



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

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Réseau électrique

Réf. :

Présenté et soutenu par :
DJEFFAL LAKHDAR

Le : dimanche 24 juin 2018

ETUDE ET SIMULATION DU LIMITEUR DE COURANT SUPRACONDUCTEUR

Jury :

Dr	Boumaraf rabia	MCA	Université mohamed khider biskra	président
Mr	Khane mohamed lotfi	MCA	Université mohamed khider biskra	Examineur
Mr	Alloui lotfi	Pr	Université mohamed khider biskra	Encadreur

Année universitaire : 2017/2018

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Kheider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Réseau Electrique

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

***ETUDE ET SIMULATION DU LIMITEUR
DE COURANT SUPRACONDUCTEUR***

Présenté par :

DJEFFAL LAKHDAR

Avis favorable de l'encadreur :

Pr. Alloui Lotfi

Avis favorable du Président du Jury

Dr. Boumaraf rabia

Cachet et signature



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Génie électrique
Option : Réseau électrique

Thème :

ETUDE ET SIMULATION DU LIMITEUR DE COURANT SUPRACONDUCTEUR

Proposé par : DJEFFAL LAKHDAR

Dirigé par : Pr. Alloui Lotfi

RESUMES (Français et Arabe)

Français

Lorsqu'un dysfonctionnement occlure dans un réseau électrique, en particulier les court-circuités, ce qui affecte néfastement le complexe du réseau au courant puissant, nous devons impérativement trouver une solution efficace le plus tôt possible pour freiner le courant émanant de ce dysfonctionnement

Dans cette thèse ,nous vous proposons une excellente solution qui est d'adjoindre à notre système le pouvoir incroyable des superconducteurs,spécifiquement les limiteurs d'intensité du courant électrique car ces derniers ont la particularité de limiter l'intensité du courant automatiquement et intelligemment d'une manière aisée évitant ainsi le recours à d'autres systèmes plus sophistiqués pour la protection des réseaux, on parviendra de cette façon à économiser temps et argent. Le but principal de cette thèse est de présenter un modèle représentant et simulant l'action des limiteurs de courant électrique grâce au programme MathLab Simulink,nous avons fournis toutes les données en relation avec les limiteurs de courant électrique actuellement disponibles sur le terrain et les avons ajoutés à ce programme pour les rendre réels et aboutir à un modèle concret. Au cours de

notre travail, nous avons tout d'abord commencé par définir ce qu'est exactement un réseau électrique afin de donner une idée sur les éventuels altérations présentes. Après cela, on a définis les différents types et composants des supraconducteurs et des limiteurs de courant ainsi que leur mode d'action physique, mathématique, leur relation avec la chaleur et la résistance, leurs effets sur le courant...etc,pour enfin clore notre projet par l'introduction et la présentation du programme qui matérialise leur action observant à travers lui des résultats stupéfiants et fortement satisfaisants en concordance avec les résultats réels des supraconducteurs.

ملخص

عند حدوث عطب في الشبكة الكهربائية وخاصة الدارات القصيرة والتي تؤثر سلبا على الشبكة المعقدة ذات التيار القوي. يستلزم علينا اجباريا ايجاد حل سريع و فعال لكبح التيار العالي لهذا العطب ..في هذه الأطروحة نقترح حل جد فعال و ممتاز وهو إصاق الموصلات الفعالة أو الفانقة السوبراكونديكتورات وبالخصوص محددات شدة التيار الكهربائي هذه الاخيرة يمكنها تحديد شدة التيار ذاتيا بدون اللجوء الى الانظمة المعقدة للكشف عن الاخطاء في الشبكة الكهربائية المراد حمايتها ما يوفر علينا الكثير من الوقت والمال

الهدف الرئيسي من هذه الأطروحة هو نمذجة نموذج يمثل أو يحاكي محددات التيار الكهربائي من خلال برنامج الماطلاب سيميلنك بحيث وفرنا جميع معطيات محددات التيار الكهربائية الموجود في أرض الواقع و أدمجناها في هذا البرنامج ليكون واقعية فقد قمنا في بداية هذا العمل بالتعريف العام للشبكة الكهربائية لإعطاء فكرة حول الأعطاب الموجودة في الشبكة بعد ذلك قمنا بالتعريف على أنواع ومكونات السوبراكونديكتورات و محددات التيار وكيفية عمل المحددات فيزيائيا و رياضيا وعلاقتها مع الحرارة والمقاومة وتأثيرها على التيار.. لنختم في الأخير بالبرنامج التي يمثل ويجسد عملها في أرض الواقع ونلاحظ نتائج جد مذهلة و فعالة تتناسب مع النتائج الحقيقية للسوبراكونديكتورات .

Le mémoire contient par ordre d'apparition:

- Dédicaces
- Remerciements
- Liste des Tableaux
- Liste des Figures
- Liste des abréviations
- Résumés (bilingue)

Sommaire :

- * Introduction générale
- * Chapitre 1, 2, 3...
(Chaque chapitre **commence** par une Introduction **et se termine** par une conclusion)
- * Conclusion générale et perspectives
- * Bibliographie
- * Annexe

Type d'écriture:

- Times new Roman 12
- Les titres en Gras
- Interligne 1.5
- Formules et Figures sont numérotées par chapitre :
exp. Fig. n°Chap. n°figure (Fig. I.1) ou (Equ. I.1)

Remarques :

- Eviter le glaçage de la page de garde.
 - Respecter le contenu par ordre d'apparition.
 - Ecrire les résumés bilingues dans une seule page...
- عدم تجليد الصفحة الأولى
 - احترام المحتوى المذكور أعلاه
 - كتابة ملخص للمذكرة باللغتين (العربية والفرنسية) و في صفحة واحدة... الخ

Dédicaces

Ma famille

Mes amies

Merci beaucoup

REMERCIEMENTS

Ce mémoire de fin de formation est l'aboutissement des efforts conjugués d'un certain nombre de personnes qui nous ont apporté une assistance morale, technique et matérielle. Qu'il nous soit donc permis de nous acquitter d'un devoir, celui de présenter nos sincères remerciements à toutes ces personnes. Alors, nous présentons nos vifs remerciements à nos parents qu'ils sont toujours proches de nous par leurs encouragements et par leurs soutiens. Nous exprimons nos remerciements à **Pr. Alloui Lotfi**, notre Encadreur qui a manifesté son entière disponibilité pour nous aider, et n'a ménagé aucun effort pour l'aboutissement de ce travail. Nos remerciements vont également à tous les enseignants de notre département de génie électrique-Biskra qui ont toujours donné le meilleur d'eux-mêmes afin de nous assurer une formation de qualité. Nous tenons à remercier aussi le **Dr. Mohamed Lotfi KHENE** (président de jury) et la membre du jury **Dr. Boumaraf rabia** de l'intérêt dont ils font preuve à notre égard pour lire ce mémoire et en assistant à notre soutenance.

Sans oublier le professeur qui m'a beaucoup aidé à terminer ce travail, **Dr. BENALIA Khaled**, et le remercier pour l'effort qu'il a fait avec moi dans ma note et **Dr. Salhi Ahmed** qui était très fatigué et ne m'a répondu aucune demande d'aide..Merci Du fond de mon cœur

Enfin nous invitons tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce travail, à trouver dans le même hommage le témoignage de notre estime et de notre gratitude.

LIST DES TABLEAUX

Chapitre II

Tableau .II.1. Liste de quelques matériaux supraconducteurs de type I	23
Tableau .II.2. Températures critiques de quelques matériaux à haute température critique	25
Tableau II.1. Principales grandeurs caractéristiques pour l'YBaCuO	37
Tableau II.2. Principales grandeurs caractéristiques du	37
Tableau II.3. Propriétés thermo physiques de l'YBaCuO et du Bismuth	37

Chapitre IV

Tableau. IV.1 : les caractéristiques des éléments du réseau étudié.	63
Tableau . IV.2 : Résumé des paramètres modèles SFCL.	64
Tableau IV.3. Les paramètres de la pastille supraconductrice adoptés dans ces simulations	84
Tableau IV.4. Les paramètres de la pastille supraconductrice adoptés dans ces simulations	97
Tableau IV.5. Les paramètres de la pastille supraconductrice adoptés dans ces simulations	107

LIST DES FIGURES

Chapitre I

Fig. I.1.Exemple d'une partie d'un réseau de transport	4
Fig. I.2. Différents modes de distribution	6
Fig. I.3.Courant de court-circuit	6
Fig. I.4. Court-circuit triphasé	7
Fig. I.5.Court circuit biphasé isolés	8
Fig. I.6.Court circuits biphasé à la terre	8
Fig. I.7.Court circuits monophasé à la terre	9
Fig I.8. Schéma équivalent du réseau au court-circuit	9
Fig. I.9.Décomposition du courant de court-circuit	10
Fig. I.10. La foudre	12
Fig.I.11.Surtensions directes	13
Fig.I.12.Surtensions directes Surtensions indirectes	13
Fig.I.13.Principe du Paratonnerre à tige	14
Fig.I.14.Exemple de protection d'un Transformateur par éclateur à tiges	14

Chapitre II

Fig.II.1. Résistivité d'un supraconducteur en fonction de la température	18
Fig.II.2.Surface critique des matériaux supraconducteurs	19
Fig. II.3. Dépendance de la résistivité en fonction de la température pour l'état normal (I) et l'état supraconducteur (II)	20
Fig.II.4. La caractéristique tension courant pour un fil supraconducteur	21
Fig.II.5. Surface critique	22
Fig.II.6.Diagramme de phases d'un supraconducteur de type I	23

Fig. II.7.a) Diagramme des phases d'un supraconducteur de type II	24
b) Dépendance de l'aimantation avec l'excitation magnétique d'un Supraconducteur de type II .	
Fig.II.8. Diagramme de phases d'un supraconducteur de type II .	25
Figure II.9. Différence entre un conducteur parfait et un supraconducteur	27
Fig. II.10.Caractéristique $E(j)$ d'un supraconducteur, modèle de l'état critique	28
Fig.II.11. Caractéristique $E(J)$ d'un supraconducteur avec activation thermique	29
Fig.II.12.La caractéristique du champ électrique E en fonction de la d ensité de courant J .	30
Fig. II.13. Structure cristallographique de l'YBaCuO	34
Fig.II.14. Résistivité de l'YBaCuO en fonction de la température	35
Fig.II.15. Structure cristallographique de bismuth Bi2223	36
Fig.II.16. Chaleur spécifique en fonction de la température du Bi2223	38
Fig.II.17.Architecture générale des couches minces	39
Fig.II.18. L'imagerie médicale	41

Chapitre III

Fig.III.1. Limitation de courant par transformateur court-circuit	47
Fig.III.2. Limitation de courant par thyristors contrôlant un circuit raisonnant	47
Fig.III.5.Courants de court circuit avec et sans limiteur	50
Fig.III.4. principe du limiteur de courant résistif.	51

Fig.III.7. Principe du limiteur de courant inductif	52
Fig.III.8.Principe du limiteur de courant de type pont redresseur	53
Fig.III.10. Principe du limiteur de courant de type contrôleur de courant de défaut	53
Fig.III.11.Principe du limiteur de courant du type noyaux magnétiques saturés	54
Fig.III.12.Insertion de limiteurs de courant de défaut dans un réseau.	57
Fig.III.13.Caractéristiques du supraconducteur E-J, montrant les trois états .	58
Fig.III.14.variation de temps de transition en fonction de courant de défaut	60

SOMMAIRE

Introduction général	1
Chapitre I : Généralités de réseau	
I.1.Introduction	3
I.2. Description des réseaux électriques	3
I.2.1. Réseau de transport THT	3
I.2.2. Réseau de répartition HT	4
I.2.3. Réseau de distribution MT	4
I.3. Etude des court -circuits	6
I.3.1.définition de court-circuit	6
I.3.2. Conséquences des défauts de court circuit	7
I.3.3.Types de court circuit	7
I.3.3.1.Court circuit triphasé	7
I.3.3.2.Court circuits biphasé isolés	8
I.3.3.3.Court-circuit biphasé à la terre	8
I.3.3.4.Court circuits monophasé à la terre	8
I.3.4.Calcul d'un courant de court-circuit	9
I 4.Surtensions	11
I 4.1.Surtensions par décharges électriques atmosphériques	11
I 4.2.Surtensions de commutation	11
I.5.La foudre	12
I.5.1.Effets de la foudre	12
I.6.Protection contre la foudre	13
I.6.1.Paratonnerre	13
I.6.2.Eclateur	14

I.6.3.Parafoudre varistance	14
I.7.Conclusion	15
Chapitre II : GENERALITE SUR LES MATERIAUX SUPRACODUCTEURS	
II.1.Introduction	16
II.2.Historique	16
II.3.Présentation générale de la supraconductivité	18
II.4.Comportement des supraconducteurs	18
II.4.1.Grandeurs critiques	18
II.4.2.Température critique	19
II.4.3.Densité de courant critique	20
II.4.4.Champ magnétique critique	21
II.4.5. Surface critique	22
II.5.Classification des supraconducteurs	22
II.5.1.Supraconducteurs de type I	22
II.5.2.Supraconducteurs de type II	23
II.6.Effet MEISSNER, supraconducteur et conducteur parfait	26
II.7.Modèles des matériaux supraconducteurs	27
II.7.1 Le modèle de l'état critique de Bean	27
II.7.2.Modèle de loi de puissance	28
II.7.3.Modèle de KIM	29
II.7.4 Modèle de Flux Flow et Flux-Creep	29
II.8.Modèle de l'état critique	31
II.9.Les pertes	31
II.9.1.Pertes DC (pas variation dans le temps)	31
II.9.2. Pertes AC	31

II.10.Propriétés spécifiques d'un supraconducteur	32
II.10.1.Ecrantage de flux	32
II.10.2.Piégeage de flux	32
II.11.Supraconducteur à haute température critique	33
II.12.Supraconducteur YBaCuO	33
II.13. Supraconducteur à base de bismuth	35
II.14.Propriétés	36
II.15.Les couches minces supraconductrices (coated conductors)	38
II.16.Principales applications des supraconducteurs	39
II.16.1.Applications en physique fondamentale	39
II.16.2.Applications en électrotechnique	39
II.16.2.a. Machines tournantes	39
II.16.2.b. Câbles de transport	40
II.16.2.c. Stockage d'énergie	40
II.16.2.d. application médical	40
II.16.2.e. Les transformateurs	41
II.16.2.f. Limitation de courant	41
II.17.conclusion	42
Chapitre III : limiteur de courant	
III.1.Introduction	43
III.2.Les limiteurs de courant traditionnel	43
III.2.1.Défauts	43
III.2.2.Elimination des défauts	44
III.2.2.a. Fusible	44
III.2.2.b. Disjoncteur	45

III.2.3.Courants de défaut	45
III.3.Principe général des limiteurs de courant	45
III.3.1.limiteurs de courant classique	46
III.3.1.a. Arc électrique	46
III.3.1.b. Réactance série	46
III.3.1.c. Limiteur à redresseurs commandés	46
III.3.1.d. Condensateur	47
III.3.1.e. Inductance	48
III.3.1.f. Résistance	48
III.3.1.j. Résistance variable	48
III.4.Limiteur de courant à base de supraconducteur SFCL	49
III.4.1. Différents types de limiteur de courant supraconducteur	50
III.4.1.a. Limiteur résistif	50
III.4.1.b. Limiteur inductif	51
III.4.1.c. Limiteur de type pont redresseur	52
III.4.1.d. SFCL de type contrôleur de courant de défaut	53
III.4.1.e. SFCL de type noyaux magnétiques saturés	54
III.4.2.Comparaison des différents SCFCL	55
III.5.Avantages et inconvénients propres aux supraconducteurs	55
III.5.1. Avantages	55
III.5.2 . Inconvénients	56
III.6 Insertion du limiteur de courant dans le réseau électrique	56
III.7. Modélisation	58
III.7.1.Implémentation du modèle de SFCL	58
III.7.2.Analyse les caractéristiques temporelles du SFCL	58
III.8.conclusion	61

Chapitre IV : Simulation et résultats

IV.1 Simulation et résultats	62
IV.1.1 résultats de Simulation	64
IV.1.2. Variation de la densité de courant critique J_c	68
IV.1.3. Variation du champ électrique critique E_c	84
IV.1.4. Variation du paramètre beta	97
IV.1.5. Variation de la température critique T_c	107
IV.2. Conclusion	117

Introduction général

Depuis le moyen âge l'homme, fasciné par les phénomènes extraordinaires de la nature, essaie d'expliquer par la physique les propriétés fondamentales de la matière. Cette science explique les phénomènes qui apparaissent parfois dans des conditions extrêmes de température et de pression. Jusqu'en 1911, le physicien Heike Kamerlingh Onnes et son équipe au cours d'une étude sur les propriétés de la matière à très basse température, découvrent que la résistance électrique du mercure devient nulle en dessous de 4,2K ; ainsi ils ont découvert le phénomène de la supraconductivité. Cette dernière se traduit par deux effets remarquables [11] :

- Le supraconducteur conduit le courant électrique de façon parfaite.
- Il expulse les champs magnétiques et fait léviter les aimants.

Malgré cette découverte de la supraconductivité qui occupe une place importante dans la science, certaines caractéristiques de ce phénomène physique restent inexpliquées et constituent une grande énigme technologique et scientifique.

A la fin des années 80 les chercheurs ont réussi à obtenir des matériaux supraconducteurs à haute température critique. Ce qui a eu la conséquence accrue pour ces matériaux. Cette nouvelle classe de supraconducteurs plus faciles et moins coûteux à utiliser que celles de leurs prédécesseurs.[11]

Actuellement, les supraconducteurs sont utilisés en recherche, pour des applications dans de nombreux domaines, notamment pour le stockage de l'énergie électrique, de l'imagerie médicale, dans les transports (les trains à lévitation magnétique) et des limiteurs de courant. La coupure des courants de défaut reste un problème mal résolu dans les réseaux électriques. Cependant, l'application la plus prometteuse semble être la protection des réseaux par l'utilisation des limiteurs supraconducteurs de courant.

Nous présentons dans ce travail une étude approfondie sur les supraconducteurs à haute température critique, ainsi qu'à modéliser les caractéristiques temporelles d'un limiteur de courant à base du supraconducteur durant le défaut. Le modèle développé doit décrire le comportement réel du limiteur supraconducteur SFCL. [11] Il doit être simple à intégrer dans n'importe quel type de réseau électrique. L'étude est basée sur la modélisation et la simulation. La validation de ces résultats sera réalisée au moyen du logiciel MATLAB.

Dans le premier chapitre, décrit les perturbations dans le réseau électrique. Sont rappelées les origines ainsi que les conséquences des principales perturbations qui peuvent être apparaissent dans le réseau électrique. Sont étudiés le court-circuit, la surtension et les surintensités. Egalement, on rappelle le calcul des courant de court-circuit [9].

Dans le deuxième chapitre on donne un aperçu historique sur la supraconductivité. Ensuite nous décrivons les propriétés physiques intéressantes. Après cela nous verrons les différents types ainsi que les modèles de supraconducteurs. Puis, nous donnerons les différentes applications industrielles des supraconducteurs dans différents domaines [11]

Le troisième chapitre présente les limiteurs du courant traditionnel ; suivi par le fonctionnement d'un limiteur de courant ; après ceci le limiteur à base de supraconducteur avec ses différents types [11].

Au niveau du quatrième chapitre, on distingue l'analyse des réseaux de distributions se basant sur le modèle de Steven M. Blair dans le cas normal, dans le cas de défaut, puis en cas d'utilisation du SFCL avec tous les résultats qui sont également présentés ainsi que les procédures d'implémentation, sous l'environnement MATLAB, et enfin la discussion des résultats de simulation de SFCL[11].

Finalement, une conclusion générale résume l'essentiel de notre travail.

Chapitre I

Généralité de réseau

I.1.Introduction

A notre époque, et sans électricité, la vie quotidienne serait difficilement envisageable, il est donc nécessaire de savoir la produire de manière efficace et continue .Pour répondre à la consommation croissante d'électricité, il a fallu inventer et construire des centrales électriques pour produire de l'électricité. Une fois produite, elle doit être amenée chez le consommateur. Les réseaux électriques de transport et de la distribution assurent le transit de l'énergie électrique entre les centrales de production et les consommateurs. Ces réseaux sont constitués d'un ensemble des appareils assurant des fonctions différentes (protection,...etc.) [9].

I .2.Description des réseaux électriques

D'une façon générale, les niveaux de tensions

Un réseau de transport THT 220.....800 KV

Un réseau de répartition HT 60.....170 KV

Un réseau de distribution MT 5.....36 KV

Un réseau de livraison BT 400/230 V

Cette hiérarchie varie considérablement d'un pays à l'autre [9].

I 2.1.Réseau de transport THT

C'est généralement le réseau qui permet le transport de l'énergie depuis les centres éloignés de production vers les centres de consommation. C'est sur le réseau THT que sont en principe branchées les centrales de grandes puissances (> 300 MW). Les réseaux de transport constituent une vaste grille couvrant le territoire, à laquelle sont raccordées les sources et les utilisations (groupes, transformateurs). Chaque nœud A, B et C (Fig.I.1) constitue un « poste d'interconnexion ». Ce poste est en général constitué par un collecteur principal appelé « jeu de barres » sur lequel se raccordent les lignes, au moyen d'appareils. Ces réseaux sont pour la plupart aériens et souterrains dans les villes ou à leur approches. Ils sont étudiés pour un transit donné correspondant en général à la limite thermique de la ligne. Une attention particulière doit être portée à l'effet couronne qui peut donner lieu en THT, à des pertes très significatives suivant le climat et l'altitude. Les pylônes de lignes sont équipés en général de deux ternes (2 fois 3 phases) voir quatre et même six ternes. Les protections de ces réseaux doivent être très performantes. Quant à leur exploitation, elle est assurée au niveau national

par un centre de conduite ou dispatching à partir duquel l'énergie électrique est surveillée et gérée en permanence [9].

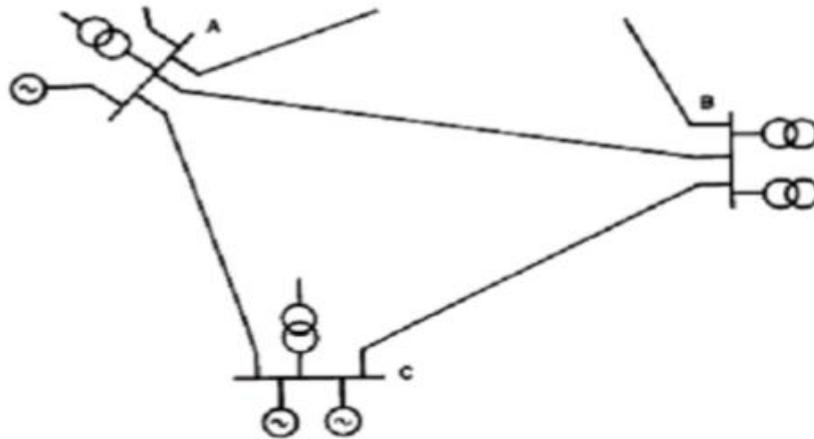


Fig. I.1.Exemple d'une partie d'un réseau de transport [9].

I 2.2.Réseau de répartition HT

La finalité de ce réseau est avant tout d'acheminer l'électricité du réseau de transport vers les grands centres de consommation qui sont :

- Soit du domaine public avec l'accès au réseau de distribution MT,
- Soit du domaine privé avec l'accès aux abonnés à grande consommation (supérieure à 10 MVA) livrés directement en HT.

I.2.3. Réseau de distribution MT

Les utilisateurs peuvent être groupés d'une façon très dense comme dans les villes ou bien séparés les uns des autres par des distances plus ou moins grandes comme dans les campagnes. Ils sont desservis par un réseau de distribution alimenté par un poste de répartition qui reçoit l'énergie, provenant de centrales éloignées, par l'intermédiaire du réseau de transport. Des lignes de distribution à moyenne tension (MT) partent des postes de répartition et alimentent des postes de transformation répartis en différents endroits de la zone à desservir; ces postes de transformation abaissent la tension à une valeur convenable pour alimenter le réseau de distribution publique auquel les abonnés sont raccordés par des branchements. On distingue, à travers le monde, différents systèmes de distribution MT [9]. Citons principalement :

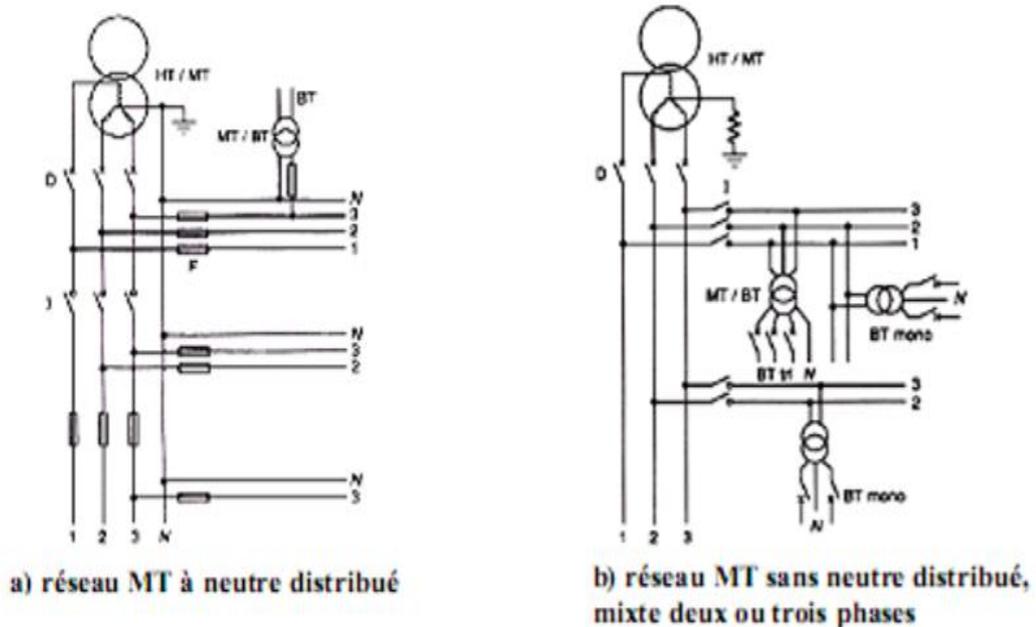
Le système nord-américain (fig. I.2a) à neutre distribué directement mis à la terre l'ossature triphasée est composée de quatre fils, et les dérivations, à distribution monophasée

entre phase et neutre, comportent un ou plusieurs fils de phase, suivant la puissance à desservir, plus le neutre [9].

Le système utilisé par exemple en Grande-Bretagne ou en Irlande (fig. I.2b), qui à partir d'ossatures triphasées à trois fils sans neutre distribué alimente des dérivations qui peuvent être à deux fils de phase [9].

Le système australien (Fig. I.2.c), particulièrement économique, est constitué d'ossatures à trois fils sans neutre distribué, avec, entre autres, des dérivations monophasées à un seul fil avec retour par la terre (cette solution nécessite une faible résistivité du sol) [9].

Le système français (fig. I.2d), entièrement triphasé en ossatures et dérivations, à neutre non distribué [9].



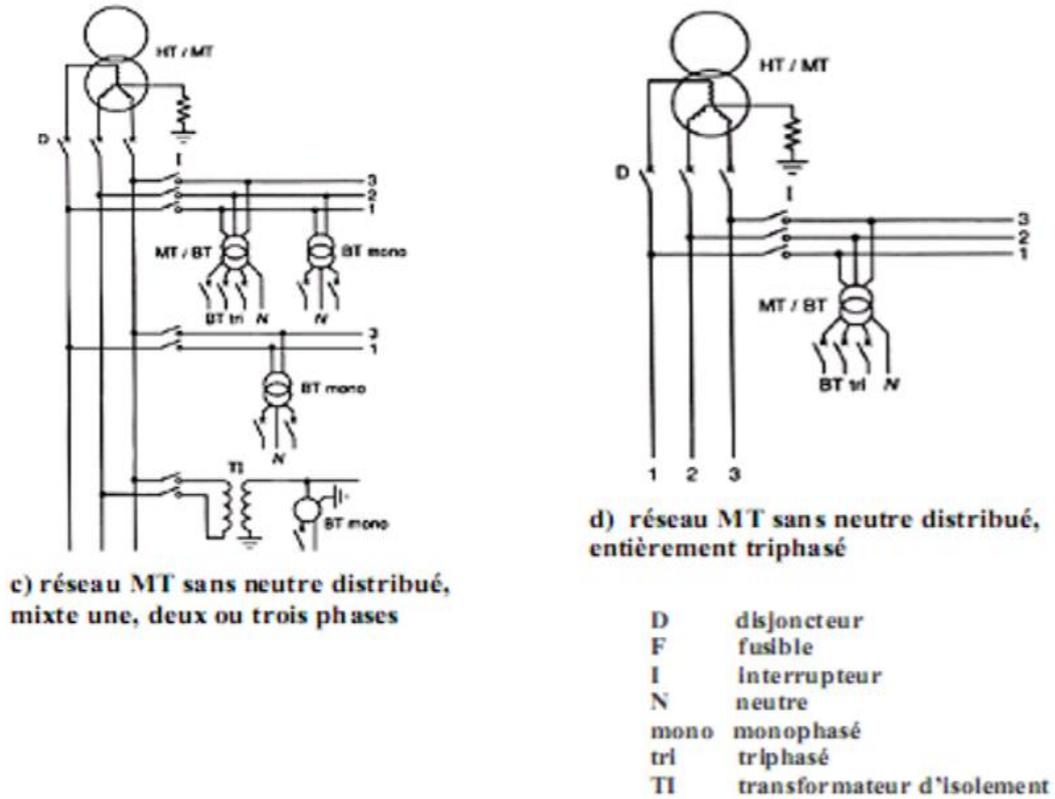


Fig. I.2. Différents modes de distribution [9].

I.3. Etude des court –circuits

I.3.1. Définition de court-circuit

Un court-circuit est une liaison accidentelle entre conducteurs à impédance nulle (court-circuit franc) ou non (court-circuit impudent) . Un court-circuit peut être interne s'il est localisé au niveau d'un équipement, ou externe s'il se produit dans les liaisons [10].

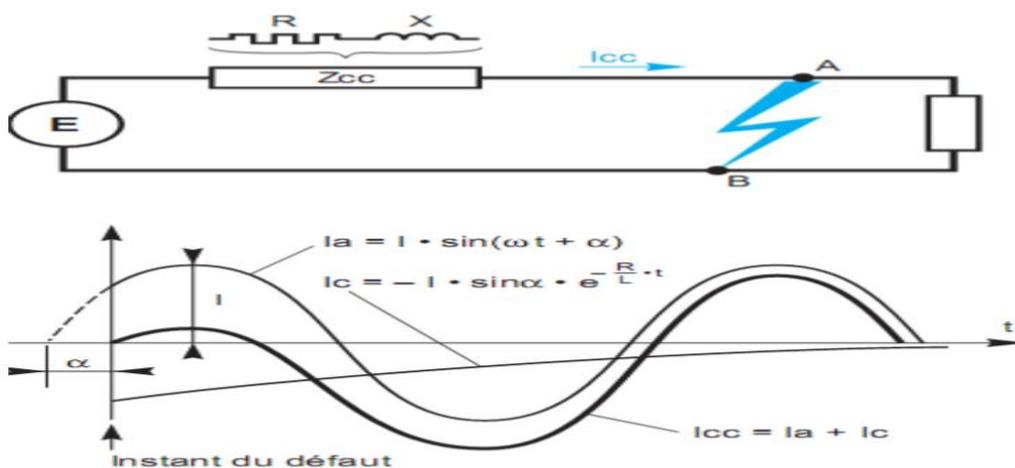


Fig. I.3. Courant de court-circuit [9].

I.3.2. Conséquences des défauts de court circuit [10]

Les conséquences du court-circuit sont souvent graves sinon dramatiques :

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

I.3.3. Types de court circuit

Plusieurs types de court-circuit peuvent se produire dans un réseau électrique :

I.3.3.1. Court circuit triphasé

Les défauts triphasés : entre les trois phases du réseau avec ou sans liaison à la terre, c'est le défaut correspondant à la figure ci-dessous. En générale il provoque les courant de défaut les plus importants son calcul est donc indispensable pour choisir les matériels (intensité et contraintes électrodynamiques maximale à supporter) [10].

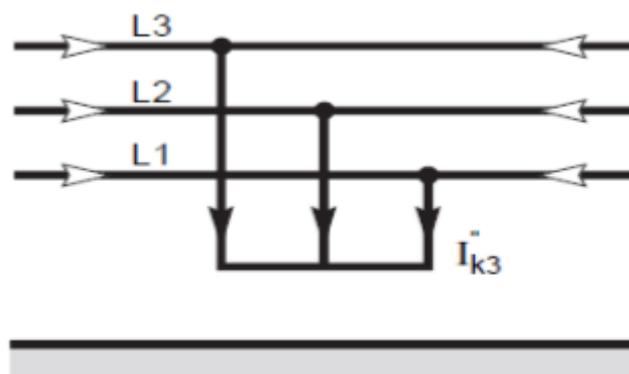


Fig. I.4. Court-circuit triphasé [10].

I.3.3.2. Court circuits biphasé isolés

Il correspond à un défaut entre deux phases sous tension composée. Le courant résultant est plus faible que dans le cas du défaut triphasé, sauf lorsqu'il se situe à proximité immédiate d'un générateur [10].

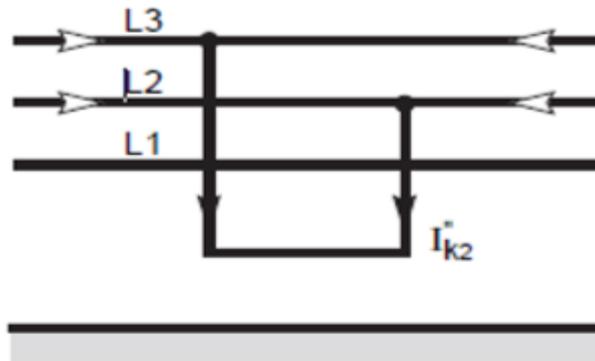


Fig. I.5. Court circuit biphasé isolés [10].

I.3.3.3. Court-circuit biphasé à la terre

Les biphasé à la terre : ce sont les court circuit entre deux phases ou une phase et le neutre avec mise à la terre ,ces défaut représentent environ 4% des cas ,c'est le défaut correspondant à la figure ci-dessous[10].

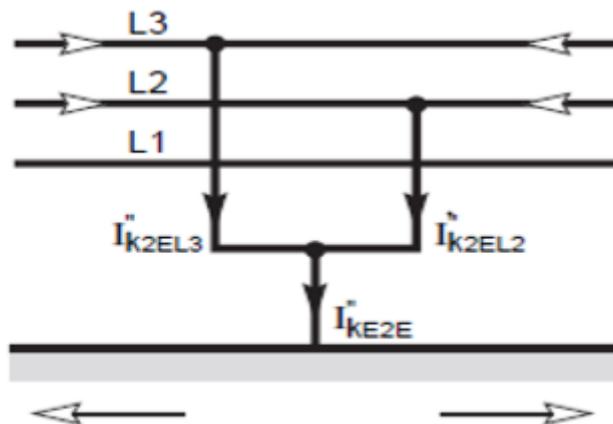


Fig. I.6. Court circuits biphasé à la terre [10].

I.3.3.4. Court circuits monophasé à la terre

Les défauts monophasés : ce sont des défauts entre une phase et la terre ou une phase et la masse, ils sont à la base de la circulation d'un courant homopolaire, leur intensité est limitée par la terre, ces court-circuit représentent à 76% des cas [10].

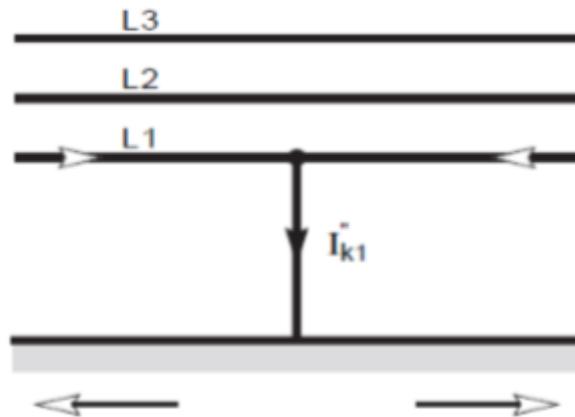


Fig. I.7. Court circuits monophasé à la terre [10].

I.3.4. Calcul d'un courant de court-circuit

La connaissance des valeurs des courants de court-circuit est indispensable pour le dimensionnement des matériels de protection. Pour les disjoncteurs ces valeurs sont requises pour leur dimensionnement au regard du pouvoir de coupure. Ce pouvoir de coupure doit être suffisant pour couper les courants de court-circuit les plus élevés. Le calcul des courants de court-circuit n'implique pas seulement la connaissance des ces courants au point de défaut, mais également la répartition de ces courants sur les autres lignes et phases du réseau ainsi que leurs conséquences sur les tensions [9] .

Le réseau amont d'un court-circuit peut se mettre sous la forme d'un schéma équivalent constitué d'une source de tension alternative d'amplitude constante E et d'une impédance en série Z_{cc} (Fig I.8) Où Z_{cc} est l'impédance de court-circuit, elle est égale à l'impédance équivalente aux lignes et aux transformateurs parcourus par le courant de court-circuit [9] :

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

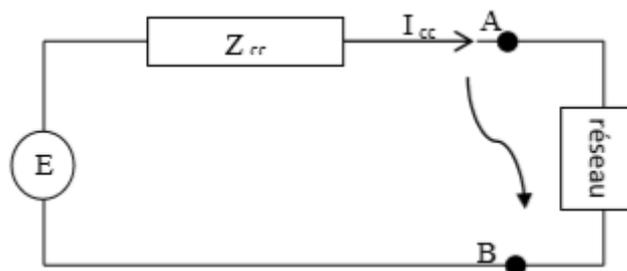


Fig I.8. Schéma équivalent du réseau au court-circuit [9].

Lors d'un court-circuit on applique une tension :

$$e = E\sqrt{2}\sin(\omega t + \alpha) \quad (\text{I.2})$$

à un circuit composé d'une réactance et d'une résistance en série. α est l'angle d'enclenchement du CC, il définit la phase de la tension à l'instant d'apparition du court-circuit (Fig. I.9) Soit φ le déphasage entre la tension et le courant en régime établi [9]:

$$\text{tg}\varphi = \frac{X}{R} \quad (\text{I.3})$$

L'expression du courant de court-circuit est :

$$I_{cc} = \frac{E\sqrt{2}}{Z_{cc}} \left[\sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{R}{X}\omega t} \right] \quad (\text{I.4})$$

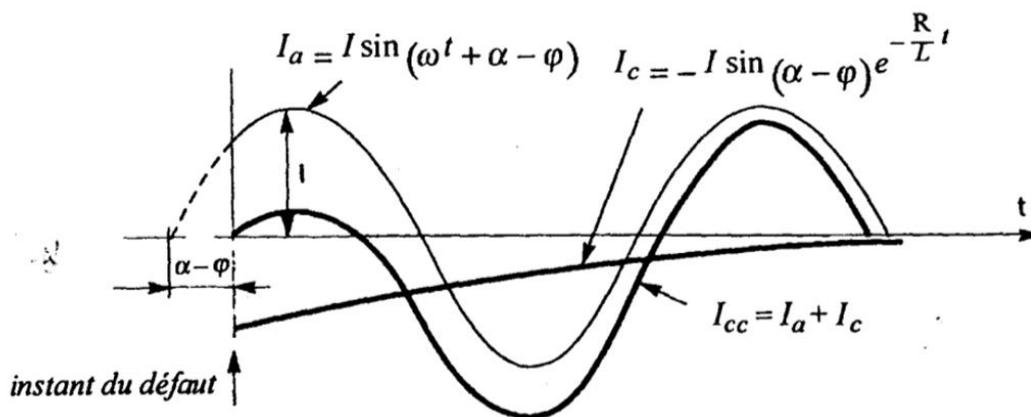


Fig. I.9. Décomposition du courant de court-circuit [9].

Le courant I_{cc} est donc la somme des deux courants suivants [9]:

$$I_a = \frac{E\sqrt{2}}{Z_{cc}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) \quad (\text{Courant sinusoïdal}) \quad (\text{I.5})$$

$$I_c = -\frac{E\sqrt{2}}{Z_{cc}} \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{R}{X}\omega t} \quad (\text{Courant apériodique}) \quad (\text{I.6})$$

La valeur efficace du courant en régime établi est :

$$I_{\text{eff}} = \frac{E}{Z_{cc}} \quad (\text{I.7})$$

Plusieurs cas sont envisageables :

- 1er cas : si l'angle d'enclenchement du CC $\alpha = \varphi$, la composante apériodique est nulle, le régime est dit symétrique
- 2eme cas : si $\alpha - \varphi = \frac{\pi}{2}$ la composante apériodique est maximale, le régime est dit

Asymétrique maximal. C'est la condition qui entraîne la plus grande valeur de crête du courant [9] :

$$I_{cc} = \frac{E\sqrt{2}}{Z_{cc}} \left[\sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) - e^{-\frac{R}{X}\omega t} \right] \quad (I.8)$$

Le courant atteint la valeur crête maximale (1re crête) lorsque [9]:

$$\sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = -1 \text{ D'où } \omega t = \pi$$

La valeur crête maximale du courant est [9]:

$$\hat{I} = \frac{E\sqrt{2}}{\sqrt{R^2 + X^2}} \left[1 + e^{-\frac{R}{X}\pi} \right] \quad (I.9)$$

I 4. Surtensions

Il existe deux classes des surtensions.

I 4.1. Surtensions par décharges électriques atmosphériques

Les orages sont des événements très habituels, et aussi très dangereux. On estime que sur notre planète se produisent simultanément quelques 2000 orages et qu'environ 100 coups de foudre se déchargent sur la terre chaque seconde. Au total, cela représente environ 4000 orages quotidiens et 9 millions de décharges atmosphériques chaque jour. Au moment de l'impact, la foudre provoque une impulsion de courant qui arrive à atteindre des dizaines de milliers d'ampères. Cette décharge génère une surtension dans le système électrique qui peut provoquer des incendies et la destruction des équipements électriques [9].

I 4.2. Surtensions de commutation

Ces surtensions sont générées dans les lignes électriques, principalement en raison des commutations de machines de grande puissance. Les moteurs électriques sont des charges très inductives dont la connexion et le débranchement provoque des surtensions. Il existe de même d'autres processus capables de les produire, comme par exemple l'allumage et l'extinction de la soudure à l'arc [9].

I.5. La foudre

Le coup de foudre est une décharge électrique se produisant dans un Grand intervalle dont les « électrodes » sont d'une part un nuage Orageux chargé et d'autre part la terre. L'impact de la foudre sur une installation est équivalent à un Générateur de courant très fort (10 à 100 kA et plus). Il produit une Surtension considérable [9].

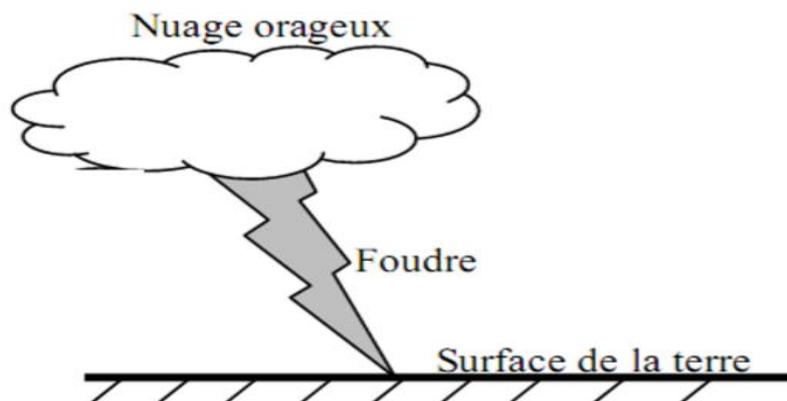


Fig. I.10. La foudre [9]

I.5.1. Effets de la foudre

Effets thermiques : Fusion d'éléments au point d'impact (30000°C) et risque d'incendie dû à la circulation d'un courant important.

Effets électrodynamiques : Lorsque les courants de la foudre circulent dans des conducteurs parallèles, la force magnétique qui en résulte (attraction et répulsion) peut entraîner des déformations mécaniques et même des ruptures [9].

Surtensions directes : L'impact direct sur une ligne électrique ou téléphonique, génère une onde de tension qui se propage. Cette onde, qui est amortie par l'effet couronne et la longueur de la ligne, est coupée soit par l'isolateur à cornes soit par les moyens de protection au poste. Comme le courant de la foudre est rarement inférieur à 10kA, et que l'impédance caractéristique d'une ligne aérienne est environ 300R, l'onde de tension atteindra 1500kV [9].

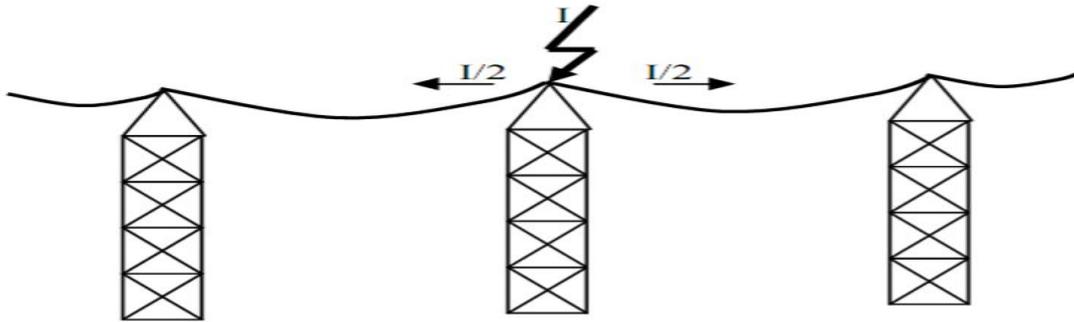


Fig.I.11.Surtensions directes [9]

Surtensions induites (indirectes) : Si la foudre tombe à proximité de la ligne, le courant provoque une variation extrêmement rapide du champ électromagnétique.

A cause des ondes électromagnétiques générées par la foudre, des surtensions sont induites dans des conducteurs situés loin du point d'impact. Ses effets se font sentir à plusieurs centaines de mètres, voire plusieurs kilomètres [9].

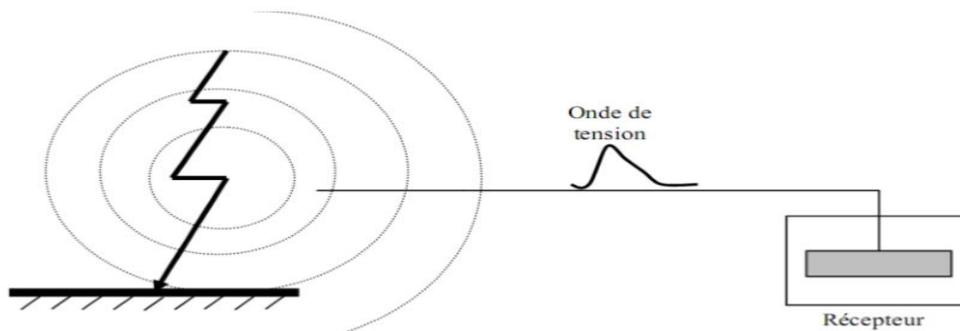


Fig.I.12.Surtensions directes Surtensions indirectes [9]

Les ondes induites sur la ligne sont similaires en forme et en amplitude à celles obtenues par choc de foudre direct. Leur caractéristique principale est leur front très raide (de l'ordre de la microseconde), et leur amortissement très rapide. Ce rayonnement est d'autant plus important que le front de montée est raide (20 à 100 kA/Q s). Un coup de foudre tombant à proximité d'une ligne développe un champ d'induction magnétique suffisamment important pour y créer une surtension induite [9].

I.6. Protection contre la foudre

I.6.1. Paratonnerre

Grâce au pouvoir de pointe, une décharge créée au sommet du paratonnerre progresse à la rencontre et la capture du traceur de la foudre pour dévier le courant vers la terre [9].

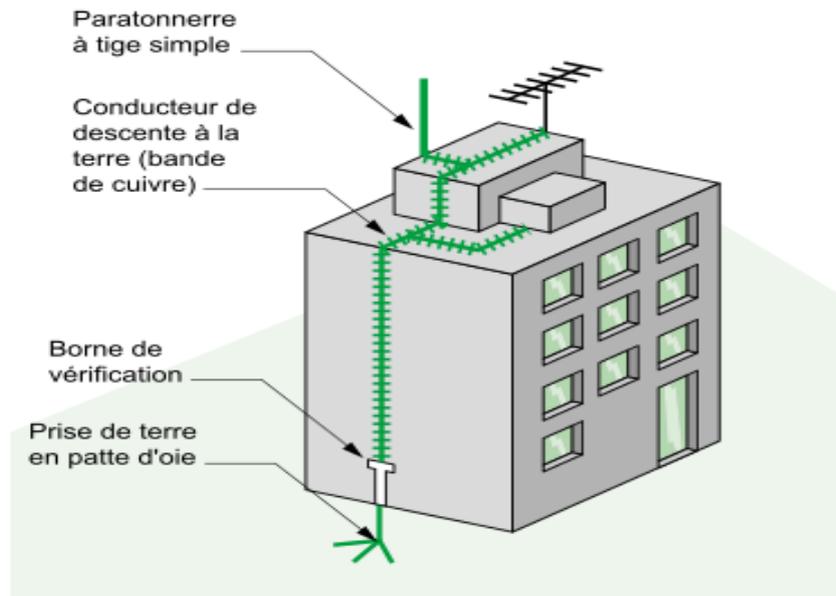


Fig.I.13.Principe du Paratonnerre à tige [12].

