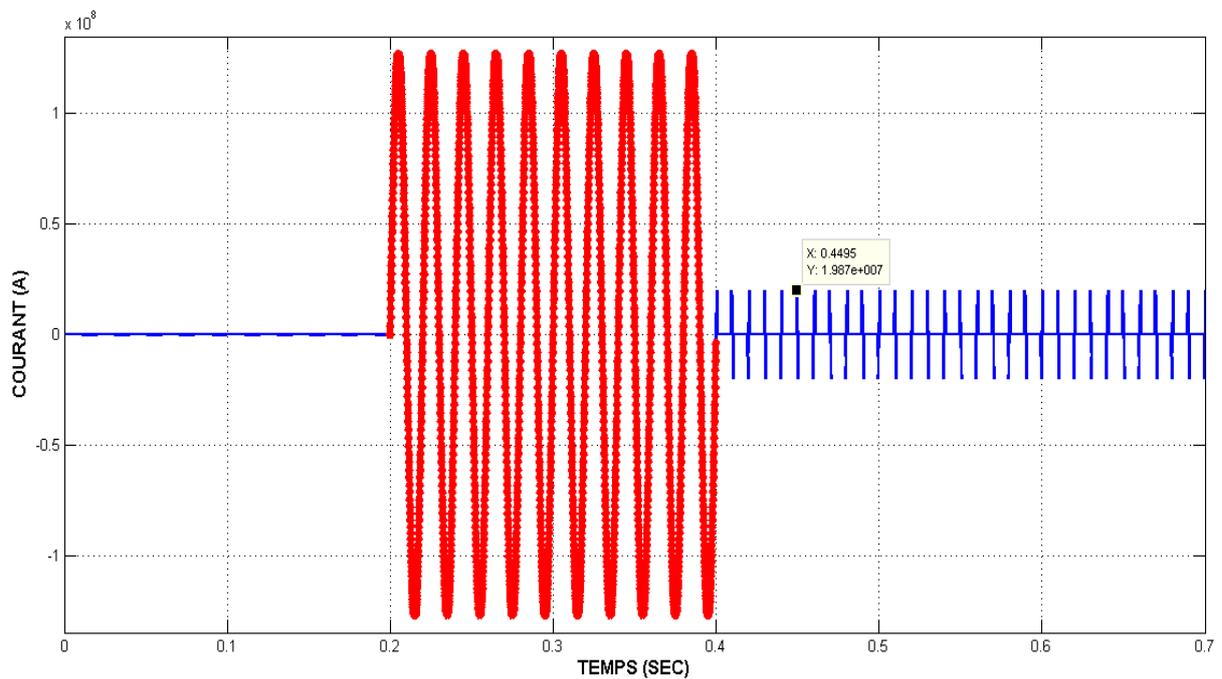


Fig.III.15. Courant durant les phases, nominale, défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c = 1 \cdot 10^7$ A/mm² pour un court-circuit biphasé.

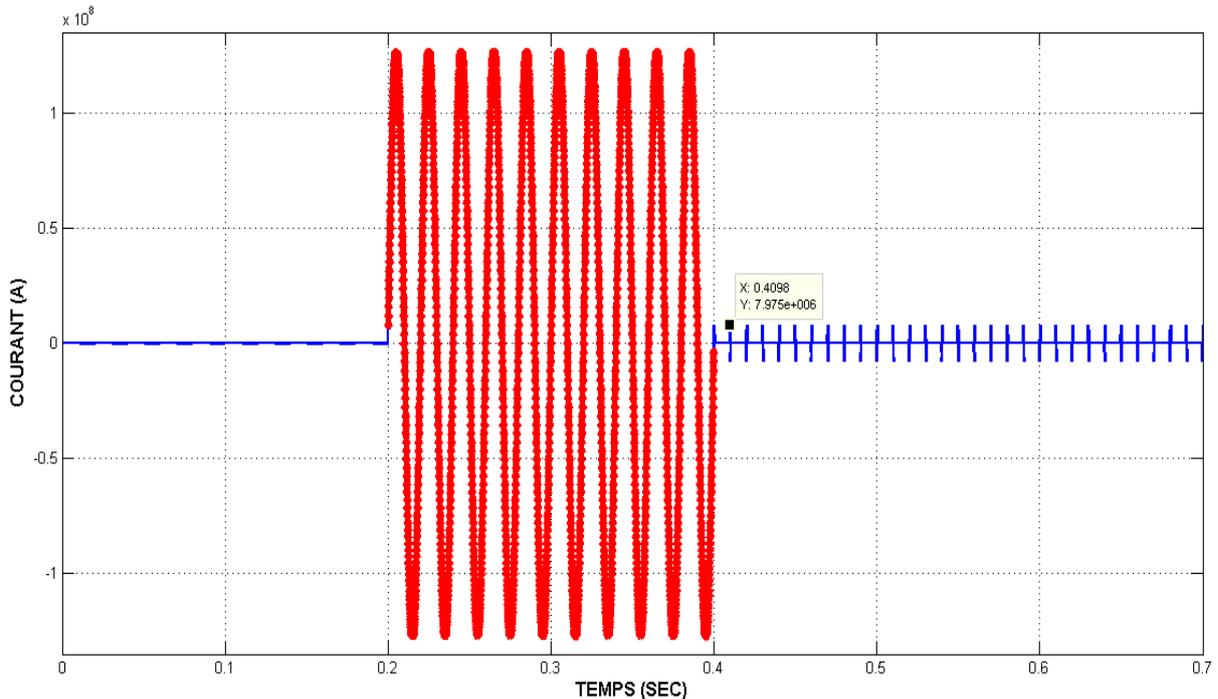


Fig.III.16. Courant durant les phases, nominale, défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c = 1*10^7$ A/mm² pour un court-circuit triphasé.

III.3.2. Résultat des simulations pour $J_c = 2*10^7$ A/mm² :

La densité de courant critique du supraconducteur est considérée comme l'élément primordial influent sur la limitation du courant de défaut. Dans le but d'étudier l'influence de la densité de courant critique sur la limitation du courant de défaut nous avons augmenté celle-ci à $J_c = 2*10^7$ A/mm². Les paramètres adoptés dans les simulations présentés sont :

$$J_c = 2*10^7 \text{ A/mm}^2; E_c = 1*10^{-4} \text{ V/mm}; S = 1*10^{-6} \text{ m}^2; l = 2*10^{-2} \text{ m.}$$

Le tableau (Tab III.5) résume les valeurs maximales du courant du défaut avant et après intervention du limiteur de courant pour les trois types de défaut et qui sont respectivement, un court-circuit monophasé, biphasé et triphasé pour $J_c = 2*10^7$ A/mm².

Comparé aux valeurs présentés précédemment c'est-à-dire pour $J_c = 1*10^7$ A/mm² on peut dire que l'augmentation de J_c à permet à un courant plus important de circulé dans le réseau électrique et de réduire considérablement le taux de limitation. En effet, un limiteur de courant ayant un $J_c = 2*10^7$ A/mm² permet à la circulation d'un courant de l'ordre de $3,89*10^7$ A/mm² alors qu'un limiteur de courant de $J_c = 1*10^7$ A/mm² autorise un courant de l'ordre de $1,96*10^7$ A/mm². En conclu alors que la densité de courant permise dans un réseau électrique est dépendante du courant critique où celle-ci est égale à deux fois à la densité de courant critique.

Cette dépendance peut être expliquée par le passage d'une phase à une autre du matériau supraconducteur c'est-à-dire par la transition de la phase supraconducteur vers une phase très dissipative caractérisée par une grande résistance. Cette transition est dépendante de la densité de courant critique où le passage d'une phase à une autre nécessite une densité de courant supérieur à la densité de courant critique.

En conclut alors que le choix du supraconducteur est dépendant principalement de la densité de courant critique où celle-ci doit être soigneusement choisie pour permettre à une valeur du courant prédéfinie a circulé dans un réseau électrique.

Tableau III.5. Taux de limitation de courant avec matériau de $J_c = 2 \cdot 10^7$ A/mm².