I.6.2.Eclateur

Quand l'onde de tension frappe l'installation, la grande Surtension qui apparaît aux bornes de l'éclateur produit un arc électrique qui dévie le courant vers la terre, car le courant choisit le chemin le moins résistant [9].

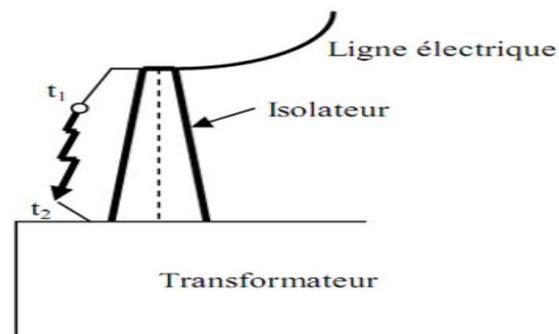


Fig.I.14.Exemple de protection d'un Transformateur par éclateur à tiges [9].

I.6.3.Parafoudre varistance

La varistance est une résistance non linéaire qui chute considérablement lorsque la tension augmente. En fonctionnement normal en l'absence de surtension, la résistance de la varistance est très élevée et empêche le passage du courant de la ligne vers la terre. Par contre, en régime de surtension la résistance chute subitement pour dévier le courant, et donc la surtension, vers la terre. Quand l'onde de tension arrive par la ligne électrique, le courant de la foudre choisit le chemin le moins résistant, celui de la varistance, et dévie ainsi vers la terre.

C'est pratiquement le même principe de Fonctionnement que l'éclateur, car dans les deux cas c'est la résistance de l'équipement de protection qui Chute :pour l'éclateur grâce au claquage, pour la varistance grâce à la résistance non linéaire[9].

I.7.Conclusion

Comme nous l'avons vu dans ce chapitre, Généralités sur les réseaux et les perturbations qui peuvent survenir au réseau électrique sont : le court-circuit, la foudre et les harmoniques. Sont rappelés les origines et les conséquences de chaque type défaut. On note que les défauts de court-circuit sont les défauts les plus persistants par rapport aux autres types de défauts [8].

Chapitre II

GENERALITE

**SUR LES MATERIAUX
SUPRACODUCTEURS**

II.1.Introduction

Le limiteur de courant à défaut supraconducteur (SFCL) est une technologie mature et proche du marché. Une variété de technologies SFCL qui utilisent des approches uniques et novatrices pour limiter les courants de défaut sont maintenant au stade de développement du prototype et, si elles réussissent, elles seront bientôt prêtes pour le déploiement du réseau

Depuis que l'utilité de la production décentralisée à grande échelle (compris celles basées sur l'énergie renouvelable) et un plus grand niveau d'interconnexion entre les lignes de transport et de distribution deviennent de plus en plus populaires dans le réseau électrique, le réseau électrique connaît inévitablement des courts-circuits. Événements de faute. Ainsi, les limites d'utilisation des dispositifs électriques normaux seraient dépassées [11].

II.2.Historique

En 1911, le phénomène de la supraconductivité a été découvert par le physicien hollandais Heike Kamerlingh Onnes d'université de Leiden qui a montré qu'aux très basses températures, quelques Kelvins, certains métaux changent de propriétés physiques. En particulier la résistance électrique de ces matériaux devient inférieure à toute valeur mesurable. Ainsi un courant électrique continu peut circuler sans dissipation d'énergie, donc quasi indéfiniment. On dit qu'il y a transition de l'état normal de conducteur vers l'état supraconducteur. Cette transition intervient à une température qualifiée de température critique. Onnes découvrit par la suite plusieurs autres supraconducteurs, et il reçut en 1913 le prix Nobel de physique pour son travail sur la supraconductivité [8].

C'est en 1933 que Walter Meissner et Robert Ochsenfeld découvrent la deuxième propriété des supraconducteurs : le diamagnétisme parfait. Un matériau supraconducteur soumis à un champ magnétique extérieur crée des courants induits dans le matériau qui expulse alors ce champ magnétique. Cet effet de non-pénétration du champ magnétique est nommé effet Meissner [8].

En 1935, les deux frères Fritz et Heinz London développèrent, en s'appuyant sur ces différentes observations, la première théorie phénoménologique de la supraconductivité, en ajoutant aux équations de Maxwell de l'électromagnétisme des équations constitutives prenant en compte les résultats expérimentaux concernant la résistance nulle et l'effet Meissner. Ils déduisirent ainsi que le champ extérieur appliqué ne disparaissait pas

brutalement à la surface du supraconducteur, mais diminuait progressivement dans la profondeur des matériaux [8].

En 1950, V. L. Ginzburg et L. D. Landau élaborent une théorie phénoménologique pour mieux comprendre la supraconductivité. Cette théorie consiste à utiliser les techniques de description des transitions de phase du second ordre à la transition supraconductrice en affectant comme paramètre d'ordre la fonction d'onde des électrons supraconducteurs. En incorporant des termes assurant l'invariance par changement de jauge, Ginzburg et Landau Proposèrent deux équations très riches permettant de décrire l'état supraconducteur. Ces équations rendent compte de l'effet Meisner avec la longueur caractéristique de London d'établissement du champ mais elles introduisent une nouvelle longueur caractéristique appelée longueur de cohérence qui représente la distance sur laquelle s'établit l'état supraconducteur [8]

A partir de la théorie de Ginzburg – Landau, A. A. Abrikosov, montre qu'il existe deux types de supraconducteurs et prédit l'apparition de réseaux de vortex dans les types II. Abrikosov et Ginzburg reçoivent le Prix Nobel de physique en 2003 pour leurs travaux, Landau étant décédé en 1968[8].

Près de 45 ans après la découverte du phénomène de supraconductivité, une théorie nommée BCS, du nom de ses inventeurs John Bardeen, Leon Cooper et John Schrieffer parvint à expliquer le phénomène de manière convaincante, celle-ci, fut publiée en 1957. Cette théorie explique qu'à très basse température, les électrons s'apparient, en quelque sorte on se mettant en couple. On dit qu'ils forment des paires de Cooper. L'idée de base est que les électrons (ou une partie d'entre eux) s'attirent plus qu'ils ne se repoussent naturellement et se couplent en paire. Dans les paires ainsi formées, les électrons possèdent une énergie plus faible, ainsi que des spins opposés. Cet ensemble, n'ayant plus de raisons d'interagir avec son environnement, n'est plus à l'origine d'une résistance électrique. Avec cette théorie, le mécanisme de la supraconductivité ne permettrait pas d'obtenir des températures critiques supérieures à une trentaine de Kelvins (au delà, l'agitation thermique casses les paires). Pour leurs travaux, Bardeen, Cooper et Schrieffer reçoivent le Prix Nobel de physique en 1972[8].

En 1986, Johannes Bednorz et Alex Müller découvrent dans des matériaux de structure pérovskite de cuivre à base de lanthane une supraconductivité ayant une température critique de 35 K, le record était battu. Mais ce n'était qu'un début : 9 mois après, Y-Ba-Cu-O

avec une température critique égale à 92 K, Bi-Sr-Ca-Cu-O en 1988 avec une température critique égale à 110 K, puis également en 1988 Tl-Ba-Ca-Cu-O avec une température critique égale 125 K furent découverts. Cette découverte apporte un regard nouveau sur la supraconductivité : les supraconducteurs à hautes températures critiques (SHTc). Ceci a fortement renforcé l'intérêt pour les supraconducteurs qui pouvaient désormais être refroidis à l'azote liquide. Ce fluide est moins cher et plus facile que d'autre fluide (hélium liquide par exemple). Cette découverte relance alors la recherche dans ce domaine, et permet la mise en évidence de ce phénomène jusqu'à 164 K, en 1998. Pour leurs travaux, Bednorz et Müller reçoivent le prix Nobel de physique en 1987[8].

II.3.Présentation générale de la supraconductivité

La supraconductivité est un état de la matière dans lequel celle-ci présente une remarquable combinaison de propriétés électriques et magnétiques. La disparition totale de la résistivité en dessous d'une certaine température appelée température critique (T_c) est la caractéristique la plus connue de ces matériaux (Figure.II.1). Une autre propriété est le diamagnétisme parfait sous certaines conditions de champ magnétique.[2]

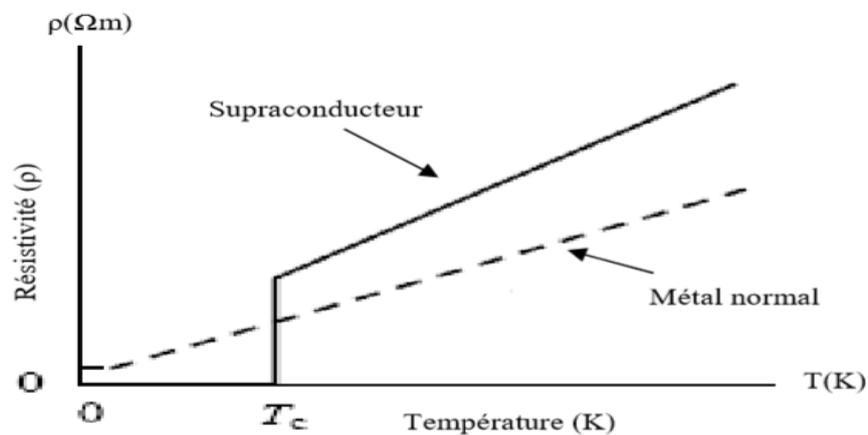


Fig.II.1. Résistivité d'un supraconducteur en fonction de la température [2]

II.4.Comportement des supraconducteurs

II.4.1.Grandeurs critiques

L'état supraconducteur non dissipatif est limité par trois grandeurs, appelées grandeurs critiques, au-delà desquelles le matériau passe dans un état fortement dissipatif. Il s'agit de la densité de courant critique J_c , de la température critique T_c , et du champ magnétique H_c [3].

Ces trois grandeurs sont fonction les unes des autres et forment ainsi une surface critique au-delà de laquelle le matériau cesse d'être non dissipatif. La figure II.2 représente la surface critique de quelques matériaux supraconducteurs, refroidis à l'azote liquide et l'hélium liquide. [3]

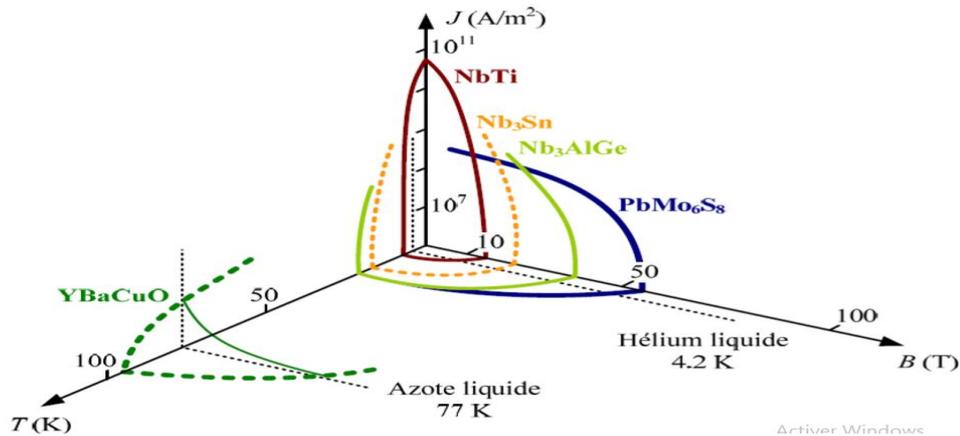


Fig.II.2.Surface critique des matériaux supraconducteurs [3]

II.4.2.Température critique

L'état de supraconductivité caractérise la plupart des métaux à condition que la température soit très proche de 0 K. La température en dessous de laquelle un matériau devient supraconducteur est nommée température critique. T_c est également la température de transition qui délimite l'état supraconducteur de l'état normal. A noter que la supraconductivité est obtenue aux températures T_c plus élevées pour les métaux mauvais conducteurs dans l'état normal, comme par exemple le mercure et le plomb. Proche de T_c la variation de la résistivité en fonction de la température est très brutale (voir Figure. I.3). La partie I représente la variation de la résistivité, $\rho(T)$ à l'état normal, correspondante à la relation [3].

$$\rho(T) = CT + \rho_r, \quad (\text{II.1})$$

ou ρ_r est dépendante des impuretés et des défauts du réseau cristallin. La partie II de la courbe (Figure II.3) représente une décroissance spontanée sur un intervalle de température de 0,01 à 0,001 K et caractérise l'état supraconducteur [3].

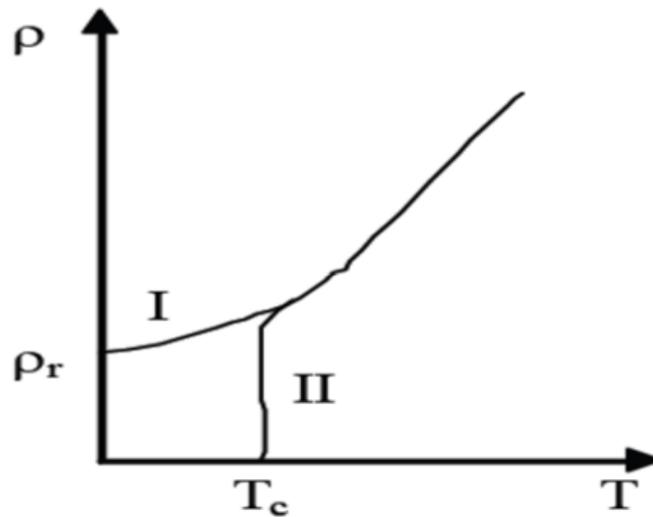


Fig. II.3. Dépendance de la résistivité en fonction de la température pour l'état normal (I) et l'état supraconducteur (II) [3].

II.4.3. Densité de courant critique

C'est la deuxième grandeur qui limite l'état supraconducteur. La densité de courant critique est la valeur maximale correspondante au delà de laquelle une résistivité apparaît. Des fils relativement fins réalisés de matériaux supraconducteurs peuvent être employés pour transporter de forts courants puisqu'il n'y a aucune perte d'énergie thermique. Cependant, ces matériaux sont conçus pour transporter un certain courant maximum limite. Au-dessus de ce courant critique ils cessent d'être supraconducteurs et passent à l'état normal même s'ils sont au-dessous de la température critique. Ce courant critique représenté par sa densité J est utilisé dans les limiteurs de courant supraconducteurs [3].

La densité de courant critique (J_c) est une fonction non linéaire de la température et du champ magnétique. Plus le supraconducteur n'est refroidi, plus le courant à transporter sans transition est élevé. La figure II.4 représente la tension en fonction du courant circulant à travers un fil Supraconducteur [3]

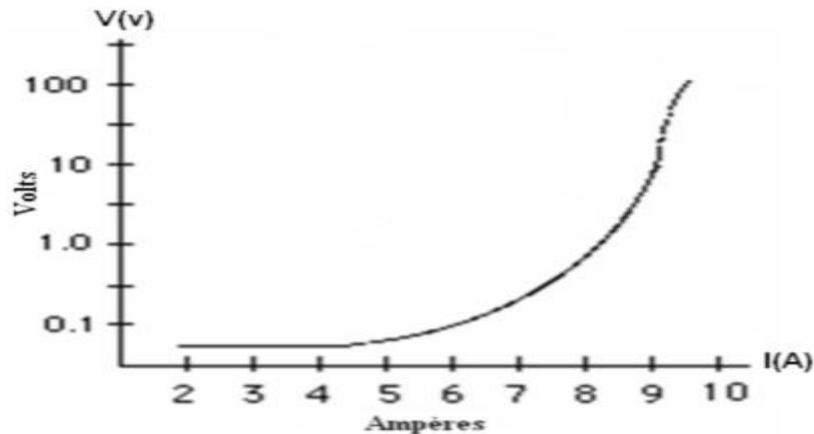


Fig.II.4. La caractéristique tension courant pour un fil supraconducteur [3].

II.4.4. Champ magnétique critique

L'état supraconducteur peut disparaître pour un champ magnétique extérieur d'une certaine intensité H_c dépendant de la température. Dans la Figure II.6, la courbe $H_c(T)$ divise le quadrant $H(T)$, ($H > 0$, $T > 0$), en deux régions ; état supraconducteur et état normale. La température maximale à laquelle un matériau est supraconducteur est obtenue pour un champ extérieur nul [3].

Le supraconducteur présente la propriété nommée effet Meissner Ochsenfeld, qui consiste à ce que les lignes de champ magnétique sont expulsées du matériau. Ainsi pour T supérieurs à T_c le matériau est non magnétique (aimantation nulle), par contre pour T inférieur à T_c il est parfaitement diamagnétique (aimantation négative) si le champ magnétique extérieur n'est pas très élevé ($H < H_c$) [3].

$$B = \mu_0 (H + I) \quad (\text{II.3})$$

B = induction magnétique en [T],

H = champ magnétique appliqué en [$A \cdot m^{-1}$],

I = l'aimantation développée dans les matériaux en [$A \cdot m^{-1}$],

μ_0 = perméabilité magnétique en [$H \cdot m^{-1}$],

Le champ critique varie avec la température suivant la loi approximative :

$$H_c(T) = H_c(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad (\text{II.4})$$

II.4.5. Surface critique

Chaque valeur critique, de la température, du champ magnétique, ou de la densité de courant, dépend des deux autres paramètres. On définit donc une surface critique (figure II.5) en dessous de laquelle le matériau reste supraconducteur [4]

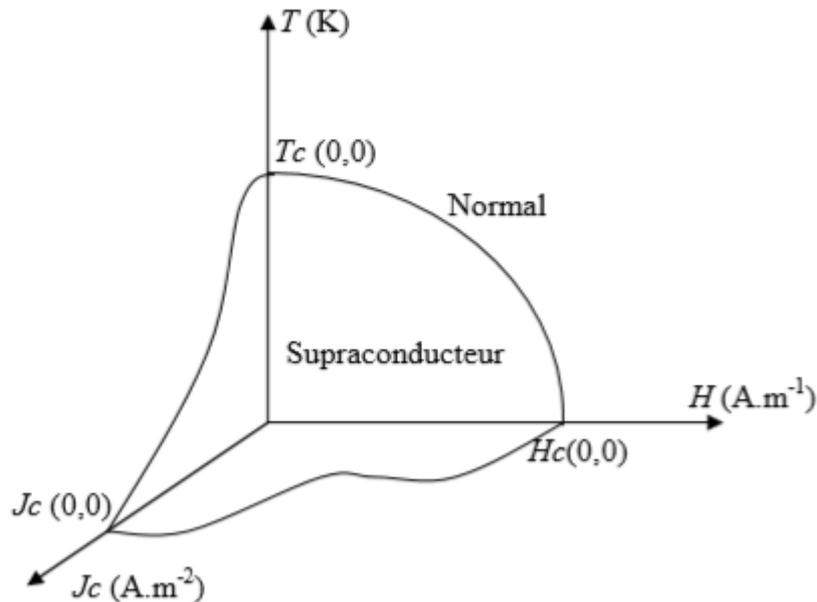


Fig.II.5. Surface critique [1]

II.5. Classification des supraconducteurs

Il existe deux types de supraconducteurs. Les supraconducteurs de type I, et Les supraconducteurs de type II. Chaque espèce est en réalité un regroupement de différents matériaux présentant les mêmes aspects généraux bien qu'ils soient tous différents [3].

II.5.1. Supraconducteurs de type I

Les supraconducteurs de type I sont caractérisés par un seul champ critique H_c . Lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique extérieur H l'induction magnétique B est nulle à l'intérieur tant que $H < H_c$ et l'aimantation $\vec{M} = -\vec{H}$. Par contre à la surface du matériau dans une épaisseur de l'ordre de λ_L appelée longueur de London, l'induction pénètre le matériau et des courants supraconducteurs d'écrantage se développent [3]

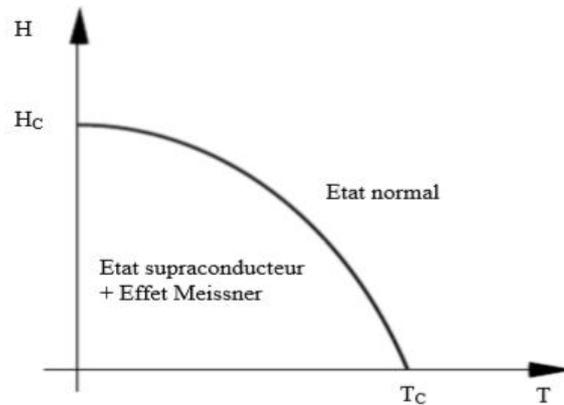


Fig.II.6.Diagramme de phases d'un supraconducteur de type I [3].

Les supraconducteurs de type I ont été découverts en premier et requièrent une très basse température pour obtenir la supraconductivité. Ces types de matériaux sont caractérisés par une transition brutale vers un état de supraconductivité et un parfait diamagnétisme (capacité de repousser un champ magnétique). Le tableau II.1 présente un ensemble de matériaux supraconducteurs de type I et leurs températures critiques de transition [3].

Tableau.II.1. Liste de quelques matériaux supraconducteurs de type I [3].

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

II.5.2.Supraconducteurs de type II

Ces supraconducteurs possèdent deux champs critiques, le deuxième nettement plus grand que le premier (il peut atteindre des dizaines de Teslas. En outre, ceux-ci présentent des

valeurs plus élevées de champ, de température et de courant critiques par rapport aux supraconducteurs du type I, ce qui les rend très attractifs pour l'électrotechnique [7].

Le comportement d'un supraconducteur du type II en présence d'un champ magnétique est décrit sur la figure (II.2). On distingue trois zones différentes : [7]

- **Zone 1** : Etat supraconducteur, diamagnétisme parfait, pour des valeurs du champ inférieur à H_{c1} (en général petit).
- **Zone 2** : Etat mixte, diamagnétisme partiel, pour des valeurs du champ entre H_{c1} et H_{c2} ; bien que supraconducteur, le matériau est pénétré par le champ extérieur.
- **Zone 3** : Etat normal avec une forte résistance électrique, pour des valeurs de champ supérieures à H_{c2} .

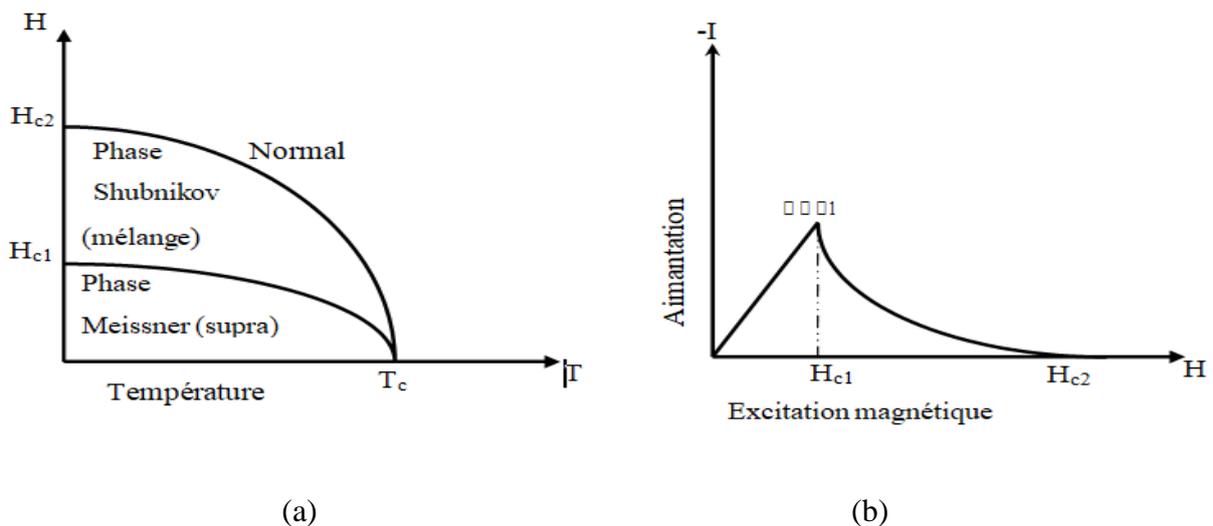
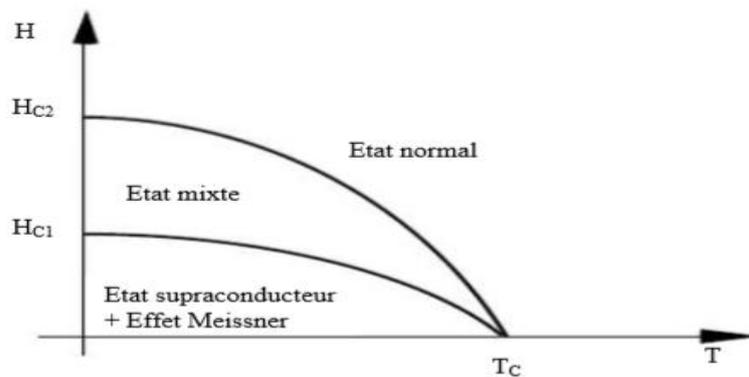


Fig. II.7. a) Diagramme des phases d'un supraconducteur de type II,
b) Dépendance de l'aimantation avec l'excitation magnétique d'un Supraconducteur de type II [7].

Tableau .II.2.Températures critiques de quelques matériaux à haute température critique

Matériaux	TC (K)
La _{2-x} Sr _x CuO ₄	38
Eu ₂ Ba ₂ Cu ₃ O _{10-x}	43
Pb ₂ Sr ₂ YCu ₃ O ₈	70
Yba ₂ Cu ₄ O ₈	80
Yba ₂ Cu ₃ O _{6+x}	92
Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	110
Tl ₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	125
HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _{8+x}	135

**Fig.II.8.** Diagramme de phases d'un supraconducteur de type II [12].

Dans l'état mixte, le champ magnétique pénètre l'échantillon localement, sous la forme de "lignes de flux" isolées. Ces lignes sont entourées de courants circulaires locaux, d'où leur nom de vortex (par analogie avec les tourbillons que l'on trouve dans les fluides). A l'intérieur de ces vortex, l'échantillon est dans l'état normal (c'est-à-dire non supraconducteur). Ces petits "tubes" de champ magnétique ont la propriété de tous contenir exactement le même flux ; les vortex ont une importance fondamentale dans le comportement des supraconducteurs de type II, aussi bien sur le plan des propriétés magnétiques qu'électriques [3].

II.6.Effet MEISSNER, supraconducteur et conducteur parfait [3]

La conductivité parfaite ($R=0$) implique qu'un changement de l'induction magnétique dans le matériau n'est pas possible $dB/dt = 0$. Ainsi, lorsqu'un conducteur parfait, sous champ nul à température ambiante, est refroidi en dessous de T_c puis soumis à un champ magnétique, alors des courants d'écrantage vont être induits pour conserver $B=0$ à l'intérieur du matériau, voir Figure II.9(a).

Si au contraire, le conducteur parfait est soumis à un champ magnétique avant d'être refroidi, alors, lorsque le champ magnétique extérieur est ramené à zéro, dB/dt doit être conservé et des courants de piégeage seront induits pour piéger l'induction magnétique à l'intérieur, voir Figure II.9(b).

Il en va tout à fait différemment dans le cas d'un supraconducteur [3] :

- Dans le premier cas, quand le champ magnétique est appliqué après refroidissement, le conducteur parfait et le supraconducteur se comportent de manière identique car l'induction magnétique est toujours nulle dans le matériau, voir Figure II.9(a).
- Dans le second cas, l'induction magnétique est expulsée de l'intérieur du supraconducteur ($B=0$) dès qu'il est refroidit en dessous de sa température critique, voir Figure II.9(c).

Ce comportement est connu sous le nom d'effet Meissner : il s'agit de l'expulsion de toute induction magnétique de l'intérieur du supraconducteur, qu'elle soit là avant que le spécimen soit devenu supraconducteur ou pas.

Le diamagnétisme parfait est une propriété intrinsèque d'un supraconducteur, qui n'est cependant valable que si la température et le champ magnétique- sont en tout point inférieurs à leur valeur critique $T < T_c$, $H < H_c$.

Le diagramme de phases d'un supraconducteur de type II est plus complexe que celui d'un supraconducteur de type I.

Même si l'état Meissner existe aussi, il est séparé de l'état normal par une zone supplémentaire, souvent appelée état mixte.

On se trouve donc en présence de deux champs critiques différents, notés H_{c1} et H_{c2} :

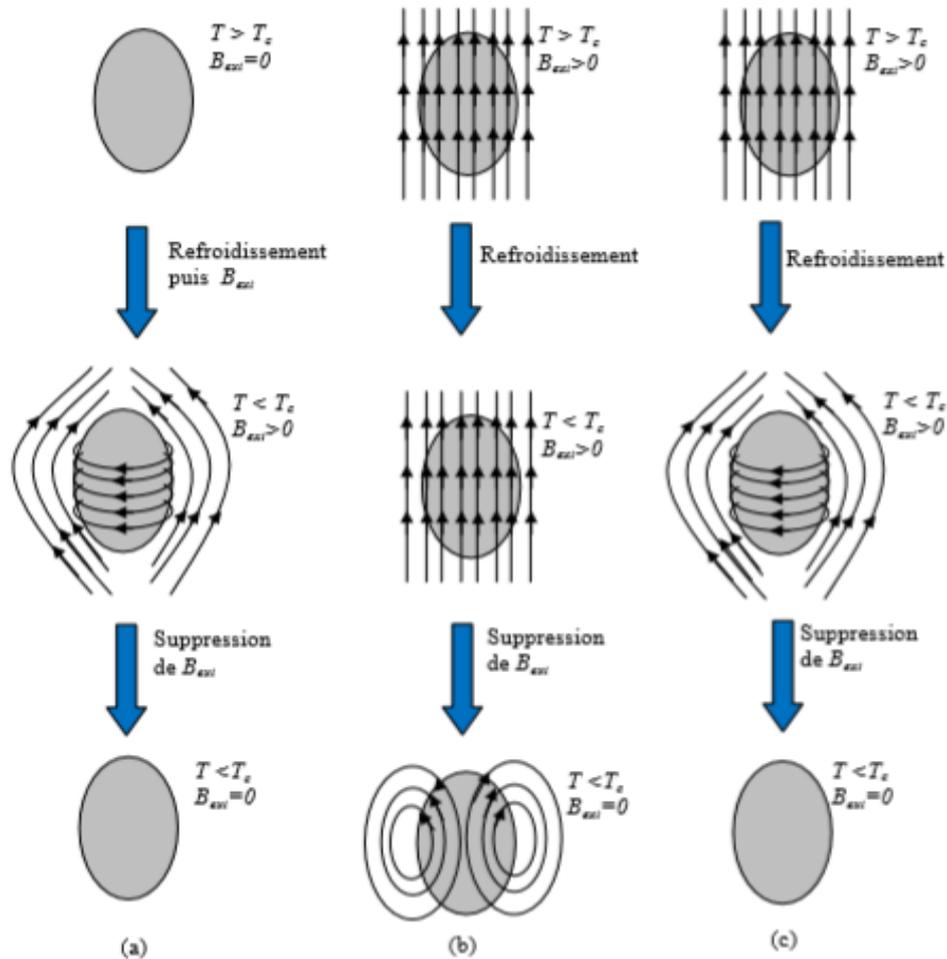


Figure II.9. Différence entre un conducteur parfait et un supraconducteur : l'effet Meissner. (a) S'il n'existe aucun champ magnétique extérieur $B_a = 0$ avant que le matériau soit refroidi, chaque matériau possède un flux magnétique interne nul en dessous de T_c . (b) Un conducteur parfait piège le flux magnétique appliquée avant refroidissement, $B = dB/dt = 0$. (c) Le flux magnétique est toujours exclu par un supraconducteur en dessous de T_c , qu'un champ magnétique soit appliqué avant refroidissement ou non, $B = 0$ [3].

II.7. Modèles des matériaux supraconducteurs

II.7.1 Le modèle de l'état critique de Bean

Il existe plusieurs modèles pour calculer les distributions de courant et de champ et évaluer les pertes AC des supraconducteurs sous différentes conditions. Le plus connu est certainement celui de l'état critique de Bean [11], appelé modèle de Bean. C'est au début des

années 60 que C.Bean introduit ce nouveau modèle basé sur l'existence d'une densité de courant macroscopique limite J_c indépendante du champ magnétique, que le supraconducteur peut transporter.

Dans le modèle de Bean, il existe seulement deux états possibles du supraconducteur :

- une densité de courant nulle pour les régions où le champ magnétique ne varie pas.
- une densité de courant $\pm J_c$ dans les régions qui s'opposent aux variations du champ magnétique [11].

Comme indiqué sur la Figure.II.10 ci-dessous :

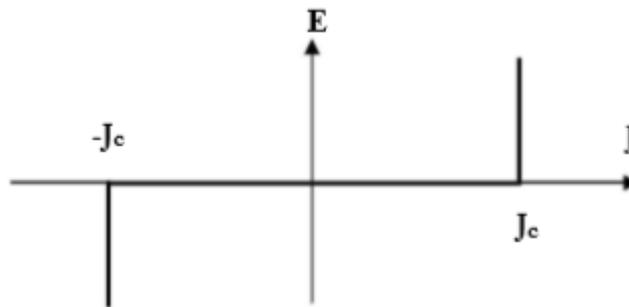


Fig. II.10.Caractéristique $E(j)$ d'un supraconducteur, modèle de l'état critique [11].

II.7.2.Modèle de loi de puissance

C'est un modèle qui traduit bien le comportement des supraconducteurs à haute température critique HTC autour de J_c [11].

$$\vec{E}(\vec{j}) = \frac{Ec}{Jc} \left[\frac{J}{Jc} \right]^{n-1} \vec{j} \quad (\text{II.5})$$

$$\vec{B}(\vec{H}) = \mu_0 \vec{H} \quad (\text{II.6})$$

Les paramètres de variation de cette loi sont la densité de courant critique, J_c et l'exposant, « n ». Avec ce modèle on peut faire varier les courbes $E(J)$ de sorte qu'on peut modéliser un conducteur normal pour $n = 1$ (loi de comportement linéaire) jusqu'à l'obtention d'une courbe raide comme dans le cas du modèle de l'état critique pour un ($n > 100$) [11].

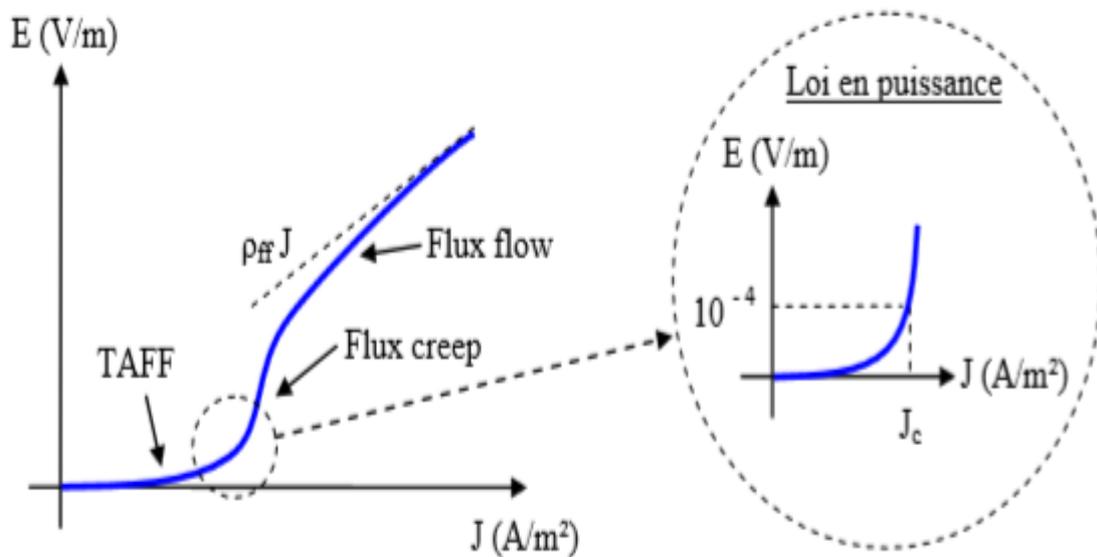


Fig.II.11. Caractéristique $E(J)$ d'un supraconducteur avec activation thermique [3].

II.7.3. Modèle de KIM

Compte tenu que le modèle de Bean ainsi que la loi en puissance considèrent le matériau supraconducteur isotrope et isotherme, de même que l'échauffement éventuel du conducteur sous l'effet des pertes qui entraînerait une diminution du courant critique, n'est pas pris en compte. Dans le modèle de Bean, la densité de courant critique est supposée constante quel que soit le champ magnétique extérieur. Mais dans la réalité la densité de courant dépend fortement de son orientation par rapport au champ et de l'induction magnétique B . Une expression de $J_c(B)$ dans le cas isotrope a été donnée par Kim [11].

$$J_c(|B|) = \frac{J_{c0} B_0}{|B| + B_0} \quad (\text{II.7})$$

C'est le modèle le plus utilisé pour la modélisation de la dépendance de la densité de courant critique avec l'induction magnétique [11].

II.7.4 Modèle de Flux Flow et Flux-Creep

La caractéristique du champ électrique E en fonction de la densité de courant J , est présentée sur la Figure (II.12).

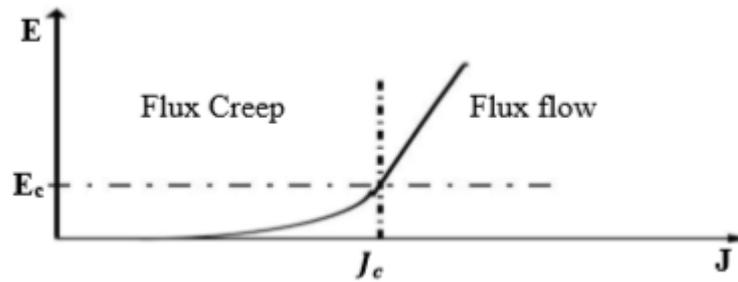


Fig.II.12. La caractéristique du champ électrique E en fonction de la densité de courant J .

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

- Pour les faibles valeurs de E avec $J \leq J_c$ la courbe $E(J)$ est de forme exponentielle, c'est la zone de « Thermale Activité Flux-Creep''TAFC'' » correspondant aux déplacements des vortex, bloqués par les défauts du matériau (impuretés,...), dus à l'activation thermique. Dans cette région, le champ électrique est défini par [11] :

$$E = 2\rho_c J_c \sinh\left(\frac{U_0}{K\theta} \cdot \frac{J}{J_c}\right) e^{\frac{-U_0}{K\theta}} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

ρ_c : Résistivité de régime flux-creep [$\Omega \cdot m$],

Θ : Température [K]

U_0 : Potentiel de pénétration [ev],

K : Constante de Boltzmann [$J \cdot K^{-1}$]

J_c : Densité de courant critique [$A \cdot m^{-2}$]

Pour des valeurs élevées de E avec $J > J_c$, c'est la zone de « Thermale Activité Flux-Flow ''TAFF'' » correspondant aux déplacements libres des vortex. La densité de courant critique est donc celle qui va arracher les vortex des défauts provoquant un passage à l'état de «flux-flow». Dans cette région, le champ électrique est défini par :

$$E = \rho_c J_c + \rho_c J_c \left(\frac{J}{J_c} - 1\right) \quad (\text{II.9})$$

Avec :

ρ_c : Résistivité de régime flux flow [$\Omega \cdot m$].

Pris en considération que la densité de courant critique est définie comme limite entre le régime de flux-creep et le régime de flux-flow. Cette limite étant très floue, la densité critique de courant est généralement déterminée par la valeur d'un champ électrique critique E_c [11].

II.8. Modèle de l'état critique

Le modèle de l'état critique est basé sur l'hypothèse d'une répartition locale de la densité de courant binaire à l'intérieur du supraconducteur. Il décrit cette répartition comme étant nulle ou égale à $\pm J_c$. Les équations de Maxwell traduisent ce phénomène par les formules (II.16).

$$\overrightarrow{rotB} = \pm \mu_0 J_c \vec{c} \quad \text{ou} \quad \overrightarrow{rotB} = 0$$

Ce modèle est mathématiquement simple et permet de comprendre facilement la supraconductivité d'un point de vue macroscopique. Ainsi les supraconducteurs fonctionnent autour de J_c , ce qui justifie l'utilisation de la loi en puissance $E(J)$ pour les modéliser. Ce modèle permet également d'obtenir l'expression analytique des pertes en courant alternatif (AC). Cependant la discontinuité qu'il induit le rend difficilement utilisable dans les modèles numériques.

II.9. Les pertes

II.9.1. Pertes DC (pas variation dans le temps)

En courant continu, la résistivité d'un supraconducteur peut être considérée comme [7].

nulle ($\rho < 10^{-25} \Omega.m$) ; Donc pas ou très peu de pertes.

II.9.2. Pertes AC

En courant continu, la résistivité d'un supraconducteur peut être considérée comme nulle ($\rho < 10^{-25} \Omega.m$). Cependant lorsque le supraconducteur est traversé par un courant alternatif, celui-ci crée un champ magnétique variable engendrant des pertes appelées AC. En considérant une analyse macroscopique, toute induction magnétique variable fait apparaître un champ électrique (II.4) [7].

$$\overrightarrow{rotB} = - \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (\text{II.10})$$

Ce champ électrique combiné au courant de transport, crée des pertes dans le supraconducteur. Notre étude portant sur des conducteurs minces de section rectangulaire, les

équations (II.5) de W.T. Norris permettent de calculer les pertes AC pour ce type de géométrie.

$$P = f \frac{I_c^2 \mu_0}{\pi} [(1 - i) \ln(1 - i) + (1 + i) \ln(1 + i) - i^2] \quad (\text{II.11})$$

Avec « P » exprimé en W/m et « f » la fréquence du courant. Ces pertes restant faibles par rapport aux pertes joules créées dans un métal, elles doivent cependant être prises en compte pour le dimensionnement de la cryogénie.

II.10. Propriétés spécifiques d'un supraconducteur

Les deux propriétés remarquables des matériaux supraconducteurs de type II : écrantage et piégeage, offre un grand avantage pour les applications de ce type de matériau supraconducteur, tels que la lévitation magnétique, les aimants supraconducteur. D'après la loi de Lenz, un conducteur soumis à une variation de champ magnétique est le siège d'un courant induit, qui génère alors à son tour un champ magnétique. Un supraconducteur de type II dans son état mixte, reste caractérisé par une résistance quasiment nulle. Contrairement à un conducteur classique comme le cuivre par exemple, cette grande conductivité électrique permet donc d'induire des supra-courants, non amortis avec le temps et sensibles aux variations du flux extérieur. Le champ résultant va alors s'opposer exactement au champ magnétique extérieur. Ce principe est utilisé pour réaliser des écrans magnétiques, ou pour piéger du champ magnétique avec des aimants supraconducteurs [8]

II.10.1. Ecrantage de flux

Un champ magnétique est appliqué à un matériau supraconducteur après qu'il a été refroidi hors ou sous champ magnétique. Des courants induits, se développeront dans le matériau s'opposant ainsi au champ magnétique appliqué, c'est-à-dire le matériau supraconducteur à expulsés les lignes du champ magnétique. Ce comportement peut être utilisé afin de guider le flux, de le blinder, ou encore de le concentrer [8].

II.10.2. Piégeage de flux

Contrairement aux aimants permanents conventionnels qui possèdent une induction rémanente, un supraconducteur a la capacité de piéger un champ magnétique en développant des courants internes (régis par la loi de Lenz). Il existe alors deux solutions permettant le piégeage du flux dans un supraconducteur : le refroidissement sous champ et le piégeage forcé par pulse de champ magnétique après refroidissement. Dans les deux cas, c'est la

capacité des matériaux à induire des courants importants et de les conserver après la suppression totale du champ appliqué, qui permet de piéger le champ magnétique. Cependant, nous rappelons que nous sommes intéressés dans le cadre du travail de cette thèse par l'étude de l'aimantation des matériaux supraconducteur à haute température critique, on utilisant la méthode de piégeage forcé par un champ pulsé. Nous détaillons dans le prochain chapitre cette technique ainsi que les autres techniques utilisées pour l'aimantation [8].

II.11.Supraconducteur à haute température critique

Le principal inconvénient des supraconducteurs à basse température critique comme son nom l'indique, est le fonctionnement à très basse température allant jusqu'à 4 K, et l'équipement cryogénique qu'ils impliquent. La découverte des supraconducteurs haute température critique a relancé l'intérêt de ces matériaux car il devient possible d'utiliser l'azote liquide comme dispositif cryogénique dont la température de liquéfaction est de 77K. Depuis leurs découvertes, en 1986 les céramiques supraconductrices du deuxième espèce constituent une bonne base pour le développement des applications supraconductrices.

Vu donc leurs intérêt du point de vue application, deux grandes familles apparaissent comme les plus prometteuses, ceux à base d'Yttrium (YBaCuO) et ceux à base de Bismuth (BiSrCaCuO). Notre étude sur le comportement des matériaux supraconducteurs à haute Température critique utilisé pour la limitation de courant de défaut à été menée essentiellement sur ces deux composés ; Leur structure cristallographique est très anisotrope. La caractéristique commune de ces composés est la présence du plan cristallin CuO₂, qui est le siège de la supraconductivité. L'intérêt du composé YBaCuO réside principalement dans sa bonne tenue sous des champs magnétiques élevés (~7 T) à 77 K, due à une forte énergie d'ancrage magnétique bien supérieure à celle des oxydes supraconducteurs à base de bismuth (Bi₂212 et Bi₂223) [3].

II.12.Supraconducteur YBaCuO

Comme tous les composés à base d'oxyde de cuivre, l'YBaCuO doit ses caractéristiques supraconductrices à la présence du plan cristallin CuO₂. Sa structure cristallographique est donc très anisotrope et ses propriétés physiques varient fortement selon la direction considérée. Ainsi le siège de la supraconductivité CuO₂ est appelé plan ab et l'axe perpendiculaire à ce plan et nommé axe c (Figure II.13)[3].

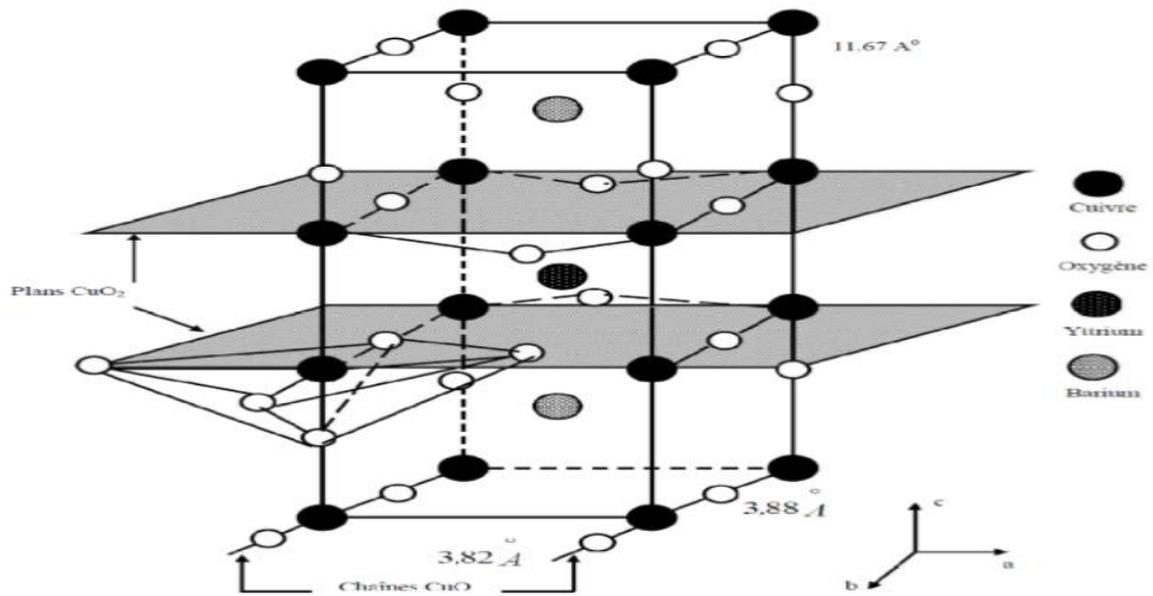


Fig. II.13. Structure cristalline de l'YBaCuO[3]

Connexions électriques entre grains adjacents très médiocres. Ces joints de grains agissent

Directement sur la densité de courant critique. A l'inverse, les films minces d'YBaCuO ayant de bonnes qualités épi axiales possèdent des densités de courant J_c , importantes sous champ magnétique élevés, ceci grâce à l'alignement quasi parfait des joints de grain. Le composé YBa₂Cu₃O₇ est un conducteur alors que le composé YBa₂Cu₃O₆ est un semi-conducteur antiferromagnétique. Le composé YBa₂Cu₃O₇ perd de l'oxygène lorsqu'il est porté à des températures supérieures à 400 C°. Le dopage en oxygène, pour atteindre la bonne stœchiométrie, peut nécessiter alors des jours de recuit en fonction de la taille des échantillons car l'oxygène doit pénétrer dans le matériau par diffusion en sautant de lacunes en lacunes. Durant la solidification de l'YBaCuO deux phases principales sont présentes : la phase dite Y-123 (Y₁Ba₂Cu₃O₇) supraconductrice et la phase Y-211 (Y₂Ba₁Cu₁O₅, dite "phase verte") non supraconductrice [3].