	$I_{L1\ max}(A)$ court-circuit	$I_{L1\ max}(A)$ limité	Taux de limitation (%)
Valeur du courant de court-circuit monophasé	$6,35 \times 10^7$	$3,89 \cdot 10^7$	38,74
Valeur du courant de court-circuit biphasé	$1,27 \cdot 10^8$	$3,92 \cdot 10^7$	69,13
Valeur du courant de court-circuit triphasé	$1,27 \cdot 10^8$	$3,92 \cdot 10^7$	69,13

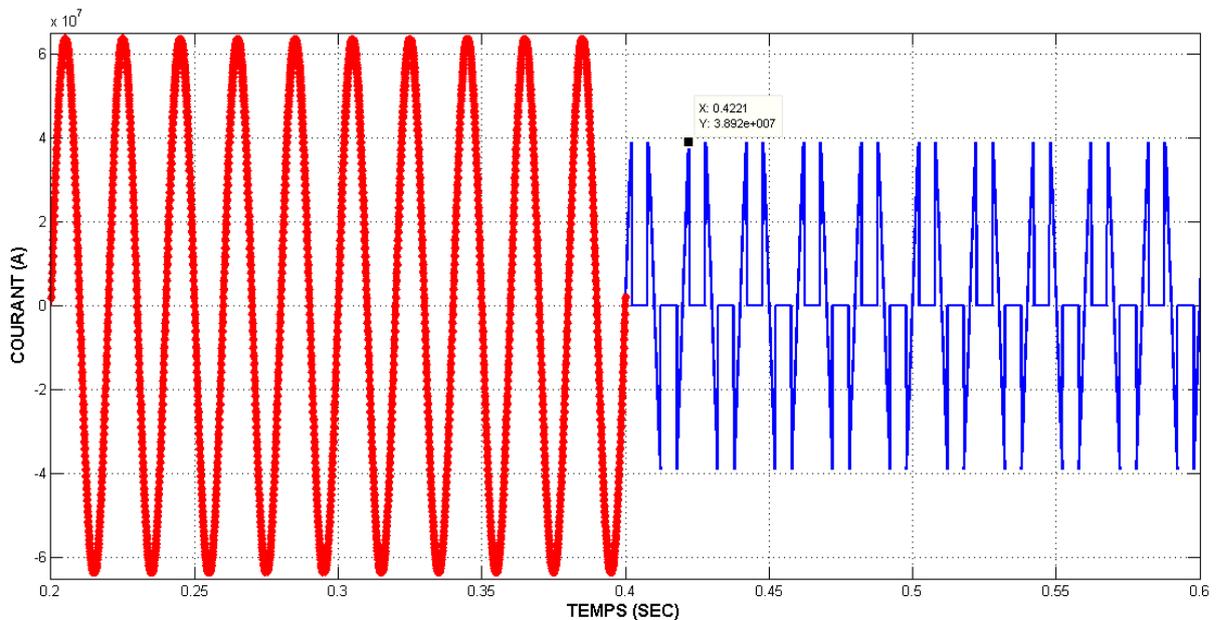


Fig.III.17. Courant durant la phase de défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c = 2 \cdot 10^7$ A/mm² pour un court-circuit monophasé.

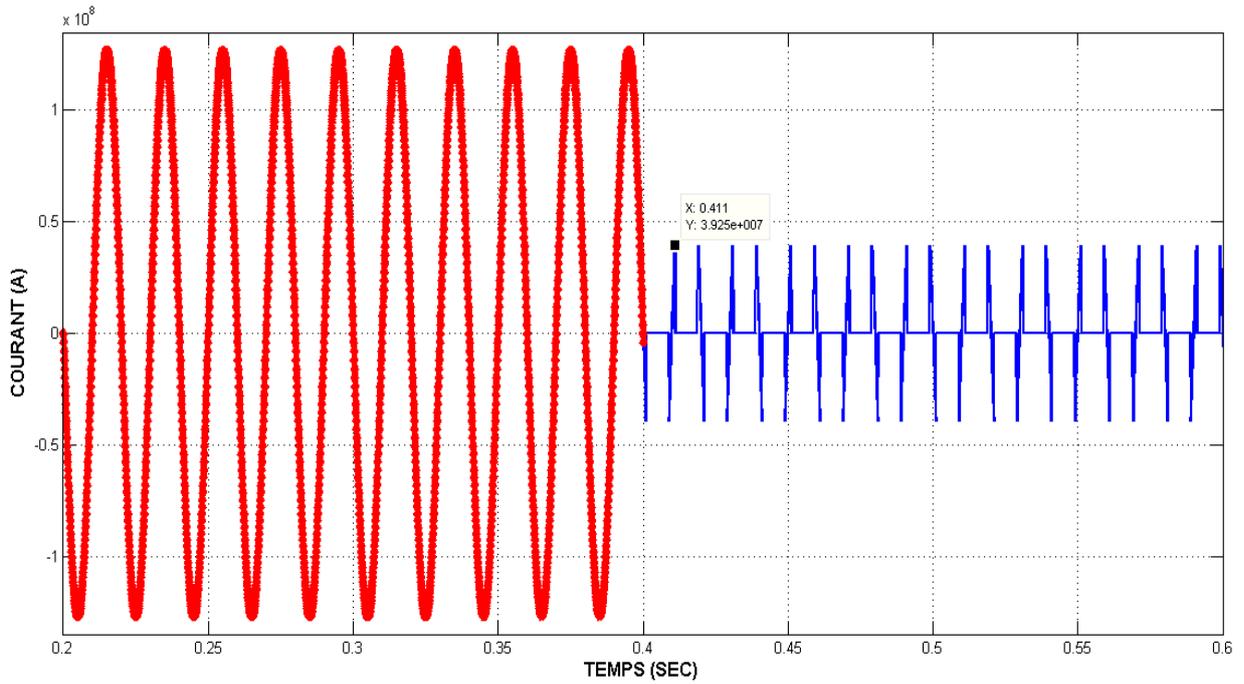


Fig.III.18. Courant durant la phase de défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c = 2 \cdot 10^7$ A/mm² pour un court-circuit biphasé.

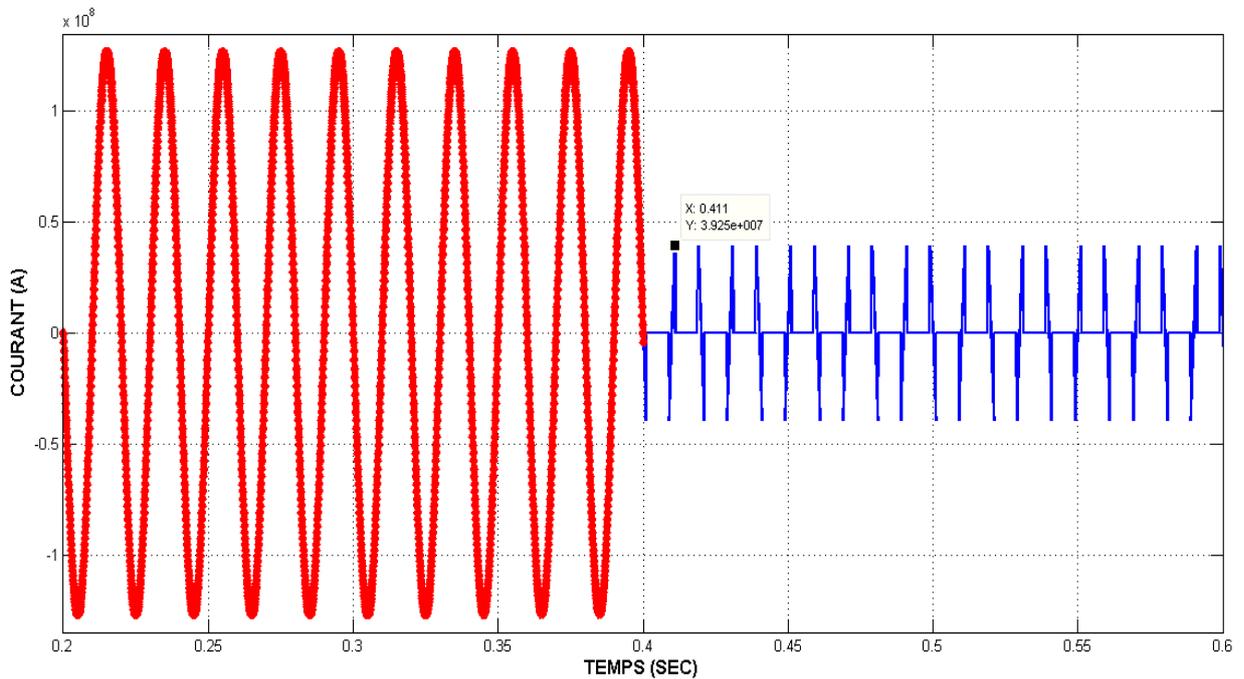


Fig.III.19. Courant durant la phase de défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c = 2 \cdot 10^7$ A/mm² pour un court-circuit triphasé.

III.3.3. Résultat des simulations pour $J_c = 3-7 * 10^7$ A/mm² :

Dans cette partie nous allons résumés les résultats des simulations obtenus durant la limitation du courant de défaut pour un défaut monophasé, biphasé et triphasé et pour J_c variant de $3-7 * 10^7$ A/mm². Les autres propriétés du supraconducteur sont :

$$E_c = 1 * 10^{-4} \text{ V/mm} ; S = 1 * 10^{-6} \text{ m}^2 ; l = 2 * 10^{-2} \text{ m} ;$$

Les tableaux (Tab III.6) résumant les valeurs maximales du courant du défaut avant et après l'intervention du limiteur de courant pour les trois types de défaut et qui sont respectivement, un court-circuit monophasé, biphasé et triphasé.

Tableaux III.6. Taux de limitation du courant avec matériau respectivement de $J_c = 3 * 10^7$ au $J_c = 7 * 10^7$ A/mm².

$J_c = 3 * 10^7$	$I_{LL \max}(A)$ court-circuit	$I_{LL \max}(A)$ limité	Taux de limitation (%)
Valeur du courant de court-circuit monophasé	$6,35 \times 10^7$	$5,97 * 10^7$	5,98
Valeur du courant de court-circuit biphasé	$1,27 * 10^8$	$5,76 * 10^7$	54,65
Valeur du courant de court-circuit triphasé	$1,27 * 10^8$	$5,76 * 10^7$	54,65
$J_c = 4 * 10^7$			
Valeur du courant de court-circuit monophasé	$6,35 \times 10^7$	Pas de limitation	/
Valeur du courant de court-circuit biphasé	$1,27 * 10^8$	$7,78 * 10^7$	38,74
Valeur du courant de court-circuit triphasé	$1,27 * 10^8$	$7,78 * 10^7$	38,74
$J_c = 5 * 10^7$			
Valeur du courant de court-circuit monophasé	$6,35 \times 10^7$	Pas de limitation	/
Valeur du courant de court-circuit biphasé	$1,27 * 10^8$	$9,79 * 10^7$	22,91
Valeur du courant de court-circuit triphasé	$1,27 * 10^8$	$9,79 * 10^7$	22,91

$J_c = 6 \cdot 10^7$			
Valeur du courant de court-circuit monophasé	6,35 x10 ⁷	Pas de limitation	/
Valeur du courant de court-circuit biphasé	1,27*10 ⁸	1,195*10 ⁸	5,90
Valeur du courant de court-circuit triphasé	1,27*10 ⁸	1,195*10 ⁸	5,90
$J_c = 7 \cdot 10^7$			
Valeur du courant de court-circuit monophasé	6,35 x10 ⁷	Pas de limitation	/
Valeur du courant de court-circuit biphasé	1,27*10 ⁸	Pas de limitation	/
Valeur du courant de court-circuit triphasé	1,27*10 ⁸	Pas de limitation	/

L'évolution temporelle des courants durant les phases, nominale, avec défaut sans et avec limitation pour les trois types du courant circuit et pour J_c variant respectivement de $3-7 \cdot 10^7$ A/mm² sont présentés dans les Fig.III.20-34. Le limiteur du courant supraconducteur intervient à l'instant $t = 0.4s$.

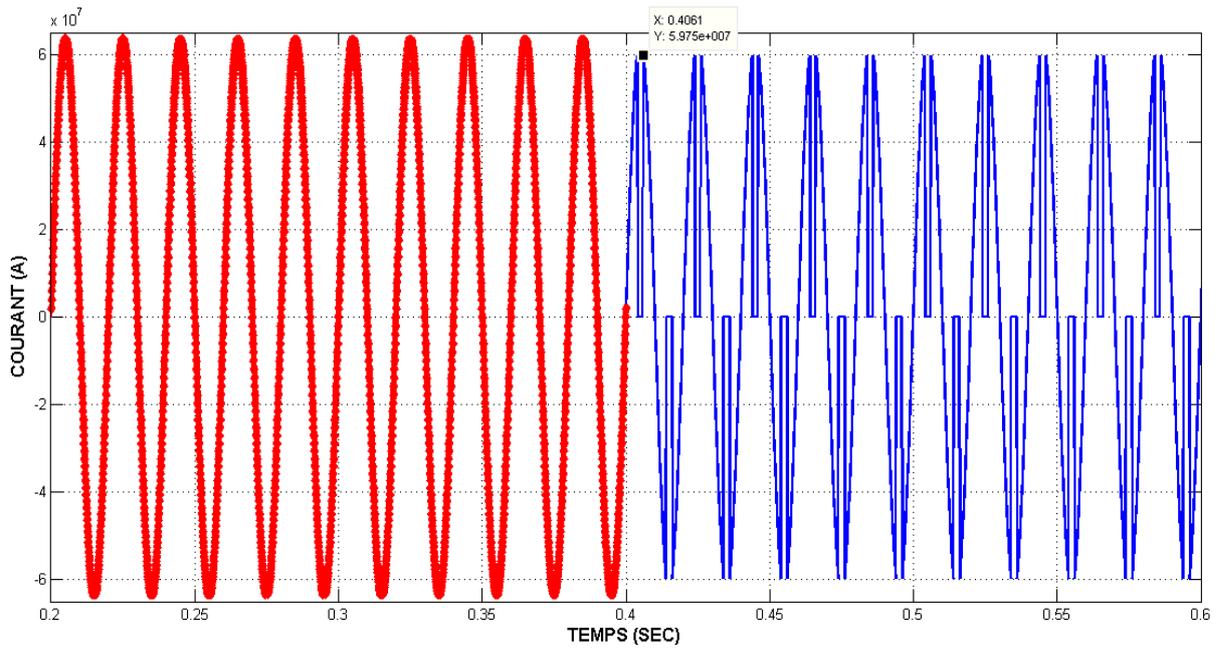


Fig.III.20. Courant durant la phase de défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c= 3*10^7$ A/mm² pour un court-circuit monophasé.

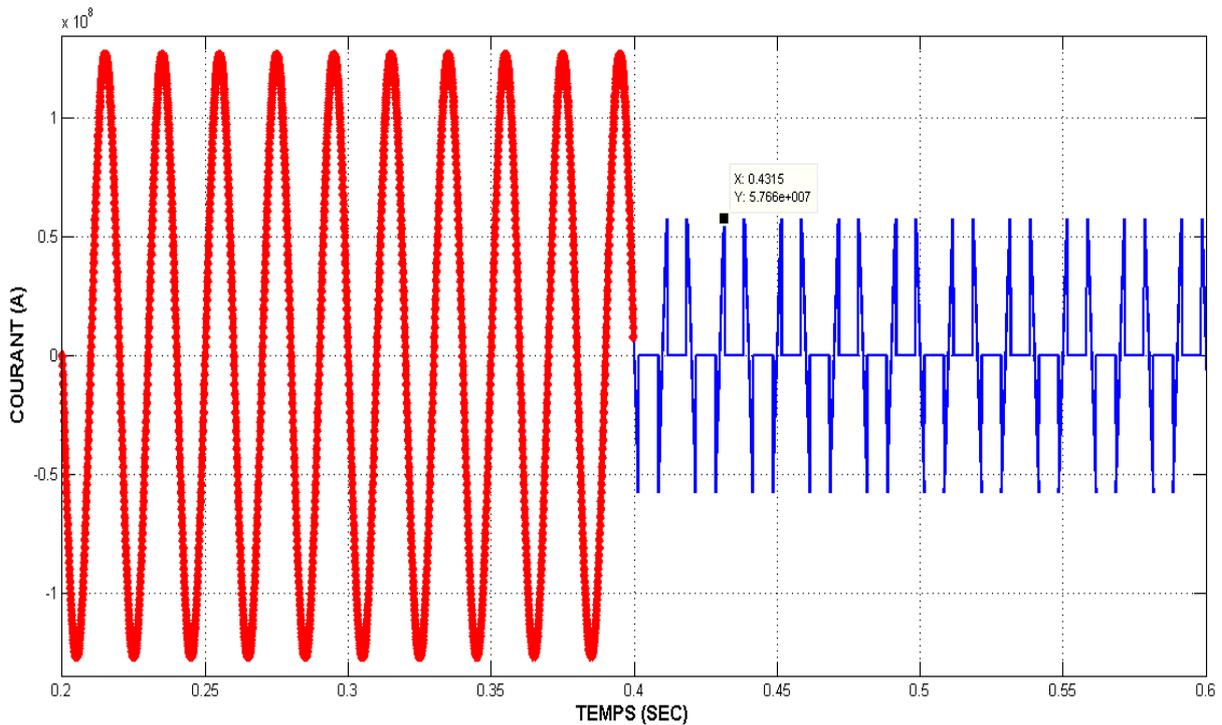


Fig.III.21. Courant durant la phase de défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c= 3*10^7$ A/mm² pour un court-circuit biphasé.