La phase verte est utile dans l'élaboration des échantillons car lors de la solidification, elle se présente sous forme d'inclusions qui introduiront des centres de piégeage pour les vortex. L'ajout de cette phase permet d'augmenter de façon notable le champ d'irréversibilité ainsi que la densité de courant critique des échantillons élaborés. Le diagramme de phase de l'YBaCuO est relativement simple, ce qui permet une élaboration "simple". Par contre ce composé est sensible aux agents corrosifs, en particulier H₂O et CO₂ [3].

La résistivité de l'YBaCuO en fonction de la température sont représentés ci-dessous (Fig. II.14).

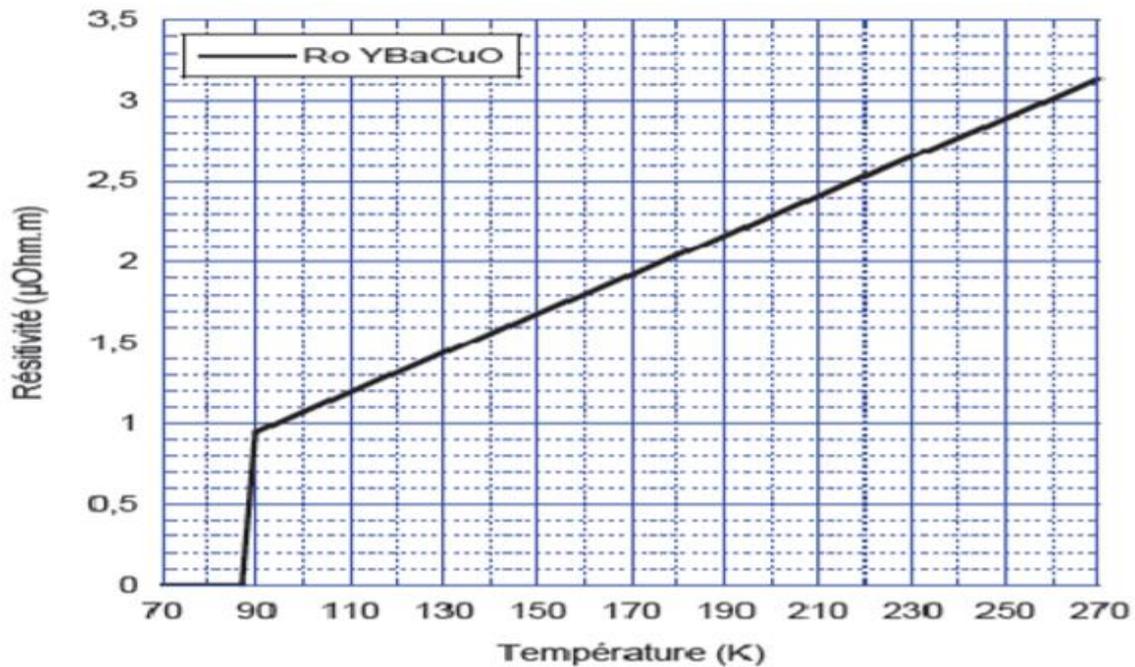


Fig.II.14. Résistivité de l'YBaCuO en fonction de la température[3]

Il apparaît sur la courbe de résistivité de la l'YBaCuO (Fig.II.18), qu'au delà de sa température critique celui-ci est un mauvais conducteur électrique ($\rho_{\text{YBaCuO}} > 100 \times \rho_{\text{Cu}}$).

Ainsi dans son état supraconducteur, la résistivité nulle de l'YBaCuO n'entraîne pas de perte, le HTS est donc totalement transparent (comme court-circuit), pour le fonctionnement normal du réseau électrique. Cependant, dans son état normal, il est caractérisé par une importante résistance élevée permettant de limiter le courant [3].

II.13. Supraconducteur à base de bismuth

Il existe principalement deux composés dans cette famille: le $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ (ou Bi2212) ayant une température critique proche de 85 K ($85 \text{ K} < T_c < 90 \text{ K}$), découvert en 1987 et le $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (ou Bi2223) avec une température critique d'environ 110 K . Leurs mailles respectives sont représentées sur la Figure II.19. Ces composés présentent une grande inertie par rapport aux agents corrosifs comme l'eau H_2O et le CO_2 [3].

En revanche les phases au bismuth sont difficiles à synthétiser à cause de la complexité de leur diagramme de phase. Les deux composés supraconducteurs à base de bismuth sont utilisés l'un et l'autre en fonction de l'application recherchée. Le Bi2212 est le plus simple à

synthétiser. Cependant, ces performances ($J_c(B,T)$) sont moins bonnes que celles du Bi2223 sauf à très basse température (4,2 K) où il présente de meilleures densités de courant critique sous forte induction[3].

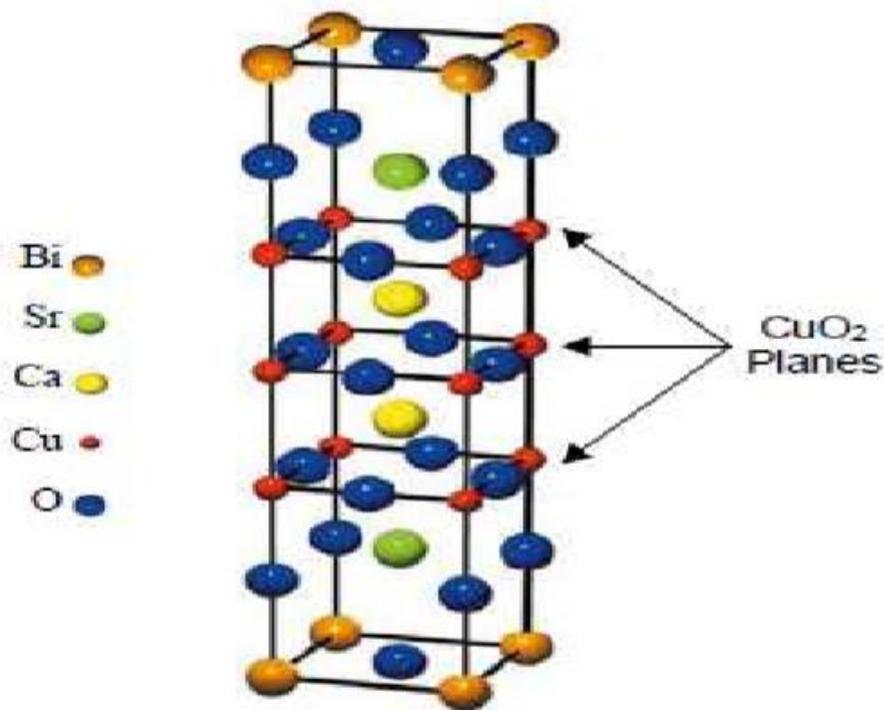


Fig.II.15. Structure cristallographique de bismuth Bi2223[3]

La structure quasi-bidimensionnelle des supraconducteurs à base de bismuth a pour effet d'induire une anisotropie des propriétés supraconductrices. La conductivité électrique et la densité de courant sont très grandes le long des plans ab alors qu'elles sont beaucoup plus faibles dans la direction perpendiculaire. Les composés au bismuth ont une structure lamellaire constituée de feuillets d'oxydes de bismuth ou de thallium peu conducteurs, auxquels sont juxtaposées des couches cuivre-oxygène supraconductrices qui peuvent facilement glisser les unes sur les autres, ce qui permet une mise en forme du matériau par compression[3].

II.14. Propriétés

Les principales caractéristiques de l'YBaCuO et du Bi2223 sont présentées ci dessous.

Les principales grandeurs physiques du matériau YBaCuO sont présentées dans le Tableau II.3[3].

Tableau II.3. Principales grandeurs caractéristiques pour l'YBaCuO[3]

	λ (nm) à 0 K	ξ (nm) à 0 K	H_{c1} (T) à 77 K	H_{c2} (T) à 77 K	ρ ($\mu \Omega$ cm) à 100 K	J_c (A/mm ²) à 77 K et 0 T
Plan ab	150	15	25×10^{-3}	150	100	10^4
Axe c	600	4	90×10^{-3}	40	10000	60

Les propriétés supraconductrices en champ fort et à basse température (vers les 20 K) des Composés au bismuth sont bonnes. Le tableau ci-dessous résume les principales grandeurs Physiques pour le Bi2223 [3].

Tableau II.4. Principales grandeurs caractéristiques du Bi2223[3]

	λ (nm) à 0 K	ξ (nm) à 0 K	H_{c1} (T) à 77 K	H_{c2} (T) à 77 K	ρ ($\mu \Omega$ cm) à 300 K	J_c (A/mm ²) à 77 K et 0 T
Plan ab	200	13	Quelques mT	250	200	50
Axe C	1000	2		30	2000	10

Le Tableau II.5 présente les principales grandeurs thermo physiques pour l'YBaCuO et le Bi2223[3]

Tableau II.5. Propriétés thermo physiques de l'YBaCuO et du Bismuth

	T_C (T)	C_p (77 K) (J.m ⁻³ .k ⁻¹)	Conductivité (77 K) (W.m ⁻¹ .k ⁻¹)	
			K_{ab}	K_c
YBaCuO	93	10^6	2 à 13	0.3
Bi2223	110	$1.9 \cdot 10^6$	≈ 2	

La chaleur spécifique est donnée à 77 K puisqu'il s'agit de la température usuelle

D'utilisation des oxydes supraconducteurs. Travailler à plus basse température demande des moyens cryogéniques plus sophistiqués.

Lorsqu'une résistance apparaît dans un supraconducteur transportant du courant (par exemple lors de sa transition), celui-ci s'échauffe. Puisque la chaleur spécifique varie en fonction de la Température T . La figure II.16 montre l'évolution de la chaleur spécifique en fonction de la température du matériau Bi2223

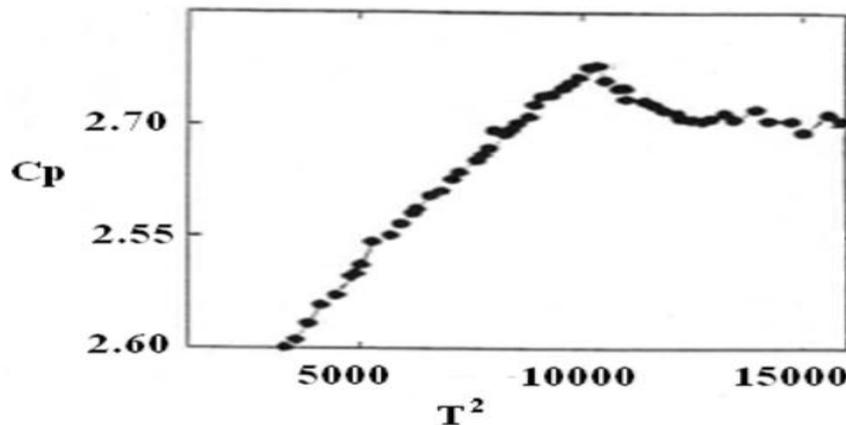


Fig.II.16. Chaleur spécifique en fonction de la température du Bi2223

II.15. Les couches minces supraconductrices (coated conductors)

Les applications industrielles ont besoin de supraconducteurs souples, résistant aux efforts. Mécaniques et flexibles pour être bobinés. Les couches conductrices (CC), sont constituées d'un substrat métallique souple sur lequel une ou plusieurs couches céramiques texturées sont déposées, suivies d'un film supraconducteur et d'un shunt métallique de protection (Figure II.17). Un supraconducteur en couche mince est élaboré par dépôt sur un ensemble composé d'un substrat et de plusieurs couches tampons, dans des conditions thermodynamiques précises. Le substrat et la couche tampon doivent être adaptés afin de ne pas induire de désorientation. Le dépôt se fait selon l'axe c , perpendiculairement au substrat.

Chaque couche composant un CC possède une ou plusieurs fonctions bien définies et fait l'objet d'études très poussées sur ces propriétés physiques [3].

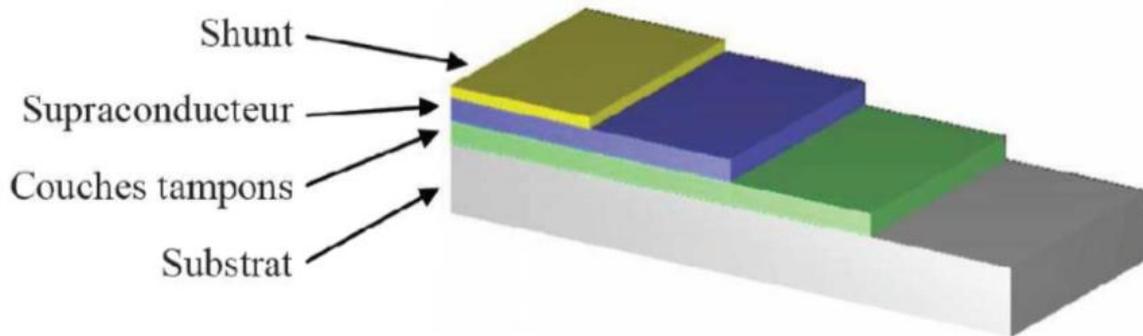


Fig.II.17.Architecture générale des couches minces[3]

II.16.Principales applications des supraconducteurs

La spectroscopie du solide et l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) sont actuellement les seules applications industrielles. Cependant, les excellentes propriétés en transport de courant, notamment grâce à des densités de courant de plusieurs kA/mm^2 , en font un matériau très prisé pour les applications de pointe en physique fondamentale et en électrotechnique. Le principal frein restant la cryogénie, celle-ci tend à s'améliorer grâce aux progrès de fabrication des HTS et des systèmes de refroidissement comme les tubes à gaz pulsé [5].

II.16.1.Applications en physique fondamentale

Beaucoup de systèmes nécessitant la création de champs magnétiques intenses utilisent des supraconducteurs. Les grands instruments pour la recherche, comme le Large Hadron Collider (LHC) de Genève ou le projet International Thermonucléaire Expérimental Réacteur (ITER) de Cadarache, utilisent les supraconducteurs comme aimants d'accélération, de guidage et de confinement du plasma [5].

II.16.2.Applications en électrotechnique

II.16.2.a. Machines tournantes

L'utilisation des supraconducteurs dans les cryoalternateurs est à l'origine de nombreux prototypes. Le remplacement des bobinages en cuivre par des enroulements supraconducteurs permet un gain de masse grâce aux grandes densités de courant du fil et à la disparition du circuit magnétique. Le fort couple massique de ces machines en fait une application intéressante pour les systèmes embarqués [5].

II.16.2.b. Câbles de transport

Les supraconducteurs créant nettement moins de pertes que les câbles classiques, ils sont très intéressants pour les applications de transport d'énergie. Cependant le problème de la cryogénie sur de grandes longueurs peut s'avérer difficile à résoudre. Une solution consiste à faire circuler un fluide cryogénique dans un tube au centre du câble et à enrouler le fil supraconducteur autour. Avec l'accroissement de la demande en énergie, certaines lignes électriques nécessitent d'être renforcées. Cependant l'espace nécessaire à la pose de nouveaux câbles n'est pas toujours suffisant, dans ce cas les supraconducteurs offrent une solution intéressante [4].

II.16.2.c. Stockage d'énergie

Le principal inconvénient de l'énergie électrique est qu'elle est difficilement stockable. Le Supraconducteur Magnétique Energie Stockage (SMES) permet de stocker de l'énergie sous forme magnétique, cette dernière pouvant être restituée avec un très bon rendement. Son fonctionnement consiste à court-circuiter une bobine supraconductrice, permettant ainsi au courant de se reboucler indéfiniment. Le SMES peut servir comme réservoir d'énergie pour réguler les réseaux électriques, il peut également être utilisé comme source d'énergie impulsionnelle pour les lanceurs électromagnétiques ou le formage magnétique [5].

II.16.2.d. application médical

Une application médicale est l'imagerie par résonance magnétique (I.R.M). L'I.R.M est basé sur le principe suivant : un noyau atomique doté d'un moment magnétique et soumis à une induction B_0 constante décrit un mouvement de précision autour de son axe avec une vitesse angulaire proportionnelle B_0 . En appliquant un champ magnétique perpendiculaire à B_0 , on observe un phénomène de résonance si la fréquence d'excitation f est égale à la vitesse angulaire de précession. On recueille ainsi un signal caractéristique. L'induction de polarisation B_0 varie dans l'espace, et f aussi donc, ce qui permet l'obtention des images. L'induction magnétique de 0,5 à 4 Tesla nécessaire ne peut être obtenue qu'à l'aide d'aimants supraconducteurs. De plus, mis à part la phase d'établissement du courant, l'alimentation électrique n'a plus lieu d'être. La consommation de froid est très faible et le poids de l'engin est réduit. Le grand gagnant est le patient : celui-ci ne subit aucun effet nocif connu à ce jour et les images prises de son corps (crâne, corps, membre...) sont d'excellente qualité, ce qui permet aux médecins de faire un diagnostic correct. Une autre application sur le même

principe que L'I.R.M. est la spectroscopie par résonance magnétique nucléaire (I.R.M). A la différence de l'I.R.M ,deux champs magnétiques orthobnaux entrent en jeu (un à haute fréquence , l'autre continu), Sous leurs effets, les noyaux entrent en précession et émettent des signaux que l'on recueille ensuite pour l'analyse de la nature , la composition chimique et la structure des échantillons .Et comme il faut des inductions magnétique supérieures à 7-13T , Les aiment supraconducteur sont extrêmement utiles. [6]



Fig.II.18. L'imagerie médicale [6]

II.16.2.e. Les transformateurs

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. La société US Navy a fabriqué un transformateur de 40 MVA 13,8 kV – 3 kV ; 60 Hz avec des enroulements en YBaCuO à 74 K et en MgB₂ à 24 K [8].

II.16.2.f. Limitation de courant

La coupure des courants de défaut reste un problème mal résolu dans les réseaux électriques. La caractéristique intrinsèque fortement non linéaire du champ électrique en fonction du courant dans un supraconducteur ouvre une nouvelle voie particulièrement intéressante et innovante pour la limitation des courants de défaut dans les réseaux électrique. En régime normal, les pertes dans l'élément supraconducteur sont très faibles (pertes AC),

voire pratiquement nulles en DC. Par contre dès que le courant dépasse un seuil prédéfini, l'élément supraconducteur développe instantanément un fort champ électrique qui peut équilibrer la tension du réseau et limiter le courant à une valeur prédéterminée et facile à couper par un disjoncteur [1].

Le limiteur supraconducteur permet de protéger le réseau électrique des courants de court-circuit en agissant comme un régulateur naturel de courant. C'est le sujet de notre étude, son fonctionnement est détaillé dans les prochains chapitres [5].

II.17.conclusion

Nous avons présenté une étude sur les matériaux supraconducteurs : type I et type II. Ces derniers sont limités par des grandeurs magnétiques et thermiques appelés grandeurs critiques désignées par: température critique T_c , champ magnétique critique H_c et enfin densité de courant critique J_c . Nous avons aussi présenté les propriétés remarquables qui rendent leur utilisation envisageable dans divers domaine d'application industrielle.

Chapitre III

Limiteur de courant

III.1.Introduction

Un réseau électrique doit non seulement être dimensionné pour supporter son régime nominal (courant nominal I_n et tension nominale U_n), mais aussi, en cas de défaut, un régime de court-circuit (courant de court-circuit I_{cc} et tension nominale U_n). Le courant de court-circuit peut atteindre vingt à quarante fois le courant nominal de la ligne. Ainsi tout le réseau (disjoncteurs, câbles, transformateurs, jeux de barres..) doit être surdimensionné en dimension et mécaniquement afin de supporter de tels courants et de tels efforts électromécaniques (la puissance de court-circuit étant supérieure de vingt à quarante fois la puissance nominale). Il apparaît donc intéressant et nécessaire d'introduire sur le réseau des appareils capables de réduire le courant de court-circuit I_{cc} sans pour autant modifier le courant nominal ; ce sont des limiteurs de courant. Plusieurs types de limiteurs existent selon la spécificité de la ligne sur laquelle ils sont installés et les performances recherchées [3].

Nous présentons dans ce chapitre les limiteurs de courants de défaut et leur importance dans les réseaux électriques par les matériaux supraconducteurs. Dans la première partie, nous parlerons des intérêts apportés par ces systèmes puis nous présenterons leurs principes de fonctionnement et leurs avantages. Dans une deuxième partie de ce chapitre nous donnerons un état de l'art complet des différents types des limiteurs de courant de défaut supraconducteurs puis nous terminerons par un état comparatif entre les différentes solutions techniques [3] et dans la dernière partie on expliquée pour la modélisation de limiteur de courant supraconducteur.

III.2.Les limiteurs de courant traditionnel

Après une rapide présentation des réseaux et de leurs défauts, les solutions utilisées actuellement sont énumérées ci-après :

III.2.1.Défauts

On dénombre plusieurs types de défauts dans le réseau de distribution (ligne aérienne ou câble souterrain) :

- Selon le lieu du défaut (sur la boucle de distribution, sur le tableau de distribution)
- Selon les phases touchées (défaut monophasé entre une phase et la terre, défaut biphasé ou triphasé entre deux ou trois phases, défaut évolutif passant par exemple de monophasé à triphasé),

- Selon la durée du défaut (fugitif lorsqu'il est inférieur à 0,3 secondes, semi-permanent pour des défauts inférieurs à 15 secondes ou permanents) [11].

Comme beaucoup d'autres facteurs pouvant intervenir sur le type de défaut, le mode d'exploitation, le régime de neutre ou les performances des protections.

Les courants de court-circuit sont nuisibles pour le réseau, pour les raisons thermiques (fusion des conducteurs, dégradation des isolants), les raisons mécaniques à cause des déformations provoquées par les forces électromagnétiques, les raisons de coût car ils contribuent aux vieillissements prématurés des matériaux. Il est donc nécessaire d'éliminer le défaut en permettant l'auto-extinction (en général en ouvrant le circuit) ; si le défaut persiste procéder à une réparation. De plus, il est nécessaire de limiter la valeur crête du courant de défaut (en particulier la première demi onde qui peut être très importante si le court-circuit est en pleine asymétrie) avant son élimination [11].

III.2.2.Élimination des défauts

III.2.2.a. Fusible

Les fusibles permettent d'interrompre automatiquement un circuit parcouru par une surintensité pendant un intervalle de temps donné. L'interruption du courant est obtenue par la fusion d'un conducteur métallique calibré. Ils sont surtout efficaces pour la protection contre les courts circuits, vis-à-vis desquels ils agissent, le plus souvent, en limiteurs de la valeur crête du courant de défaut. Le fusible est ainsi un excellent dispositif pour l'élimination des défauts, cependant il présente un certain nombre d'inconvénients qui limitent son utilisation :

- Il doit être remplacés après chaque fonctionnement.
- En régime triphasé, il n'élimine que les phases parcourues par un courant de défaut, ce qui peut présenter un danger pour le matériel et le personnel.
- Son calibre doit être bien adapté pour éviter un fonctionnement intempestif en cas de surcharge momentanée.

Les fusibles peuvent être associés à des interrupteurs ou à des contacteurs avec lesquels ils constituent des combinés capables d'assurer automatiquement la coupure des phases saines lors du fonctionnement de l'un d'eux de façon à éviter la marche monophasée dangereuse [11].

III.2.2.b. Disjoncteur

Un disjoncteur est destiné à établir, supporter et interrompre des courants dans les conditions normales et anormales du réseau. Il est très généralement associé à un système de protection (relais), qui détecte le défaut et envoie des ordres au disjoncteur pour éliminer automatiquement le défaut ou pour remettre en service un circuit lorsque le défaut a été éliminé. Lorsqu'un flux de courant est détecté le disjoncteur rentre en fonction. Ce qui est la base de tous les disjoncteurs en détectant le passage du courant par la valeur zéro et d'interrompre le flux de courant à ce moment. On constate que le disjoncteur n'interrompt pas le courant durant la première tentative ; plusieurs cycles de la fréquence fondamentale du courant sont nécessaires pour une interruption complète du flux de courant, ce qui affecte la vitesse du disjoncteur. Les disjoncteurs rapides utilisés dans la HT sont d'un cycle, par contre ceux utilisés dans la BT prennent 20 à 50 cycles pour ouvrir. De plus pour distinguer entre un défaut permanent et un défaut temporaire le concept d'auto-enclenchement est utilisé. Quand le disjoncteur déclenche le relais essaye de détecter le défaut, si le défaut persiste le disjoncteur déclenche à nouveau ; si le défaut disparaît le relais ne fonctionne pas et la ligne va rester en service [11].

III.2.3. Courants de défaut

Le courant nominal I_n (ou courant assigné) est le courant maximal autorisé en régime

Permanent dans la ligne électrique alors que le courant de ligne I_l est le courant circulant réellement dans celle-ci. En revanche, le courant d'utilisation de la ligne est la valeur moyenne du courant de ligne. La puissance nominale S_n (ou puissance assignée) d'un réseau de niveau de tension entre phase U_n (et de niveau de tension phase- neutre V_n) est égale à [3] :

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

Lors d'un court-circuit, le courant en régime de défaut établi est appelé courant de court-circuit I_{cc} . La puissance de court-circuit PCC de la ligne pour un réseau de niveau de tension U_n est alors égale à :

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

III.3. Principe général des limiteurs de courant

La limitation de courant utilise le principe d'une impédance variable en série avec le réseau.

Celle-ci pouvant être purement résistive dans le cas des réseaux DC mais également inductive dans le cas des réseaux AC. Le courant est limité par une augmentation brutale de l'impédance. Cette augmentation doit être suffisamment rapide (<1 ms) pour limiter le premier pic de courant à une valeur seuil, nettement inférieure à la valeur théorique de court-circuit. Lors d'un défaut le limiteur est pratiquement soumis à la pleine tension du réseau, la puissance dissipée est donc très importante [3].

III.3.1. limiteurs de courant classique

Il existe peu de solutions classiques permettant la limitation naturelle des courants de défaut. Le fusible présente la solution la plus adaptée dans la basse et moyenne tension. Cependant il présente les inconvénients majeurs indiqués précédemment.

D'autres solutions utilisent des systèmes permettant l'augmentation de leur impédance lors d'une montée de courant [11] :

III.3.1.a. Arc électrique

Cette solution s'adapte aux disjoncteurs lorsqu'ils s'ouvrent sur courant de défaut pour isoler une ligne. La résistance électrique d'un arc est fortement non linéaire avec le courant: les faibles courants mènent à une forte résistance qui diminuera d'autant plus le courant. Il est possible d'augmenter la puissance perdue par l'arc en favorisant les processus de convection et de rayonnement qui augmentent encore la résistance de l'arc (en imposant un certain cheminement) [11].

III.3.1.b. Réactance série

L'insertion permanente de réactances en série dans les réseaux permet de limiter les courants de défauts mais dégrade la stabilité transitoire et introduit des surtensions transitoires durant les séquences de refermeture des appareils de coupure. De plus, les chutes de tensions en régime nominal et l'encombrement n'étant pas négligeables, De fait, cette solution introduit une composante inductive qui peut être gênante pour certains types de réseau [11].

III.3.1.c. Limiteur à redresseurs commandés

Pour limiter ces inconvénients, il est préférable d'introduire des composants de commutation telle que les thyristors au moment du défaut. Un des dispositifs de référence est le transformateur série court-circuité par des thyristors [3] (Figure III.1). Lorsque les thyristors sont passants le transformateur est en court-circuit, l'impédance série est négligeable devant la

charge. Cependant lorsque les thyristors sont bloqués, le transformateur est en circuit ouvert et son impédance augmente fortement [3].

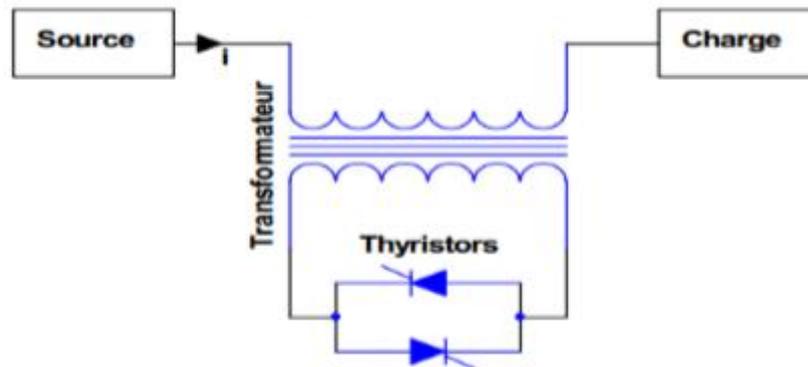


Fig.III.1. Limitation de courant par transformateur court-circuit [3].

Il est également possible d'utiliser des dispositifs à résonance insérés en série avec des Thyristors (Figure III.2), permettant de contrôler l'impédance du circuit LC en modifiant la Commande de l'angle d'amorçage.

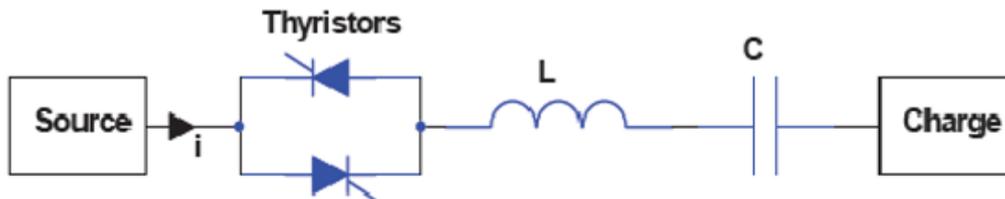


Fig.III.2. Limitation de courant par thyristors contrôlant un circuit raisonnant [3].

L'inductance et la capacité sont choisies et raccordées de façon à ne pas dépasser les limites de di/dt des thyristors. Les dispositifs commandés comme les disjoncteurs statiques, permettent de commuter très rapidement le courant d'une branche de faible impédance à une branche d'impédance élevée. Dans tous les cas, la synchronisation des dispositifs semi-conducteurs de commutation est délicate ; ces systèmes restent difficiles à adapter aux fortes puissances et à la haute tension et les composants de puissance présentent des chutes de tension non négligeables à l'état passant [3].

III.3.1.d. Condensateur

On obtient une tension qui limite bien le courant, en commutant le courant à limiter dans un condensateur. Malheureusement on distingue que la valeur de capacité nécessaire est importante et le courant limité reste significatif. Ce procédé reste pour tant exploitable en

basse tension. Un autre problème est que la commutation doit se faire en quelques microsecondes. Pour cela il est possible d'utiliser des disjoncteurs statiques [11], mais dans tous les cas la synchronisation des dispositifs semi-conducteurs de commutation est délicate.

Ces systèmes de commutation rapide sont non applicables à la haute tension et présentent des chutes de tension non négligeables à l'état passant (quand le courant est inférieur ou égal au courant nominal)[11].

III.3.1.e. Inductance

On distingue également le procédé d'une inductance insérée en série dans le réseau que limite le courant de court-circuit mais dégrade la stabilité transitoire si l'inductance est à proximité des générateurs, et introduit des surtensions transitoires durant les séquences de reconnections des appareils de coupure. Cependant la chute de tension, les pertes en régime nominal et l'encombrement sont loin d'être négligeables sauf pour de très faibles courants nominaux. De fait, cette solution introduit une composante inductive qui peut être gênante pour certains types de réseau. Les transformateurs sont en général conçus volontairement avec des tensions de court-circuit important afin de limiter les courants de défaut [11].

III.3.1.f. Résistance

Cette méthode consiste à réduire à l'aide d'une simple résistance le courant de court-circuit.

Celle-ci est intéressante lorsque le rapport I_c/I_n est très élevé. L'opportunité d'utilisation d'un tel système doit se décider en fonction de la chute de tension engendrée et de la dissipation de l'énergie locale qui s'ensuit [3].

Une autre solution consiste à ajouter, comme dans le cas de l'utilisation de capacités, des disjoncteurs statiques afin de commuter le courant dans une branche plus résistive. Les inconvénients des systèmes de commutation comme dans le limiteur de courant par thyristors décrits ci dessus, propres à ce système, persistent [3].

III.3.1.j. Résistance variable

Le processus de l'utilisation de la méthode résistance variable en série avec le réseau, s'avère plus efficace. Elle consiste à la variation provenant d'un changement de phase ou d'état du matériau. Le phénomène physique responsable du changement peut être (thermique, mécanique, magnétique...), mais il est toujours liée au courant. Cependant deux problèmes subsistent [11]:

- Les variations par changement de phase nécessitant une énergie qui tend à diminuer la vitesse de transition.
- Les variations par changement d'état soulèvent le problème de l'inhomogénéité qui tend à concentrer la puissance localement et ainsi affaiblir le matériau. Les matériaux à coefficient Thermique Positif (CTP) ayant une résistance contrôlée thermiquement sont des candidats potentiels pour la limitation de courant. Il existe deux familles de CTP :
 - Les résistances homogènes métalliques (Fer, Tungstène...) pour lesquelles la résistivité augmente d'un facteur 7 à 17 entre la température ambiante et la température du point de fusion.
 - Les polymères chargés (carbone ou céramiques conductrices) qui offrent des facteurs de résistivité supérieurs à 100.

Ces matériaux sont principalement utilisés en basse tension pour limiter les arcs électriques à l'ouverture des disjoncteurs [11].

III.4 Limiteur de courant à base de supraconducteur SFCL

Etant donné qu'un réseau électrique doit être dimensionné pour supporter son régime assigné mais aussi en cas de défaut, un régime de court-circuit, et à savoir que, le courant de court-circuit peut atteindre 30 fois la valeur du courant nominal, il est impératif que tout le réseau (générateurs, transformateurs, jeux de barres...) doit être surdimensionné électriquement et mécaniquement ; ce qui impose un prix très coûteux. L'introduction d'appareils capables de réduire le courant de court-circuit est très conseillée, ce qui est le principe d'un limiteur de courant à base de supraconducteur (Superconducting Fault Current Limiter SFCL) [11], cela consiste à introduire une impédance supplémentaire lorsqu'un défaut apparaît. En utilisant la transition de l'état supraconducteur vers un état résistif, on réalise une impédance variable. Par simple dépassement du courant critique d'un élément supraconducteur inséré dans la ligne électrique, le matériau va transiter naturellement lors d'un court-circuit, sans avoir besoin d'appareil de détection pour provoquer cette transition (Figure III.5). Par la simplicité de ce principe et sa performance qui n'est pas égalée par les techniques conventionnelles de limitation du courant, il est très indiqué pour permettre l'amélioration de la qualité de service des réseaux actuels. De plus son fonctionnement est répétitif et autonome. Ce qui n'est pas comme l'utilisation de fusible qui nécessite son remplacement et l'intervention d'un opérateur humain. Ainsi, le courant de court-circuit deviendrait une notion théorique qui ne serait jamais atteinte. Si les courants limités

n'excèdent pas, par exemple, huit fois le courant nominal, la puissance dissipée lors d'un court-circuit devient alors plus de six fois inférieure à la valeur actuelle [11].

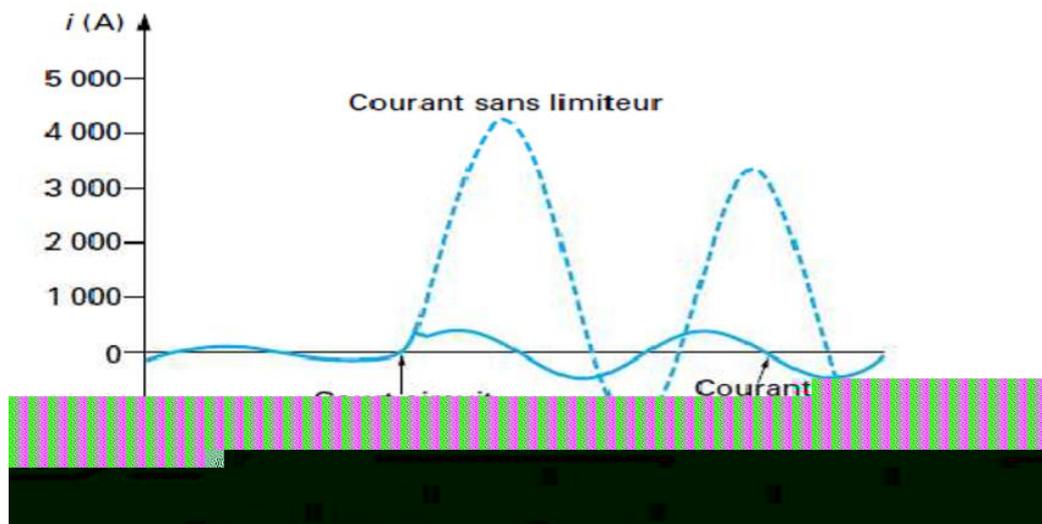


Fig.III.5.Courants de court circuit avec et sans limiteur [11]

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

De plus son fonctionnement est répétitif et autonome. C'est le fusible permanent qui ne nécessite ni d'être changé ni l'intervention d'un opérateur humain. Ainsi, le courant de court-circuit deviendrait une notion théorique qui ne serait jamais atteinte. Si les courants limités n'excèdent pas, par exemple, huit fois le courant nominal, la puissance dissipée lors d'un court-circuit devient alors plus de six fois inférieure à la valeur actuelle [3].

Il est même possible d'imaginer de dimensionner de manière totalement différente les réseaux futurs, surtout dans les pays en voie de développement ou le réseau est entièrement à construire. Le transport du courant pourrait se faire non plus par les lignes de THT mais par des lignes supraconductrices en MT avec des courants importants grâce à l'insertion systématique de limiteurs de courant. Tous les disjoncteurs pourraient être remplacés par de simples interrupteurs [3].

III.4.1. Différents types de limiteur de courant supraconducteur

III.4.1.a Limiteur résistif

Le principe du limiteur de courant résistif est simple, s'agissant d'insérer dans la ligne à protéger un élément supraconducteur en série, qui transite naturellement par dépassement de

transformateur est court-circuité par une résistance supraconductrice). Le limiteur est placé en série dans le circuit à protéger. La Figure III.7 présente schématiquement le principe. En régime nominal, le secondaire étant dans son état supraconducteur, le transformateur est court-circuité, et seule l'impédance de fuite est vue par le système. En cas de court-circuit sur le réseau, le secondaire transite et le limiteur se comporte comme une forte réactance. L'avantage de ce type de limiteur est de pouvoir dimensionner les parties supraconductrices à des intensités ou des tensions bien inférieures aux valeurs du réseau, les enroulements primaires étant réalisés en cuivre. Le rapport de transformation laisse toute latitude d'adaptation. Une des difficultés de cette structure est de limiter l'inductance de fuite à des niveaux acceptables pour le système. Un autre inconvénient réside dans l'encombrement et le poids de telles structures [3].

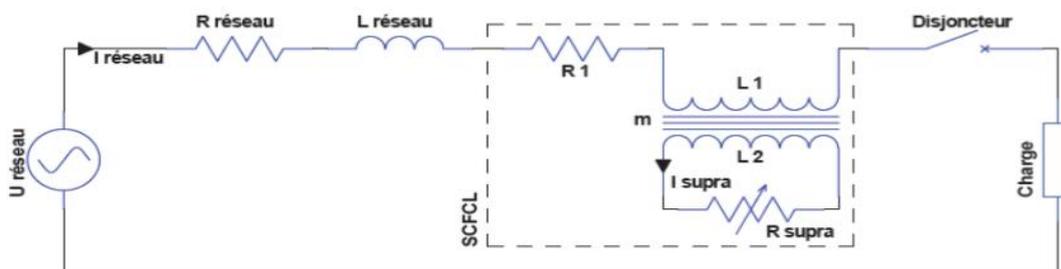


Fig.III.7. Principe du limiteur de courant inductif [3].

Le limiteur inductif permet de limiter efficacement les courants de court-circuit, mais son principe est plus compliqué que celui du limiteur résistif. De plus, sa réalisation peut être délicate car il nécessite en général un bon couplage entre le circuit primaire et le circuit secondaire qui ne sont pas forcément à la même température. Le limiteur résistif quant à lui ne présente pas ces inconvénients [3].

III.4.1.c. Limiteur de type pont redresseur

Ce type de SFCL a été inventé par Boeing en 1983. Il est composé d'un pont redresseur à diodes ou thyristors, d'une bobine supraconductrice L_{supra} et d'une source de tension continue U_{dc} (Figure II.8). Un courant continu I_{dc} traversant une bobine supraconductrice L_{supra} est délivré par une source de tension U_{dc} . En régime assigné le courant $I_{réseau}$ étant inférieur au courant I_{dc} , les diodes sont passantes et le courant $I_{réseau}$ ne traverse pas l'inductance L_{supra} . Dans ce cas l'impédance du SFCL est faible et seule l'électronique de puissance génère des pertes. Si le courant $I_{réseau}$ excède le courant I_{dc} , les diodes (D1, D4) ou (D2, D3) selon l'alternance concernée par le court-circuit, se bloquent. Ce quasi

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

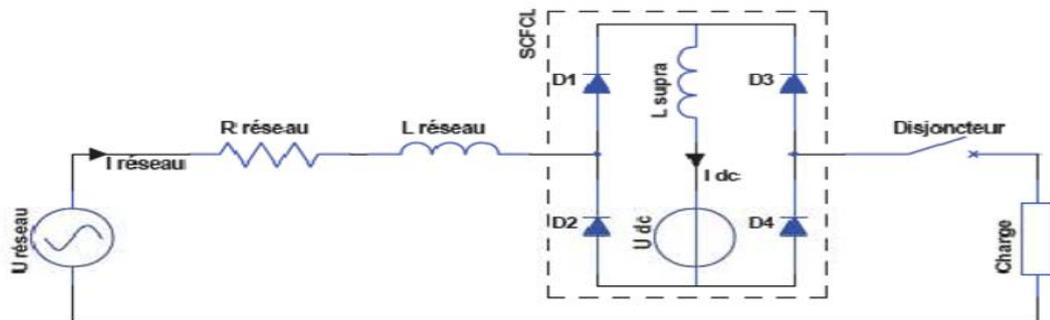


Fig.III.8. Principe du limiteur de courant de type pont redresseur [11].

Cependant si on remplace les diodes par des thyristors il devient possible de stopper le court-circuit au passage par zéro du courant. De plus, on distingue que le courant de déclenchement est réglable par I_d et peut facilement être adapté aux besoins du réseau. Mais malgré tous ces avantages le fonctionnement reste peu fiable ; en effet en régime de défaut un disfonctionnement d'une diode court-circuitera la bobine, annulant ainsi le phénomène de limitation de courant [11].

III.4.1.d. SFCL de type contrôleur de courant de défaut

Ce type de SFCL a été développé par Kuperman et Juengst en 2000 [56]. Il est composé de deux thyristors $T1$ et $T2$ montés en opposition-série et court-circuités respectivement par les inductances supraconductrices $L1$ et $L2$ (Figure III.10) [3].

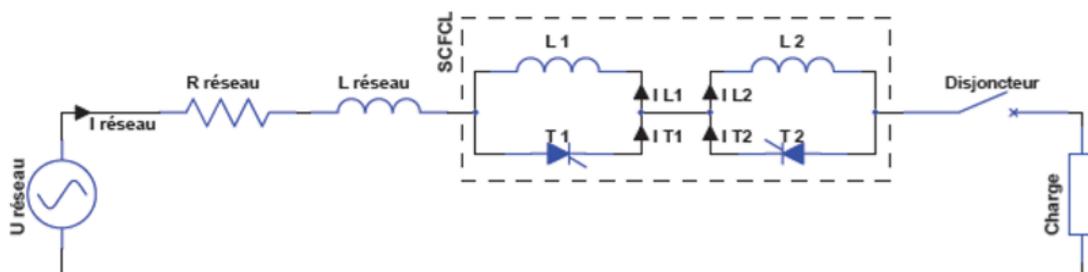


Fig.III.10. Principe du limiteur de courant de type contrôleur de courant de défaut [11]

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

En régime de défaut le courant $I_{\text{réseau}}$ dépasse I_{dc} , ceci bloque alternativement les thyristors et aiguille ainsi le courant dans les inductances qui leurs sont associées. Par conséquent les inductances supraconductrices $L1$ et $L2$ sont alternativement insérées sur le réseau à chaque passage par zéro du courant, cette augmentation d'impédance permet ainsi de limiter le courant. Cette architecture possède les mêmes caractéristiques que le SFCL avec pont redresseur mais exige une source de tension et le circuit de commande des thyristors [3].

III.4.1.e. SFCL de type noyaux magnétiques saturés

Pour limiter le courant de court-circuit, une impédance non-linéaire peut être obtenue en reliant les enroulements $L1$ et $L2$ de deux noyaux magnétiques saturés par des bobines supraconductrices $L_{\text{supra}1}$ et $L_{\text{supra}2}$ parcourues par des courants continus (Figure III.11) [3].

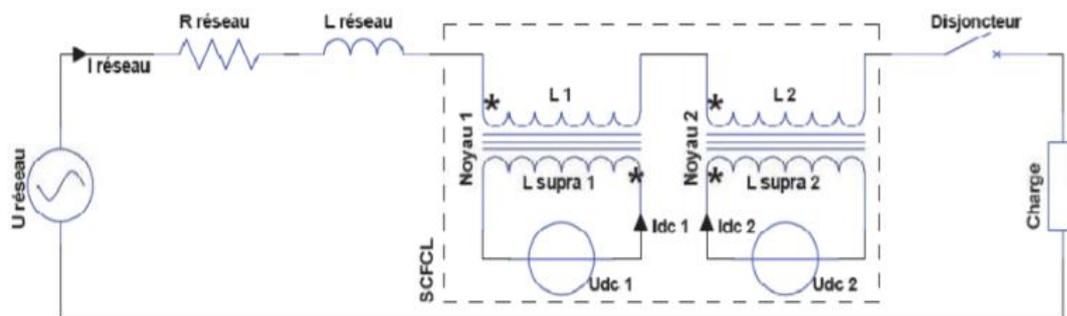


Fig.III.11. Principe du limiteur de courant du type noyaux magnétiques saturés [11].

Les deux noyaux étant saturés, l'inductance apparente du SFCL est faible et correspond à la somme des résistances et des réactances de $L1$ et $L2$. En régime assigné, $I_{\text{réseau}}$ est assez faible pour maintenir les noyaux entièrement saturés, assurant ainsi la faible impédance du SFCL. Dans le cas d'un défaut, l'augmentation de $I_{\text{réseau}}$ conduit alternativement les deux noyaux hors de leur saturation, dans leur zone de perméabilité élevée. Ceci entraîne une importante augmentation de l'impédance apparente du SFCL, développant ainsi un champ électrique permettant de limiter le courant. L'enroulement supraconducteur n'étant que très faiblement traversé par le courant variable, les pertes à basse température sont faibles et ne nécessitent pas de système de refroidissement important. Cependant, le noyau de fer et toute l'installation restent relativement encombrants [3].

III.4.2. Comparaison des différents SCFCL

La commercialisation des SFCL n'est pas encore de jour. Comme il est encore difficile de prévoir quel type sera le plus prometteur pour l'avenir. Cependant il est possible de les distinguer en fonction de 4 principales caractéristiques [11] :

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

III.5. Avantages et inconvénients propres aux supraconducteurs

L'utilisation d'une technologie nouvelle doit apporter un certain nombre d'avantages par rapport aux techniques classiques éprouvées. Dans le cas du limiteur de courant, la fonction de limitation est intrinsèque au matériau supraconducteur qui transite rapidement et automatiquement de l'état non résistif à l'état résistif. Cet avantage peut être contrebalancé par les besoins de réfrigération, de maintenance et les contraintes économiques si le coût et la mise en œuvre de ces matériaux sont prohibitifs [3].

III.5.1. Avantages

Les avantages attendus par rapport aux systèmes classiques sont [3]:

- Une limitation immédiate et non différée du courant, ce qui garantit la protection des matériels contre les efforts électromagnétiques intenses qu'occasionnent les surintensités ;
- Une fonctionnalité nouvelle sans équivalent classique ; Un fonctionnement autonome et naturel ;
- une intégration des dispositifs de détection et de limitation ;
- Une faible chute de tension et de faibles pertes en régime normal ;
- Une masse et un volume réduits ;
- Un fonctionnement répétitif, la transition de l'état supraconducteur à l'état normal étant non destructive si elle est bien maîtrisée ;
- Une autoprotection en cas de dysfonctionnement automatique puisque, en cas de panne ;
- cryogénique par exemple, le supraconducteur se trouve naturellement dans l'état normal résistif ;

- Une bonne tenue diélectrique pour les applications en haute tension ;
- Une réponse possible aux besoins accrus de la qualité de la fourniture d'énergie électrique.

III.5.2 Inconvénients

Les inconvénients qu'il convient de minimiser par des dispositifs adaptés sont [3] :

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

III.6. Insertion du limiteur de courant dans le réseau électrique

On peut envisager plusieurs endroits d'insertion d'un limiteur dans un réseau de distribution. Des caractéristiques différentes sont observées (courant nominal, courant à limiter, temps de récupération), selon l'emplacement choisi. Ainsi, en fonction de son emplacement, le type de matériau supraconducteur utilisé sera différent.

Une des plus intéressantes configurations consiste à installer un limiteur entre deux jeux de barres (Figure II.9) afin d'augmenter le maillage du réseau (accroître la continuité de service). Actuellement, certains réseaux moyens tension ne peuvent pas être interconnectés entre eux car les courants de court-circuit engendrés seraient trop importants.[11]

L'exploitation des infrastructures existantes est à son maximum compte tenu de la sensibilité accrue de l'opinion publique et le coût engendré vis à vis de l'installation de nouvelles lignes de transport. Ainsi en haute tension, le bouclage de deux réseaux évite d'amener une autre source pour sécuriser les départs [11].

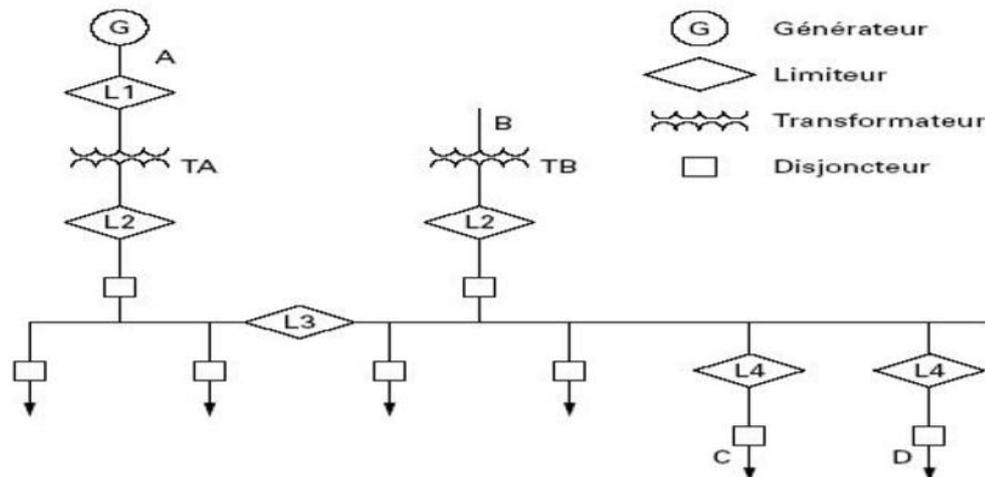


Fig.III.12. Insertion de limiteurs de courant de défaut dans un réseau [3].

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

Toujours compte tenues des contraintes situées ci-dessus une autre possibilité intéressante dans les réseaux actuels consiste à placer le limiteur en aval du transformateur HT / MT avant le jeu de barre, au niveau de l'arrivée MT. Ainsi, sur un réseau existant, il est possible de rajouter des départs sur le jeu de barre et de conserver les mêmes protections (disjoncteurs). Sans limiteurs, les courants de court-circuit auraient été trop importants. Pour le dimensionnement d'un réseau futur, un limiteur placé en aval d'un transformateur permettrait de réduire la tension de court-circuit U_{cc} du transformateur et donc de diminuer la chute de tension à ces bornes. Actuellement les transformateurs sont dimensionnés avec des U_{cc} importants afin justement de réduire les courants de court-circuit.[11]

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

Lors de la conception des réseaux futurs, un limiteur de courant peut être prévu après l'arrivée MT sur les transformateurs afin de limiter les courants de court-circuit et ainsi éviter de surdimensionnés le réseau [11].

III.7. Modélisation

III.7.1. Implémentation du modèle de SFCL

Le modèle est basé sur les trois états possibles d'un supraconducteur : flux-creep, fluxflow et l'état (résistif) normal. La Fig.III.13. illustre la relation typique entre le champ électrique E et densité de courant J , pour ces trois états d'après le modèle de puissance, le tableau (III.2) définit les valeurs électriques et thermiques utilisés [11].

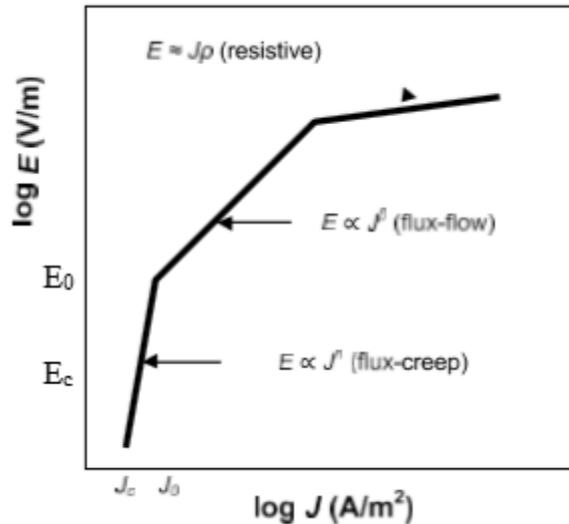


Fig.III.13. Caractéristiques du supraconducteur E-J, montrant les trois états [11].

Notez que la résistance est augmentée si on déplace d'un état vers l'autre. Le phénomène thermique dans un limiteur a été modélisé comme suit :

$$T_c = T_a \frac{1}{C_{sc}} \int_0^t [Q_{sc}(t) - Q_{\text{évacuées}}(t)] dt \quad (\text{III.3})$$

T_a : Température ambiante

Q évacuées : Chaleur évacuée par le système de refroidissement

Q_{sc} : La chaleur dissipée dans le supraconducteur

III.7.2. Analyse des caractéristiques temporelles du SFCL

Les équations de modèle de SFCL peuvent être analysées pour se rapprocher des travaux de nivellement, c'est-à-dire l'instant, le temps pris pour étancher pour un courant de défaut donné. La température du supraconducteur est calculée à l'aide de (III.6), dans la région de flux-flow (où $E(t, T) \geq E_0$ et $T(t) < T_c$). Quand $T(t) \geq T_c$, il est supposé que le

supraconducteur étanche [11]. L'équation (3) peut être différencié et manipulé comme suit [11] :

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C_{sc}} [Q_{sc}(t) - Q_{transition}(t)] \quad (III.4)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C_{sc}} [i(t)E(t, T)I_{sc} - \frac{T(t)-T_a}{\theta_{sc}}] \quad (III.5)$$

$$dt = \frac{dT}{\frac{1}{C_{sc}} [i(t)E(t, T)I_{sc} - \frac{T(t)-T_a}{\theta_{sc}}]} \quad (III.6)$$

$$T = T^{t-1} + \frac{dt}{C_{sc}} [\frac{1}{C_{sc}} [i(t)E(t, T)I_{sc} - \frac{T(t)-T_a}{\theta_{sc}}]] \quad (III.7)$$

Pour simplifier l'analyse, une constante de courant de défaut dc, I, est supposé. Par conséquent, E peut être simplifié pour être seulement une fonction de la température [11] :

$$\int dt = \int [IE(T)I_{sc} - \frac{T(t)-T_a}{\theta_{sc}}] \quad (III.8)$$

Ou E(T) c'est [11]

Pour $T < T_c$ et $J < J_c$

$$E(T) = E_c \left(\frac{J}{J_c} \right)^{\alpha(T)} \quad (III.9)$$

Pour $T < T_c$ et $J > J_c$

$$E(T) = E_0 \left(\frac{E_c}{E_0} \right)^{\frac{\beta}{n_{77K}}} \left(\frac{J_c}{J_c(T)} \right) \left(\frac{J}{J_c} \right)^{\beta} \quad (III.10)$$

Pour $T > T_c$

$$E(T) = \rho(T_c) \left(\frac{T}{T_c} \right) J \quad (III.11)$$

On pose

$$IE(T) I_{sc} = K \frac{T_c - 77}{T_c - T} \quad (III.12)$$

$$\text{Avec : } K = IE_0 \left(\frac{E_c}{E_0} \right)^{\frac{\beta}{n_{77K}}} \left(\frac{I}{J_c \alpha_{sc}} \right)^{\beta} I_{sc} \quad (III.13)$$

Cela fournit une expression pour t, le temps pour le supraconducteur d'atteindre une température particulière T, comme suit [11]:

$$t = C_{sc} \int \frac{dT}{\left[K \frac{T_c - 77}{T_c - T} - \frac{T - T_a}{\theta_{sc}} \right]} \quad (III.14)$$

Dans le cas où $T_a = 77 \text{ K}$, $T_c = 95 \text{ K}$ et $T = 95 \text{ K}$, le temps nécessaire pour atteindre une température T_c est donné par l'équation suivant [11]

$$t = 6C_{sc} \theta_{sc} \frac{\arctan\left(\frac{3}{\sqrt{2\theta_{sc}K-9}}\right)}{\sqrt{2\theta_{sc}K-9}} \quad (\text{III.15})$$

La figure(III.14) illustre les caractéristiques des temps de transition en fonction de courant de défaut pour trois différentes valeurs de la température initiale T_a (77, 80,85) K.

Par exemple, pour $T_a = 77 \text{ K}$, un courant inférieur de 1,9 kA n'influe pas le SFCL, c.-à-d. la température reste inférieur de T_c , par contre pour $T_a=85\text{K}$, le courant nécessaire pour augmenter la température au de la valeur critique est 1.4kA

On peut conclure d'après cette simulation que l'augmentation de la température ambiante diminue le courant de transition de SFCL de l'état supra vers l'état normale [11].

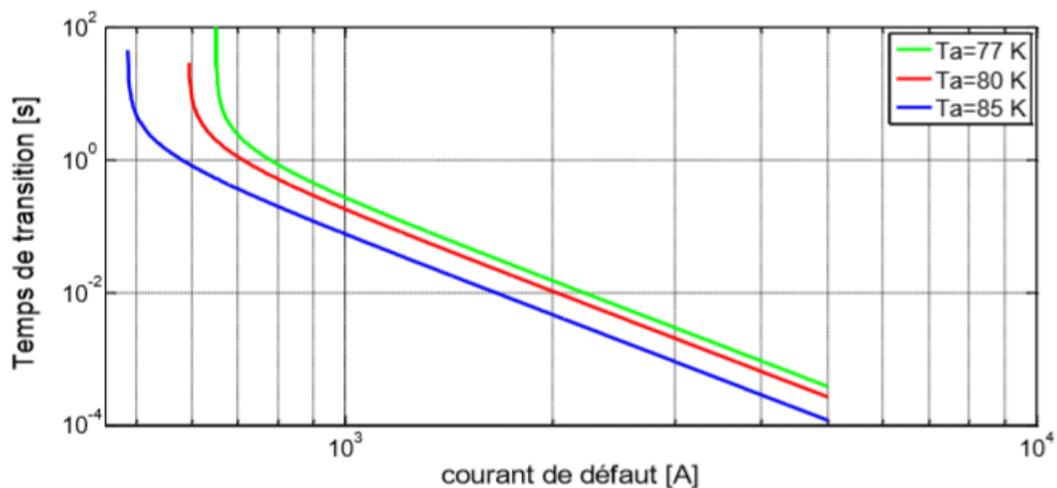


Fig.III.14.variation de temps de transition en fonction de courant de défaut [11].

III.8.conclusion

Nous avons décrit dans ce chapitre les différents types de limiteurs et leurs configurations dans un réseau électrique, et aussi les limiteurs de courant à base de supraconducteur sont peu fiables après défaillance et encombrants et la modélisation.

En conséquence de tous ce qu'on a vu précédemment sur le limiteur de courant à base de supraconducteur, celui-ci s'impose comme élément clé pour la protection des équipements électriques, l'extension des puissances transitées sur réseaux existant, l'accroissement du degré d'interconnexion des réseaux et de la qualité de service. Cette propriété peut être soit utilisée directement (limitation purement résistive) soit indirectement, l'élément supraconducteur étant alors un organe de détection et de déclenchement d'un processus auxiliaire de limitation [11].

Chapitre IV

Simulation et résultats

IV.Simulation et résultats

Nous présentons dans cette partie les résultats des simulations du comportement électro-magnéto-thermique d'un limiteur de courant conçu à partir d'un supraconducteur à haute température critique de type II, ce dernier est inséré dans un réseau électrique triphasé. Dans le but de prévoir le comportement électrique et thermique du limiteur de courant dans le réseau, nous provoquons un défaut dans le réseau qui s'agit d'un court-circuit (CC), phase-terre, symétrique où nous considérons que les trois phases du réseau sont en court-circuit.

Pour modéliser un tel problème, il est nécessaire de prédire la conductivité électrique apparente du supraconducteur. Pour cela, nous avons adopté le modèle de Flux-Flow et Flux-Creep. Dans plusieurs travaux de recherche, le modèle de puissance est adopté, où la conductivité électrique apparente du supraconducteur est décrite par une loi de puissance à travers un coefficient n . Ce modèle peut décrire de façon satisfaisante la conductivité électrique apparente du supraconducteur mais dans une zone précise limitée par la valeur de la densité de courant critique J_c . Or, un limiteur de courant conçu à partir d'un supraconducteur fonctionne dans les quatre zones qui sont respectivement :

- La zone où le supraconducteur est défini par une résistance nulle,
- Les deux régimes, Flux-Flow et Flux-Creep,
- Le régime normal défini par une résistance élevée.

Pour décrire correctement le comportement du supraconducteur dans ces quatre régimes, le modèle Flux-Flow et Flux-Creep est adopté (voir chapitre 2).

L'équation de diffusion de la chaleur est adoptée pour décrire l'évolution temporelle de la température intérieure dans le supraconducteur. Cette équation est adoptée dans le modèle via la dépendance de plusieurs paramètres en température, tel que, la densité de courant critique, le champ magnétique. Le modèle peut prendre alors la dépendance en température de la conductivité électrique apparente du supraconducteur.

Le schéma en bloc de la figure IV.1 présente le Montage adopté pour décrire le court-circuit au sein du réseau. L'outil SIMULINK de MATLAB sera utilisé comme moyen de modélisation du réseau électrique afin de calculer les courants de court-circuit.

Dans notre travail de simulation, nous avons fait varier la valeur de la densité de courant critique (J_c), dans le but est de déterminer la valeur optimale de J_c qui permet de donner les meilleures conditions pour limiter le courant de défaut, la marge de la variation de

Les paramètres de la pastille supraconductrice adoptés dans ces simulations sont les suivants :

Tableau . IV.2 : Résumé des paramètres modèles SFCL.

Symbole	Paramètre	valeur
E_0	Le champ électrique du régime Flux-Flow	0.1 (V/m)
E_c	Le champ électrique critique	$1e-6*100(V/m)$
$alpha_{77K}$	Exposent de la région Flux-creep	6.0
$Beta$	Exposent de la région Flux-flow	3
T_c	La température critique	95 (K)
rho_{Tc}	Résistivité du supraconducteur	$1.0e-6(ohm/m^2)$

IV.1.Résultats de simulation

Dans la partie ci-dessous, nous présentons les résultats des simulations du limiteur de courant supraconducteur. Les résultats à caractère magnétique et thermique sont largement présentés, où le supraconducteur prend différentes valeurs de J_c . Dans ces résultats, la résistance additionnelle due à la présence du limiteur de courant est présentée. Aussi, l'évolution temporelle respectivement, du champ électrique E , de la densité de courant J_c et enfin de la température intérieur T du supraconducteur.

IV.1.1.Pour : $J_c_{77K}=1e7 (A/m^2)$

Les figures de **Fig.IV.2** à **Fig.IV.6** représentent respectivement l'évolution temporelle de, la résistance additionnelle, du champ électrique E , du courant du réseau électrique i , de la densité du courant J_c et enfin de la température intérieur du supraconducteur. L'évolution présentée, inclus les régimes, avant défaut, au cours du défaut et enfin après défaut. L'instant du court-circuit est à partir de 0.03 s.

Selon les résultats présentés ont constate que tout les paramètres liés au supraconducteur à l'instant $t = 0.3$ s croit et augmente principalement la résistance du supraconducteur ou elle prend une valeur considérable à partir d'une valeur nulle. Ceci veut dire que le supraconducteur fonctionne correctement et il intervient avec une résistance qui croit

considérablement. Cette augmentation provoque une augmentation du champ électrique, de la température, cependant le courant diminue considérablement comparé à celui obtenu sans limiteur.

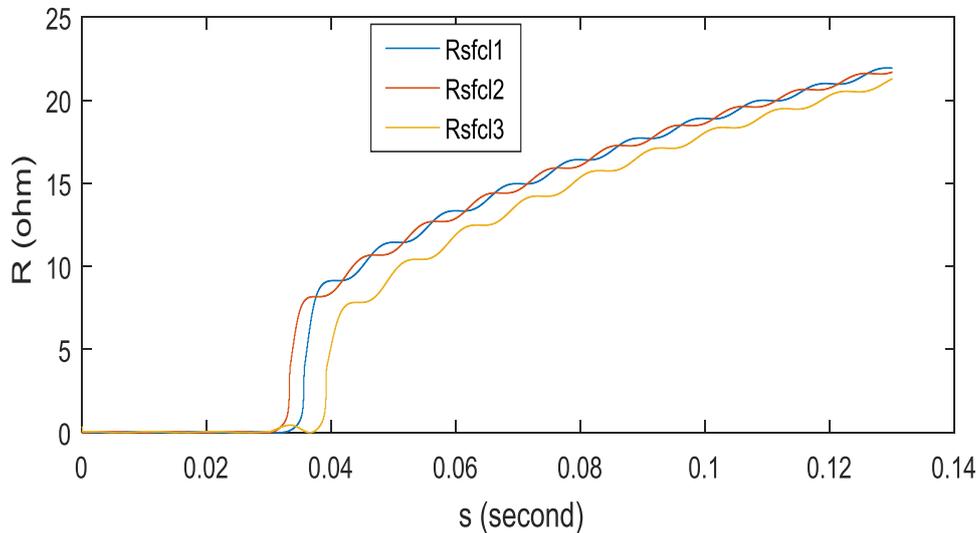


Fig.IV.2. l'évolution temporelle de la résistance additionnelle (la résistance due à la présence du limiteur de courant) pour- $J_{c_77K}=1e7$ (A/m²).

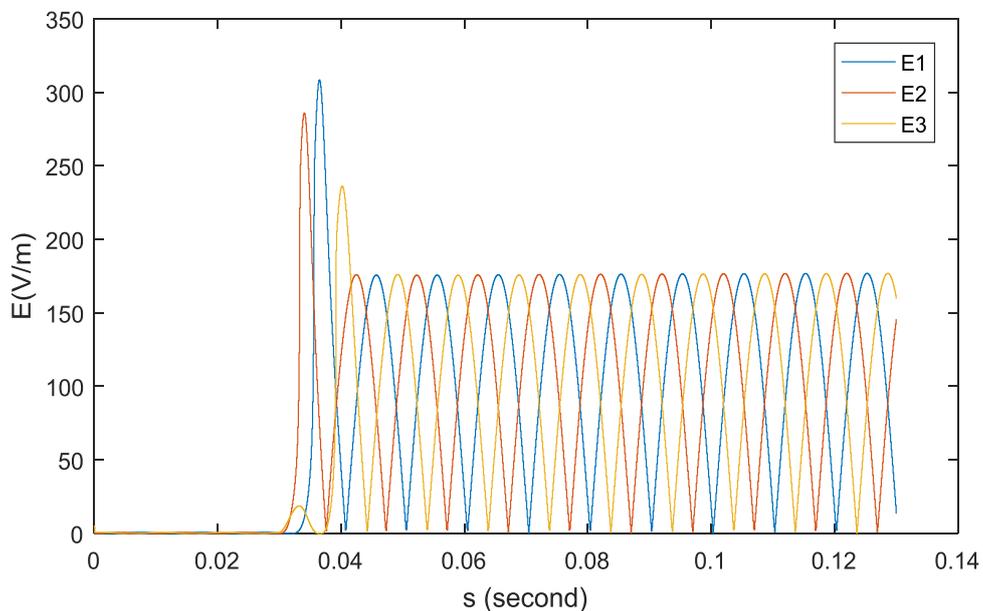


Fig.IV.3. l'évolution temporelle du champ électrique pour- $J_{c_77K}=1e7$ (A/m²).

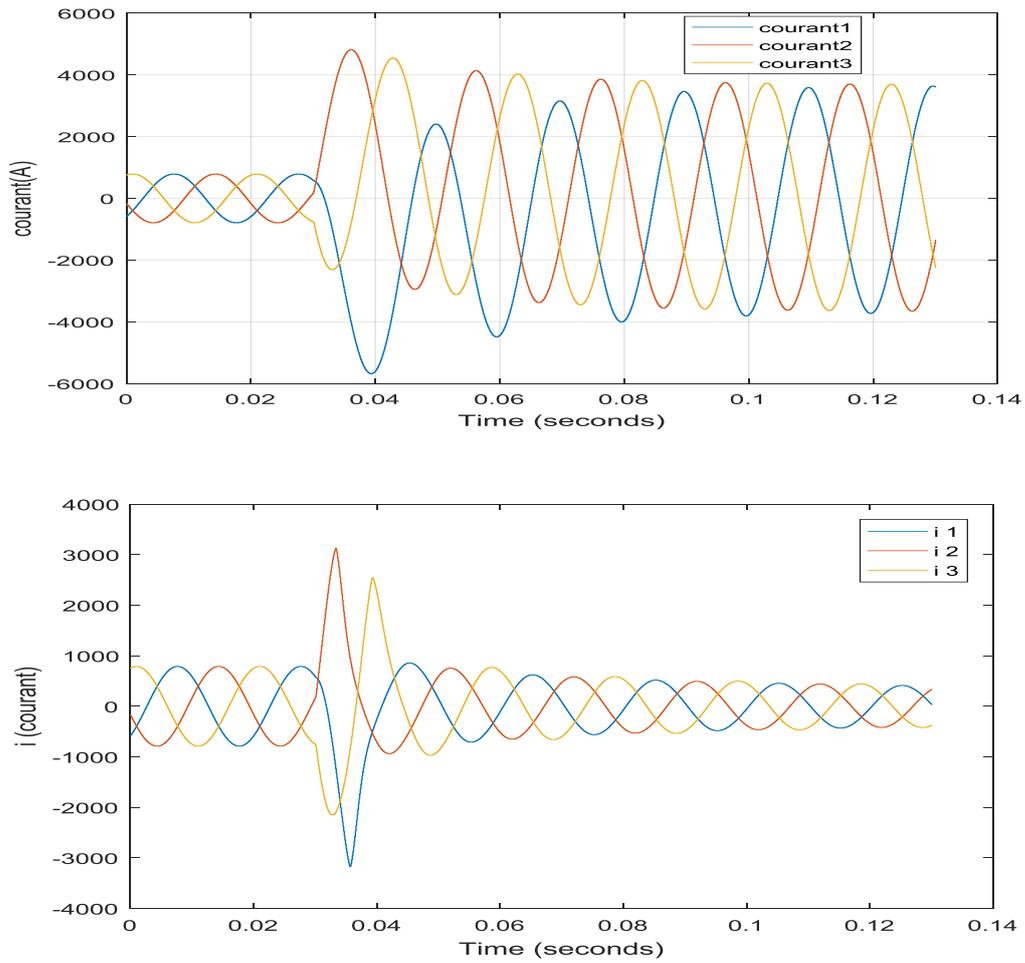


Fig.IV.4. l'évolution temporelle du courant du réseau électrique sans et avec le limiteur de courant SFCL pour- $J_{c_77K}=1e7$ (A/m²).

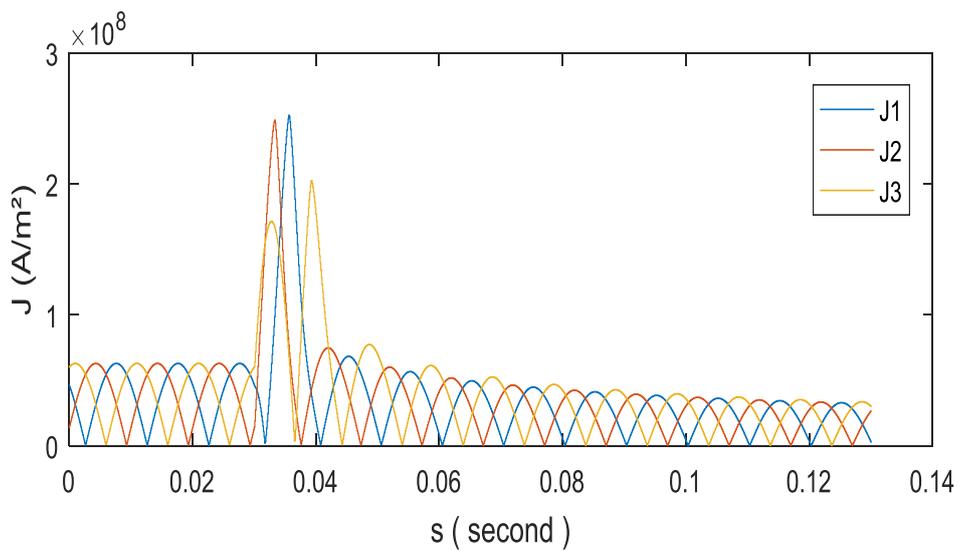


Fig.IV.5. Evolution temporelle de la densité de courant critique pour- $J_{c_77K}=1e7$ (A/m²).

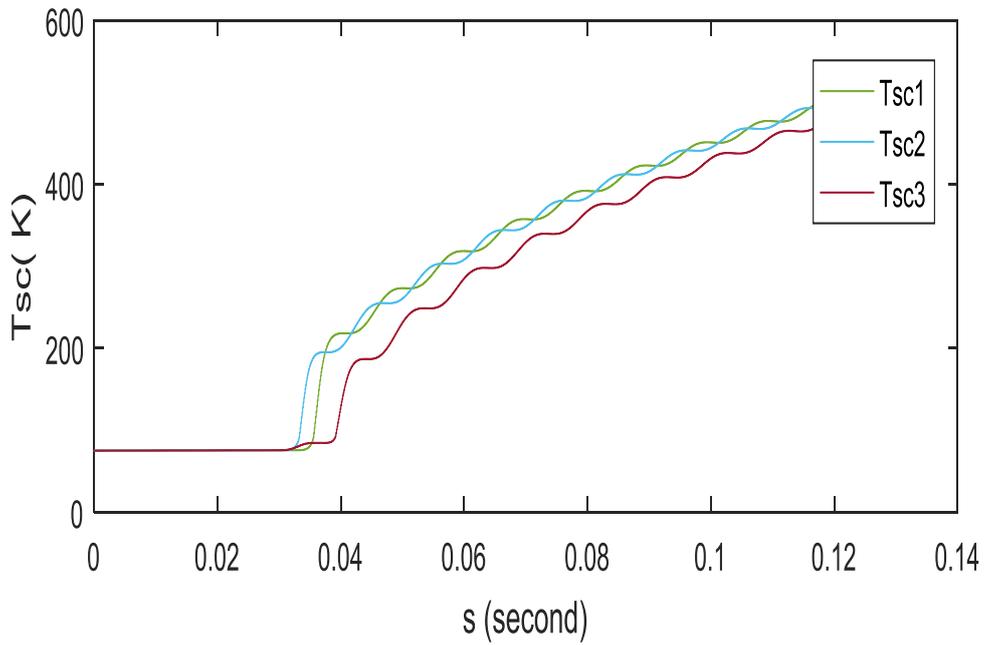


Fig.IV.6. Evolution temporelle de la température dans chaque phase pour- $J_c_{77K}=1e7$ (A/m²)

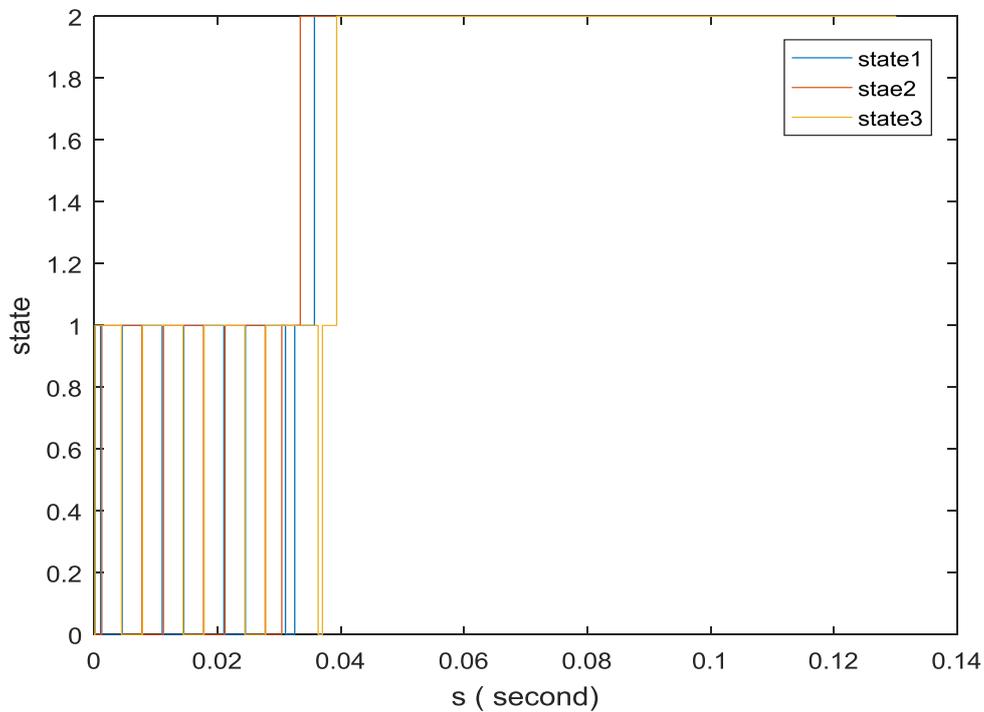


Fig.IV.7. Evolution temporelle de la state en chaque phase pour- $J_c_{77K}=1e7$ (A/m²) .

IV.1.2. Variation de la densité de courant critique J_c

Cette partie présente les mêmes résultats présentés précédemment, cependant dans les résultats présentés, on agit sur la valeur de la densité de courant critique J_c afin de voir son influence sur le processus de la limitation du courant de défaut. Cette variation est prise entre $2e7$ (A/m^2) et $5e8$ (A/m^2).

IV.1.2.1. Densité de courant $J_{c_77K=2e7}$ (A/m^2)- $5e8$ (A/m^2)

De même, Les figures de **Fig.IV.8** à **Fig.IV.13** représentent respectivement l'évolution temporelle de, la résistance additionnelle, du champ électrique E , du courant du réseau électrique i , de la densité du courant J_c et enfin de la température intérieure du supraconducteur, mais avec une densité de courant $J_{c_77K=2e7}$ (A/m^2)-. L'évolution présentée, inclut les régimes, avant défaut, au cours du défaut et enfin après défaut. L'instant du court-circuit est à partir de 0.03 s. on remarque que les mêmes phénomènes se produisent, c'est-à-dire, tous les paramètres liés au supraconducteur à l'instant $t = 0.3$ s croissent et augmentent principalement la résistance du supraconducteur ou elle prend une valeur considérable à partir d'une valeur nulle. Ceci veut dire que le supraconducteur fonctionne correctement et il intervient avec une résistance qui croît considérablement. Cette augmentation provoque une augmentation du champ électrique, de la température, cependant le courant diminue considérablement comparé à celui obtenu sans limiteur. Il est de même pour les autres cas, celles de $J_{c_77K=3e7}$ (A/m^2)- $5e8$ (A/m^2).

Dans l'allure de la résistance, on remarque certain décalage temporel entre résistances du limiteur inséré dans les trois phases, ceci est dû à la valeur des courants du réseau qu'ils ont un origine décalée, il s'agit d'un système triphasé équilibré.

Le changement qui est dû à la variation de J_c signifie qu'il est nécessaire d'utiliser un limiteur de courant supraconducteur avec une densité de courant faible de l'ordre de $J_{c_77K=1e7}$ (A/m^2).

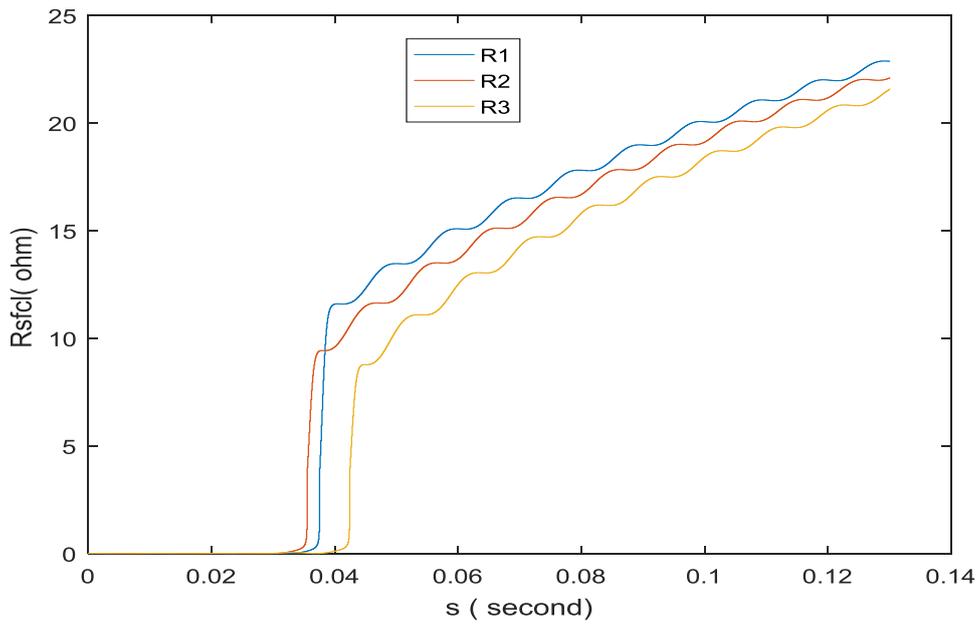


Fig.IV.8. l'évolution temporelle de la résistance additionnelle (la résistance due à la présence du limiteur de courant) pour- $J_c_{77K}=2e7$ (A/m²).

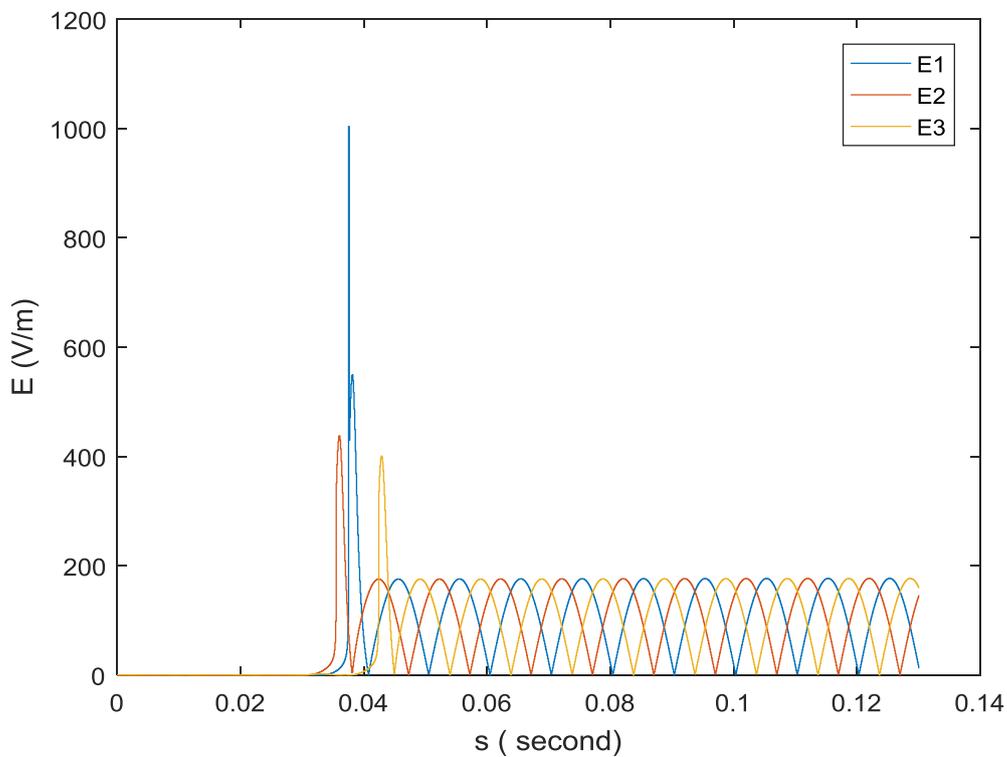


Fig.IV.9. l'évolution temporelle du champ électrique pour- $J_c_{77K}=2e7$ (A/m²)..

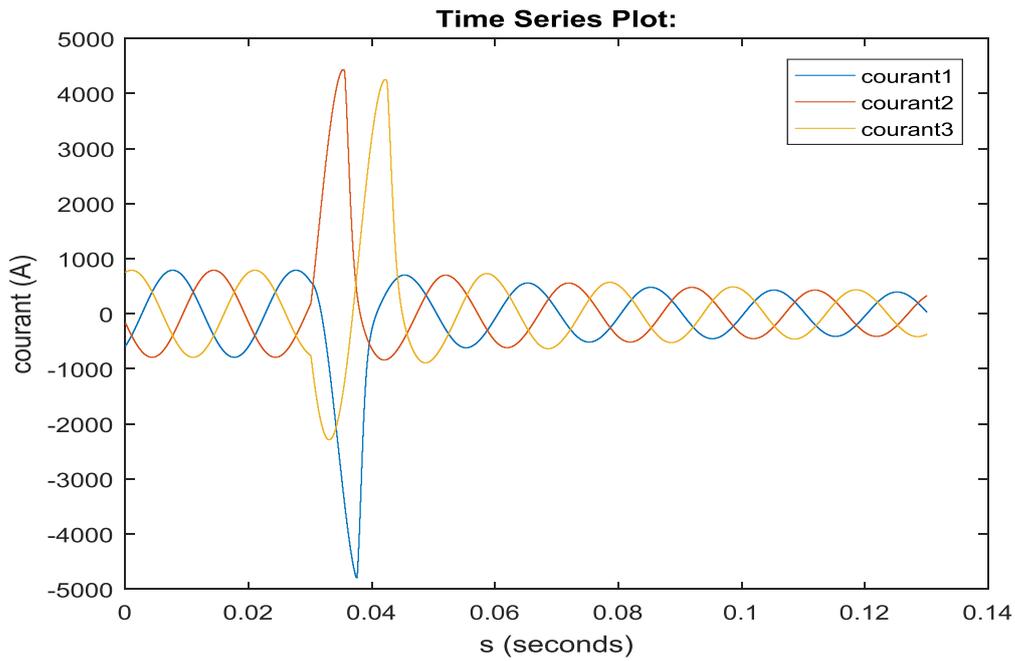


Fig.IV.10. l'évolution temporelle du courant du réseau électrique pour- $J_c_{77K}=2e7$ (A/m²).

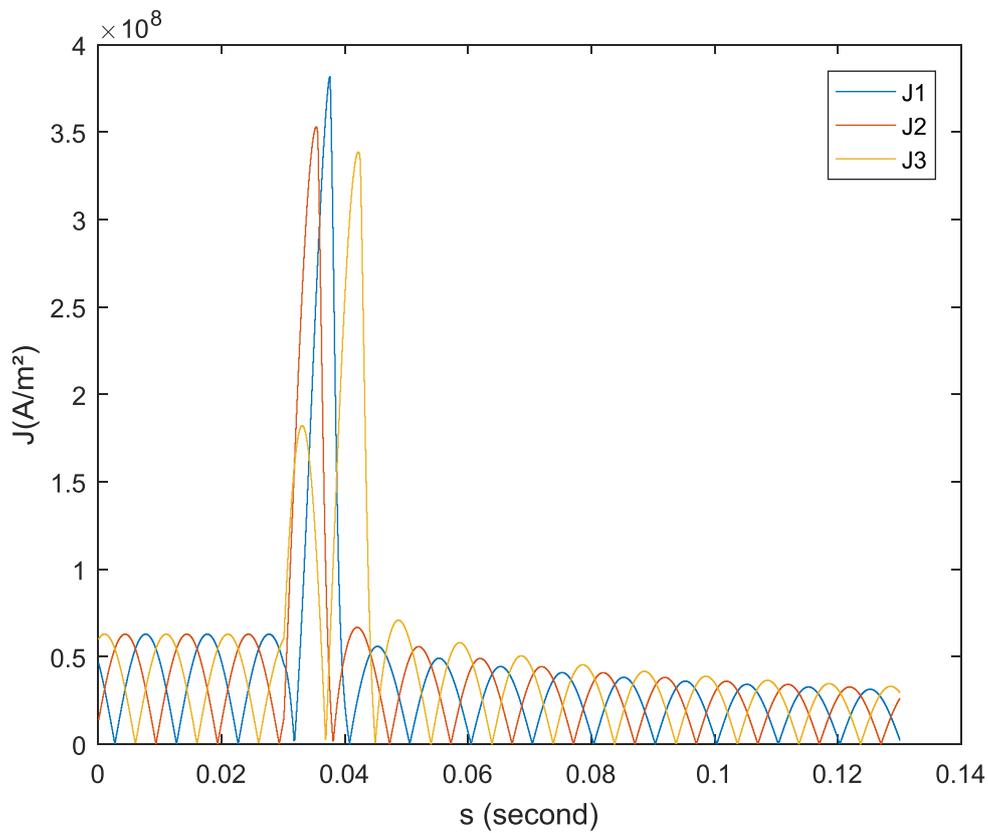


Fig.IV.11. Evolution temporelle de la densité de courant critique pour- $J_c_{77K}=2e7$ (A/m²).

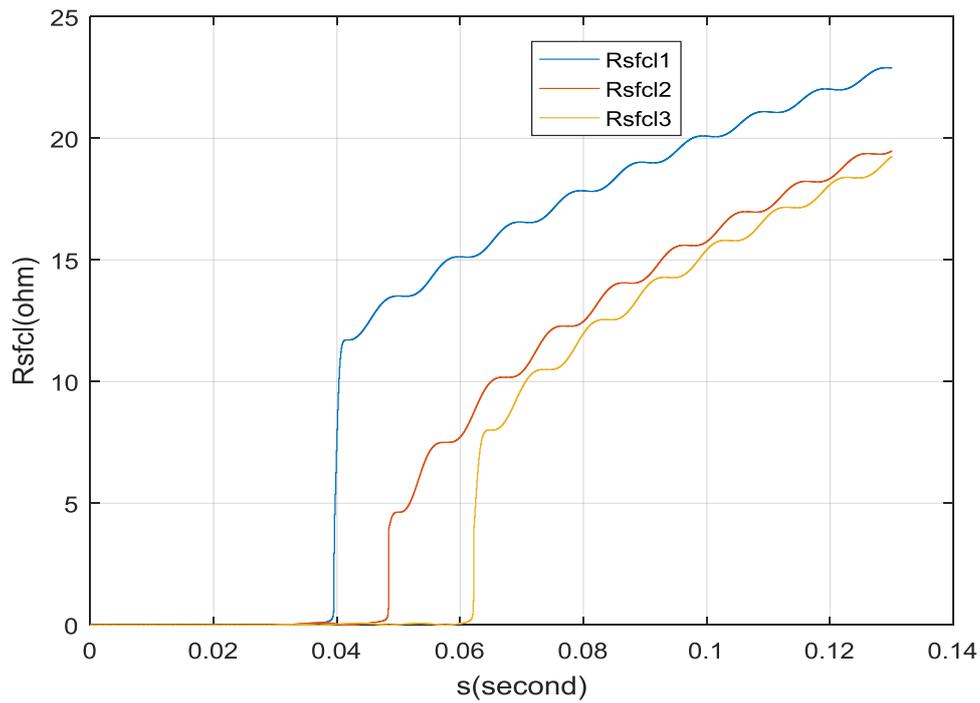


Fig.IV.14. l'évolution temporelle de la résistance additionnelle (la résistance due à la présence du limiteur de courant) pour- $J_c_{77K}=3e7$ (A/m²).

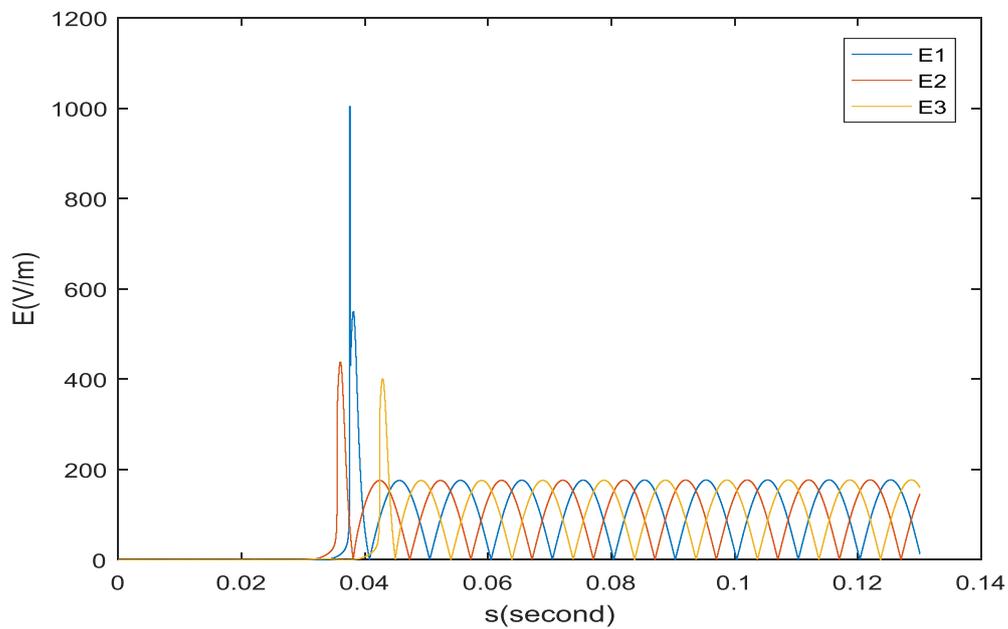


Fig.IV.15. l'évolution temporelle du champ électrique pour- $J_c_{77K}=3e7$ (A/m²).

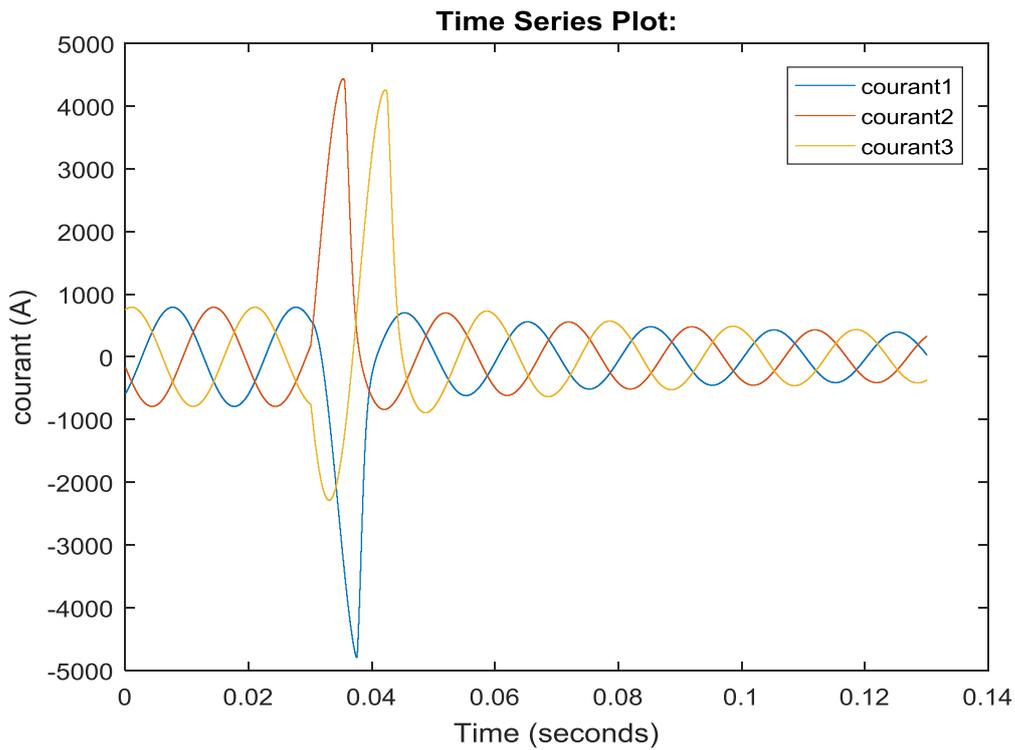


Fig.IV.16. l'évolution temporelle du courant du réseau électrique pour- $J_c_{77K}=3e7$ (A/m^2).

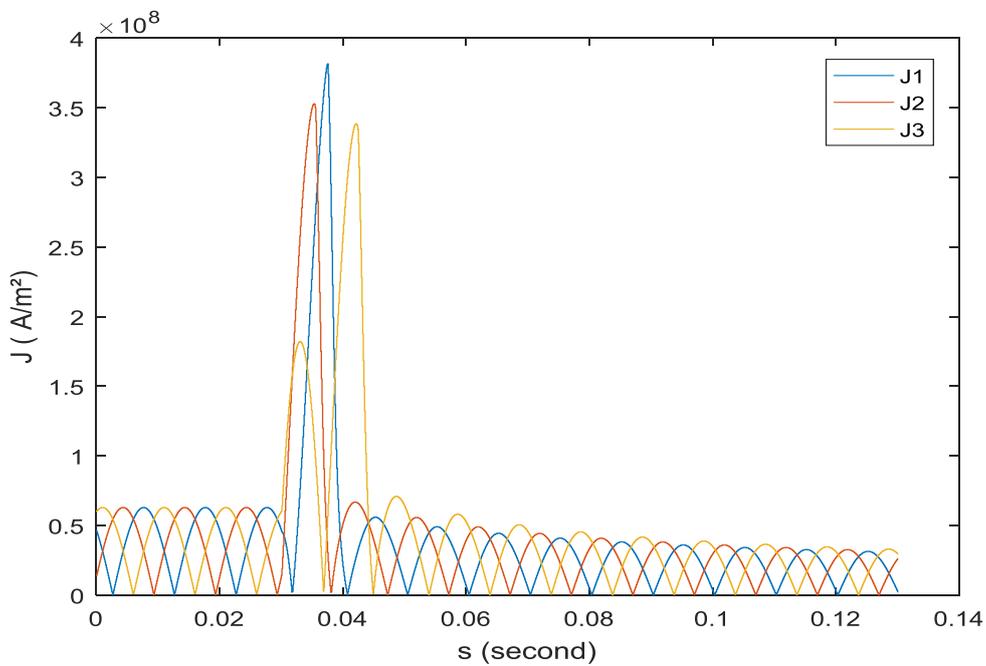


Fig.IV.17. l'évolution temporelle du densité de courant critique pour- $J_c_{77K}=3e7$ (A/m^2).