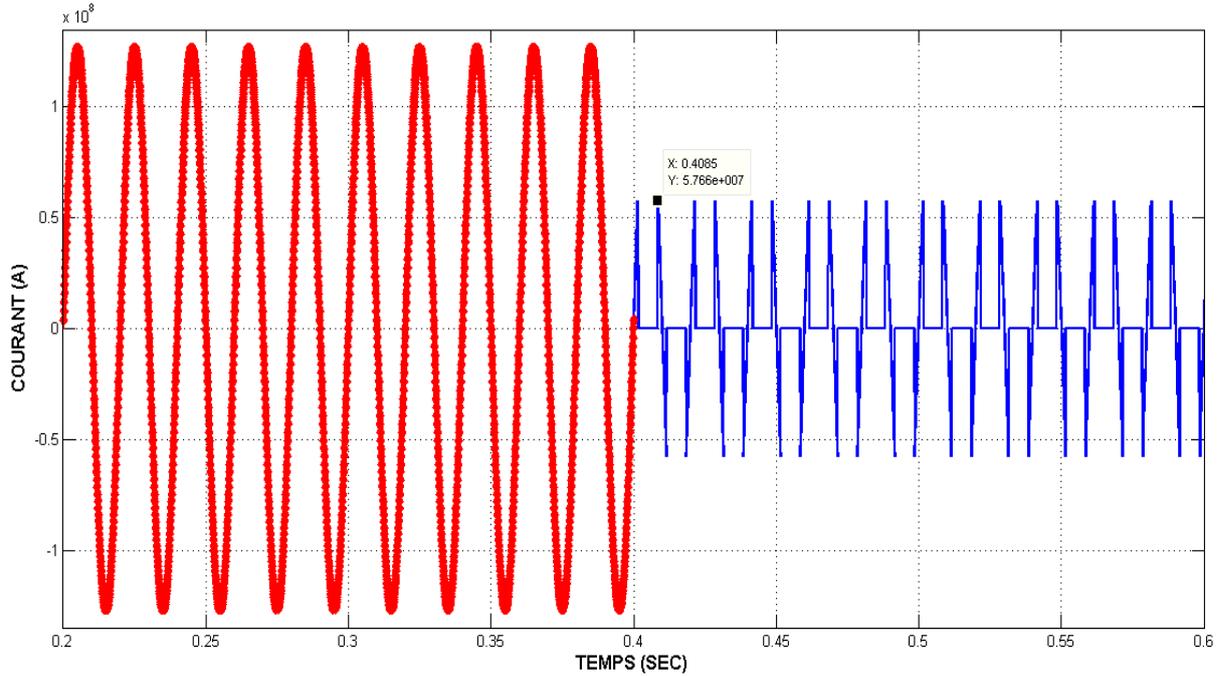


Fig.III.22. Courant durant la phase de défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c = 3 \cdot 10^7$ A/mm² pour un court-circuit triphasé.

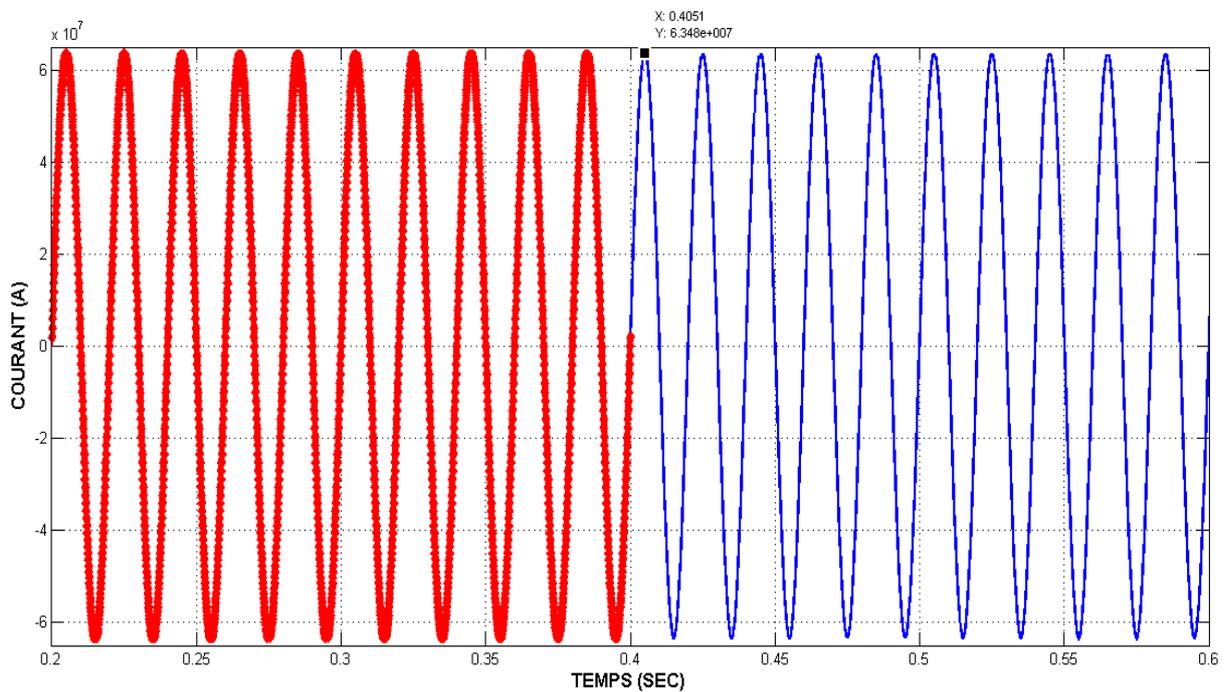


Fig.III.23. Courant durant la phase de défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c = 4 \cdot 10^7$ A/mm² pour un court-circuit monophasé.

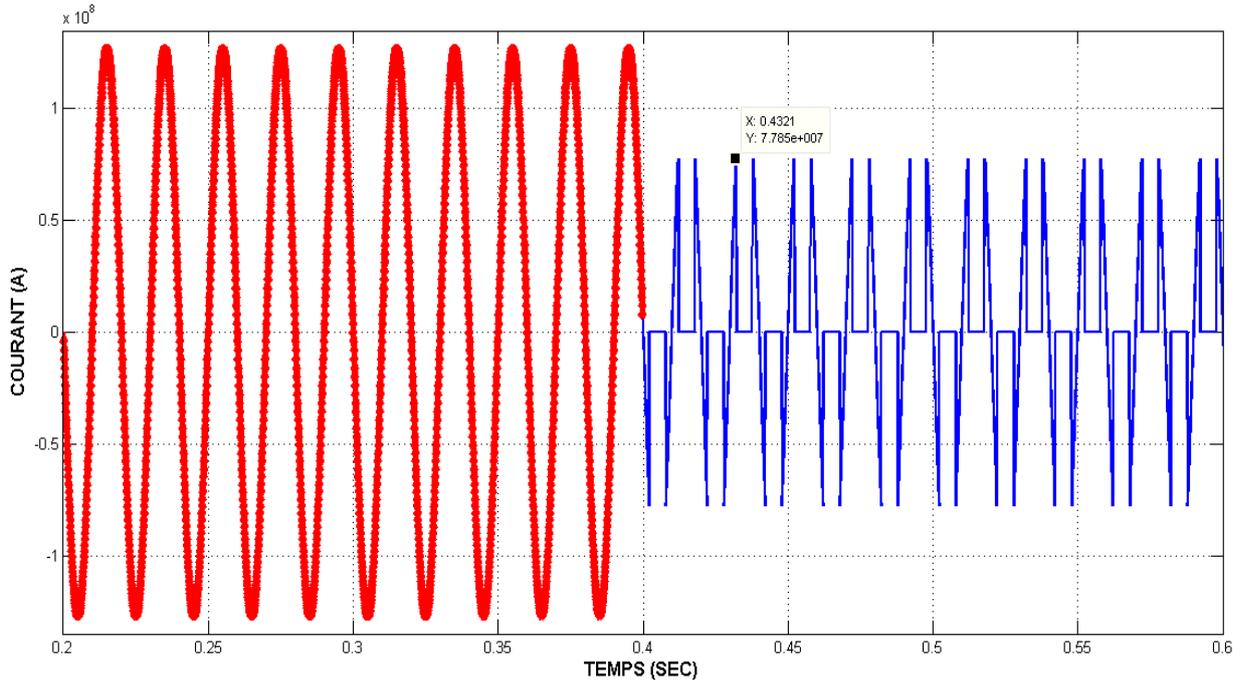


Fig.III.24. Courant durant la phase de défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c= 4*10^7$ A/mm² pour un court-circuit biphasé.