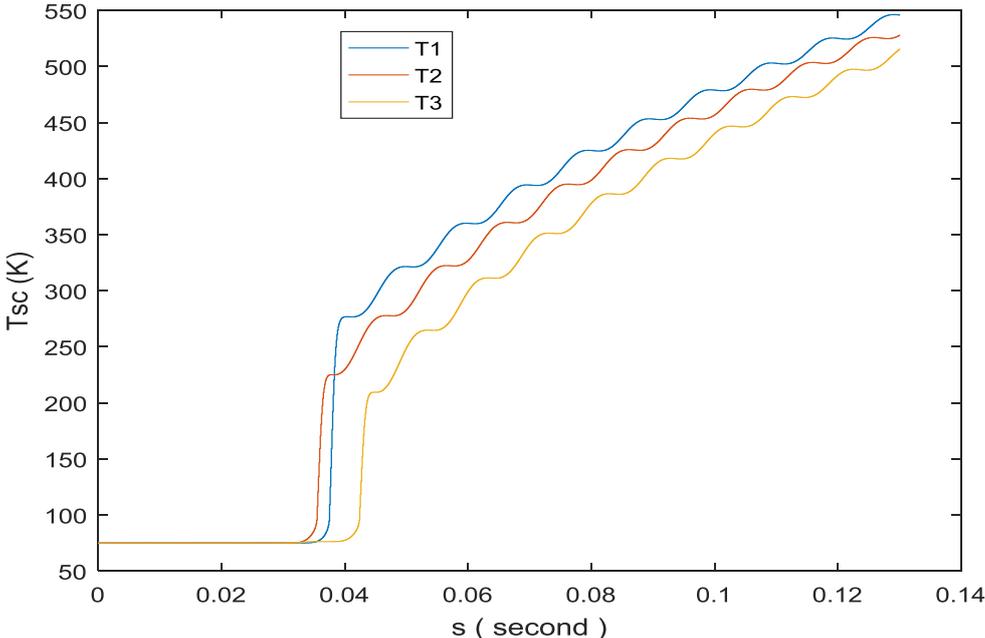


Fig.IV.18. Evolution temporelle de la température dans chaque phase pour- $J_c_{77K}=3e7$ (A/m²).

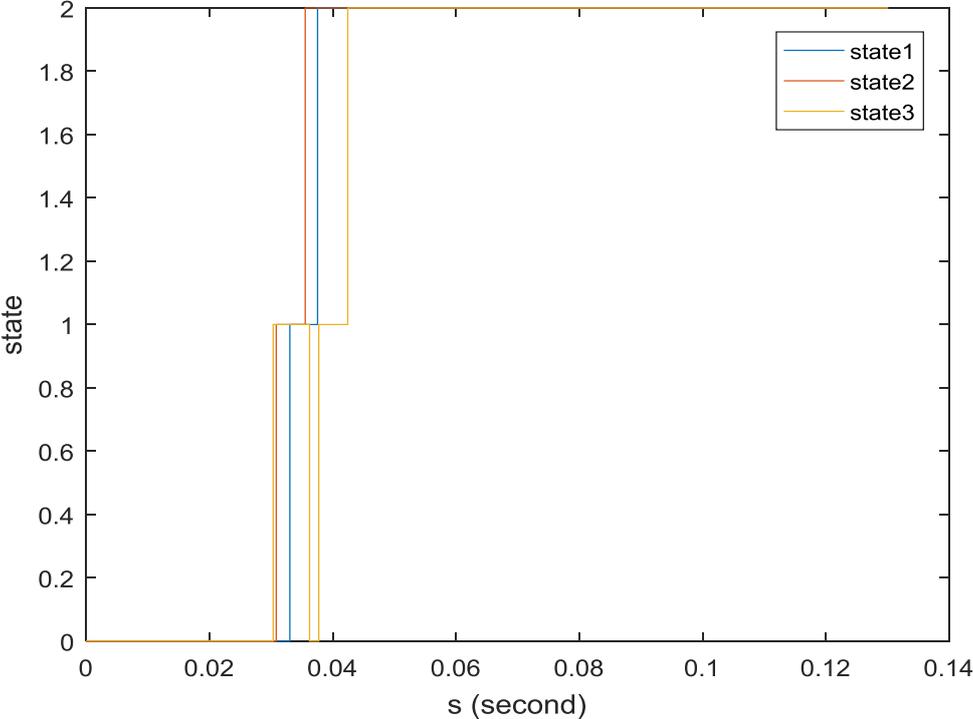


Fig.IV.19. Evolution temporelle de la state en chaque phase pour- $J_c_{77K}=3e7$ (A/m²).

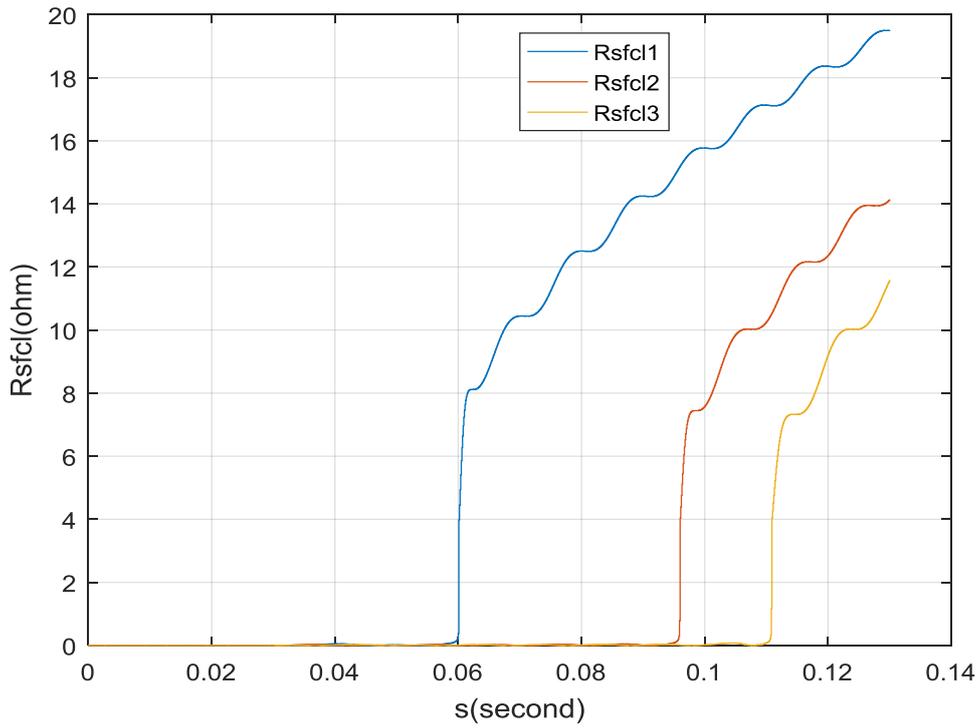


Fig.IV.20. l'évolution temporelle de la résistance additionnelle (la résistance due à la présence du limiteur de courant) pour- $J_c_{77K}=4e7$ (A/m²).

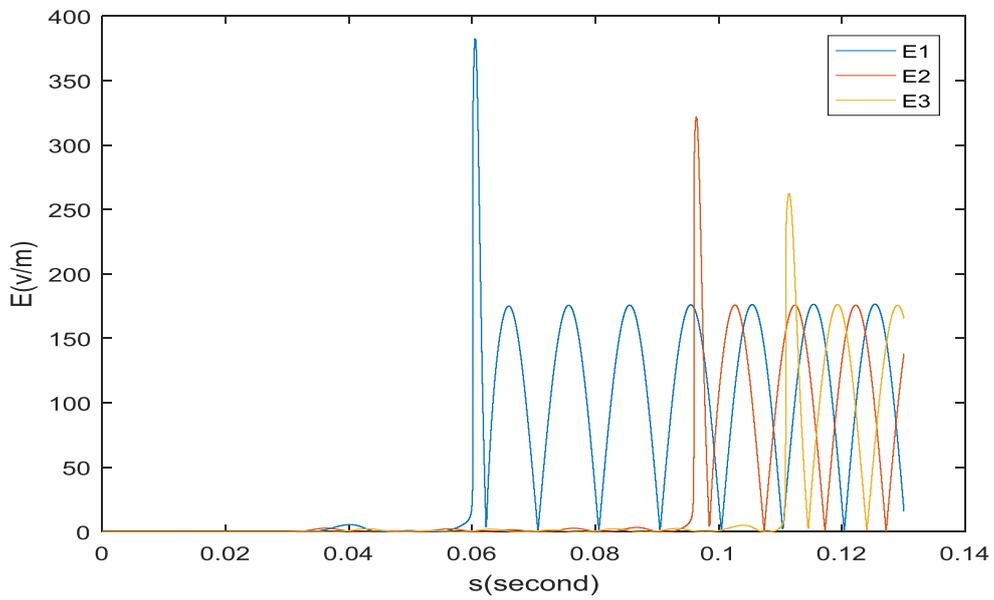


Fig.IV.21. l'évolution temporelle du champ électrique pour- $J_c_{77K}=4e7$ (A/m²).

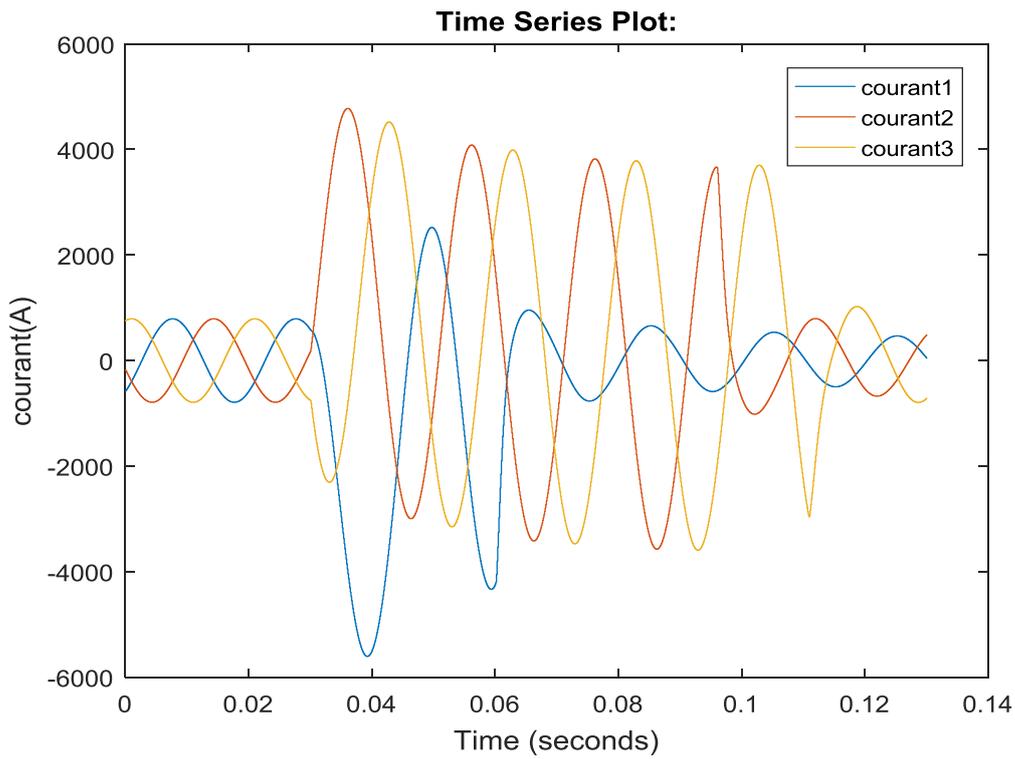


Fig.IV.21. l'évolution temporelle du courant du réseau électrique pour- $J_c_{77K}=4e7$ (A/m²).

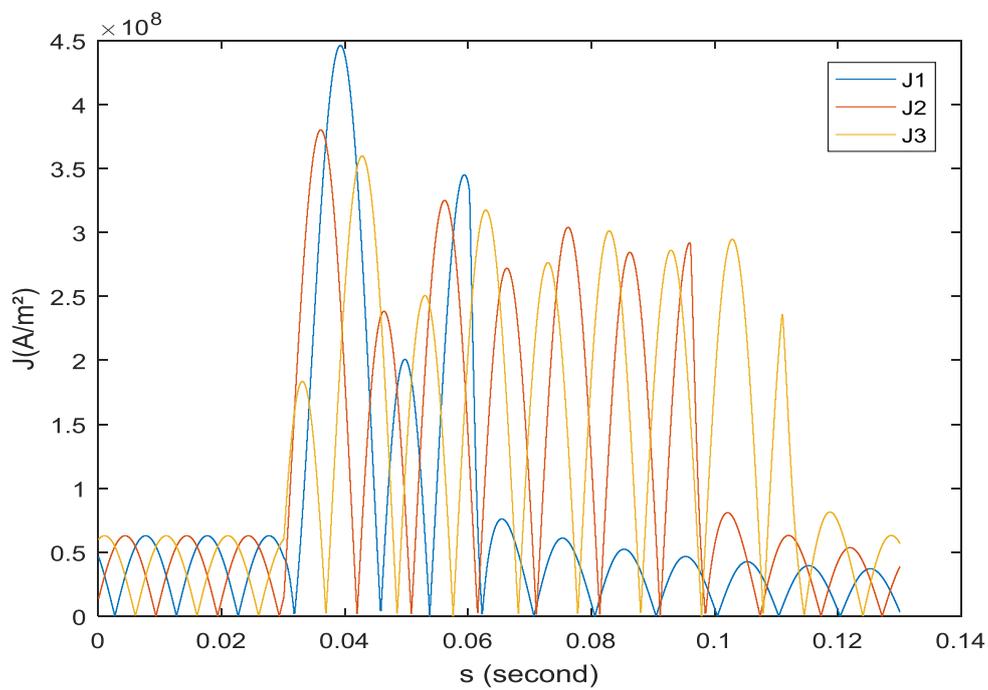


Fig.IV.22. Evolution temporelle de la densité de courant critique pour- $J_c_{77K}=4e7$ (A/m²).

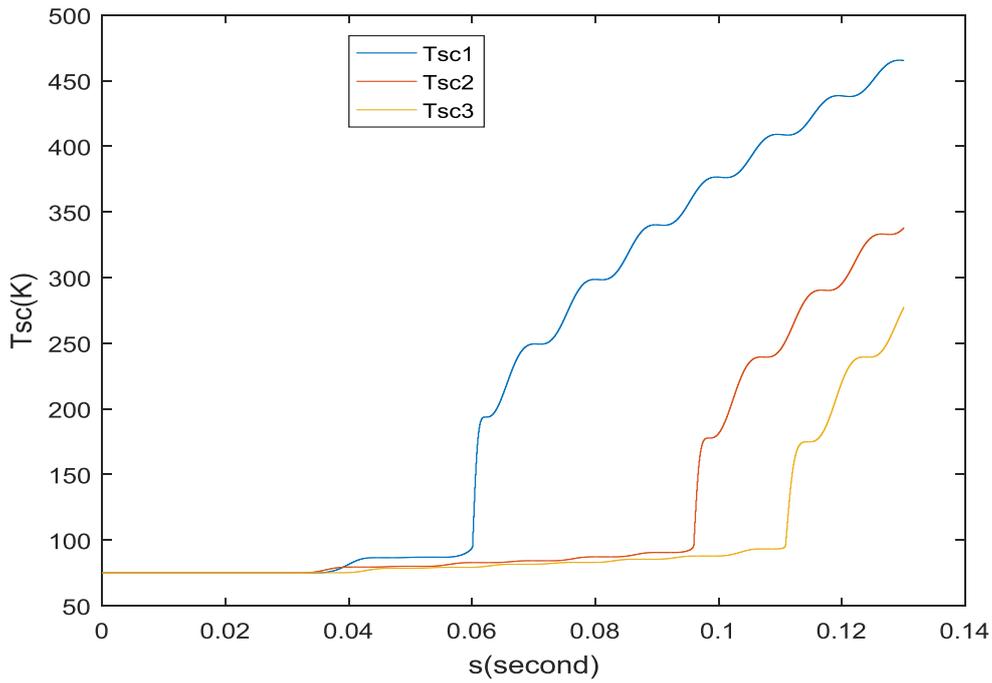


Fig.IV.23. Evolution temporelle de la température dans chaque phase pour- $J_c_{77K}=4e7$ (A/m²).

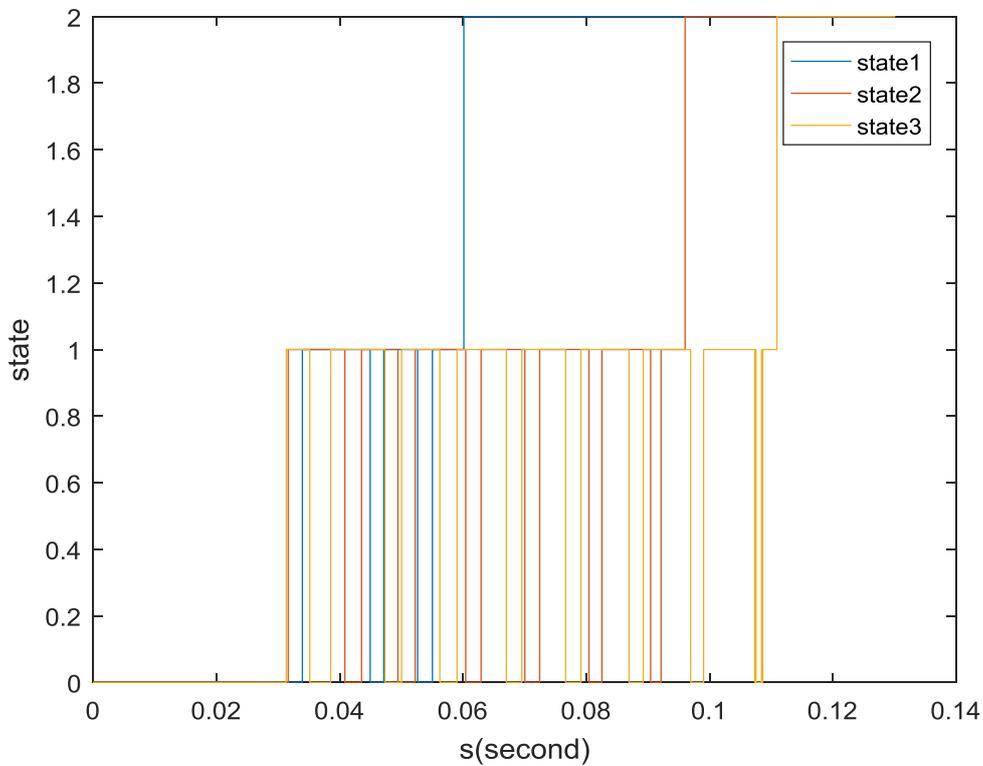


Fig.IV.24. Evolution temporelle de la state en chaque phase pour- $J_c_{77K}=4e7$ (A/m²).

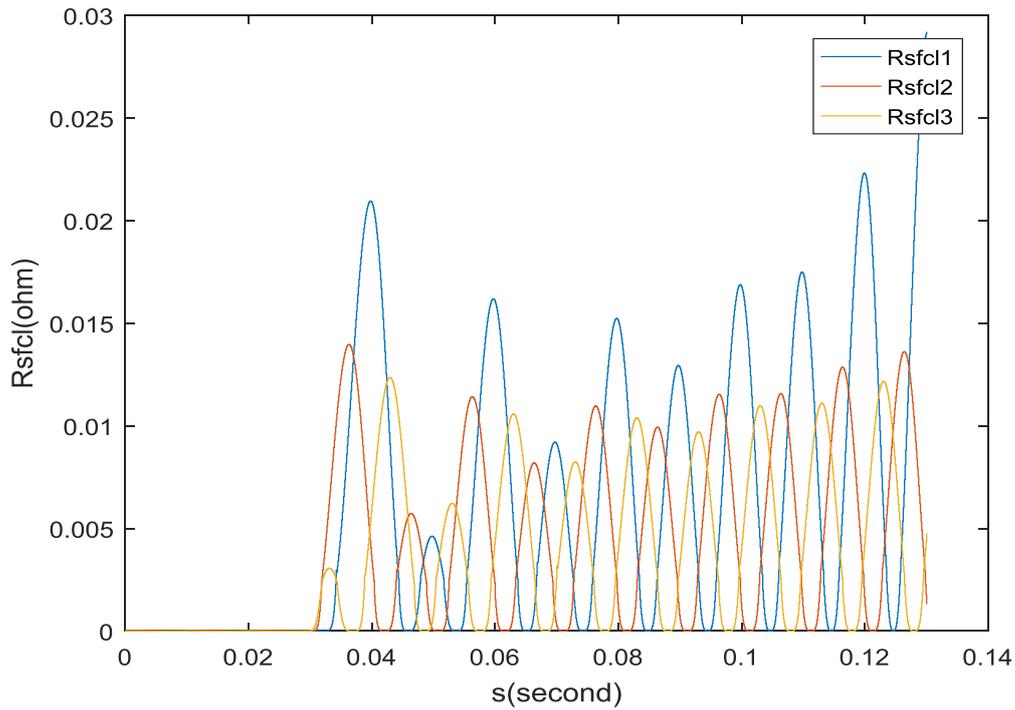


Fig.IV.25. l'évolution temporelle de la résistance additionnelle (la résistance due à la présence du limiteur de courant) pour- $J_c_{77K}=5e7$ (A/m²).

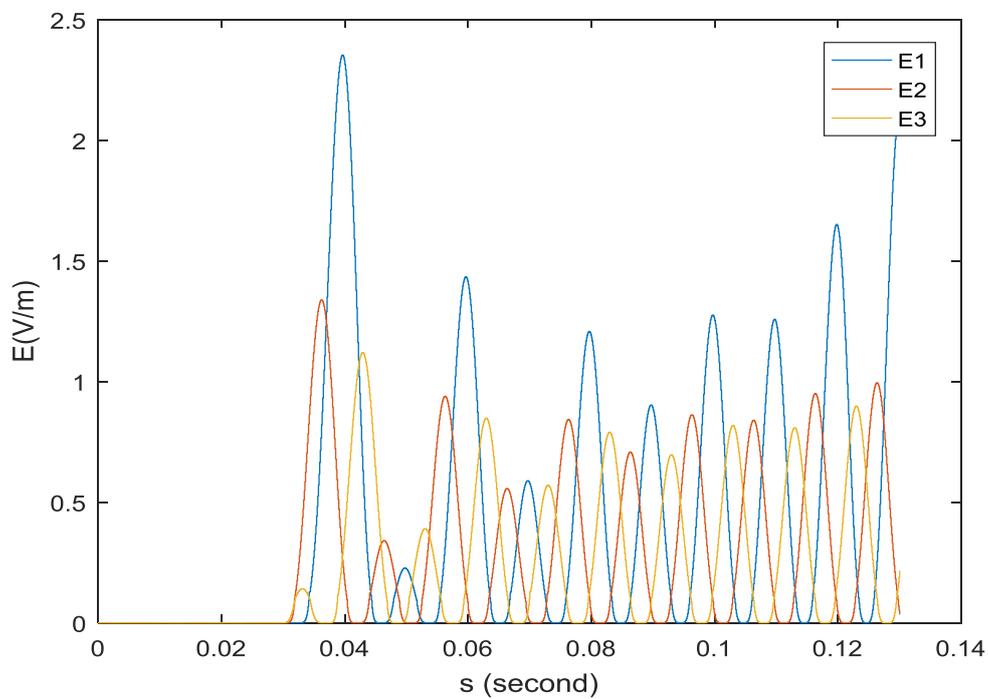


Fig.IV.26. l'évolution temporelle du champ électrique pour- $J_c_{77K}=5e7$ (A/m²).

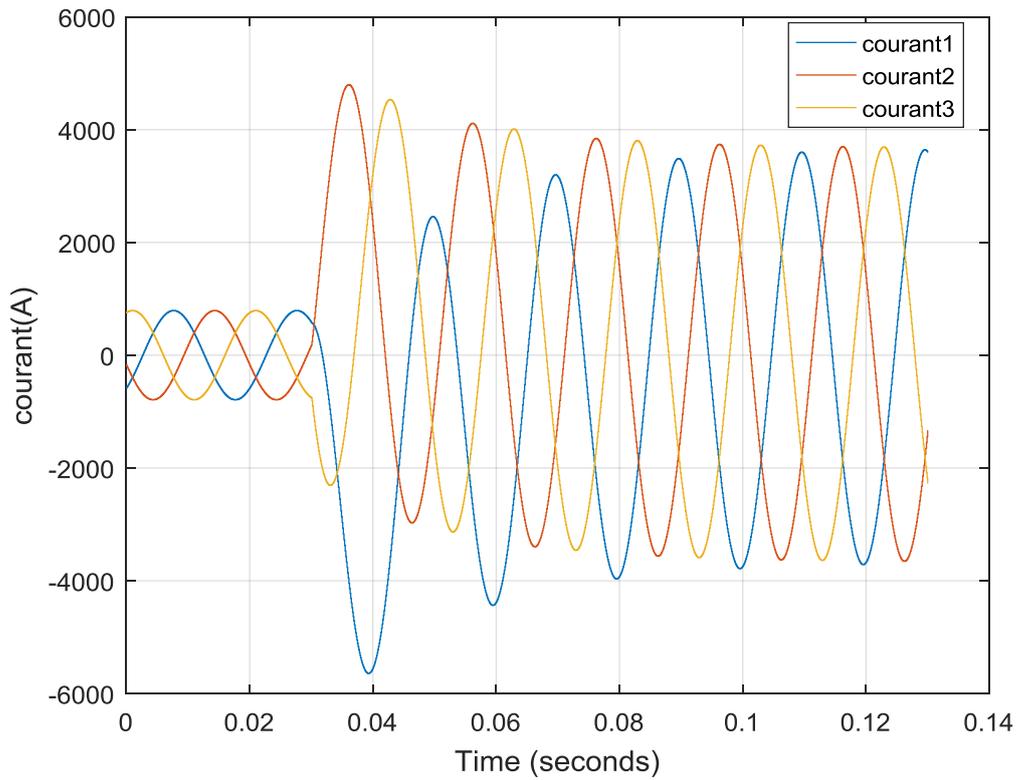


Fig.IV.27. l'évolution temporelle du courant du réseau électrique pour- $J_c_{77K}=5e7$ (A/m^2).

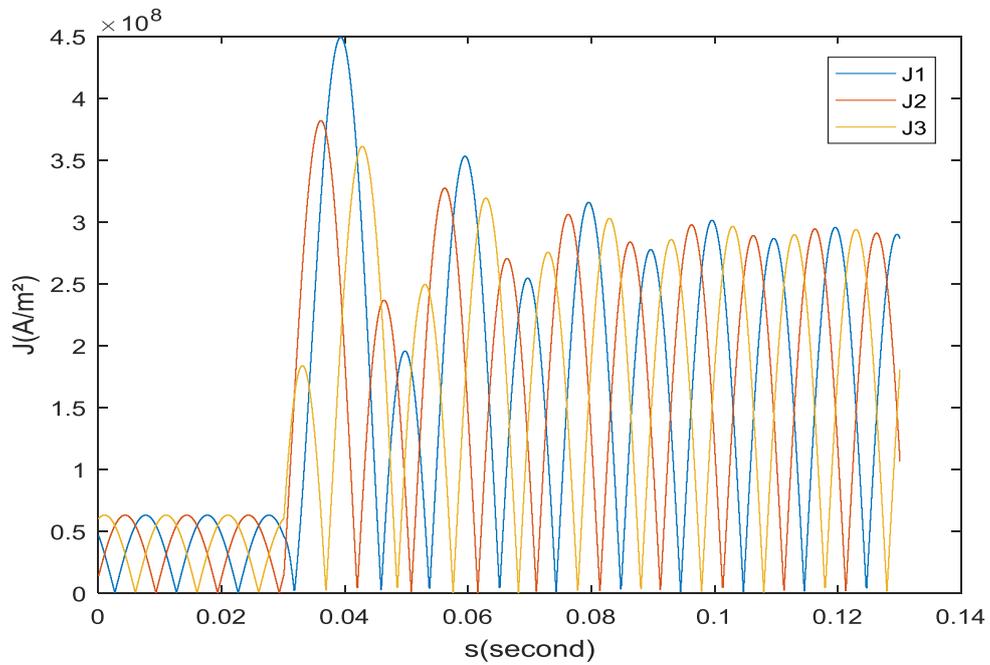


Fig.IV.28. Evolution temporelle de la densité de courant critique pour- $J_c_{77K}=5e7$ (A/m^2).

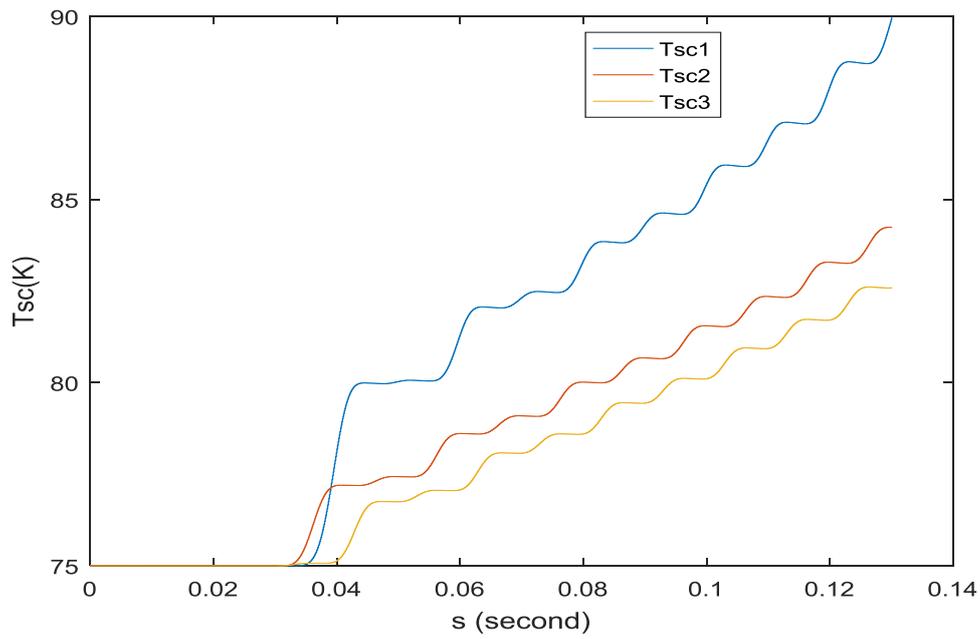


Fig.IV.29. Evolution temporelle de la température dans chaque phase pour- $J_c_{77K}=5e7$ (A/m²).

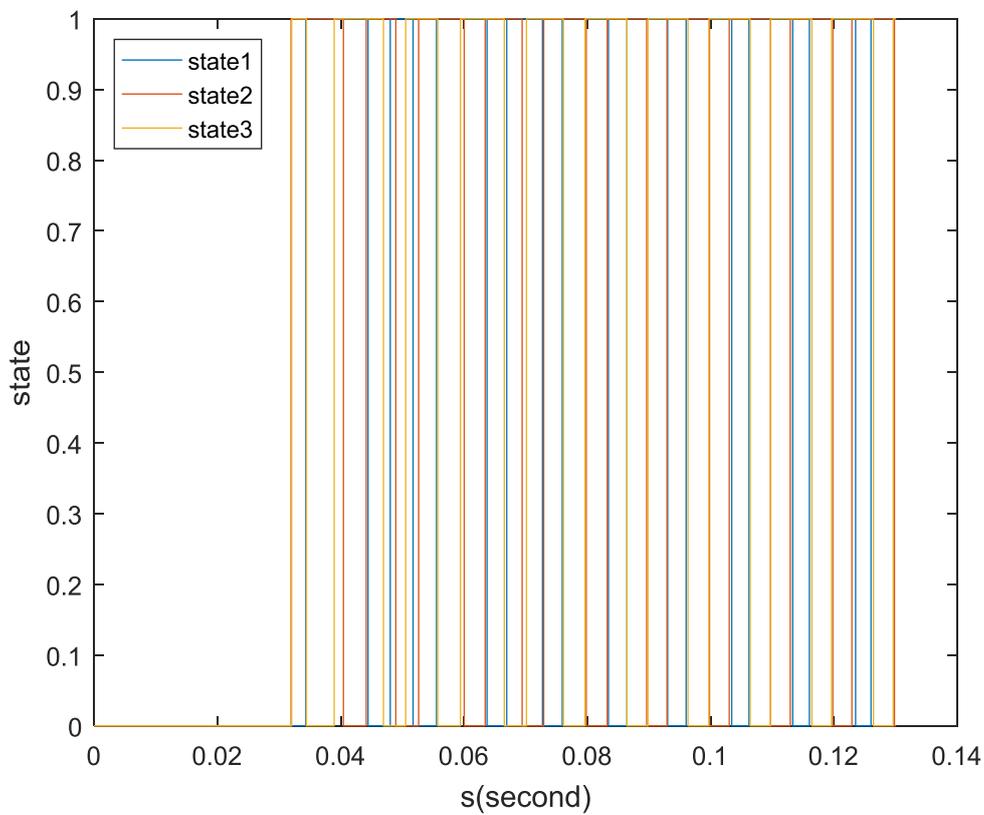


Fig.IV.30. Evolution temporelle de la state en chaque phase pour- $J_c_{77K}=5e7$ (A/m²).

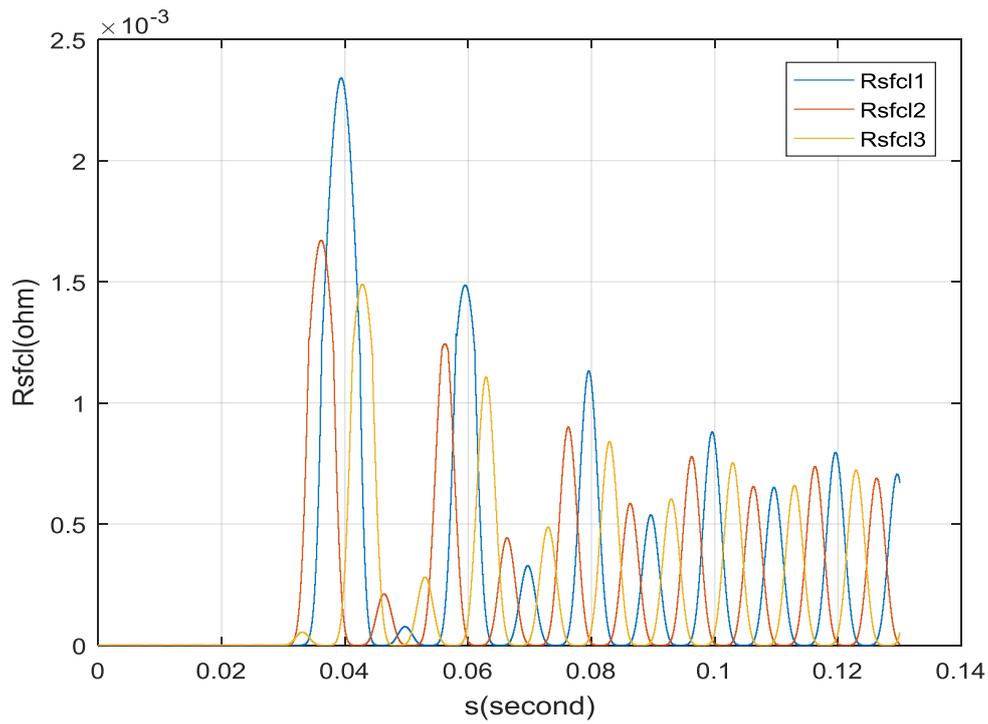


Fig.IV.31. l'évolution temporelle de la résistance additionnelle (la résistance due à la présence du limiteur de courant) pour- $J_c_{77K}=1e8$ (A/m²).

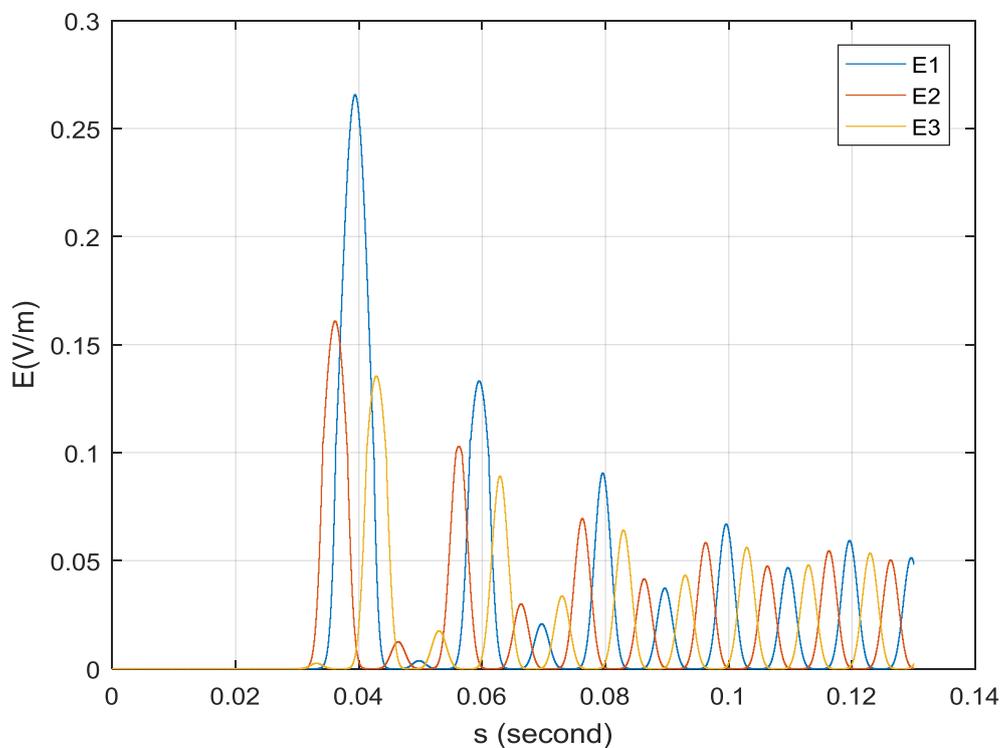


Fig.IV.32. l'évolution temporelle du champ électrique pour- $J_c_{77K}=1e8$ (A/m²).

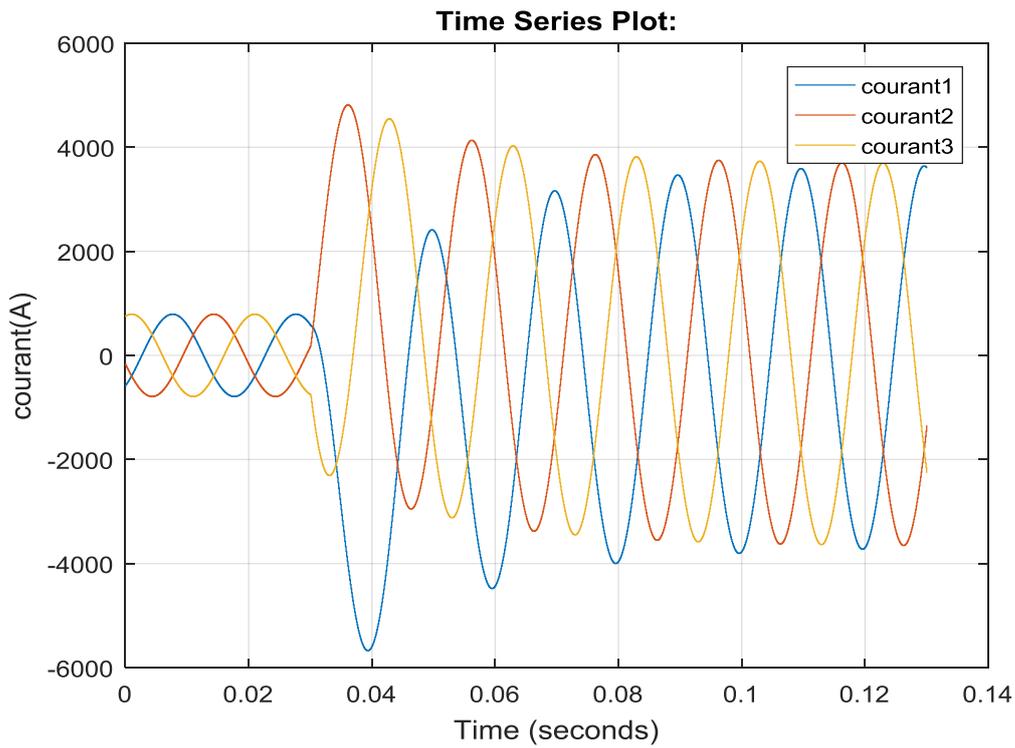


Fig.IV.33. l'évolution temporelle du courant du réseau électrique pour- $J_{c_77K}=1e8(A/m^2)$.

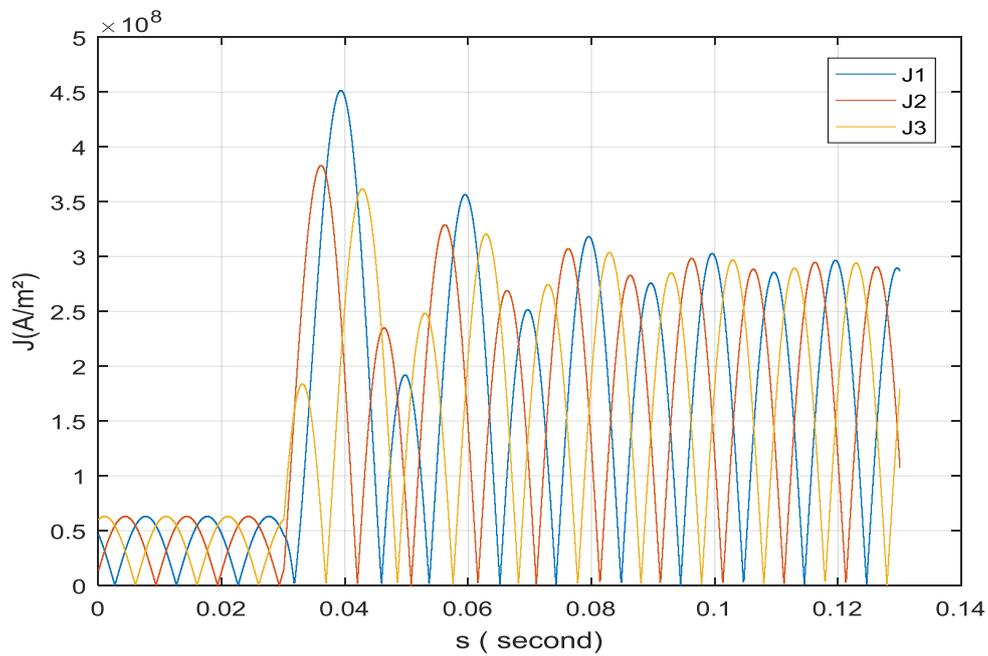


Fig.IV.34. Evolution temporelle de la densité de courant critique pour- $J_{c_77K}=1e8(A/m^2)$.

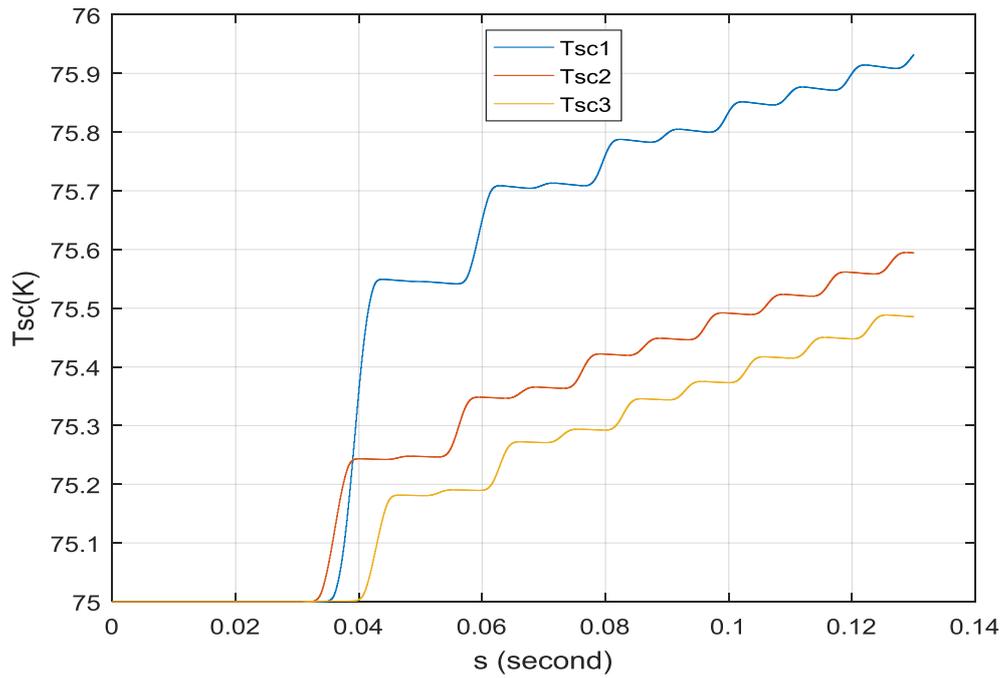


Fig.IV.35. Evolution temporelle de la température dans chaque phase pour- $J_c_{77K}=1e8(A/m^2)$.

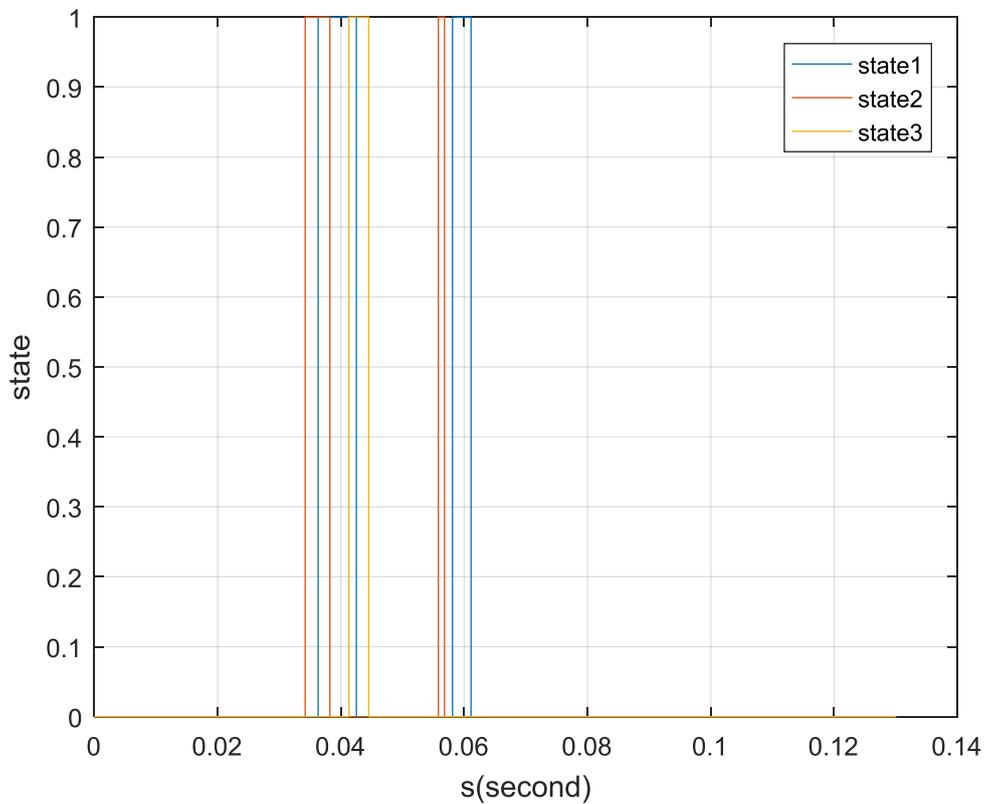


Fig.IV.36. Evolution temporelle de la state en chaque phase pour- $J_c_{77K}=1e8(A/m^2)$.

IV.1.3. Variation du champ électrique critique E_c

Dans cette partie, nous présentons les résultats des simulations du comportement du limiteur de courant supraconducteur, on agit sur la valeur du champ électrique qui sera pris entre $1e-4$ (V/m) au $1e-2$ (V/m).

Selon les résultats présentés, on constate que l'augmentation du champ électrique n'intervient pas dans le régime du court-circuit, où la résistance ne varie pas, cependant cette valeur intervient sur le régime assigné du réseau où on remarque l'apparition d'une faible résistance. Ceci présente un inconvénient, car la résistance du réseau peut être augmentée dans son régime nominal.

Tableau IV.3. Les paramètres de la pastille supraconductrice adoptés dans ces simulations sont les suivants :

Symbole	paramètre	valeur
E_0	Le champ électrique du régime Flux-Flow	0.1 (V/m)
J_c	Densité de courant critique	$1e7(A/m^2)$
$alpha_{77K}$	Exposant de la région Flux-creep	6.0
$Beta$	Exposant de la région Flux-flow	3
T_c	La température critique	95 (K)
rho_{Tc}	Résistivité du supraconducteur	$1.0e-6(ohm/m^2)$

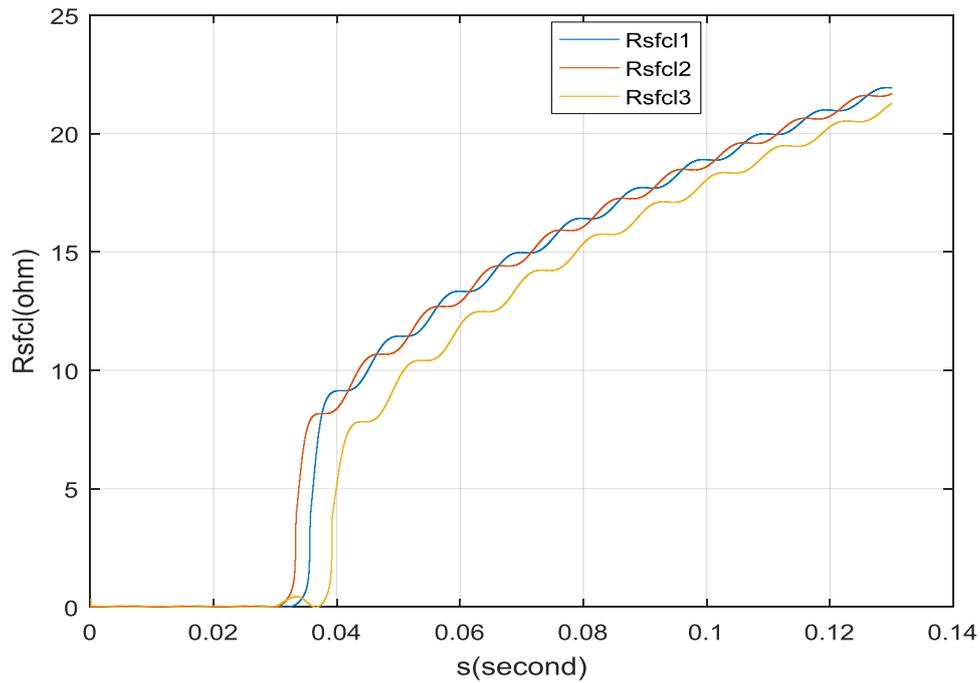


Fig.IV.37. l'évolution temporelle de la résistance additionnelle (la résistance due à la présence du limiteur de courant)-Pour $E_c= 1e-4(V/m)$.

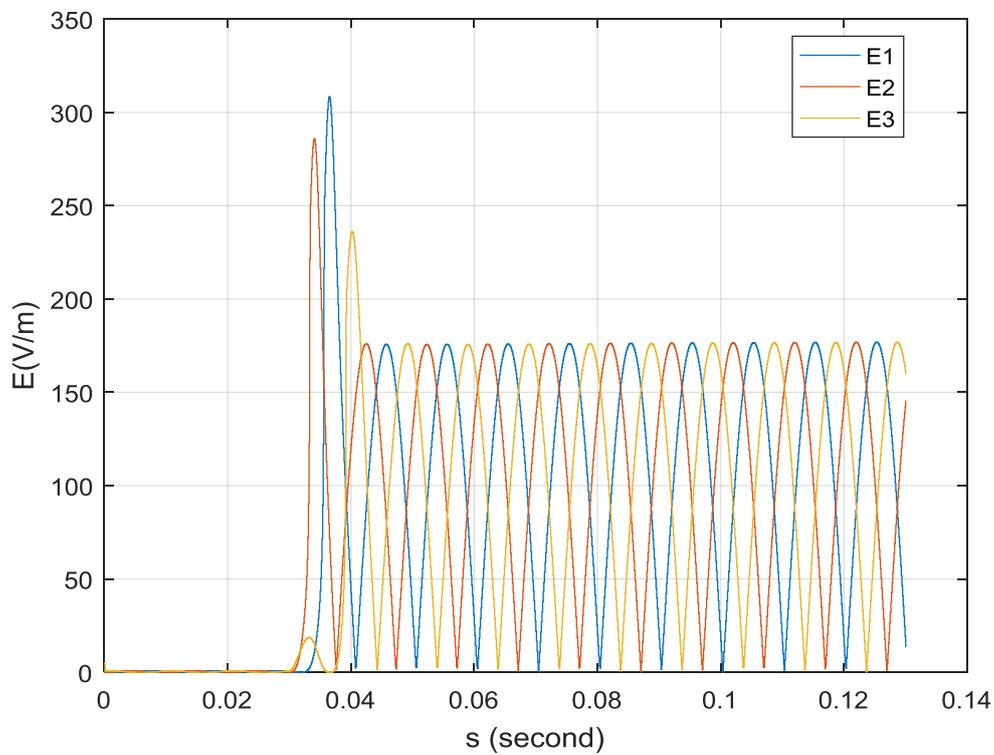


Fig.IV.38. l'évolution temporelle du champ électrique-Pour $E_c= 1e-4(V/m)$.

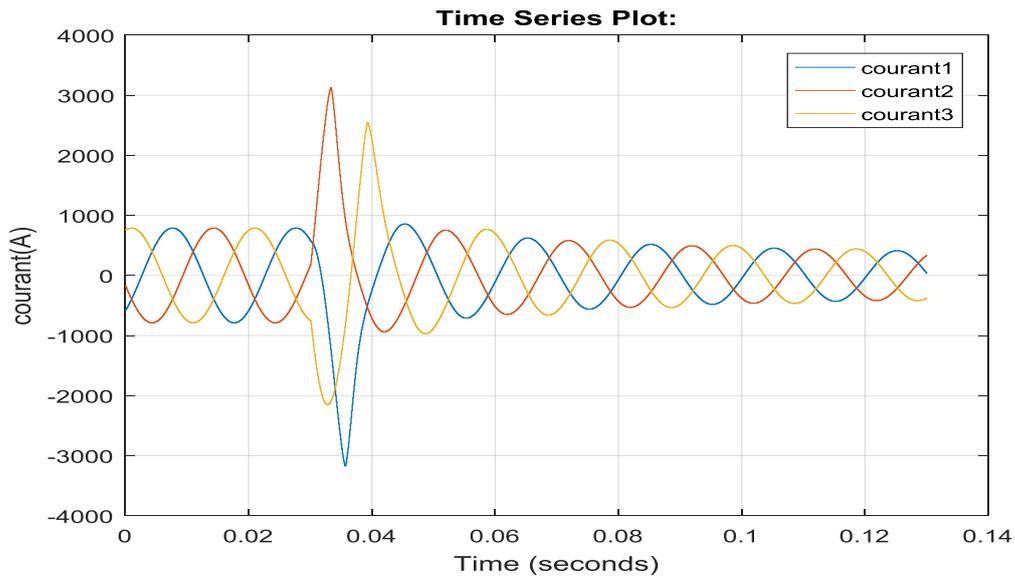


Fig.IV.39. l'évolution temporelle du courant du réseau électrique-Pour $E_c= 1e-4(V/m)$.

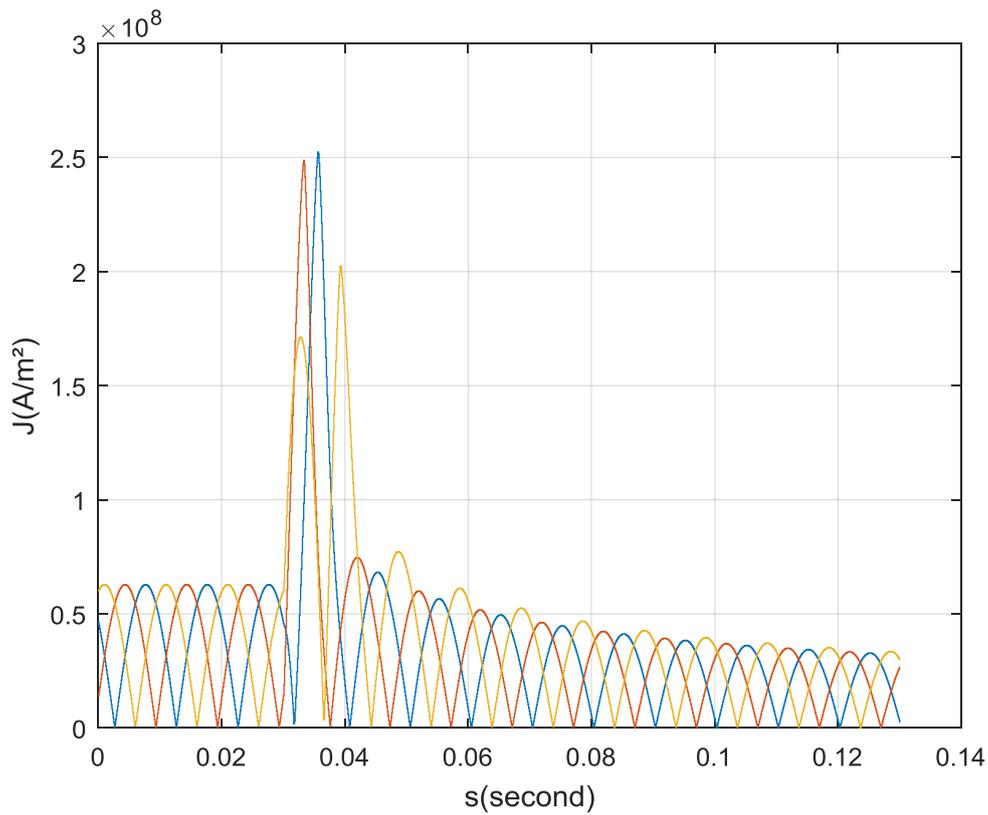


Fig.IV.40. Evolution temporelle de la densité de courant critique-Pour $E_c= 1e-4(V/m)$.

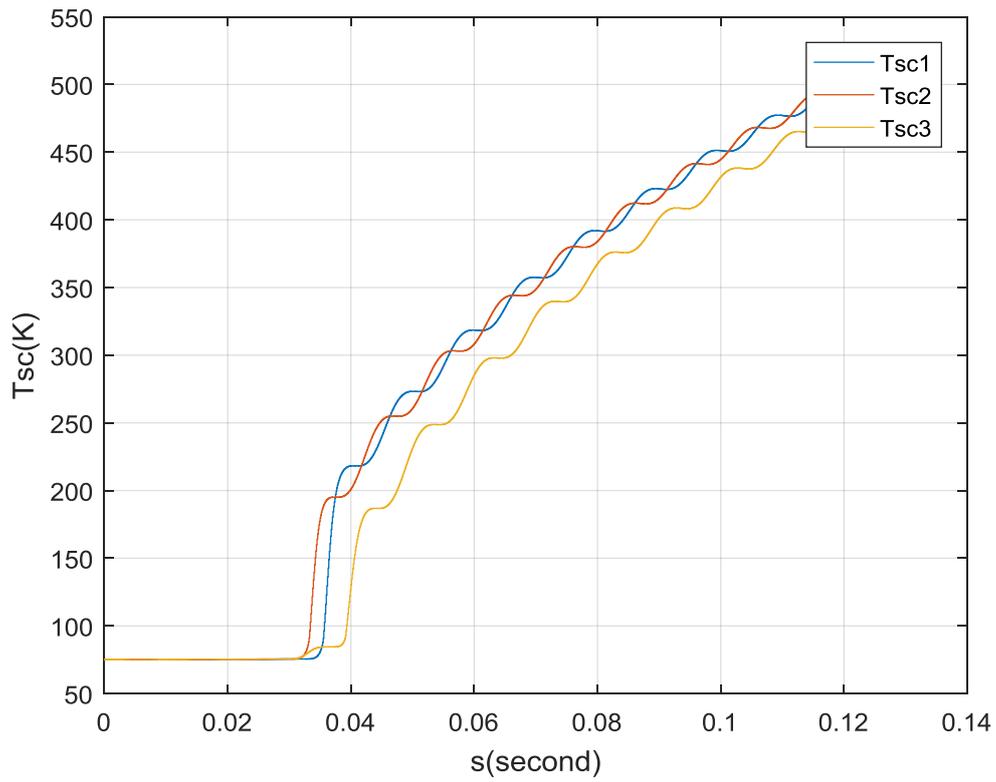


Fig.IV.41. Evolution temporelle de la température dans chaque phase-Pour $E_c= 1e-4(V/m)$.

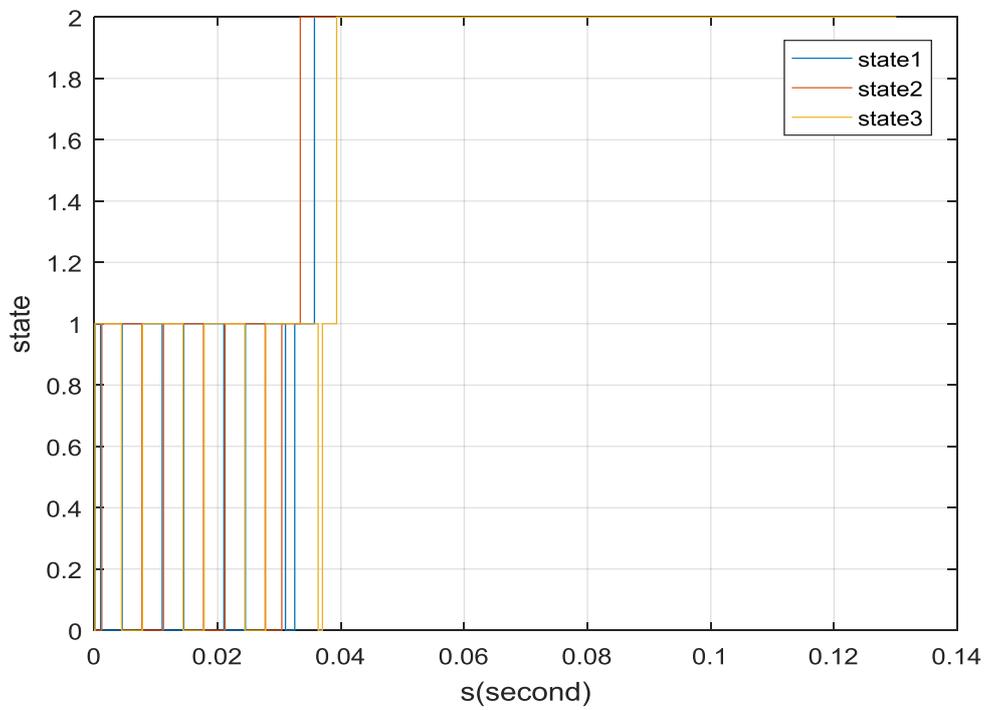


Fig.IV.42. Evolution temporelle de la state en chaque phase-Pour $E_c= 1e-4(V/m)$.

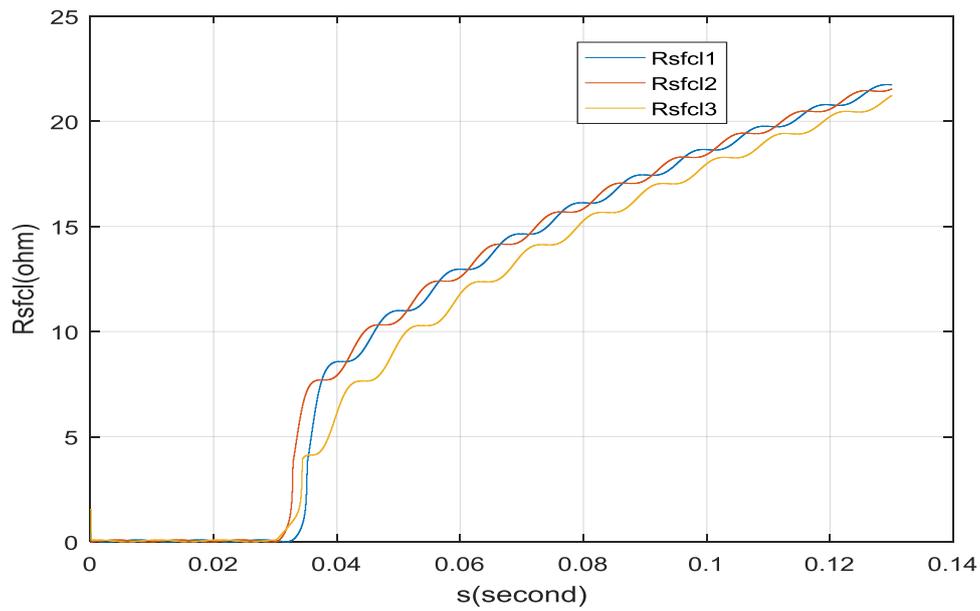


Fig.IV.43. l'évolution temporelle de la résistance additionnelle (la résistance due à la présence du limiteur de courant) -Pour $E_c = 4e-4$ (V/m).

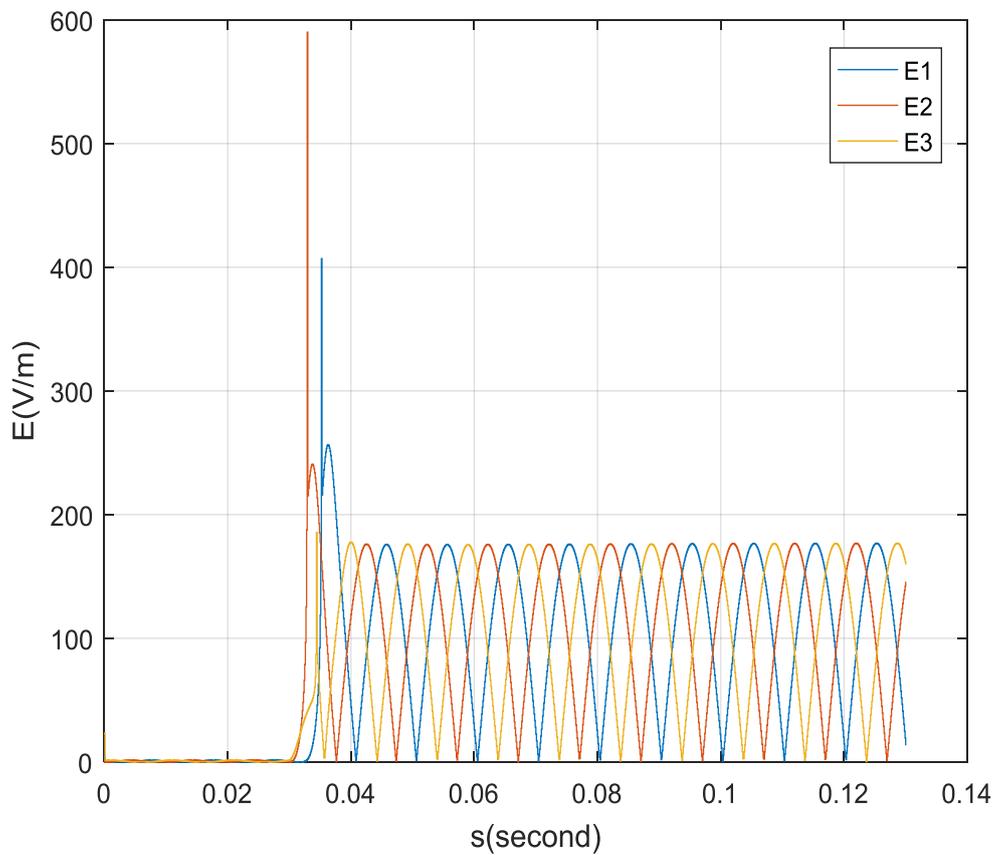


Fig.IV.44. l'évolution temporelle du champ électrique-Pour $E_c = 4e-4$ (V/m).

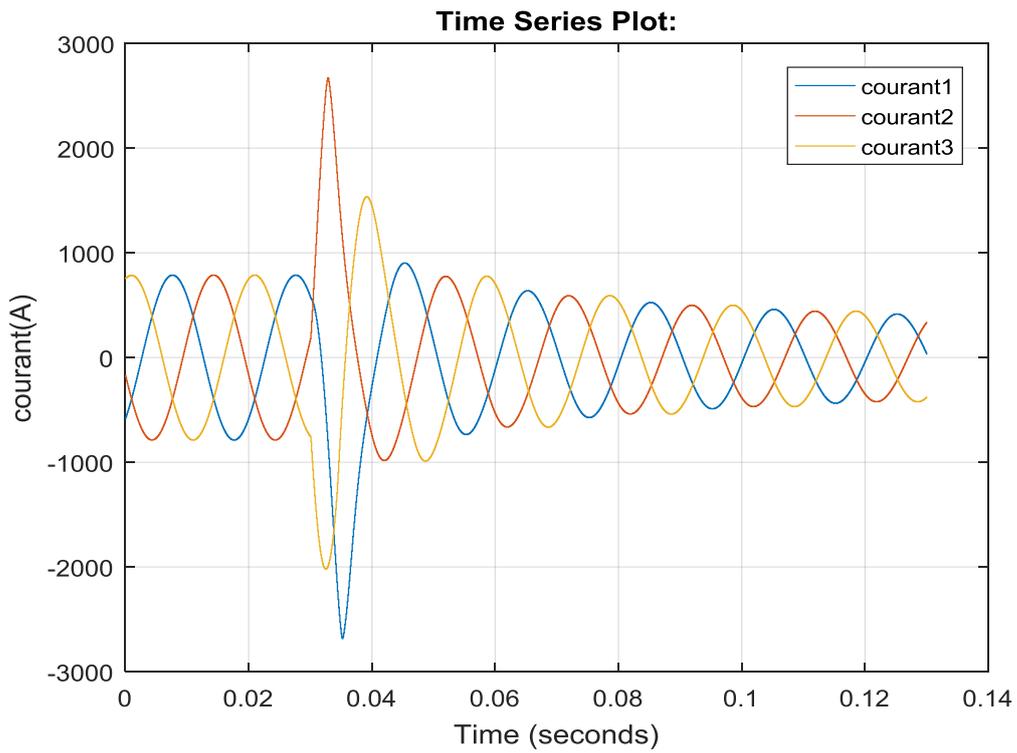


Fig.IV.45. l'évolution temporelle du courant du réseau électrique-Pour $E_c= 4e-4(V/m)$.

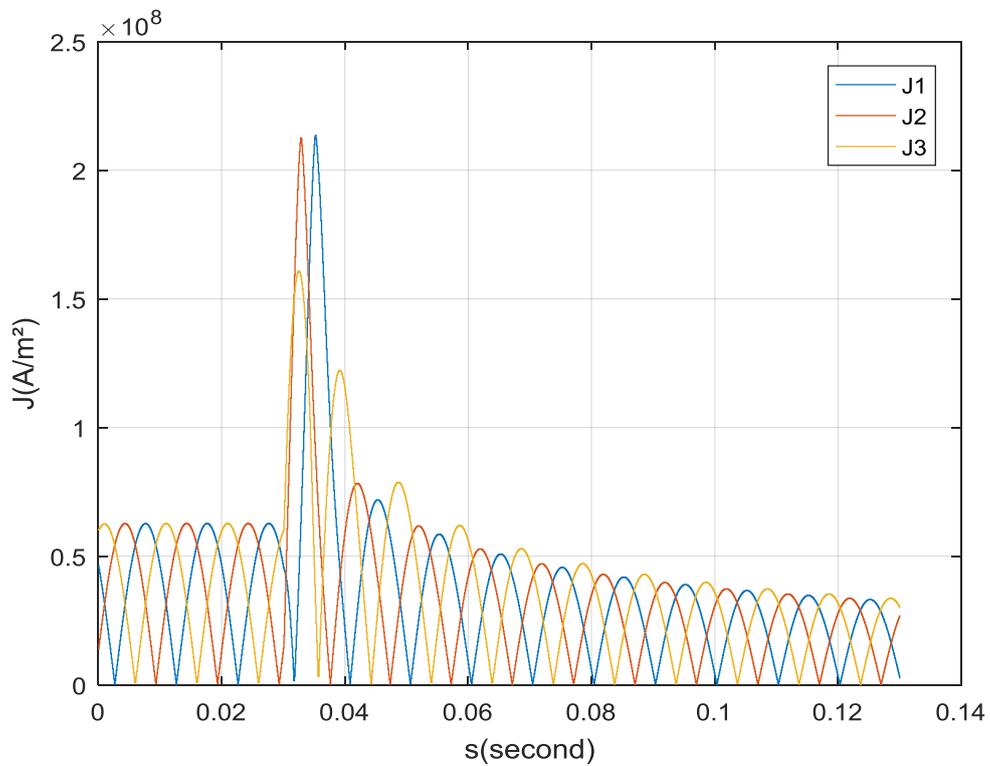


Fig.IV.46. Evolution temporelle de la densité de courant critique-Pour $E_c= 4e-4(V/m)$.

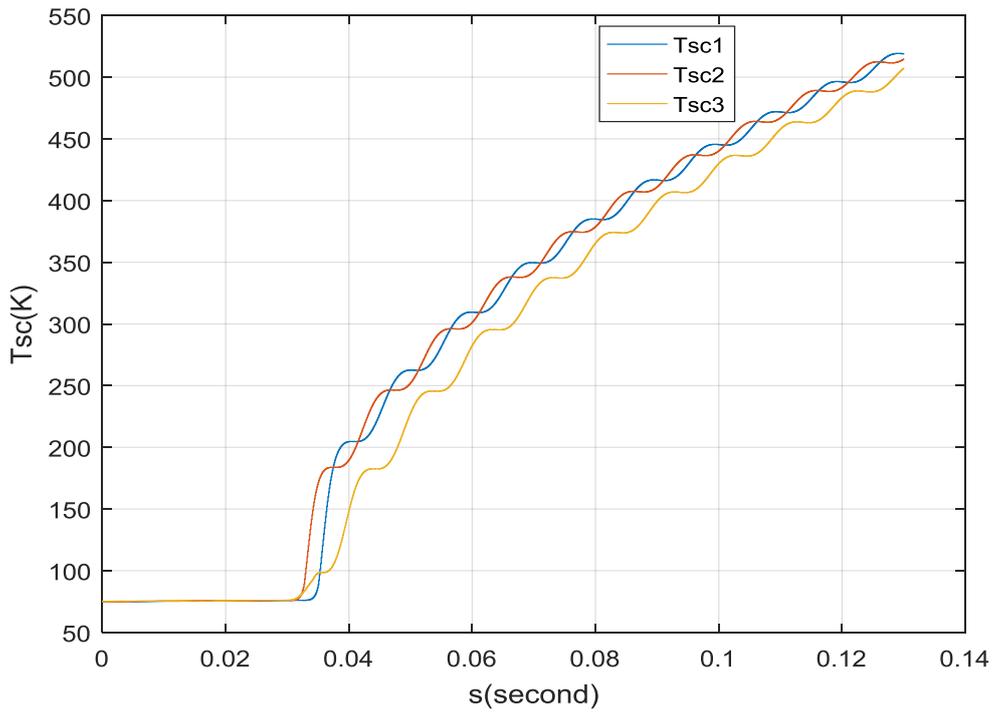


Fig.IV.47. Evolution temporelle de la température dans chaque phase-Pour $E_c= 4e-4(V/m)$.

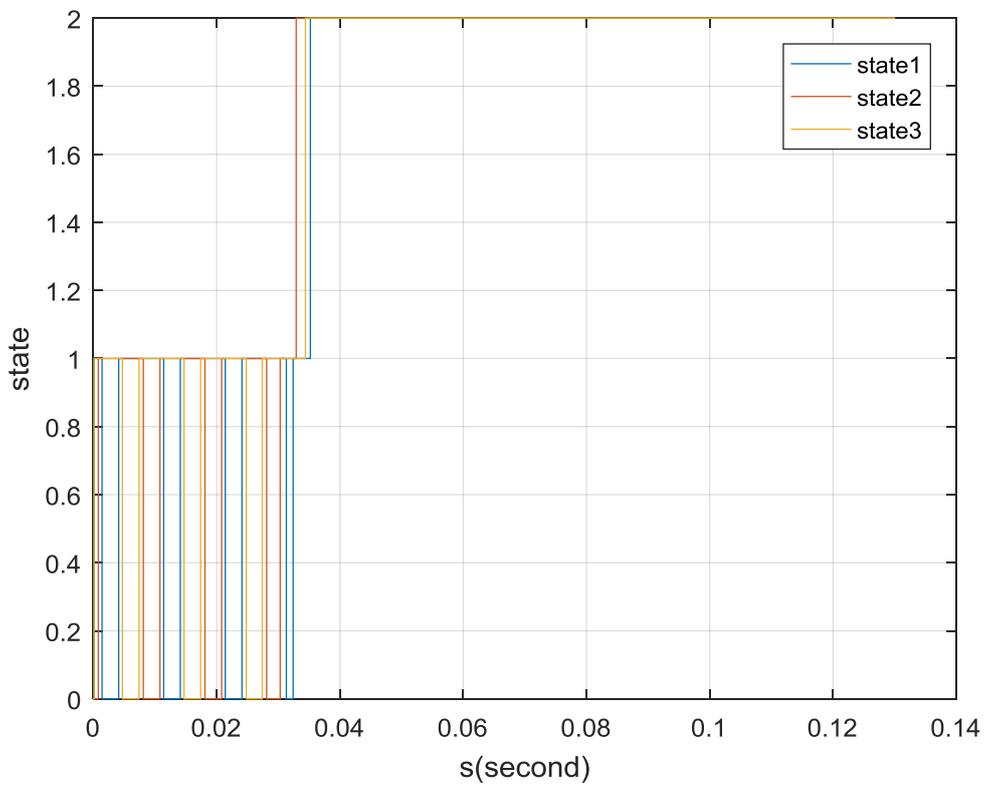


Fig.IV.48. Evolution temporelle de la state en chaque phase-Pour $E_c= 4e-4(V/m)$.

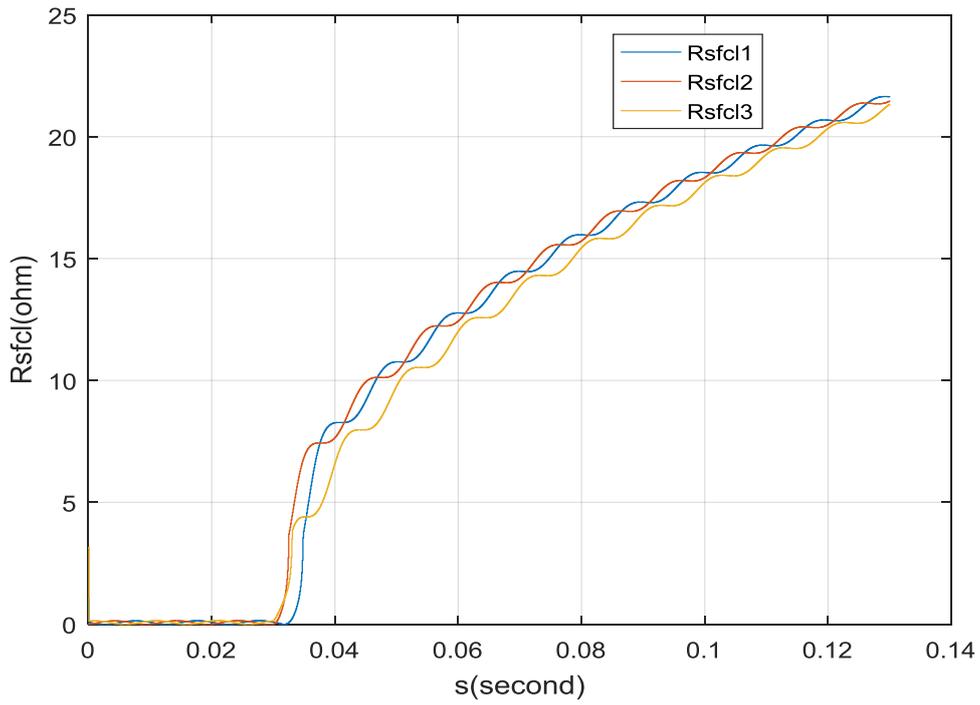


Fig.IV.49. l'évolution temporelle de la résistance additionnelle (la résistance due à la présence du limiteur de courant) -Pour $E_c = 1e-3$ (V/m).

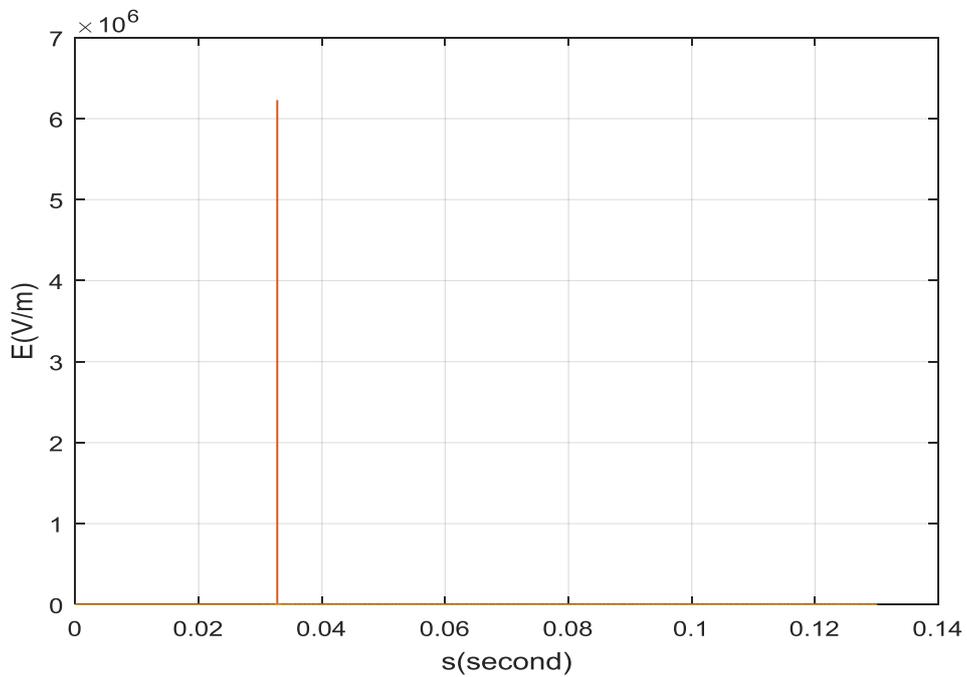
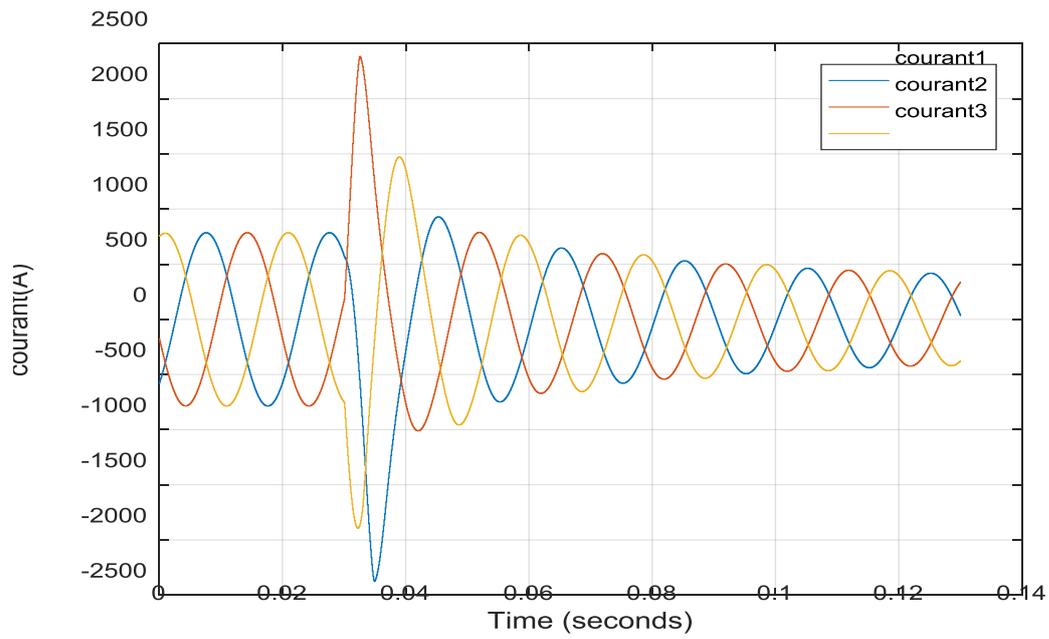


Fig.IV.50. l'évolution temporelle du champ électrique-Pour $E_c = 1e-3$ (V/m).



IV.51. l'évolution temporelle du courant du réseau électrique-Pour $E_c= 1e-3(V/m)$.

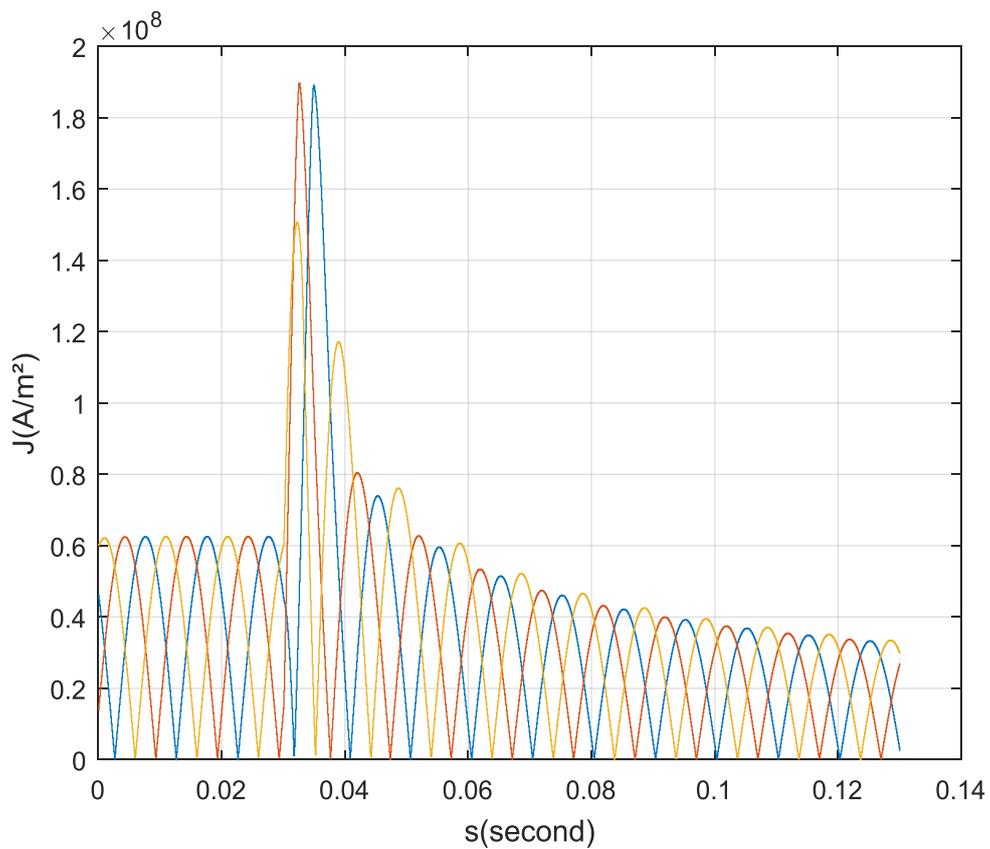


Fig.IV.52. Evolution temporelle de la densité de courant critique-Pour $E_c= 1e-3(V/m)$.

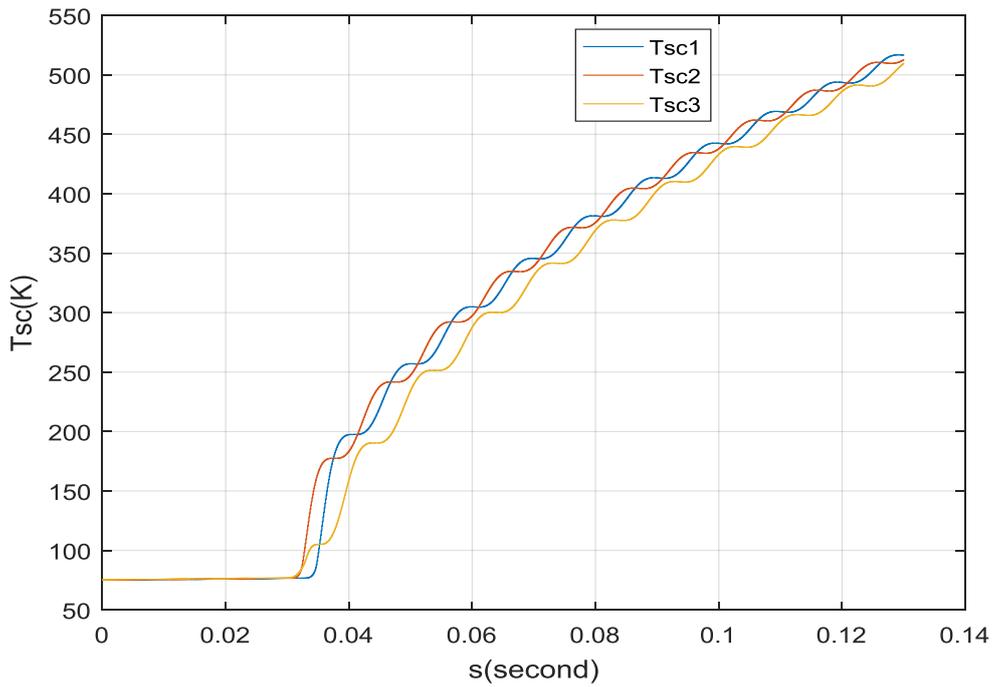


Fig.IV.53. Evolution temporelle de la température dans chaque phase-Pour $E_c= 1e-3(V/m)$.

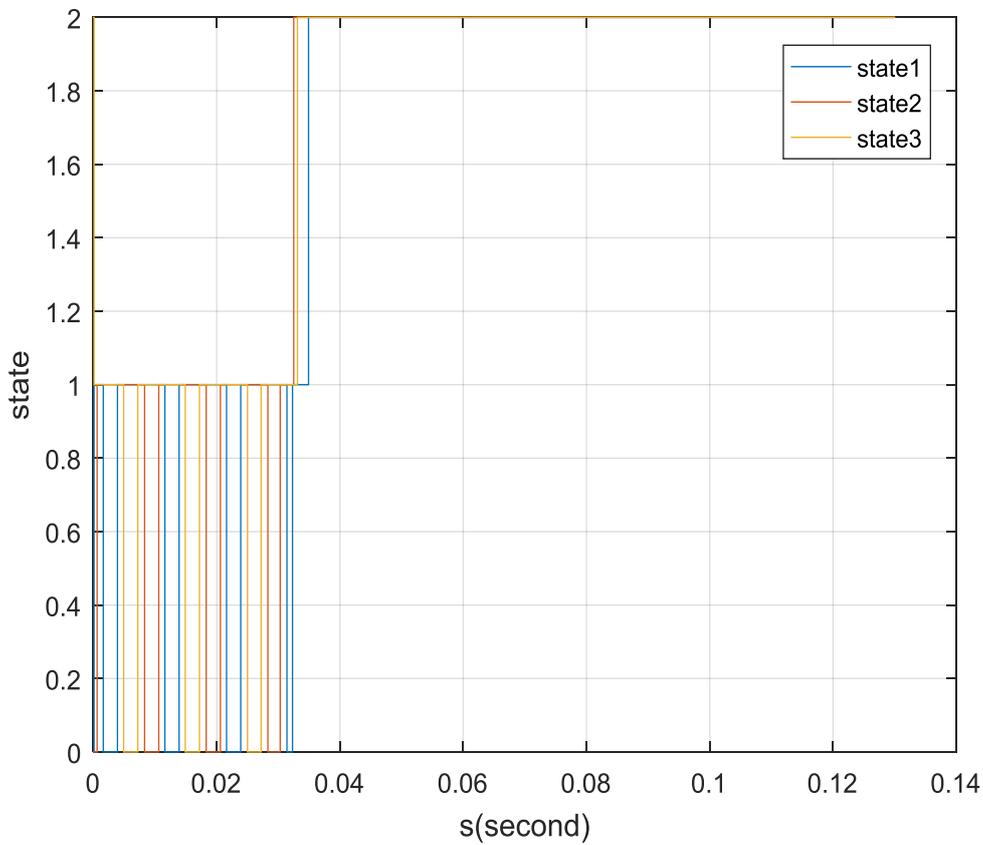


Fig.IV.54. Evolution temporelle de la state en chaque phase -Pour $E_c= 1e-3(V/m)$.

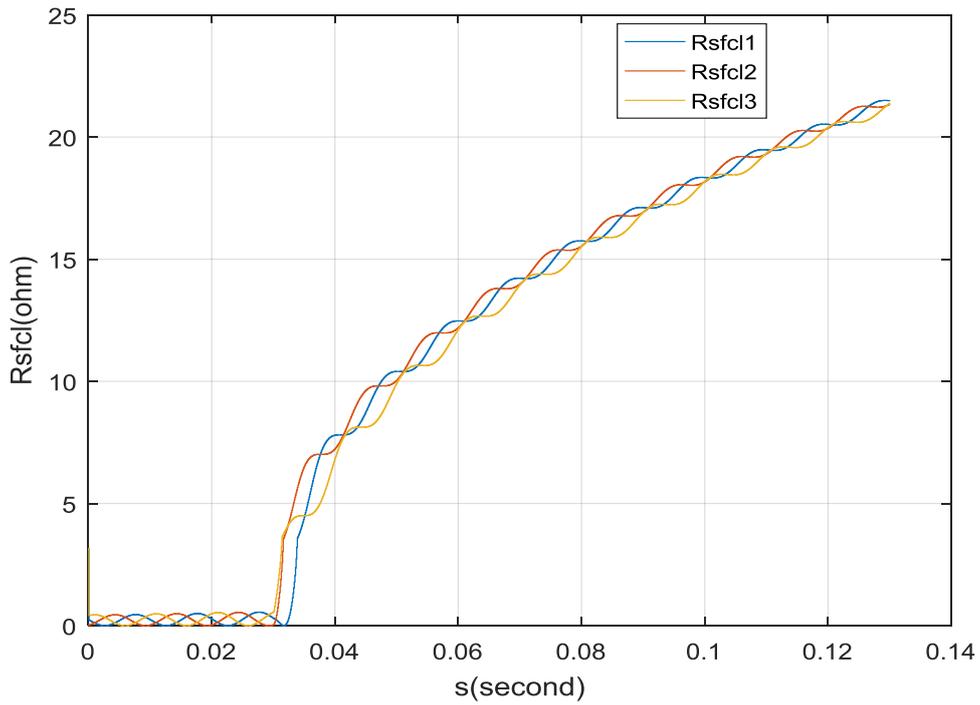


Fig.IV.55. l'évolution temporelle de la résistance additionnelle (la résistance due à la présence du limiteur de courant) -Pour $E_c = 1e-2$ (V/m).

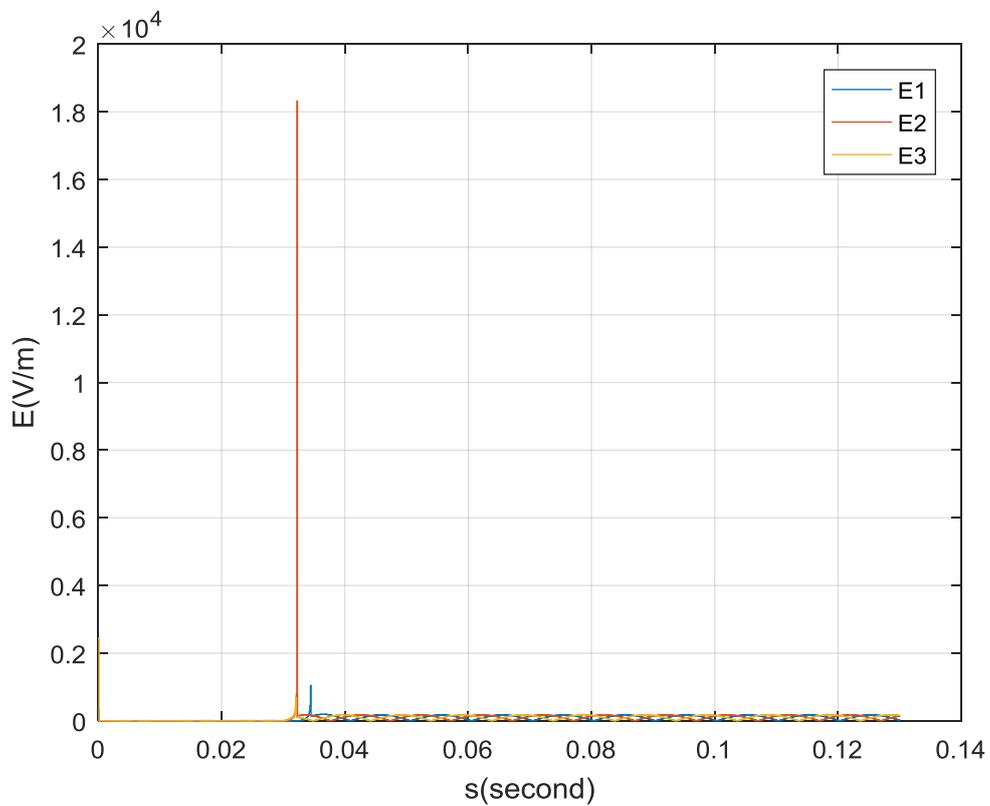


Fig.IV.56. l'évolution temporelle du champ électrique-Pour $E_c = 1e-2$ (V/m).