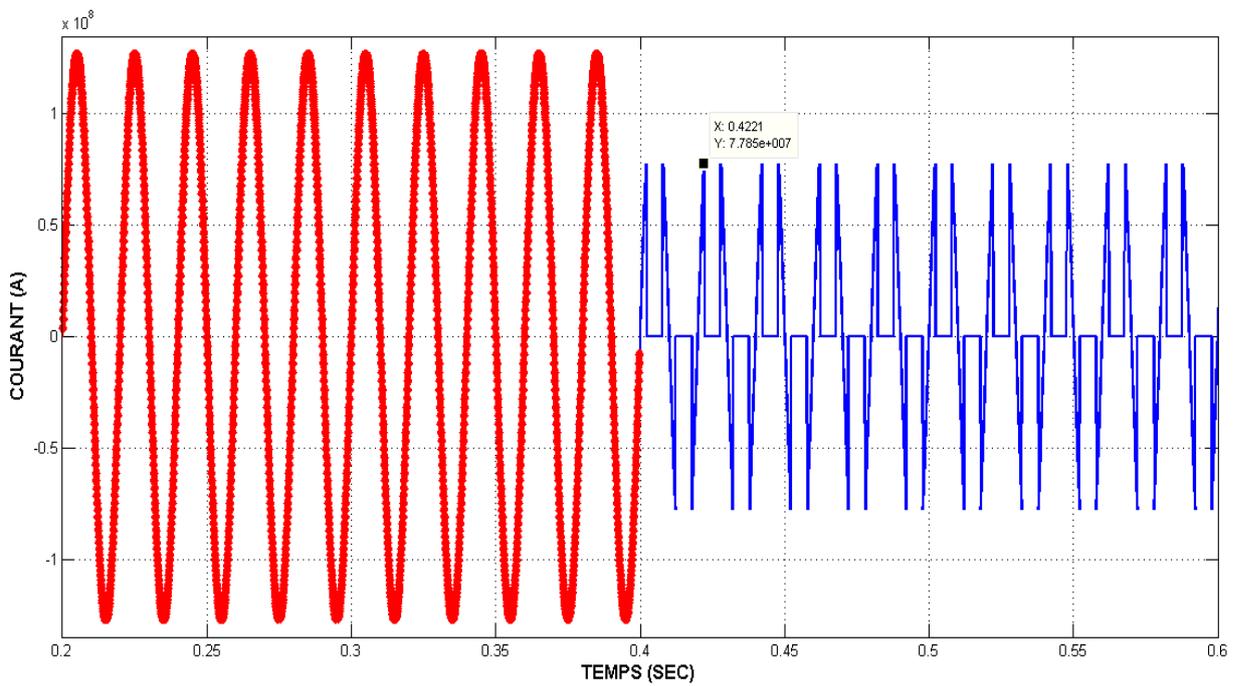


Fig.III.25. Courant durant la phase de défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c= 4*10^7$ A/mm² pour un court-circuit triphasé.

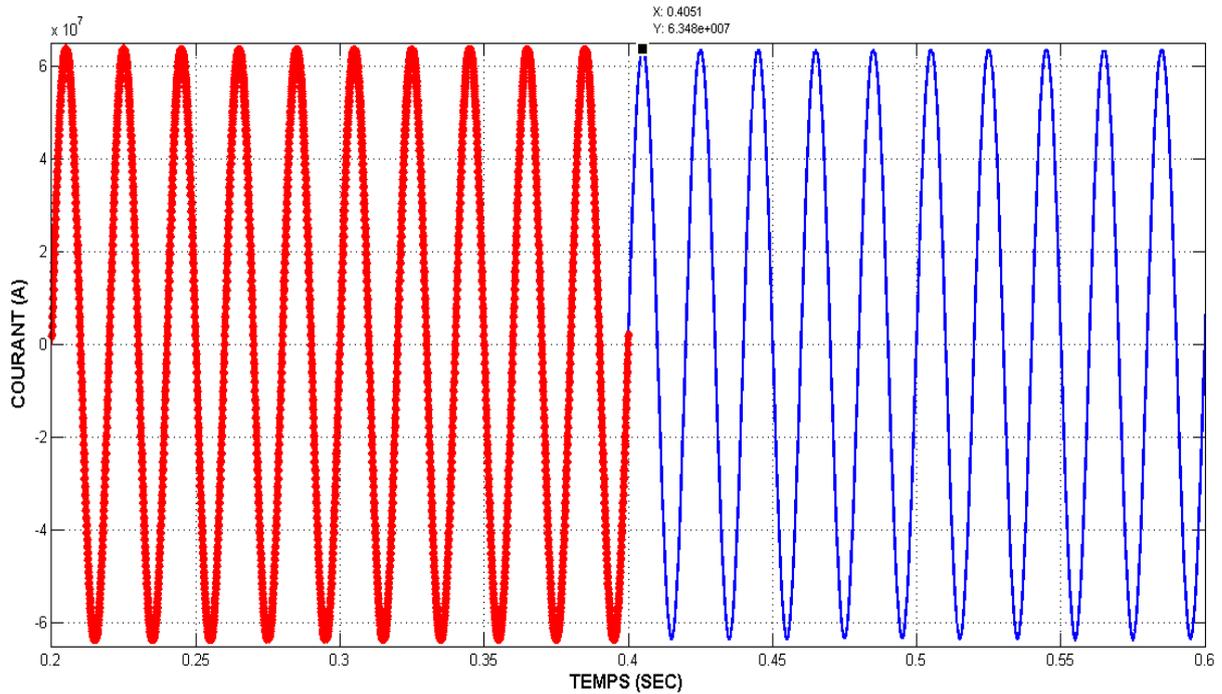


Fig.III.26. Courant durant la phase de défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c = 5 \cdot 10^7$ A/mm² pour un court-circuit monophasé.

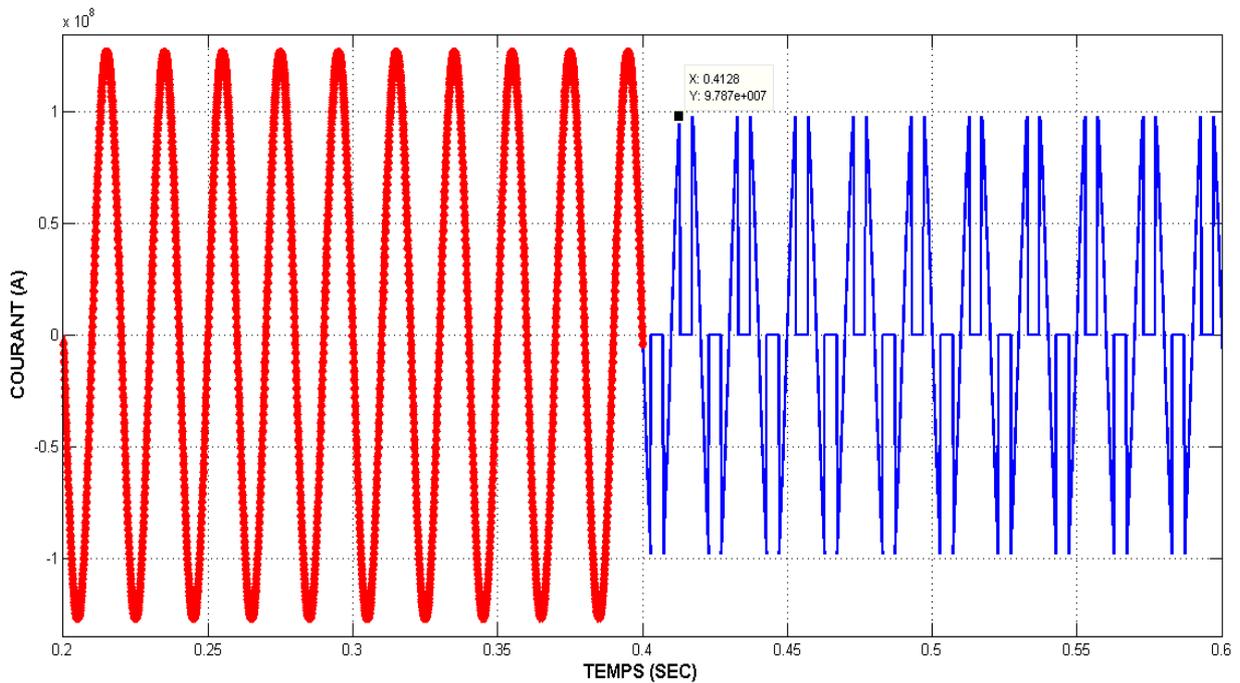


Fig.III.27. Courant durant la phase de défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c = 5 \cdot 10^7$ A/mm² pour un court-circuit biphasé.