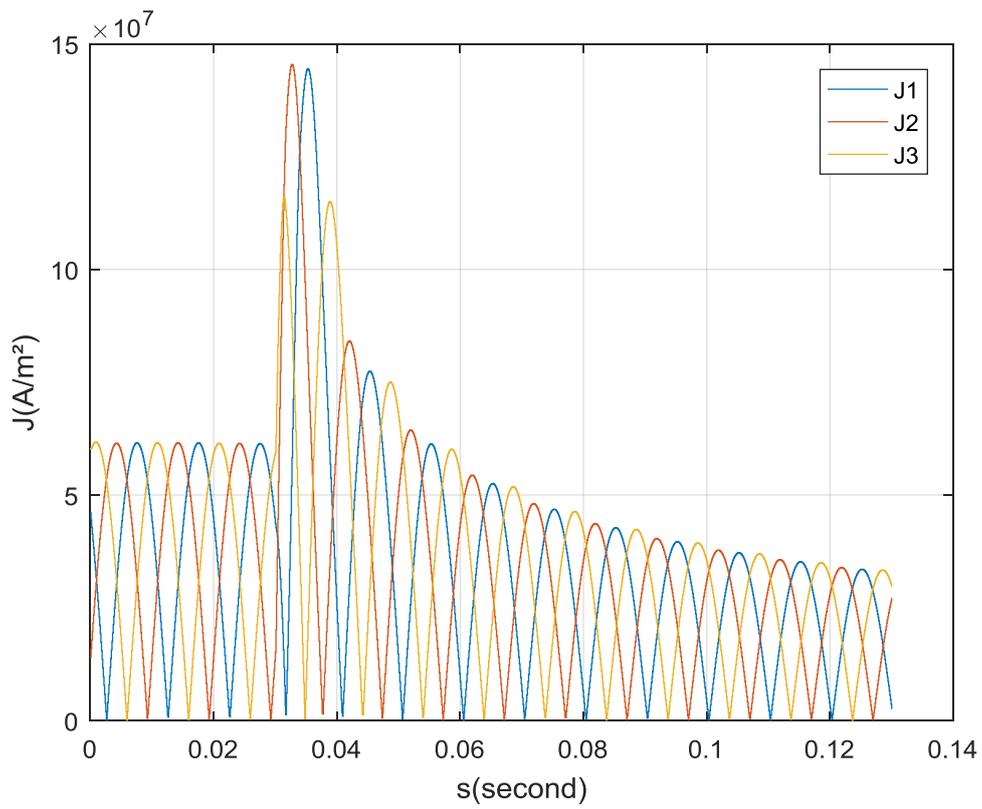
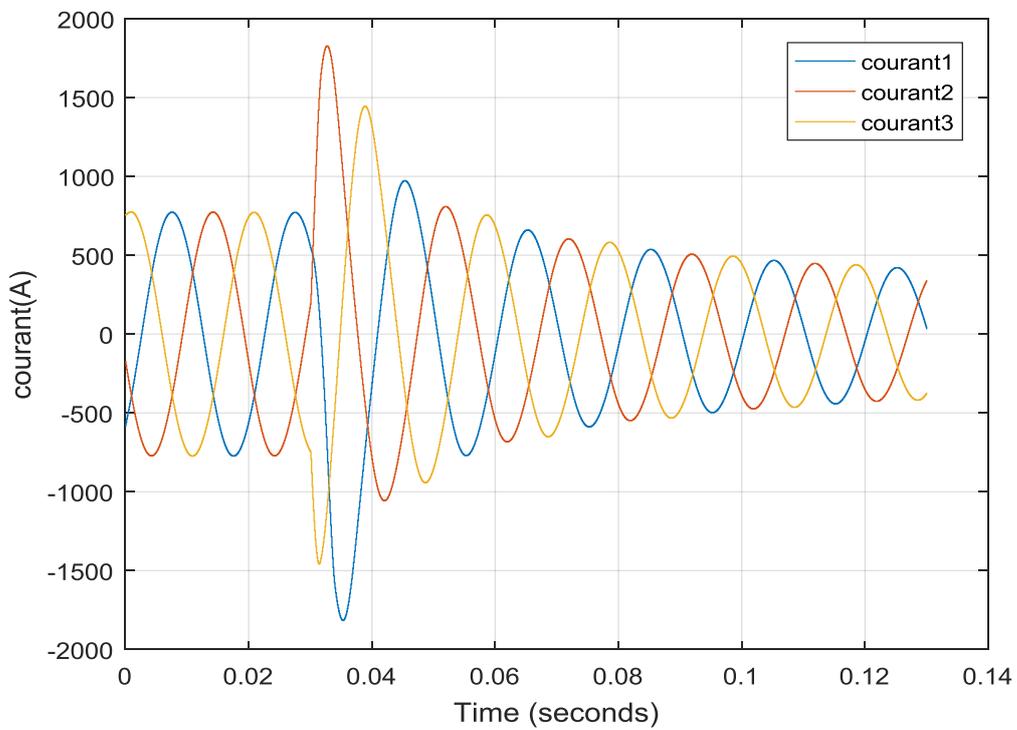


Fig.IV.57. Evolution temporelle de la densité de courant critique-Pour $E_c= 1e-2(\text{V/m})$.



IV.58. l'évolution temporelle du courant du réseau électrique-Pour $E_c= 1e-2(\text{V/m})$.

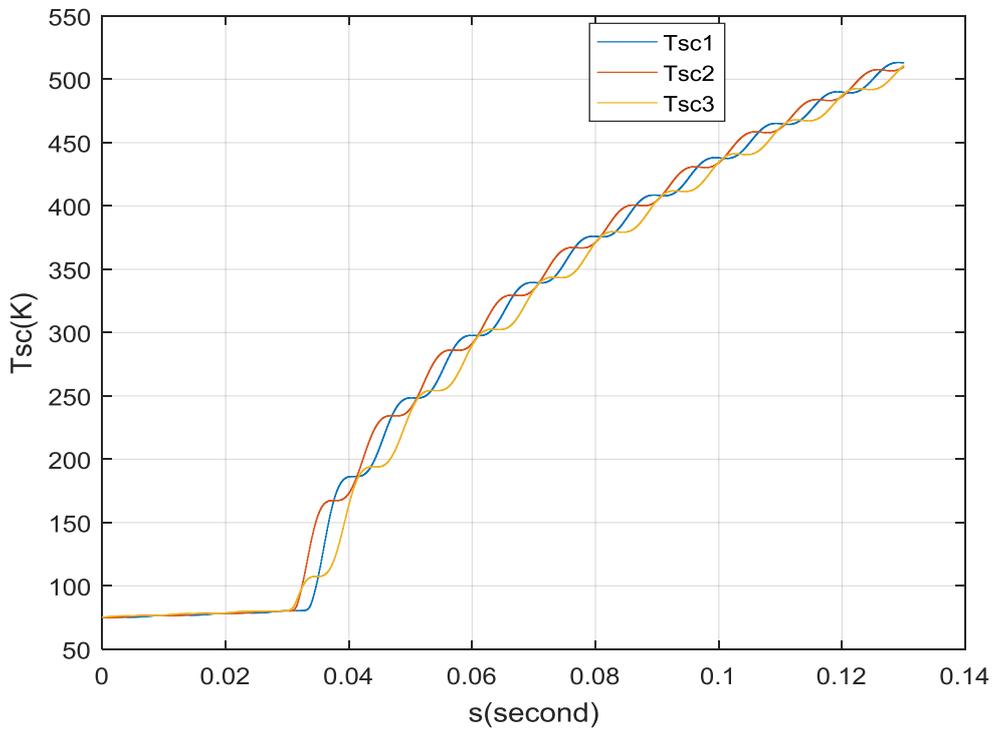


Fig.IV.59. Evolution temporelle de la température dans chaque phase-Pour $E_c= 1e-2(V/m)$.

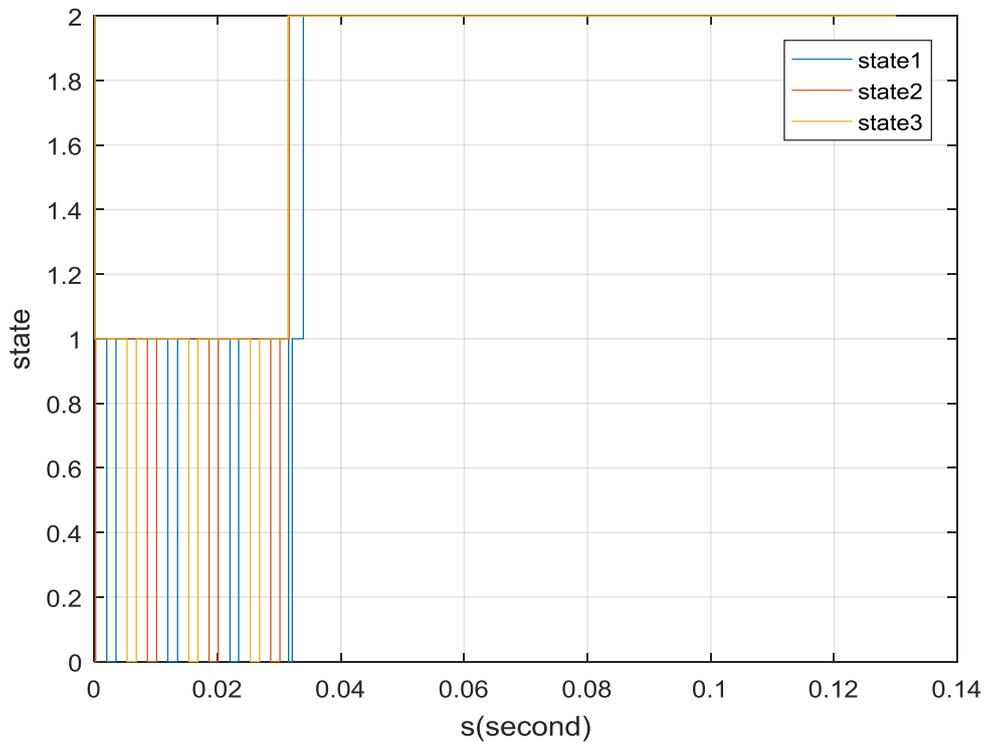


Fig.IV.60. Evolution temporelle de la state en chaque phase-Pour $E_c= 1e-2(V/m)$.

IV.1.4. Variation du paramètre beta

Dans cette partie, nous présentons les résultats des simulations d'un limiteur de courant supraconducteur où nous agissons sur la valeur de beta, adopté comme paramètre qui traduit le régime Flux-Flow Flux-Creep. Selon les résultats présentés on constate que celle-ci n'agit pas sur le comportement du supraconducteur, cependant elle reflète sur la stabilité numérique du processus itérative, en particulier à l'état supraconducteur.

Les paramètres de la pastille supraconductrice adoptés dans ces simulations sont les suivants :

Tableau IV.4. Les paramètres de la pastille supraconductrice adoptés dans ces simulations sont les suivants :

Symbole	paramètre	valeur
E_0	Le champ électrique du régime Flux-Flow	0.1 (V/m)
E_c	Le champ électrique critique	$1e-6 \cdot 100$ (V/m)
α_{77K}	Exposent de la région Flux-creep	6.0
J_c	Densité de courant critique	$1 e7$ (A/m ²)
T_c	La température critique	95 (K)
ρ_{T_c}	Résistivité du supraconducteur	$1.0e-6$ (ohm/m ²)

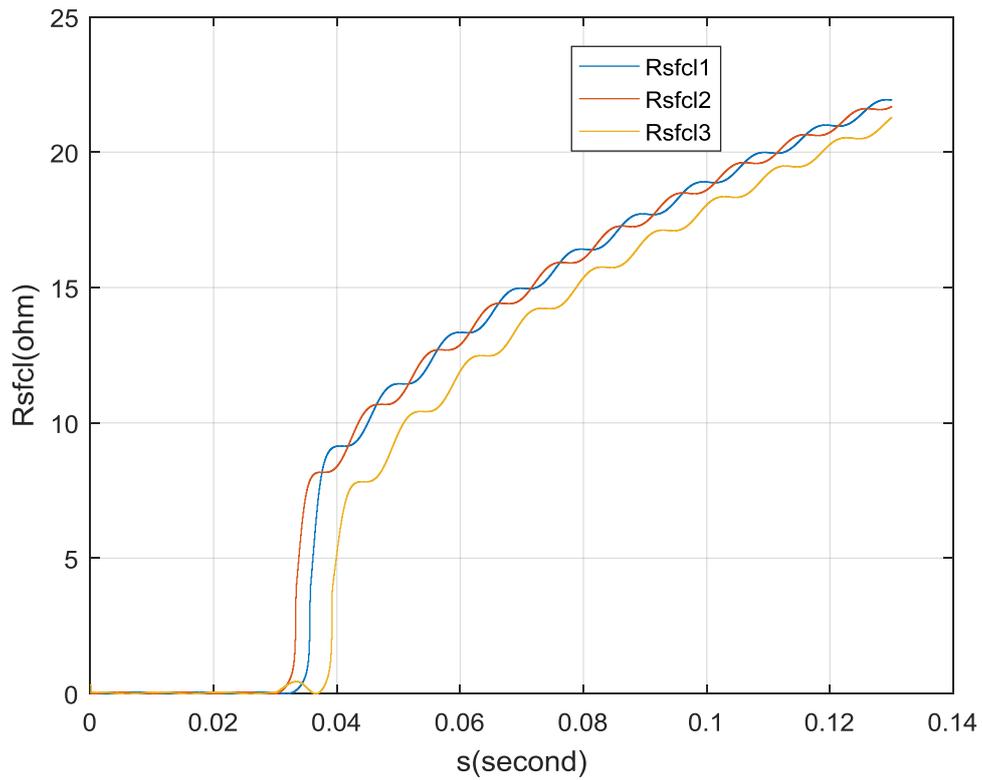


Fig.IV.61. l'évolution temporelle de la résistance additionnelle (la résistance due à la présence du limiteur de courant)-Pour $\beta = 5$.

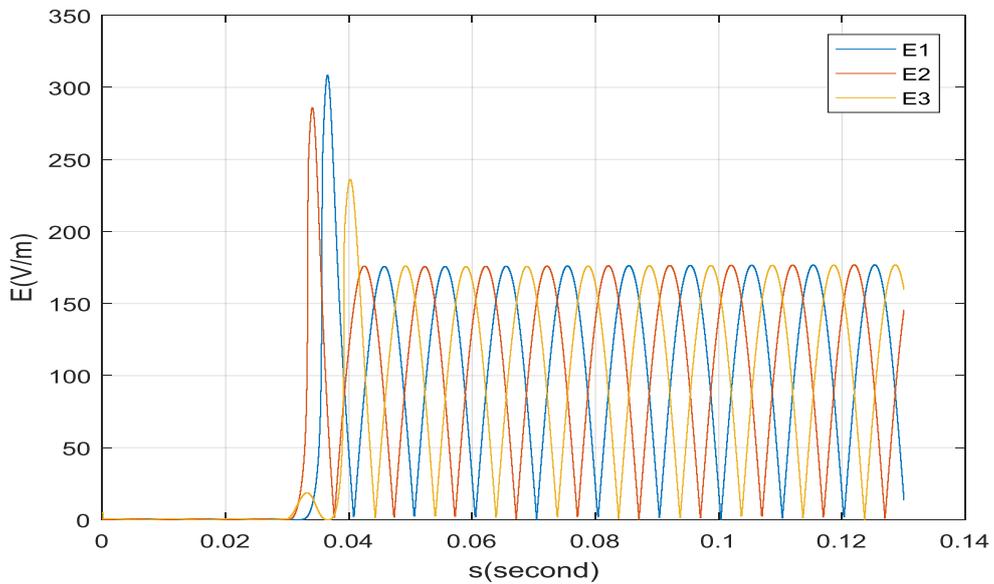


Fig.IV.62. l'évolution temporelle du champ électrique-Pour $\beta = 5$.

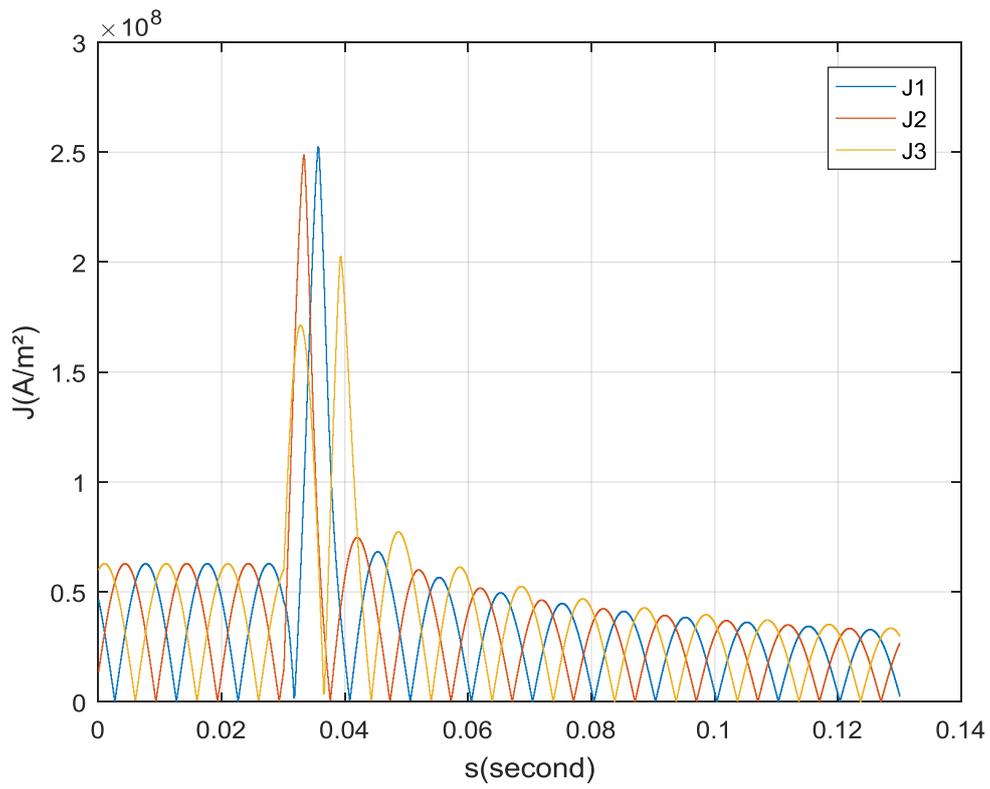


Fig.IV.63. Evolution temporelle de la densité de courant critique-Pour beta = 5.

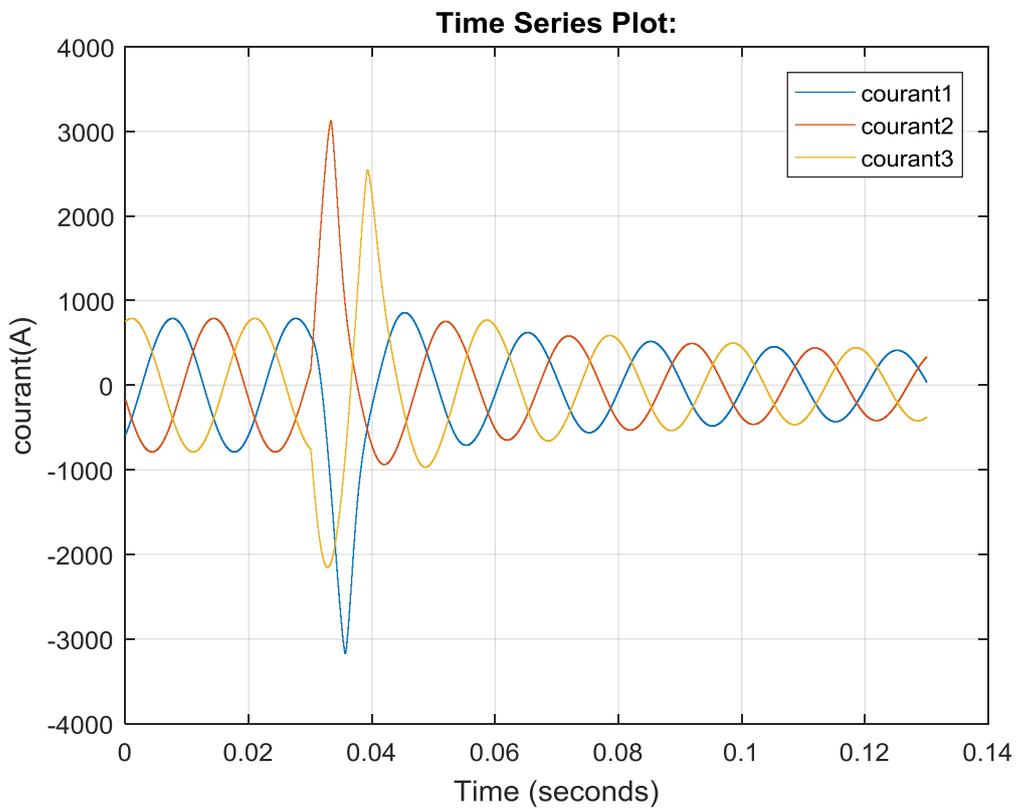


Fig.IV.64. l'évolution temporelle du courant du réseau électrique-Pour beta = 5.

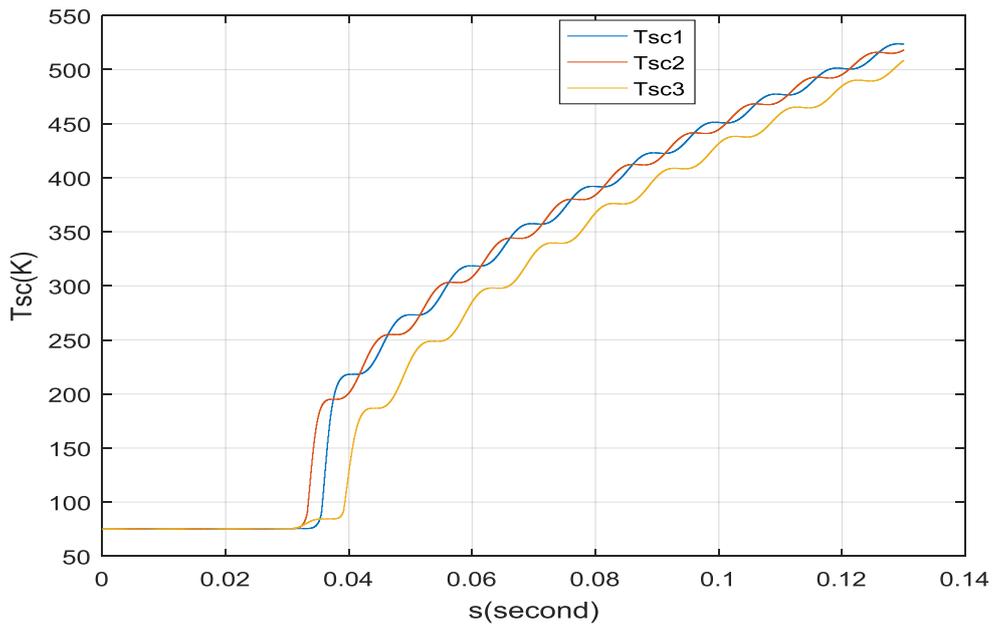


Fig.IV.65. Evolution temporelle de la température dans chaque phase-Pour beta = 5.

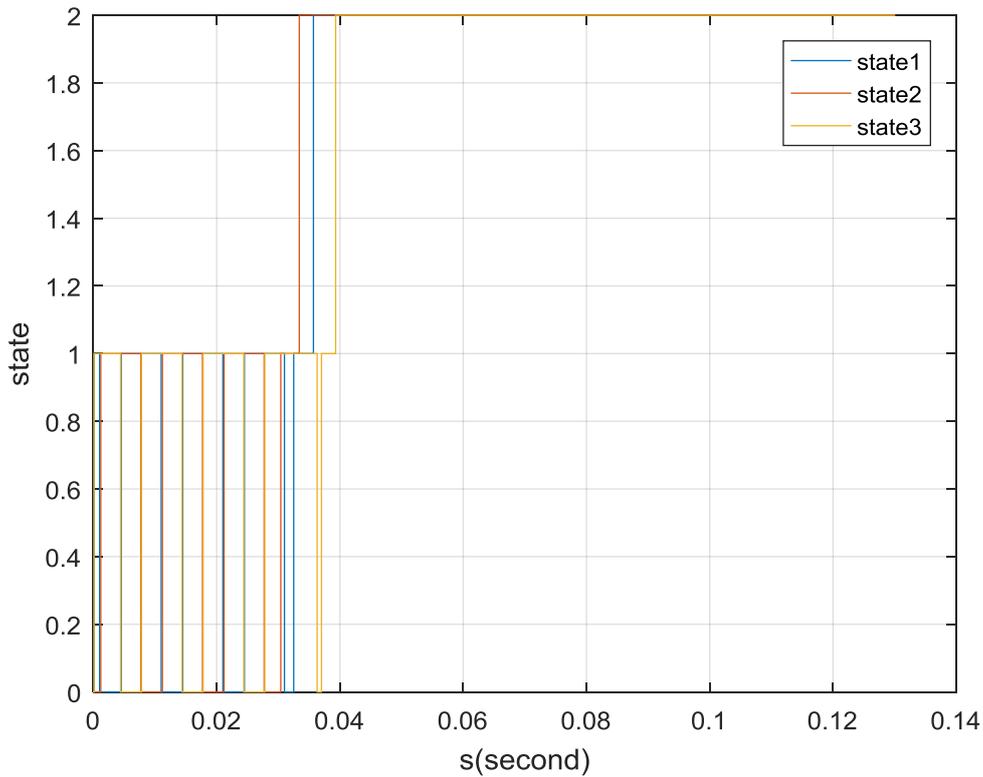


Fig.IV.66. Evolution temporelle de la state en chaque phase-Pour beta = 5.

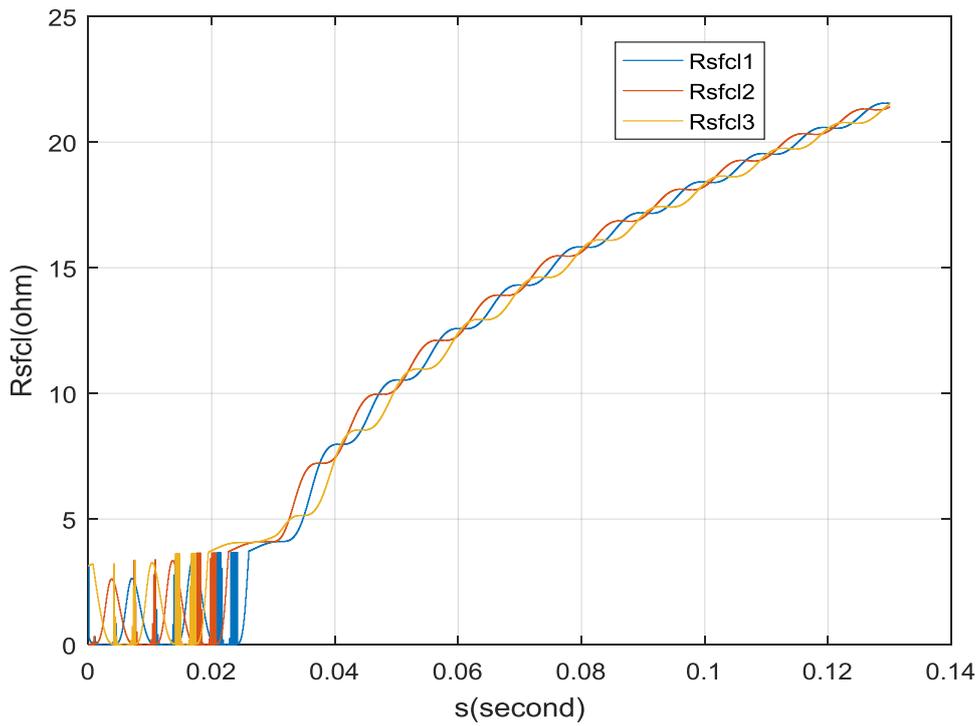


Fig.IV.67. l'évolution temporelle de la résistance additionnelle (la résistance due à la présence du limiteur de courant) -Pour beta = 10.

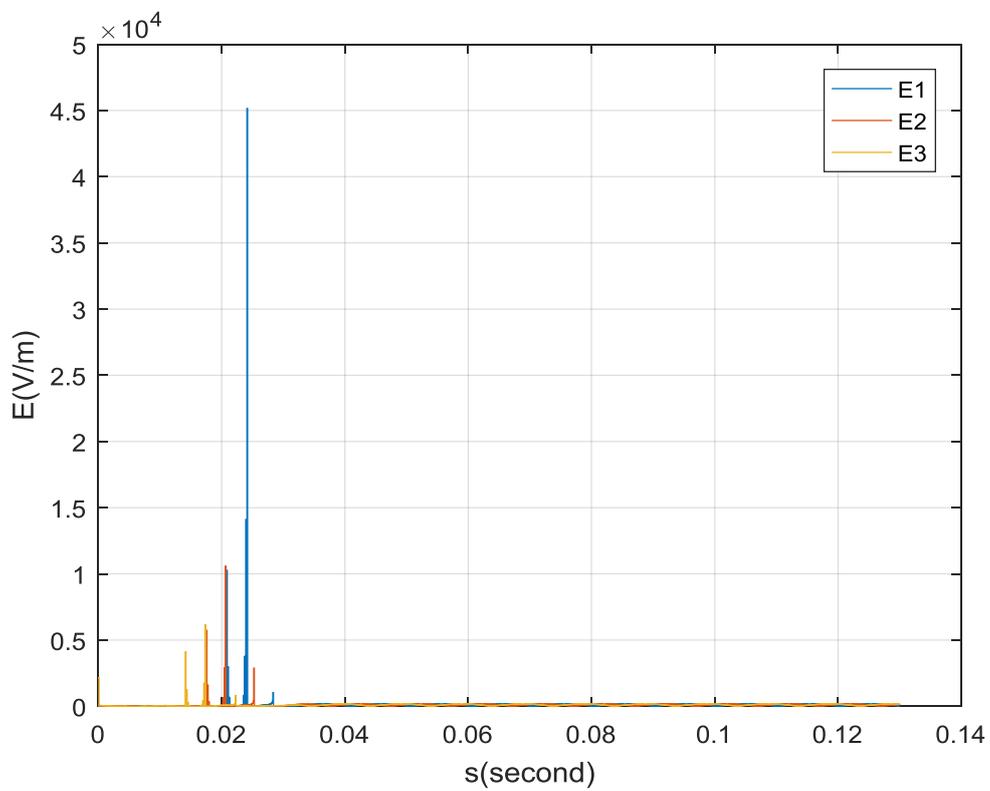


Fig.IV.68. l'évolution temporelle du champ électrique-Pour beta = 10.

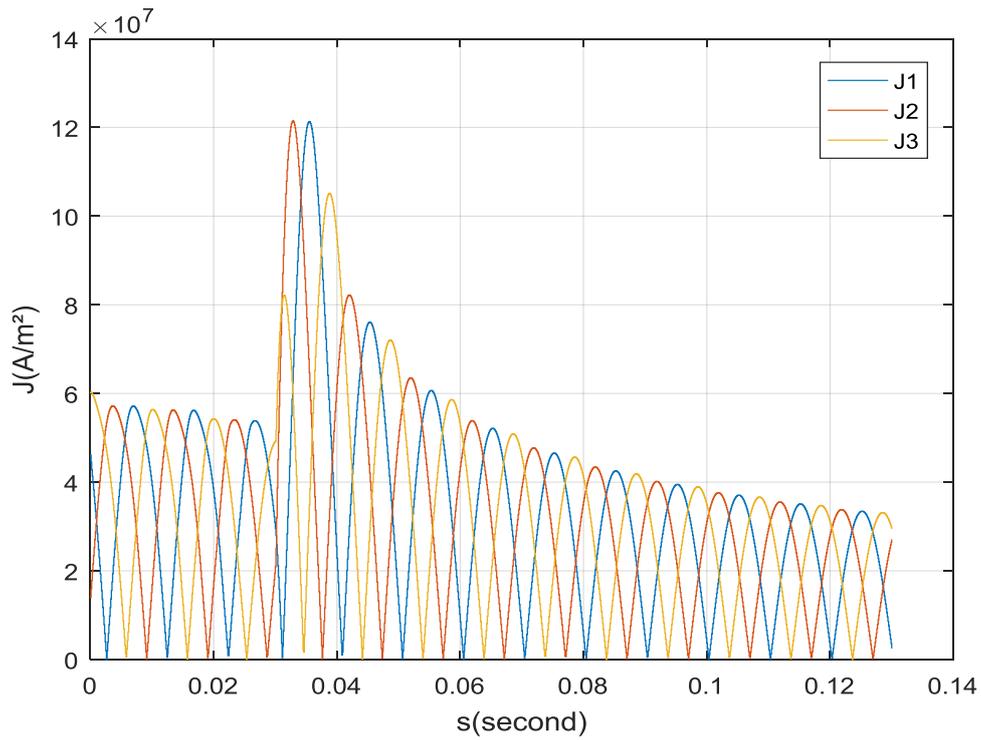


Fig.IV.69. Evolution temporelle de la densité de courant critique -Pour beta = 10.

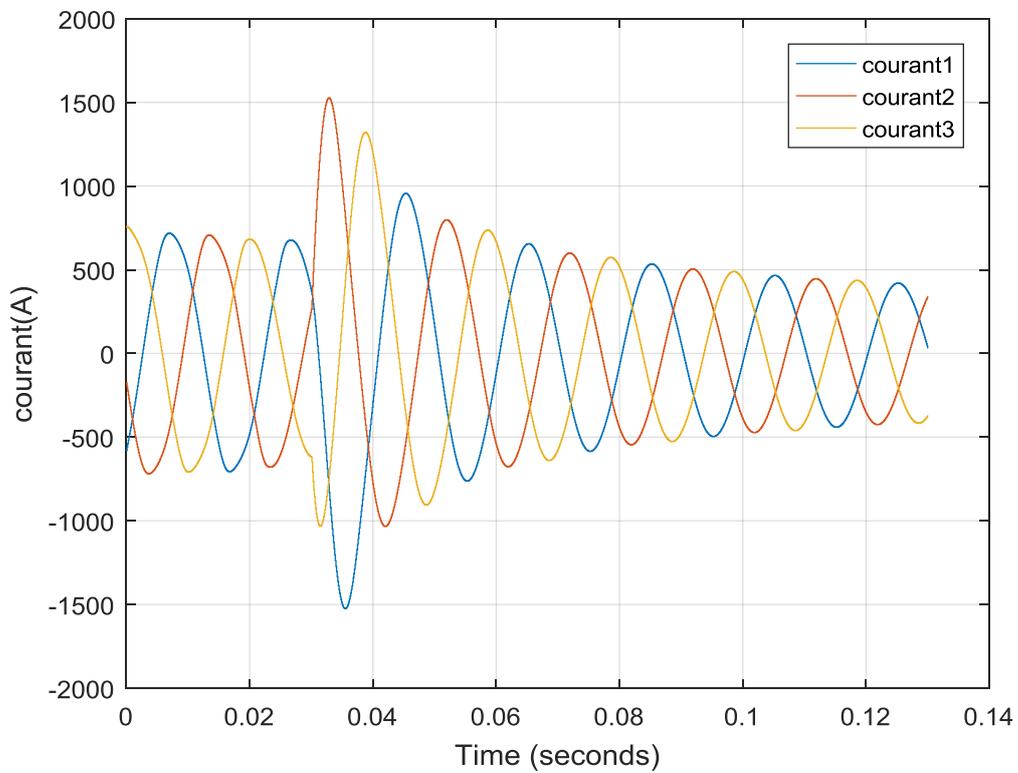


Fig.IV.70. l'évolution temporelle du courant du réseau électrique-Pour beta = 10.

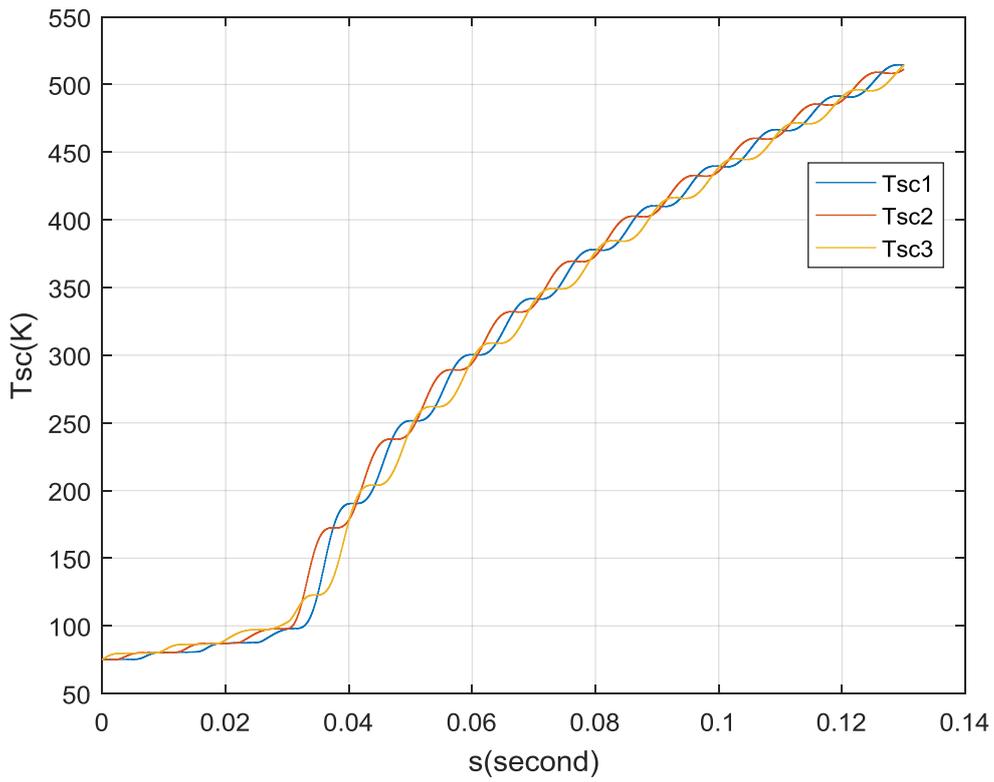


Fig.IV.71. Evolution temporelle de la température dans chaque phase-Pour beta = 10.

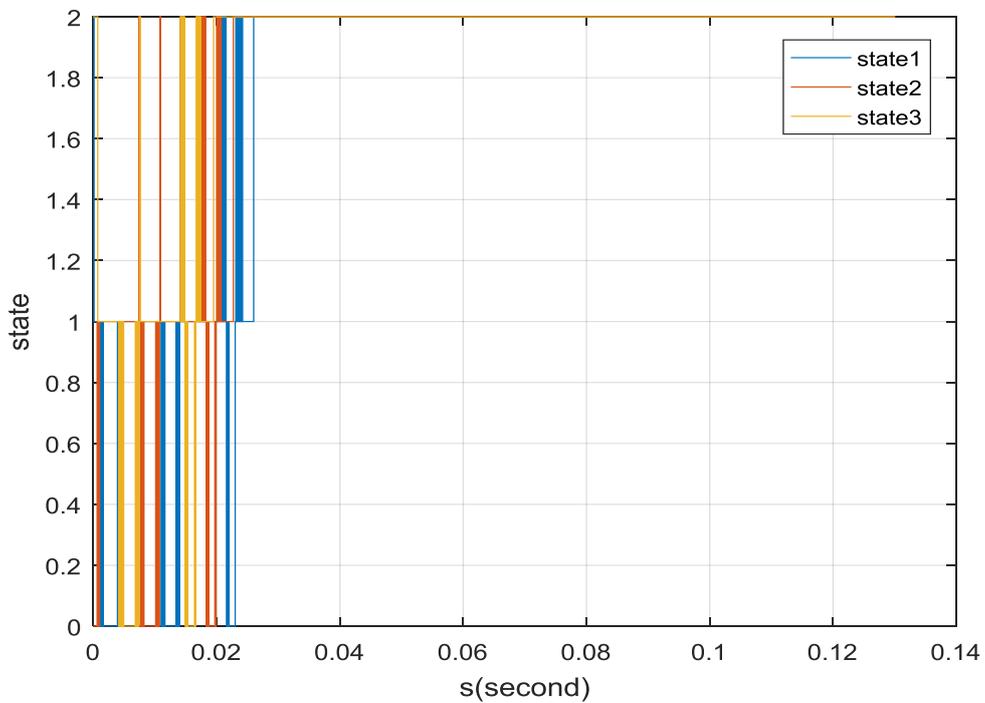


Fig.IV.72. Evolution temporelle de la state en chaque phase-Pour beta = 10.

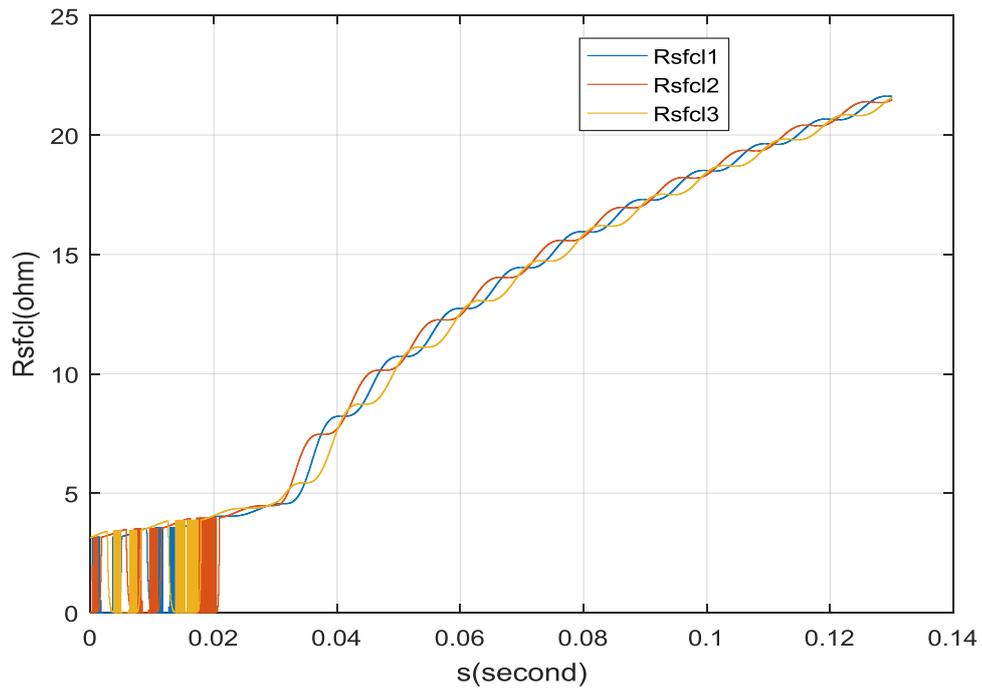


Fig.IV.73. l'évolution temporelle de la résistance additionnelle (la résistance due à la présence du limiteur de courant) -Pour beta = 20.

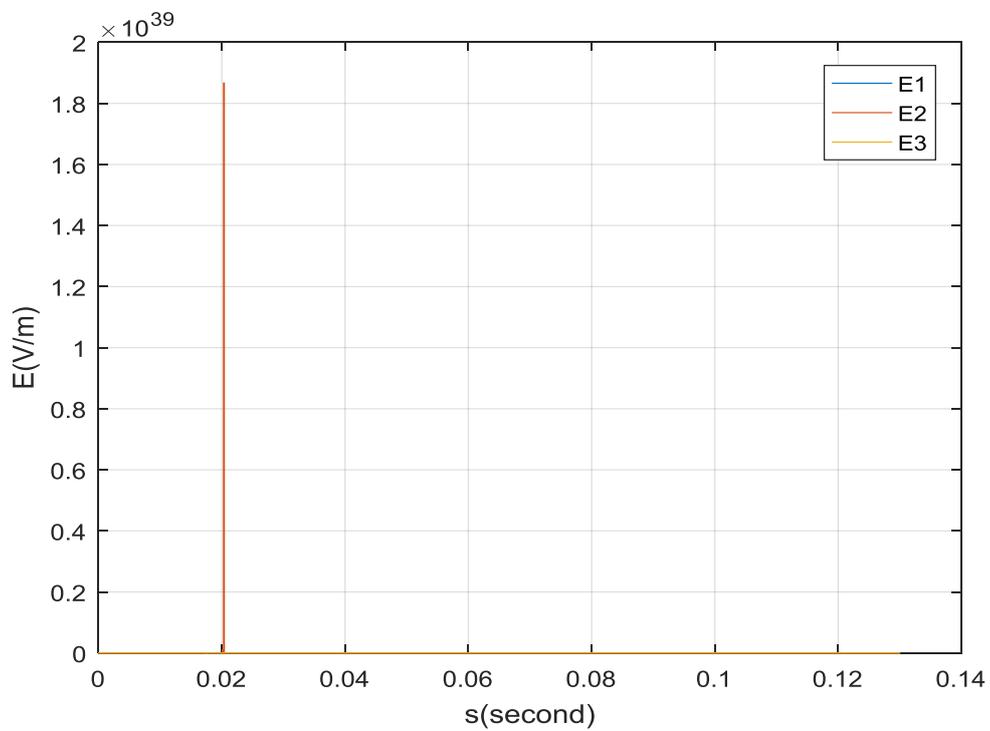


Fig.IV.74. l'évolution temporelle du champ électrique-Pour beta = 20.

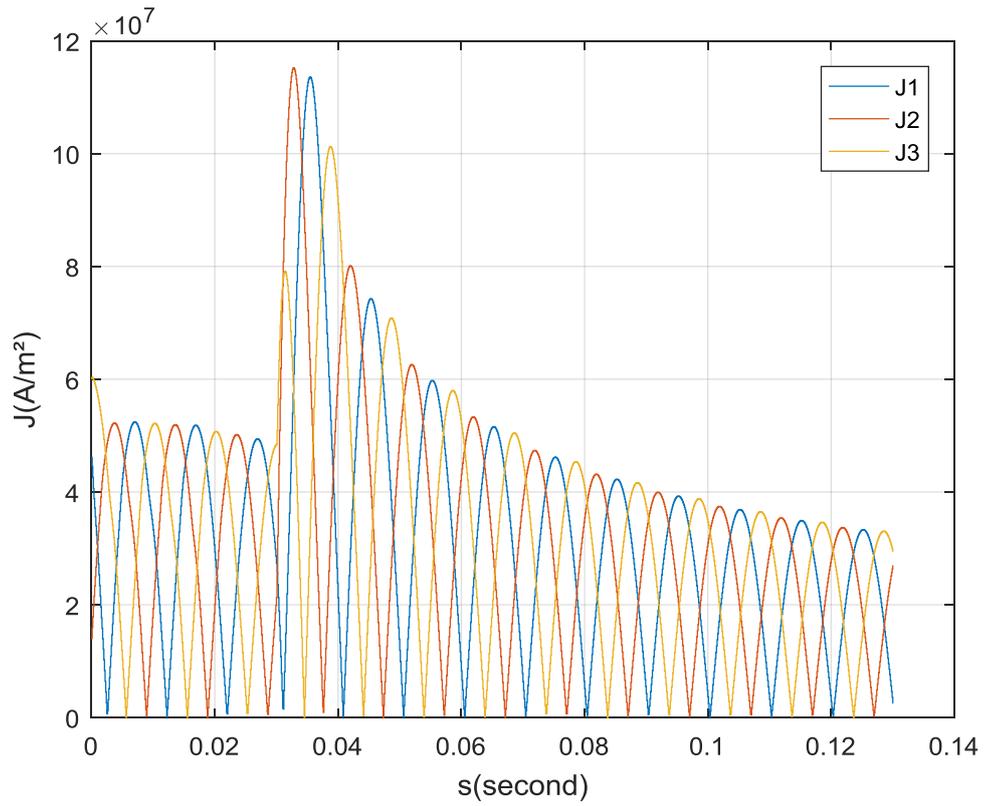


Fig.IV.75. Evolution temporelle de la densité de courant critique-Pour beta = 20.

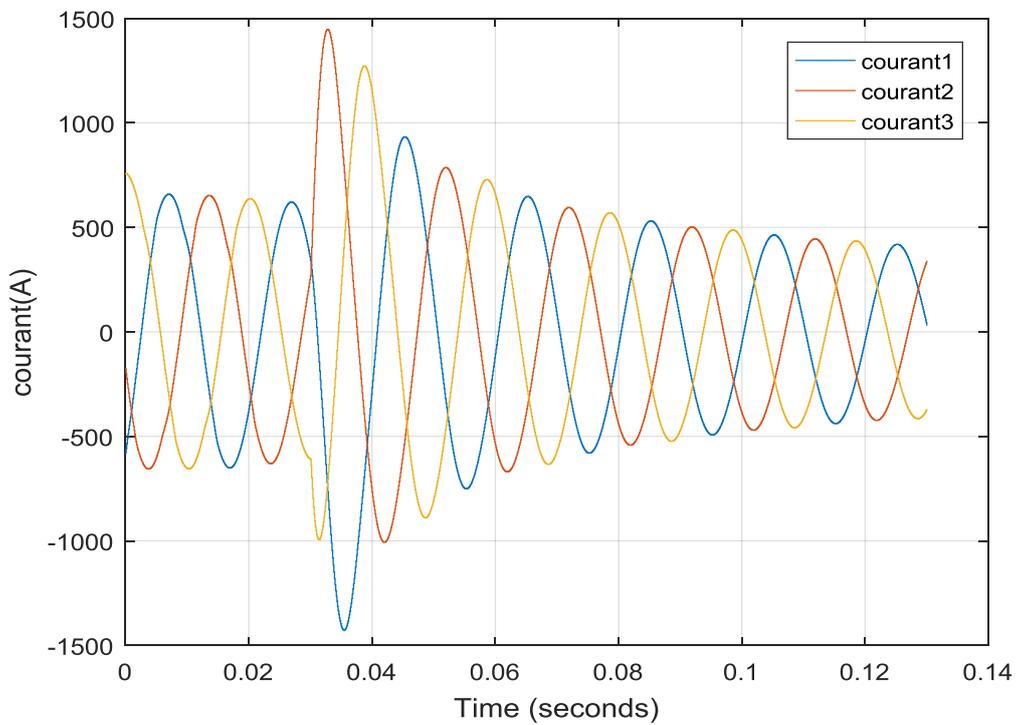


Fig.IV.76. l'évolution temporelle du courant du réseau électrique-Pour beta = 20.