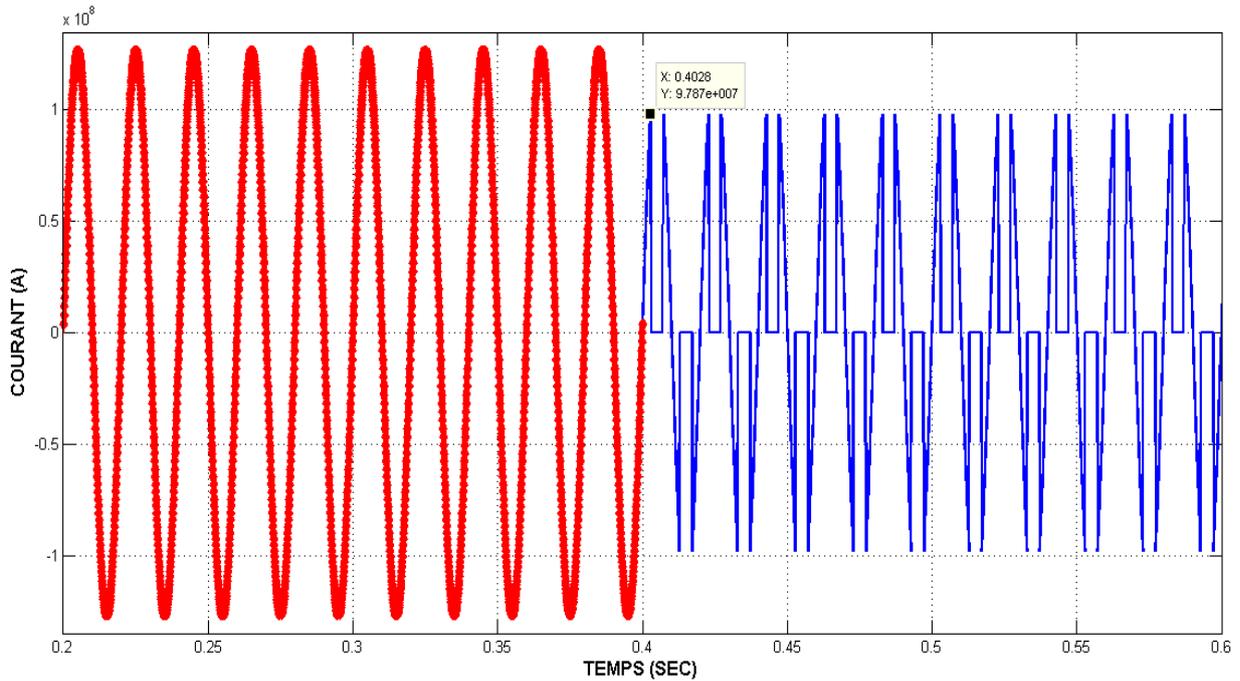


Fig.III.28. Courant durant la phase de défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c = 5 \cdot 10^7$ A/mm² pour un court-circuit triphasé.

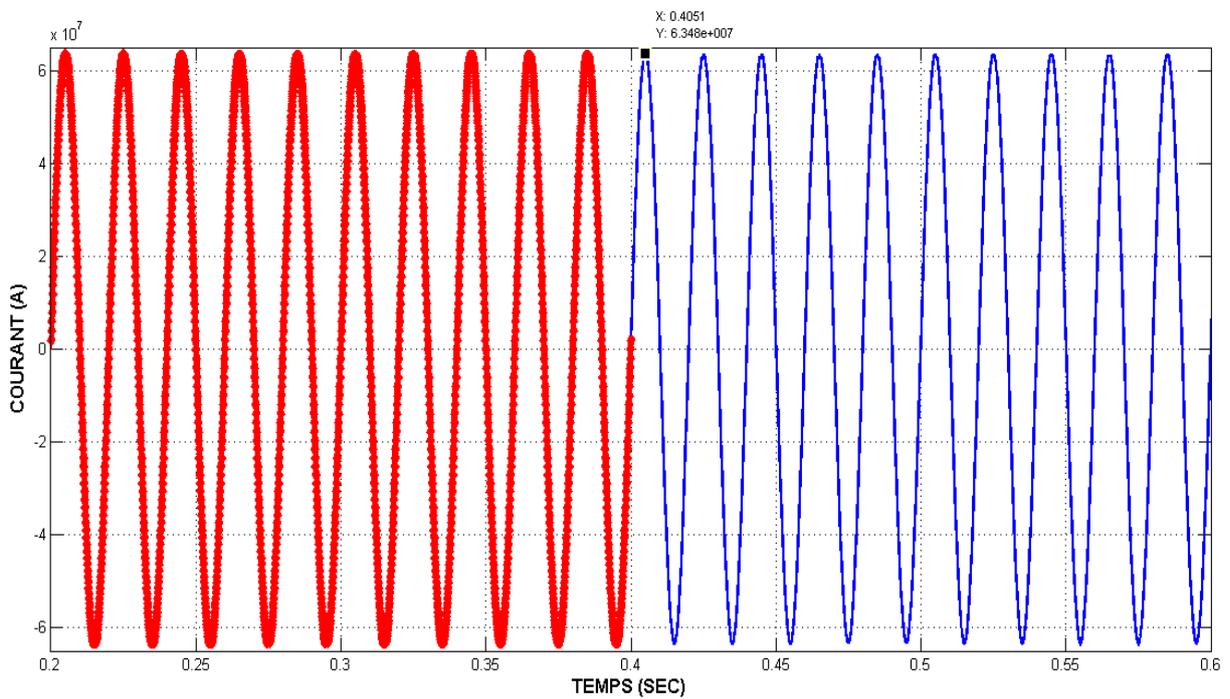


Fig.III.29. Courant durant la phase de défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c = 6 \cdot 10^7$ A/mm² pour un court-circuit monophasé.

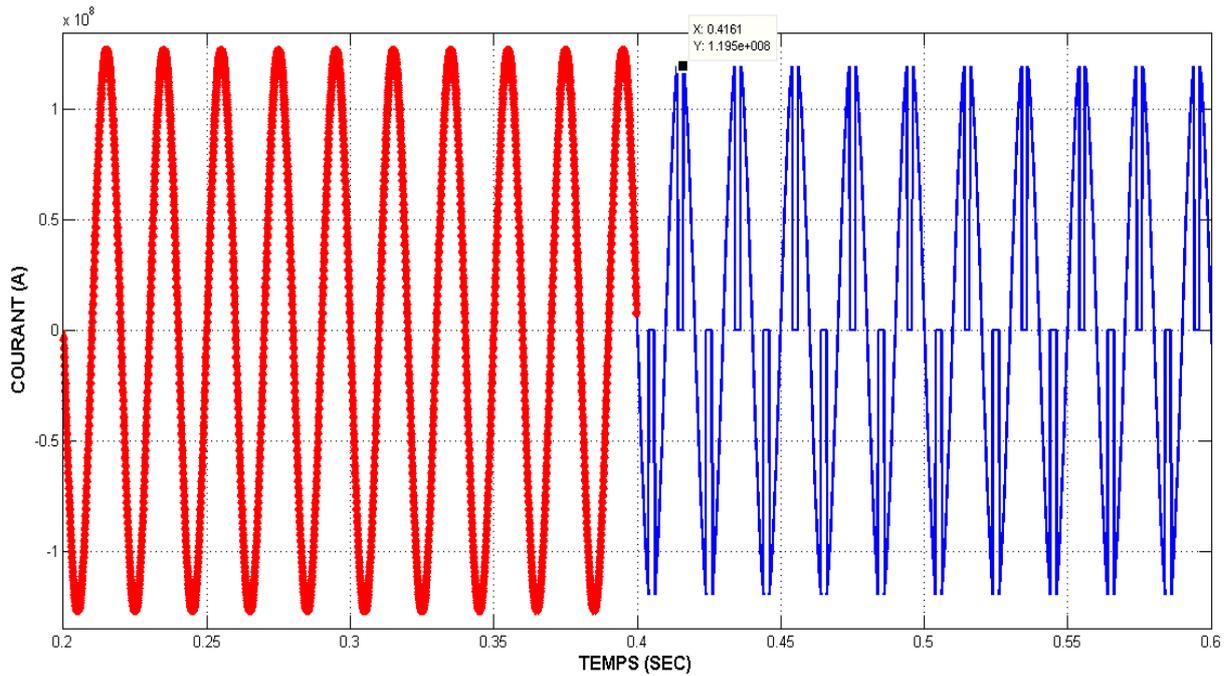


Fig.III.30. Courant durant la phase de défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c= 6*10^7$ A/mm² pour un court-circuit biphasé.