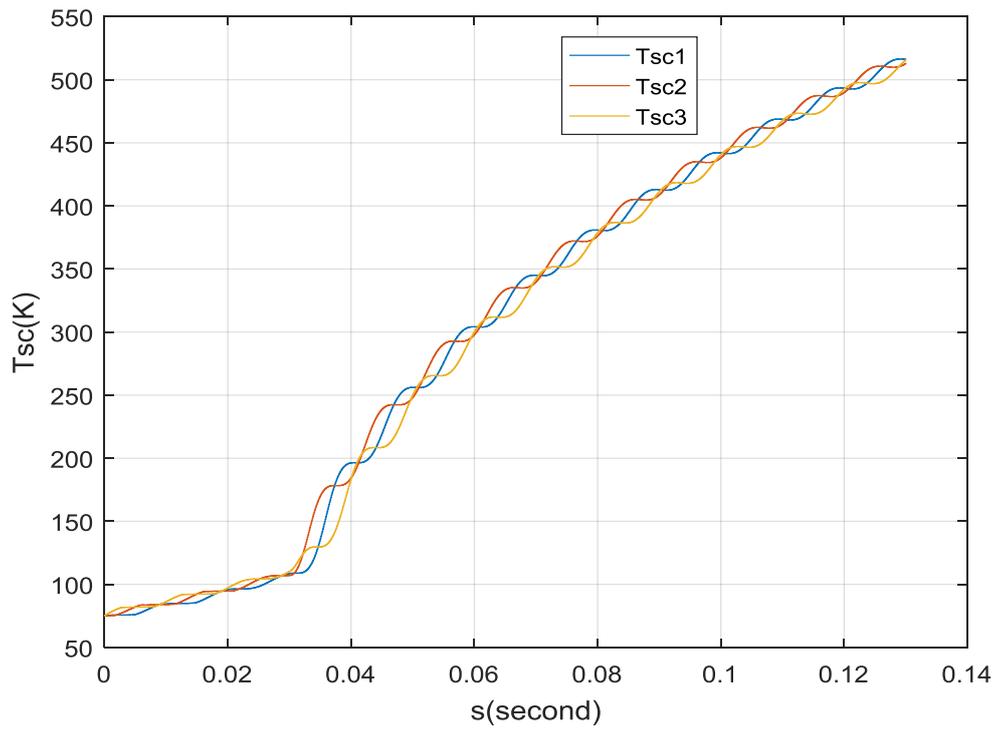


Fig.IV.77. Evolution temporelle de la température dans chaque phase-Pour beta = 20.

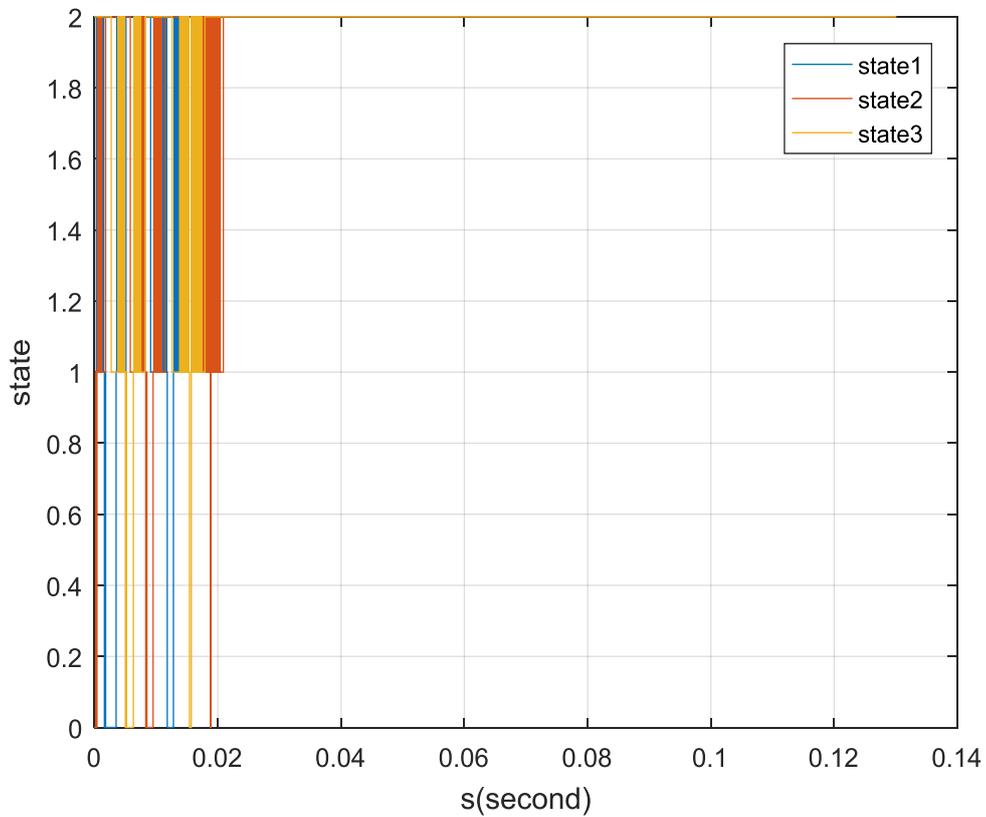


Fig.IV.78. Evolution temporelle de la state en chaque phase -Pour beta = 20.

IV.1.5. Variation de température critique T_c

Dans cette partie, nous présentons les résultats des simulations d'un limiteur de courant supraconducteur où nous agissons sur la valeur de T_c . Selon les résultats présentés on constate que celle-ci n'agit pas sur le comportement du supraconducteur, du processus itérative, en particulier à l'état supraconducteur dans cette réseau.

Les paramètres de la pastille supraconductrice adoptés dans ces simulations sont les suivants :

Tableau IV.5. Les paramètres de la pastille supraconductrice adoptés dans ces simulations sont les suivants :

<i>Symbole</i>	paramètre	valeur
E_0	Le champ électrique du régime Flux-Flow	0.1 (V/m)
E_c	Le champ électrique critique	$1e-6*100(V/m)$
$alpha_{77K}$	Exposant de la région Flux-creep	6.0
J_c	Densité de courant critique	$1 e7 (A/m^2)$
$Beta$	Exposant de la région Flux-Flow	3
rho_{Tc}	Résistivité du supraconducteur	$1.0e-6(ohm/m^2)$

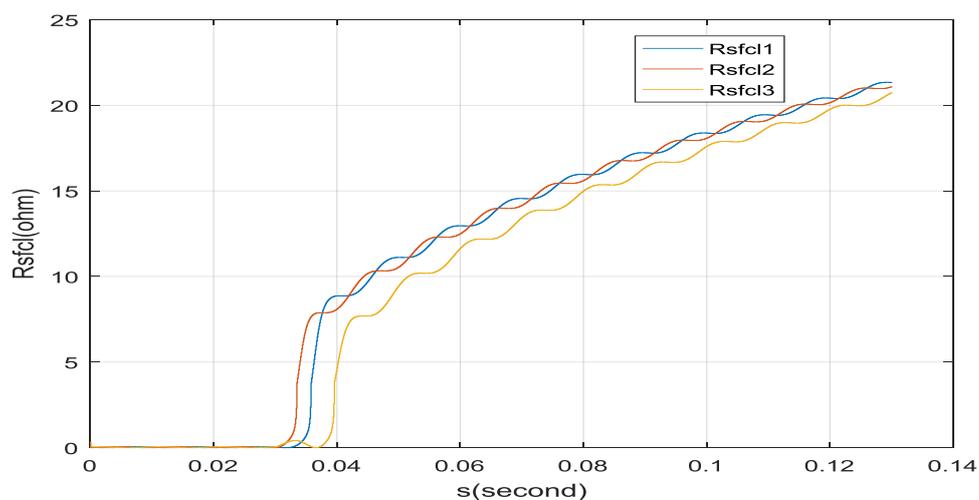


Fig.IV.79. l'évolution temporelle de la résistance additionnelle (la résistance due à la présence du limiteur de courant) –Pour $T_c = 100$ (K)

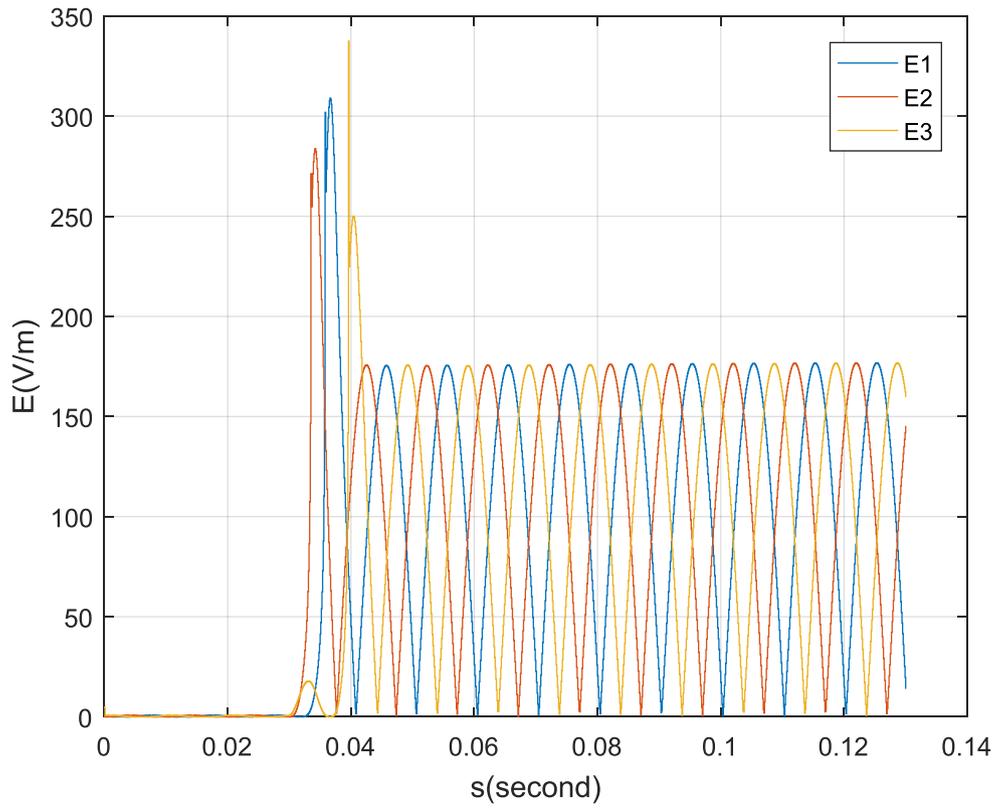


Fig.IV.80. l'évolution temporelle du champ électrique-Pour $T_c = 100$ (K)

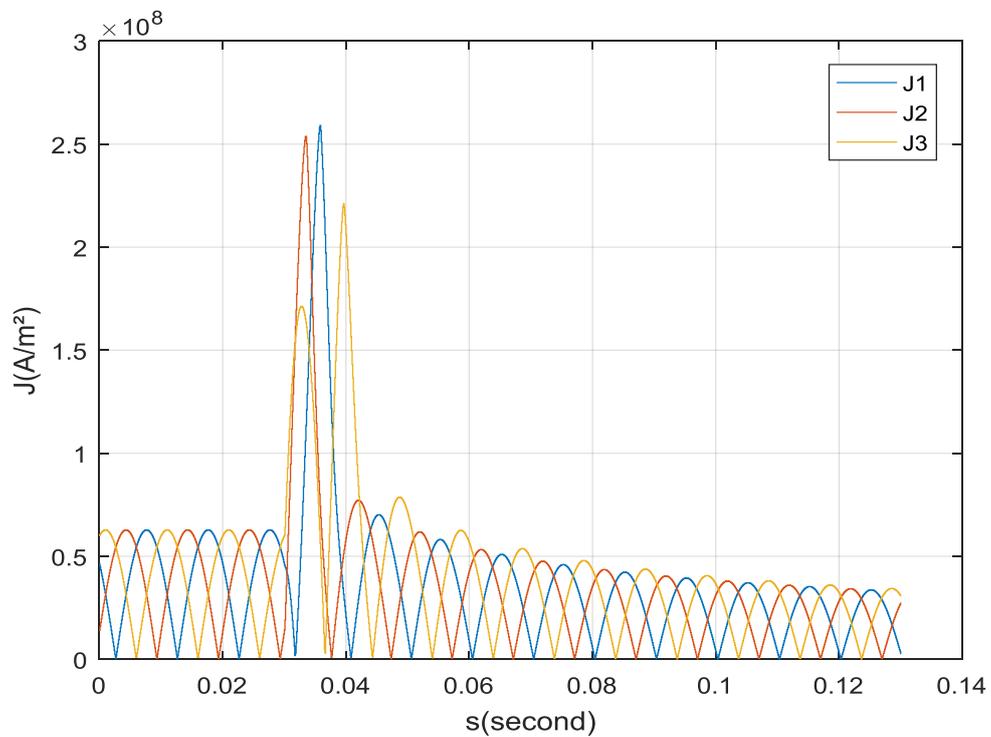


Fig.IV.81. Evolution temporelle de la densité de courant critique-Pour $T_c = 100$ (K)

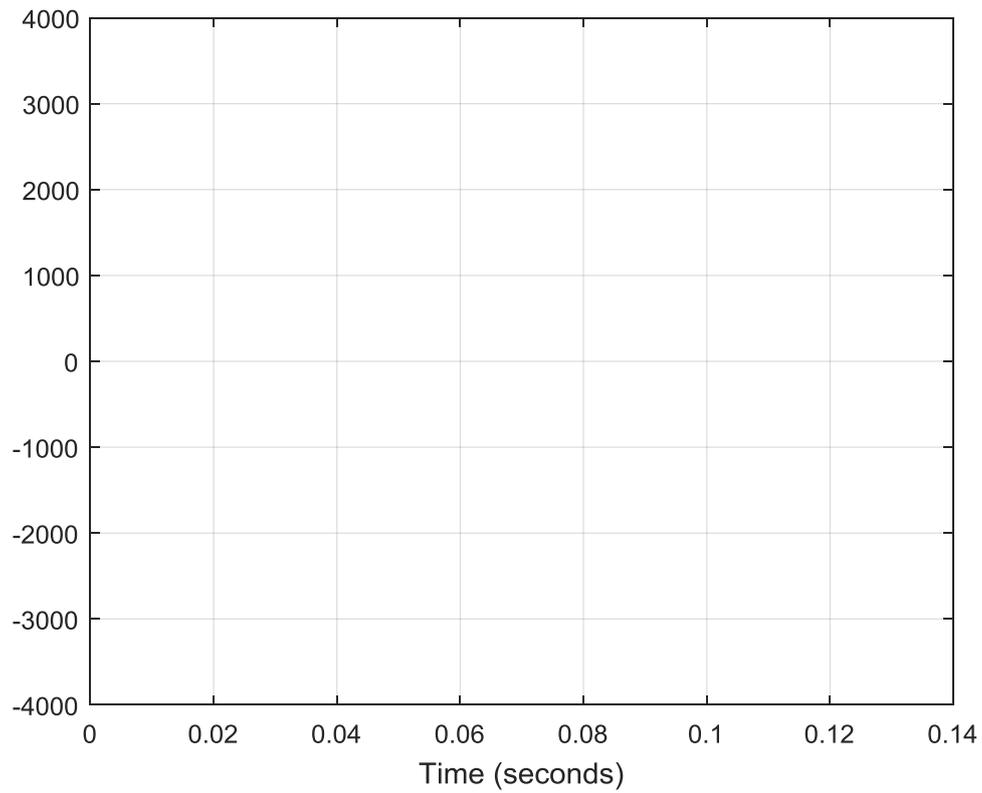


Fig.IV.82. l'évolution temporelle du courant du réseau électrique-Pour $T_c = 100$ (K).

Fig.IV.83. Evolution temporelle de la température dans chaque phase-Pour $T_c = 100$ (K).

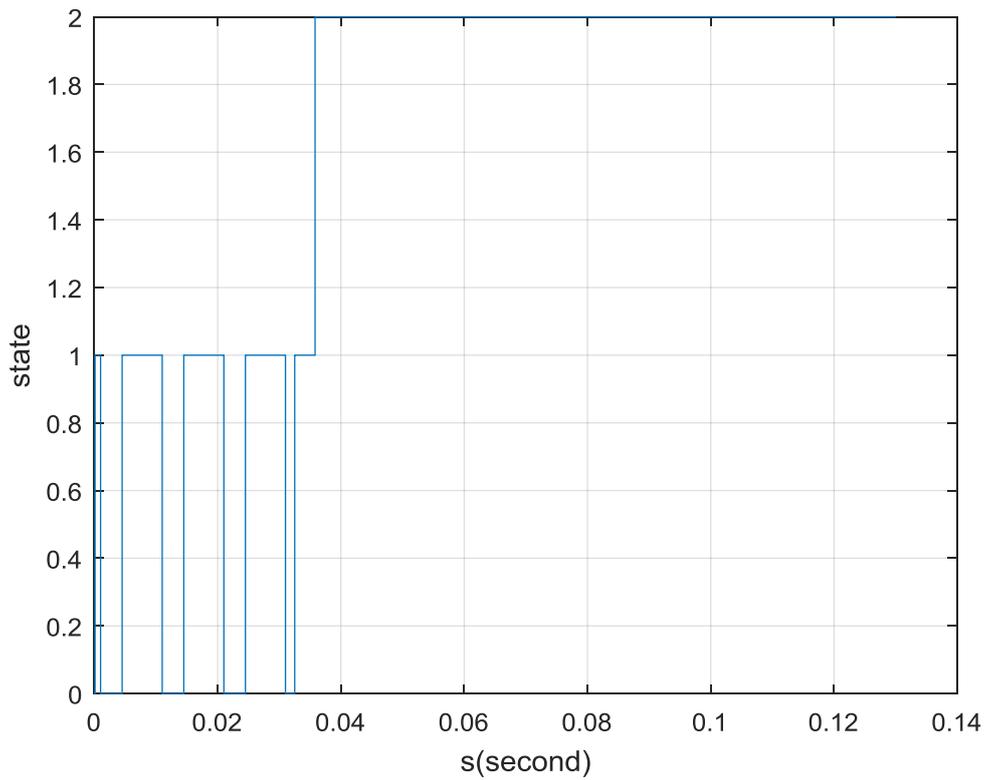


Fig.IV.84. Evolution temporelle de la state en chaque phase-Pour $T_c = 100$ (K)

Fig.IV.85. l'évolution temporelle de la résistance additionnelle (la résistance due à la présence du limiteur de courant) -Pour $T_c = 150$ (K)

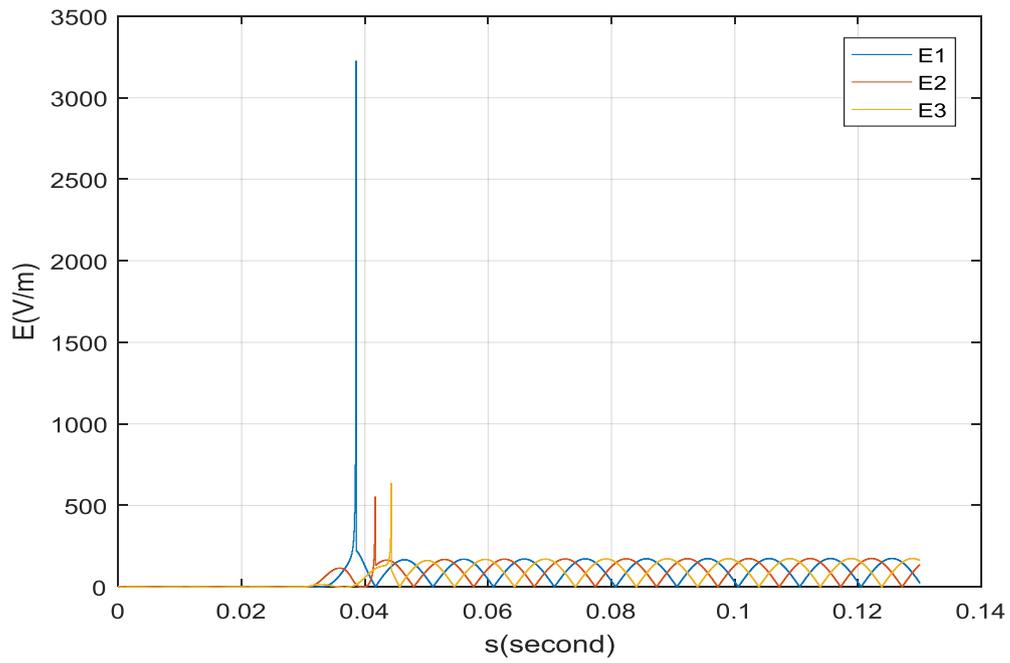


Fig.IV.86. l'évolution temporelle du champ électrique-Pour $T_c = 150$ (K)

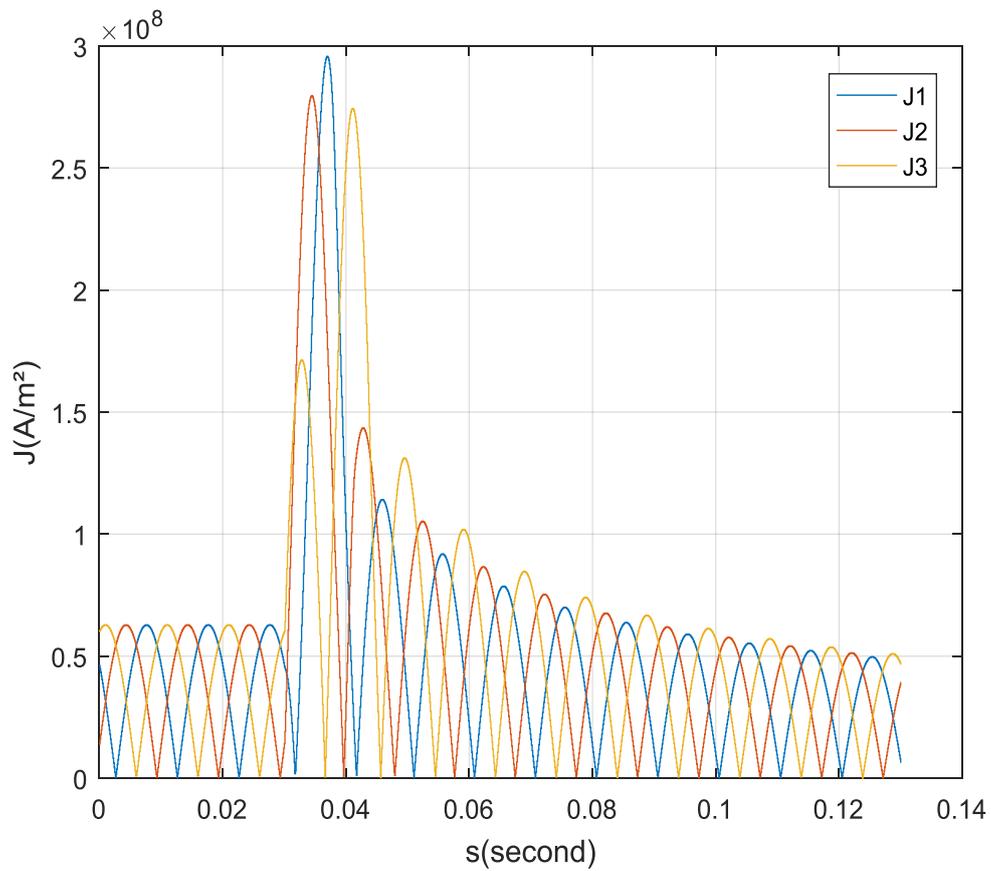


Fig.IV.87. Evolution temporelle de la densité de courant critique-Pour $T_c = 150$ (K)

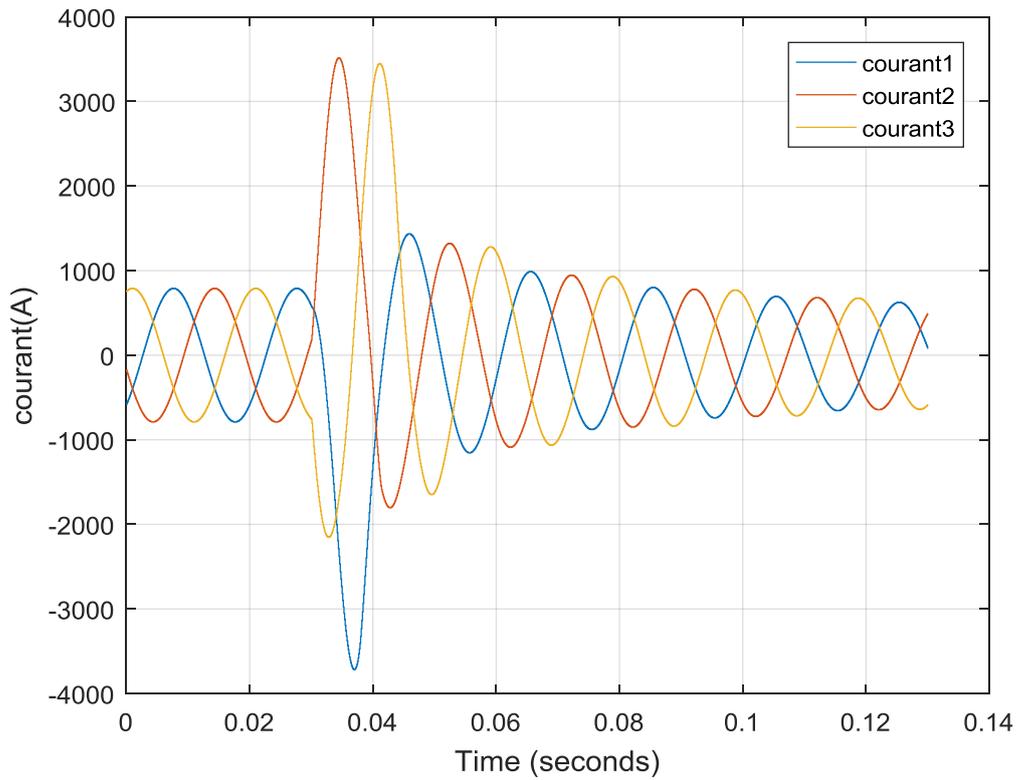


Fig.IV.88. l'évolution temporelle du courant du réseau électrique-Pour $T_c = 150$ (K)

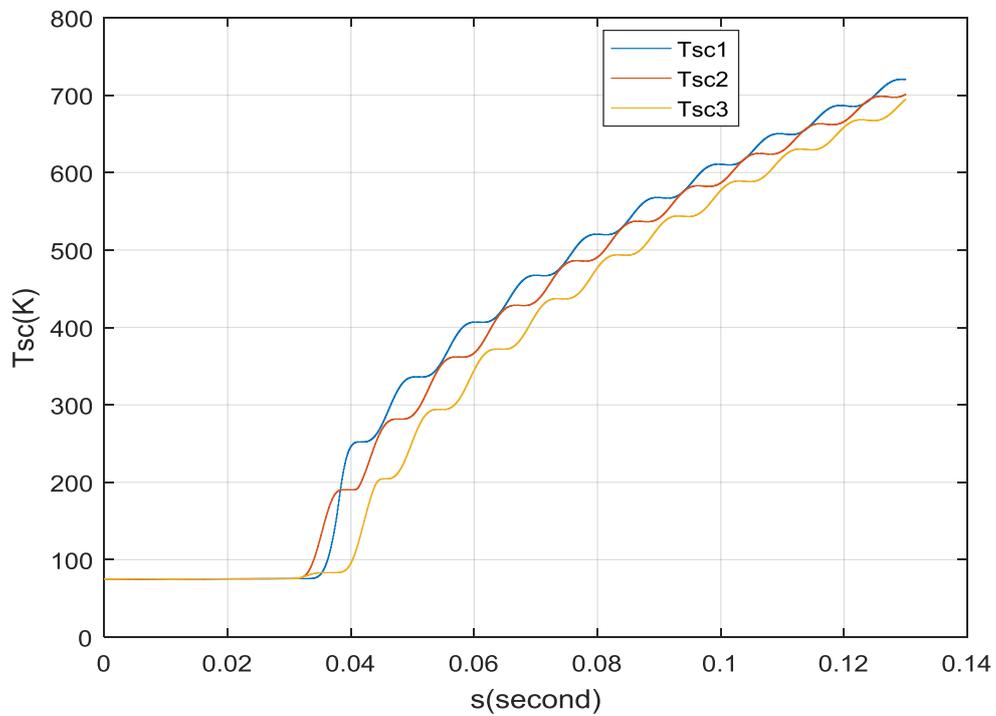


Fig.IV.89. Evolution temporelle de la température dans chaque phase-Pour $T_c = 150$ (K)

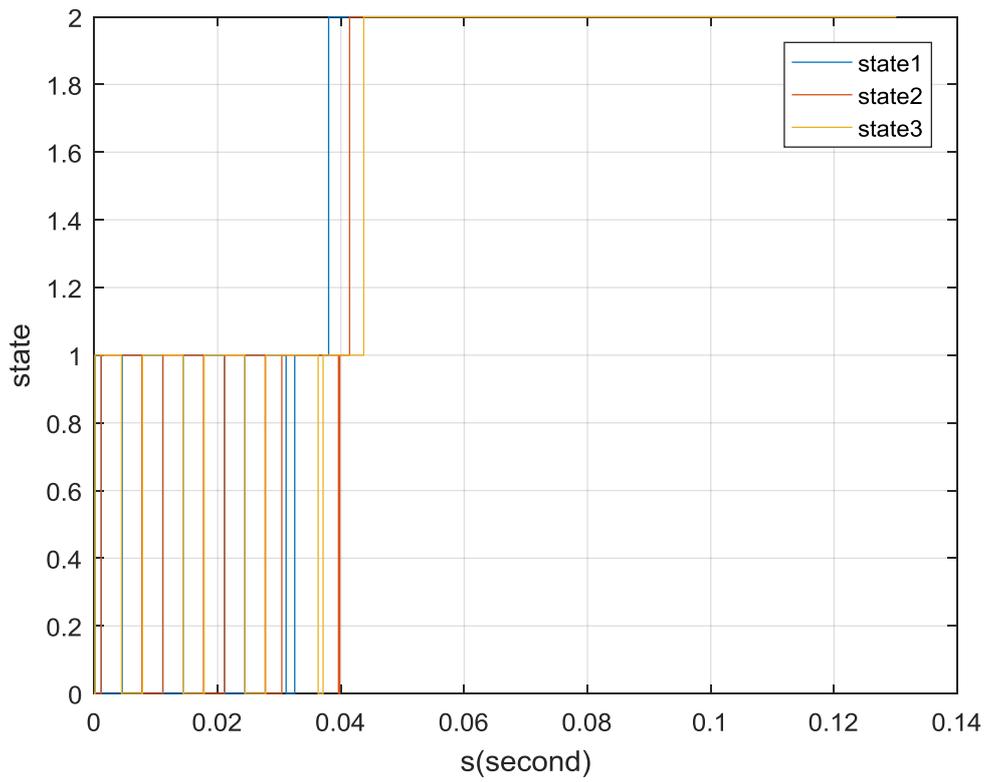


Fig.IV.90. Evolution temporelle de la state en chaque phase -Pour $T_c = 150$ (K)

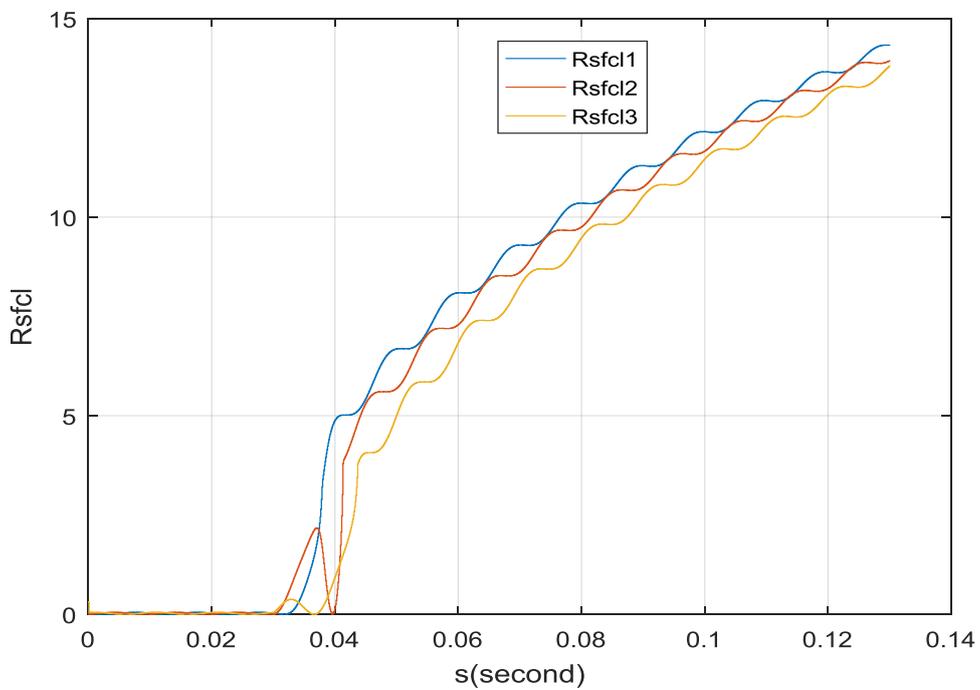


Fig.IV.91. l'évolution temporelle de la résistance additionnelle (la résistance due à la présence du limiteur de courant) -Pour $T_c = 200$ (K)

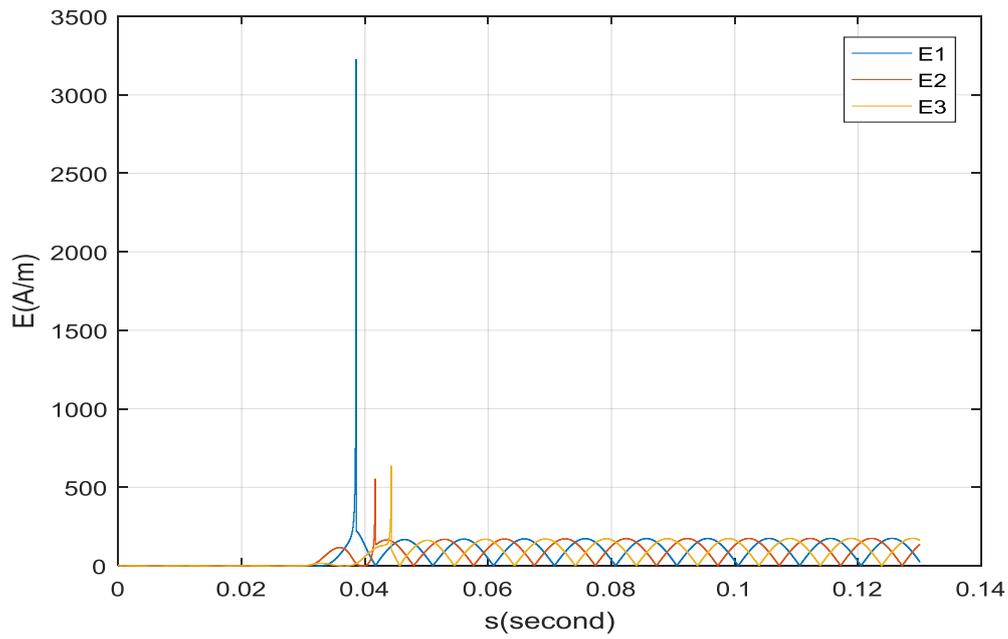


Fig.IV.92. l'évolution temporelle du champ électrique-Pour $T_c = 200$ (K)

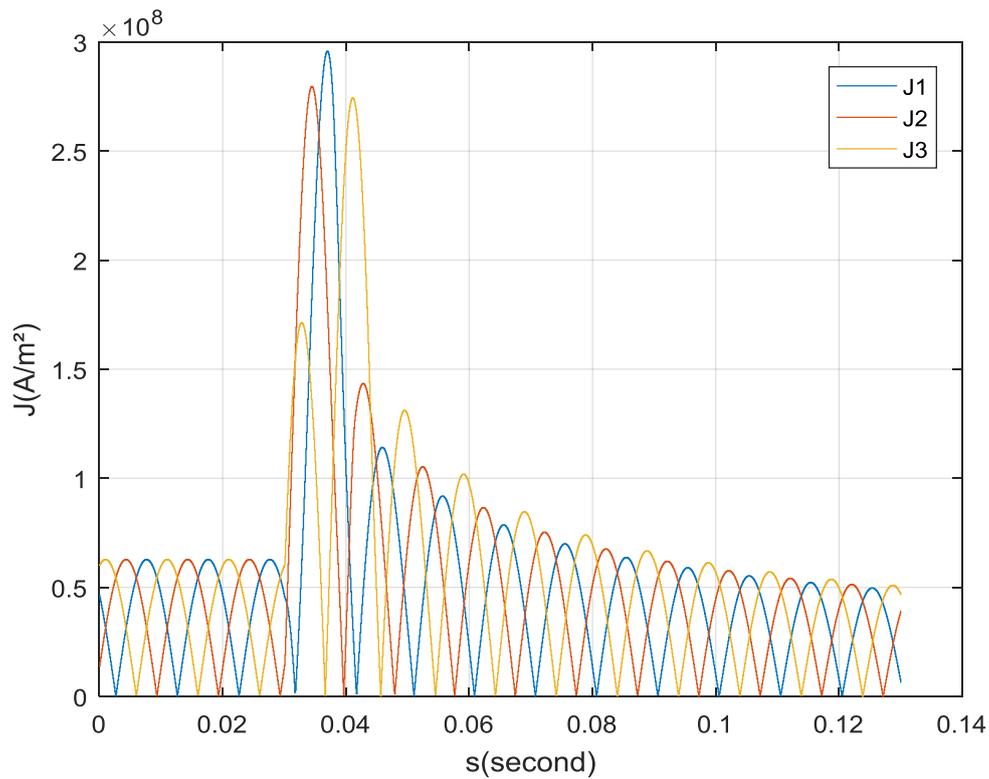


Fig.IV.93. Evolution temporelle de la densité de courant critique-Pour $T_c = 200$ (K)

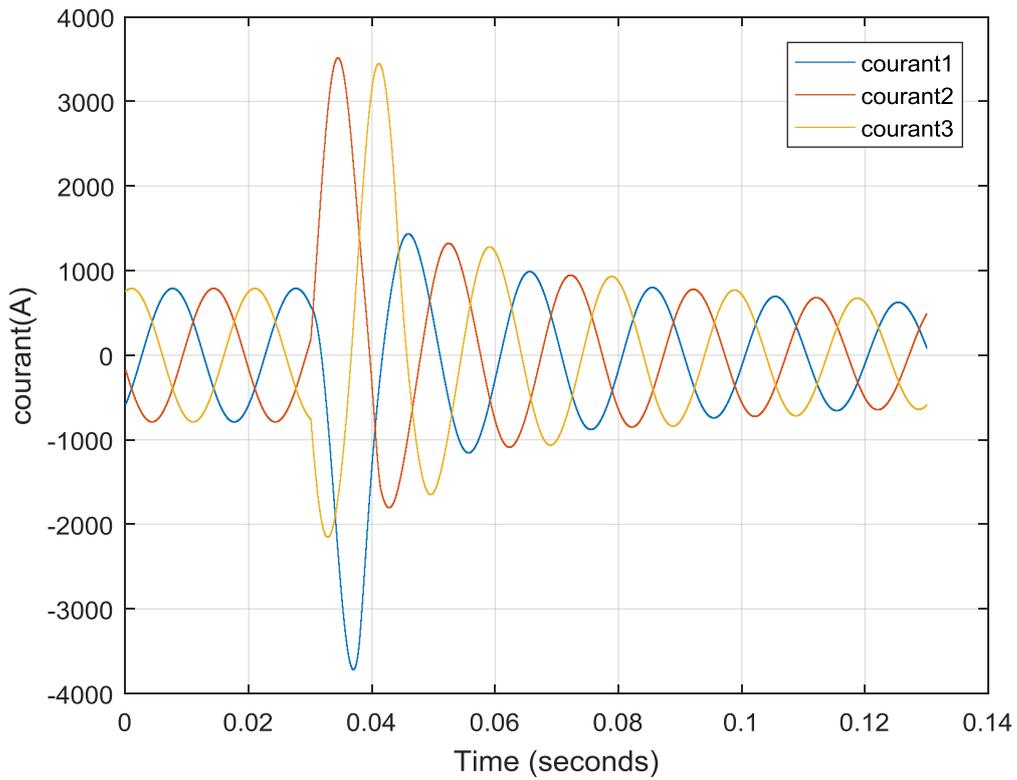


Fig.IV.94. l'évolution temporelle du courant du réseau électrique-Pour $T_c = 200$ (K)

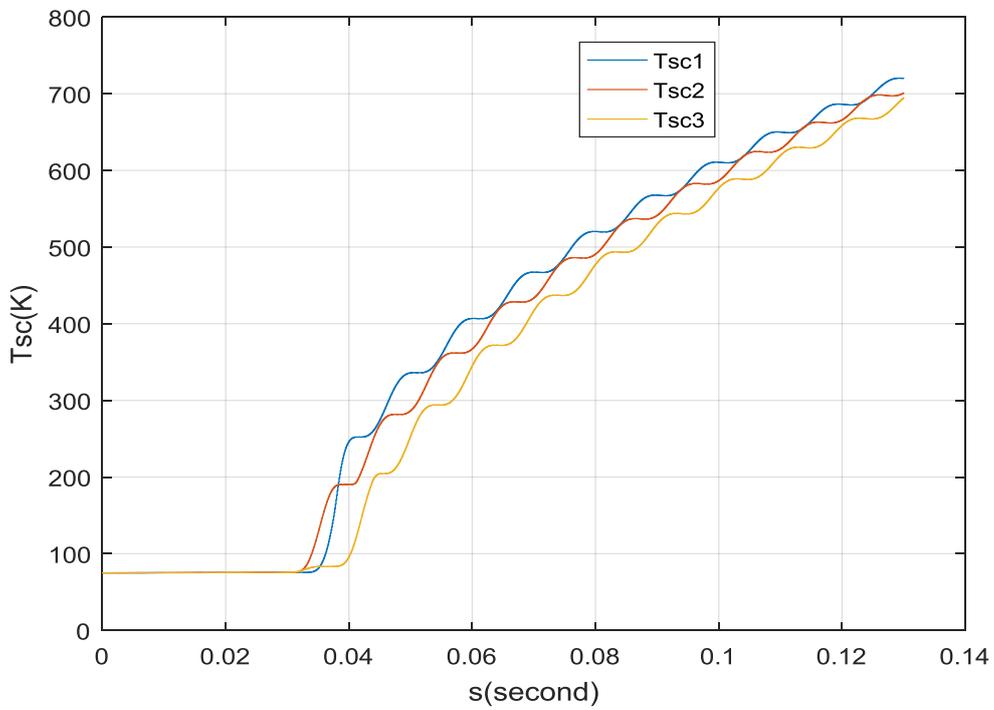


Fig.IV.95. Evolution temporelle de la température dans chaque phase-Pour $T_c = 200$ (K)

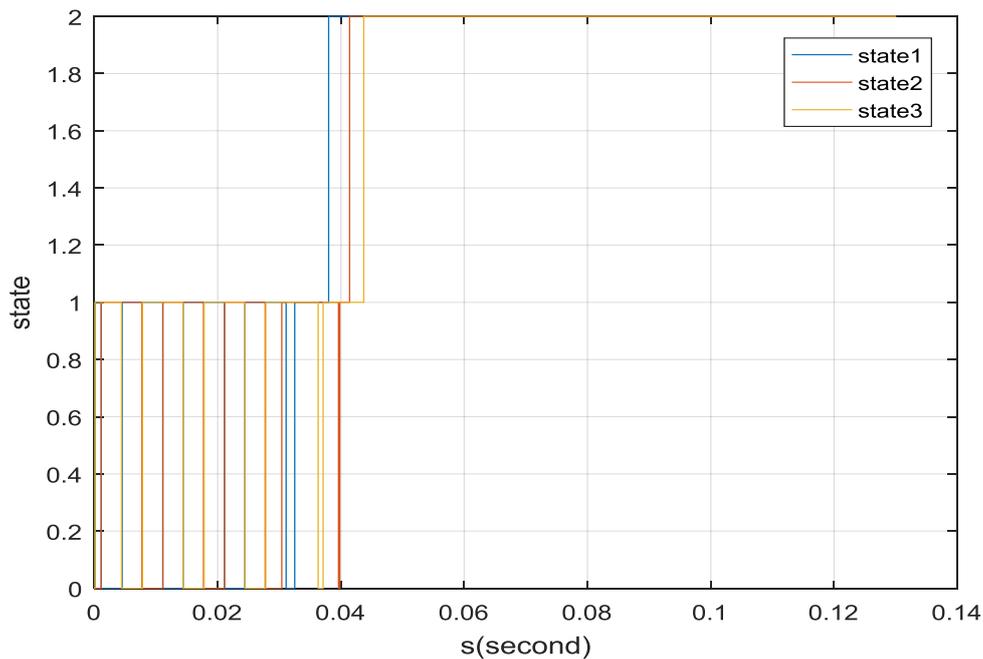


Fig.IV.96. Evolution temporelle de la state en chaque phase-Pour $T_c = 200$ (K)

IV.2.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons simulé un réseau électriques de distribution avec l'intégration des limiteurs de courant, dont l'objectif de calculer les différentes grandeurs électriques et thermiques couplé dans les matériaux supraconducteurs, et comparais entre chaque variation du caractéristiques de supraconducteur, densité de courant critique J_c , champ magnétique critique E_c , beta et température critique T_c

Pour modéliser un tel problème, il est nécessaire de prédire la conductivité électrique apparente du supraconducteur. Pour cela, nous avons adopté le modèle de Flux-Flow et Flux-Creep. Dans plusieurs travaux de recherche, le modèle de puissance est adopté, où la conductivité électrique apparente du supraconducteur est décrite par une loi de puissance à travers un coefficient n . Ce modèle peut décrit de façon satisfaisante la conductivité électrique apparente du supraconducteur mais dans une zone précise limitée par la valeur de la densité de courant critique J_c . Or, un limiteur de courant conçu à partir d'un supraconducteur fonctionne dans les quatre zones qui sont respectivement :

- La zone où le supraconducteur est défini par une résistance nulle,
- Les deux régimes, Flux-Flow et Flux-Creep,
- Le régime normal défini par une résistance élevée.

nous présentons les résultats des simulations du limiteur de courant supraconducteur. Les résultats à caractère magnétique et thermique sont largement présentés, où le supraconducteur prend différentes valeurs de J_c . Dans ces résultats, la résistance additionnelle due à la présence du limiteur de courant est présentée. Aussi, l'évolution temporelle respectivement, du champ électrique E , de la densité de courant J_c et enfin de la température intérieure T du supraconducteur.

Dans l'allure de la résistance, on remarque certain décalage temporel entre résistances du limiteur inséré dans les trois phases, ceci est due à la valeur des courant du réseau qui ils ont un origine décalé, il s'agit d'un système triphasé équilibré.

Le changement qui est dû à la variation de J_c signifie qu'il est nécessaire d'utilisé un limiteur de courant supraconducteur avec une densité de courant faible de l'ordre de $J_c_{77K}=1e7$ (A/m²).

En fin, Nous avons conclu dans le suivi du courant a un impact significatif sur la qualité de fonctionnement de supraconducteur et est très important dans la sélection en fonction du réseau à protéger

Conclusion générale

Le but principal de ce mémoire est l'étude des caractéristiques temporelles d'un limiteur de courant à base de supraconducteur à haute température critique durant le défaut d'un court-circuit.

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

Nous avons fait varier la valeur de la densité de courant critique (J_c), dans le but est de déterminer la valeur optimale de J_c qui permet de donner les meilleures conditions pour limiter le courant de défaut, la marge de la variation de J_c est définie dans l'intervalle de $[10^7-10^9]$ A/m². Cette marge reflète la valeur réelle de J_c d'un limiteur de courant supraconducteur.

Bibliographie

[1] : Lotfi ALLOUI Sujet de la thèse :MODELISATION TRIDIMENSIONNELLE DES MATERIAUX SUPRACONDUCTEURS. Pour obtenir le grade de DOCTEUR de l'UNIVERSITE PARIS SUD

[2]: Yannick COINTE le 13 décembre 2007 LIMITEUR SUPRACONDUCTEUR DE COURANT CONTINU

[3]: NEMDILI SAAD Thème Modélisation et simulation du limiteur de courant supraconducteur

[4] : chaib sami thèse master 06 juin 2012 étude des supraconducteurs à haute température critique

[5]: Yannick COINTE thèse LIMITEUR SUPRACONDUCTEUR DE COURANT CONTINU - le 13 décembre 2007 HAL Id: tel-00300552 <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00300552>

[6] : les matériaux supraconducteur, rapport d'épistémologie Wiest-Million Nicolas,Le moine julien,SlotEdward ,juillet 2002

[7] Ben Mebarek Fethi S o u t e n u publiquement le 29 Septembre 2014 Modélisation des matériaux supraconducteurs, application à un limiteur du courant

[8] : Mohamed Lotfi KHENE Thèse de DOCTORAT Soutenu publiquement le 12/03/2015 en Sciences : ETUDE DE L'AIMANTATION DANS LES SUPRACONDUCTEURS

[9]: Zaaboubi Khaled Soutenu le : 04 Juin 2013 thème Pilotage sous LabView d'un système de protection à max de courant

[10] :ZOUZOU Abderrahmane,KANOUNE Mohammed Yakhlef Soutenu publiquement Le : 01/06/2017 Thème Analyse par simulation des courants de court-circuit survenant dans les réseaux électriques

[11] : DEBBA Mounib,BELHANI Hakima Soutenu publiquement Le :06/06/2017 / Thème Étude des caractéristiques temporelles d'un limiteur de courant à base de supraconducteur durant les défauts

[12] : google image <https://goo.gl/images/KcGr3z>