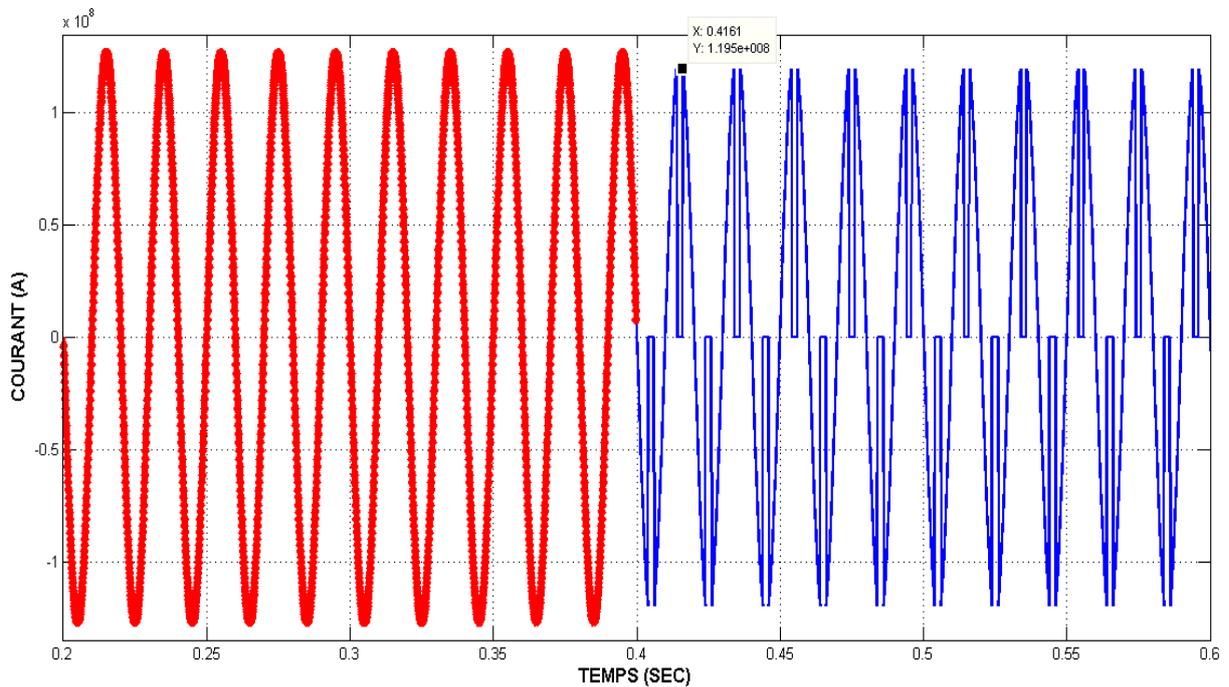


Fig.III.31. Courant durant la phase de défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c= 6*10^7$ A/mm² pour un court-circuit monophasé.

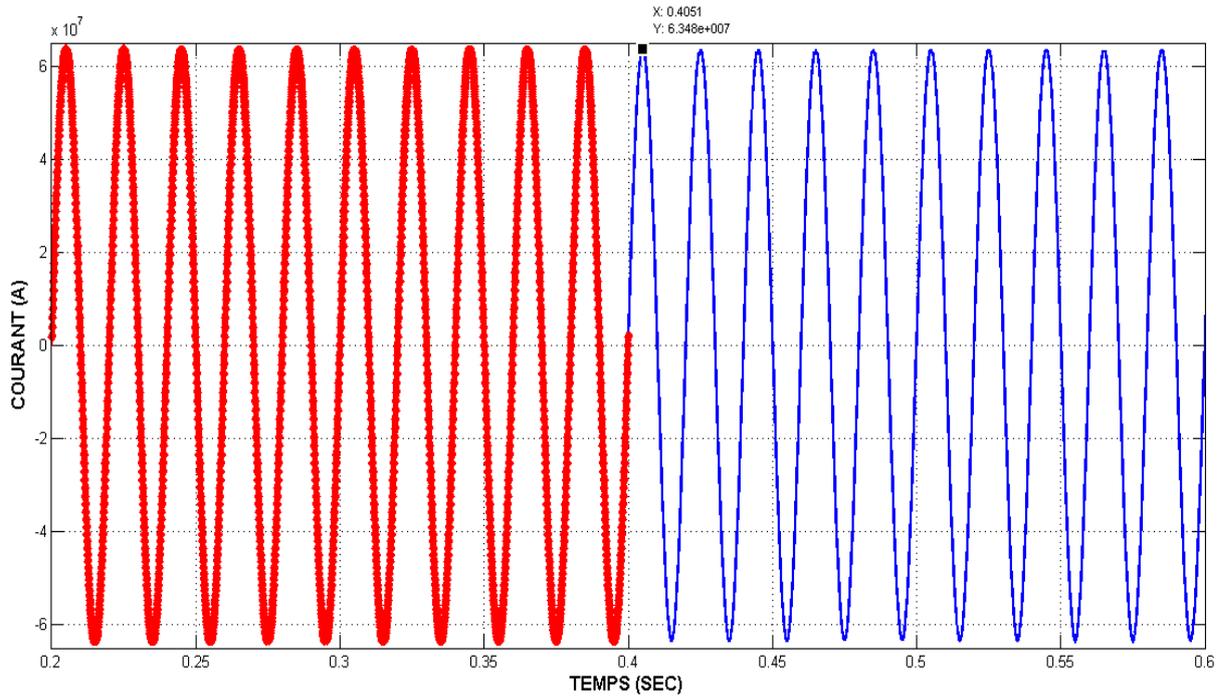


Fig.III.32. Courant durant la phase de défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c = 7 \cdot 10^7$ A/mm² pour un court-circuit monophasé.

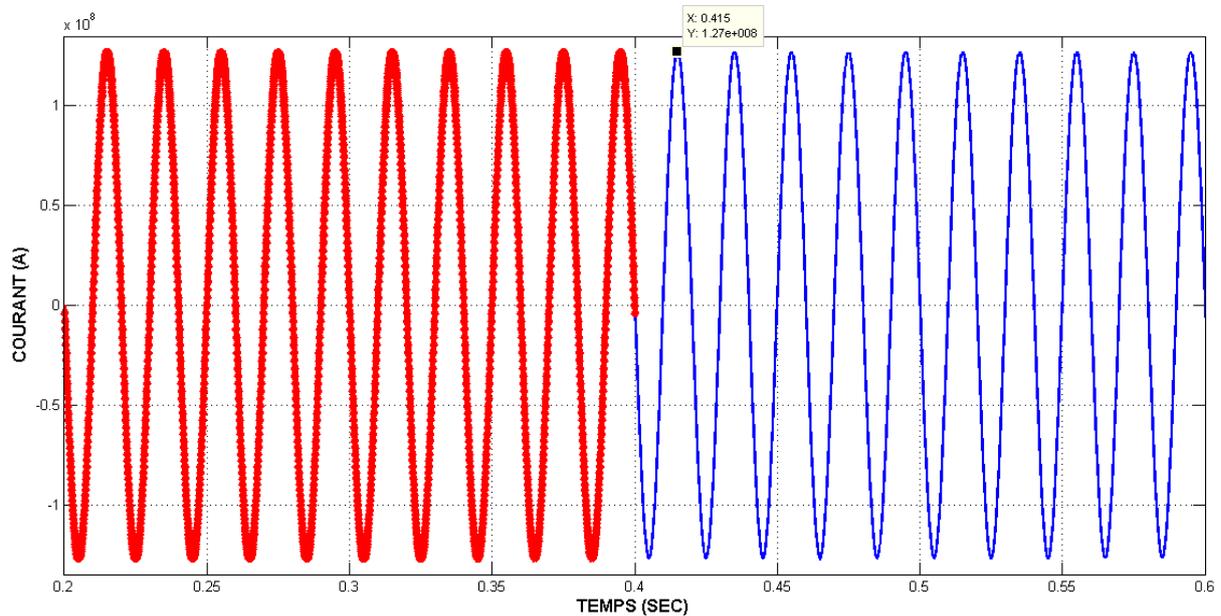


Fig.III.33. Courant durant la phase de défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c = 7 \cdot 10^7$ A/mm² pour un court-circuit biphasé.

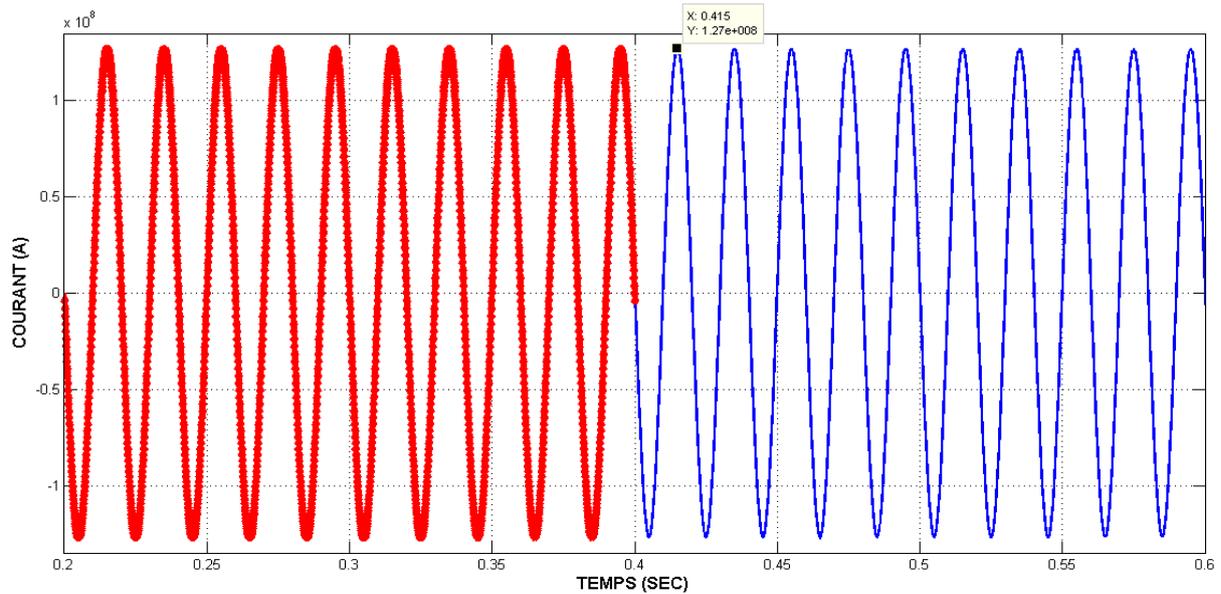


Fig.III.34. Courant durant la phase de défaut sans limitation et défaut avec limitation pour un limiteur de courant ayant un $J_c = 7 \cdot 10^7$ A/mm² pour un court-circuit triphasé.

Selon les résultats présentés on peut dire qu'avec l'augmentation de la densité du courant critique, la densité de courant circulant dans le réseau électrique augmente et elle voisine une valeur égale à deux fois la valeur de la densité de courant critique.

Pour certains cas, le limiteur de courant ne peut pas intervenir si la densité de courant critique est supérieur ou égale à celle de la densité de courant de court-circuit. Ceci est traduit par un taux de limitation qui égale à l'unité.

III.4. Conclusion :

Ce chapitre est dédié à la modélisation du comportement électrique d'un limiteur de courant conçu à partir d'un supraconducteur de haute température critique, de type II. Selon les résultats présentés, on peut dire que le limiteur de courant supraconducteur peut parfaitement assuré le fonctionnement de la limitation du courant de défaut dans le réseau où il peut attribué à l'augmentation de la résistance du réseau dans le but de limiter le courant.

La limitation du courant de défaut est dépendante de plusieurs paramètres physiques, principalement, la densité de courant critique J_c . Celle-ci doit être choisie inférieure à la densité de courant de court-circuit car si celui-ci dépasse la valeur de J_c , il n'y aura aucune limitation.

Le courant circulant dans le réseau est presque égal à deux fois le courant critique.

Conclusion générale

Ce mémoire est dédié à la simulation et à la modélisation des matériaux supraconducteurs à haute température critique. Comme application, nous avons étudié leurs utilisations dans la limitation du courant de défaut dans les réseaux électriques où nous avons examiné l'influence de la densité du courant électrique critiques sur la limitation du courant de court-circuit (CC). Afin d'obtenir les résultats de l'effet de J_c en limitation des courants dans un réseau électrique, nous avons procédé au développement de deux codes de calcul numérique adoptés pour le calcul des courants de défaut qui est dû principalement au court-circuit dans un réseau électrique, le second est adopté pour déduire les caractéristiques électriques du limiteur de courant. Le premier code utilise la méthode des composants symétriques pour calculer les trois types du courant de défaut dans un réseau électrique triphasé, le deuxième code utilise une approche pour calculer la résistance électrique équivalente du supraconducteur qui dépendra de l'état du matériau supraconducteur, soit dans un état très dissipatif caractérisé par une grande résistance, soit par une résistance négligeable dans son état supraconducteur.

Les supraconducteurs offrent l'opportunité de développer plusieurs applications uniques en Génie Electrique qui ne sont pas réalisables avec des matériaux conventionnels. Ils effectuent une transition relativement nette vers un état hautement résistif lorsque la densité de courant critique est dépassée. Cet effet a donc suggéré leur utilisation pour la limitation du courant de défaut. Ce travail a pour objectif d'étudier l'effet de la densité de courant critique dans les supraconducteurs sur la limitation du courant de défaut dans les réseaux électriques.

D'après les résultats présentés dans ce mémoire, les matériaux supraconducteurs intervenant dès l'apparition en premier pic de courant de court-circuit (quand la valeur du courant de court-circuit atteint une valeur précis reliev de J_c) ; alors on peut dire que le limiteur de courant supraconducteur peut parfaitement assuré le fonctionnement de la limitation du courant de défaut dans le réseau électrique où il peut attribué à l'augmentation de la résistance du réseau dans le but de limiter le courant. Cette application de limitation du courant peut réduire considérablement les exigences de protection en termes de taille, poids et coût.

Comme perspectives, nous proposons l'étude de l'effet de deux grandeurs restant (température critique T_c et champ magnétique critique H_c) et la relations entre ces deux grandeurs avec la densité de courant en limitation du courant de défaut.

Bibliographie :

1. [A. Bhatia, B.E., “Introduction to Short Circuit Analysis”](https://www.pdhonline.com/cgi-bin/quiz/courses/courselist.cgi?class_name=e204), PDH course E204, online: https://www.pdhonline.com/cgi-bin/quiz/courses/courselist.cgi?class_name=e204.
2. B. Hakim, “Contribution à l’identification des courts circuits”, thèse de Magister de l’université Badji Mokhtar, Annaba, 2007.
3. C.H. Bonnard, “Méthodes d’évaluation du comportement des limiteurs de courant de court-circuit supraconducteurs résistifs intégrés dans des simulateurs de réseaux électriques”, Thèse de doctorat de l’université de l’université de Lorraine, 2017.
4. CCAS: U.S. organization, “Superconductivity: Present and Future Applications”, IEEE Council on Superconductivity (CSC), 2009.
5. C. Rey, “Superconductors in the Power Grid: Materials and Applications”, Woodhead Publishing, Langford Lane, Kidlington, UK, 2015.
6. E. A. Lynton, “Superconductivity”, Spottiswoode, Ballantyne & Co Ltd, second edition, Colchester, London, 1964.
7. J. C. Das, “Power System Analysis: Short-Circuit Load Flow and Harmonics”, Amec, Inc. Atlanta, Georgia, 2002.
8. Joe Khachan and Stephen Bosi, “Superconductivity”, on line: <http://www.physics.usyd.edu.au/~khachan/PTF/Superconductivity.pdf> , 2019.
9. L. Alloui, “Modélisation Tridimensionnelle Des Matériaux Supraconducteurs”, Thèse de doctorat de l’université paris sud, Paris.
10. L. Miloud, “Etude et modélisation des courants de court-circuit dans les réseaux MT/BT”, Thèse de master de l’Université de M’sila, 2016.
11. L. Song, “Transformer Short Circuit Current Calculation and Solutions”, Bachelor’s Thesis Electrical Engineering, Vaasa, 2013.
12. M. Eremia, M. Shahidehpour (Editors), et. al., “Handbook of Electrical Power System Dynamics: Modeling, Stability, and Control”, Wiley & IEEE Press, Power Engineering Series, New Jersey, 2013.
13. N. GHANEMI, “Etude de la tenue aux courants de court-circuit pour le raccordement d’une production décentralisée au réseau MT”, Thèse de Magister de l’université Mentouri De Constantine, Algerie, 2008.
14. P. Mangin and R. Kahn, “Superconductivity: an introduction”, EDP Sciences, Grenoble Sciences Series, Grenoble, France, 2013.

15. S. Khene, “Critical Currents and Superconductivity: Ferromagnetism Coexistence in High-TC Oxides”, Taylor & Francis Group, 2016.
16. Schneider Electric, “Protection des réseaux électriques : Guide de la protection”, PozzoGrosMonti – Italie, 2003.
17. Schneider Electric, “Calcul des courants de court-circuit”, Cahier technique n°158, 2000.
18. T. Matsushita, “Electricity and Magnetism: New Formulation by Introduction of Superconductivity”, CORONA PUBLISHING CO., LTD., Sengoku, Bunkyo, Tokyo, Japan, 2014.