

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

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE
N° : ELM-05



FILIERE : ELECTROMÉCANIQUE
OPTION : ELECTROMÉCANIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par :

DJAFER TALAL
DJEMIL FATNA DOUNIA

THEME

Étude d'un transformateur supraconducteur

Soutenu devant le jury composé de:

Pr. GHEMARI Zine	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Président
Dr. BELKHIRI Salah	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Rapporteur
Dr. BENDAIKHA A.Malik	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Examineur
Pr. DJERIOUI Ali	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Examineur
Mr. YAHIAOUI Slimane	SPE de M'sila	Invité

Année universitaire : 2023 / 2024

Remerciements

Nous remercions avant tout Allah, Tout-Puissant, de nous avoir donné la force et la volonté d'accomplir ce travail.

Nous adressons notre profonde gratitude à notre encadreur de ce mémoire, Dr. BELKHIRI Salah, pour sa patience, sa disponibilité, et surtout ses judicieux conseils, qui ont grandement contribué à enrichir notre réflexion.

Nous exprimons également nos sincères remerciements à tous les membres du jury pour avoir accepté de juger nos travaux.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À mes parents, pour leur encouragement et leur foi en moi

À mes frères et à ma famille

*À tous mes amis À tous ceux qui ont été la raison de notre
succès de près ou de loin*

À toute de la promotion de génie électromécanique de 2024.

Talal

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À ma mère qui m'a toujours soutenu et encouragé à réaliser mes ambitions.

A mon père qui est ma source de sécurité et de fierté.

A mes deux frères qui sont mon soutien dans ma vie.

À toute ma famille

À tous mes amis

Et à toute la promotion de génie électrique 2024.

Dounia

ملخص

أدى إدخال مواد فائقة التوصيل BSCCO و HTC YBCO في مجال الهندسة الكهربائية، وتحديدًا في تصميم المحولات، إلى إحياء اهتمام الباحثين إلى حد كبير في السنوات الأخيرة. تتمثل الظاهرة في استبدال اللفات النحاسية بملفات فائقة التوصيل، مما يسمح بزيادة الكفاءة بفضل كثافة التيار العالية للسلك واختفاء المقاومة الكهربائية. إن الكفاءة العالية لهذه المحولات تجعلها تطبيقًا مثيّرًا للاهتمام للأنظمة المدمجة. الهدف الرئيسي من رسالتنا هو المساهمة في تقديم دراسة مقارنة بين نوعين من المحولات؛ الأول هو المحول التقليدي، والثاني فائق التوصيل تمامًا. يتم عرض نتائج المحاكاة على نطاق واسع لمعرفة سلوك هذه المحولات. استنادًا إلى طريقة العناصر المحدودة MATLAB/PDETOOL الثلاثة، باستخدام برنامج

Résumé

L'introduction des matériaux supraconducteurs HTC YBCO et bscco dans le domaine de l'électrotechnique, en particulier dans la conception des transformateurs, a considérablement ravivé l'intérêt des chercheurs ces dernières années. Le phénomène consiste à remplacer les enroulements en cuivre par des enroulements supraconducteurs, ce qui permet d'augmenter le rendement grâce à la densité de courant élevée du fil et à la disparition de la résistance électrique. Le rendement élevé de ces convertisseurs en fait une application intéressante pour les systèmes embarqués. L'objectif principal de notre thèse est de contribuer à la présentation d'une étude comparative de deux types de transformateurs ; Le premier est un transformateur conventionnel, et le second est partiellement supraconducteur. Les résultats de simulation sont largement affichés pour connaître le comportement de ces trois convertisseurs, en utilisant le programme MATLAB/PDETOOL basé sur la méthode des éléments finis.

Mots clés : Supraconducteurs HTC, Champs magnétiques, Transformateur, Bobine, PDETOOL / MATLAB.

Abstract

The introduction of superconducting materials HTC YBCO and bscco in the field of electrical engineering, in particular in the design of transformers, has significantly revived the interest of researchers in recent years. The phenomenon consists in replacing the copper windings by superconducting windings, which makes it possible to increase the efficiency thanks to the high current density of the wire and the disappearance of the electrical resistance. The high efficiency of these converters makes them an interesting application for embedded systems. The main objective of our thesis is to contribute to the presentation of a comparative study of two types of transformers; the first is a conventional transformer, and the second is partially superconducting. The simulation results are widely displayed to know the behavior of these three converters, using the MATLAB/PDETOOL program based on the finite element method.

Keywords: HTC Superconductors, Magnetic Fields, Transformer, Coil, PDETOOL / MATLAB.

TABLE DES MATIERES

Remerciements

Dédicace

Résumé

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles et abréviations

Introduction générale..... 1

CHAPITRE I : Généralités sur les matériaux supraconducteurs

I.1. Introduction.....3

I.2. Historie3

I.3. Propriétés des supraconducteurs.....5

I.3.1. Résistivité électrique nulle.....5

I.3.2. Effet Meissner6

I.3.3. La Surface critique8

I.3.4. Théorie BCS.....9

I.3.5. Température Critique10

I.3.6. Champ Magnétique Critique11

I.3.7. Densité de courant critique $J_c(H,T)$12

I.4. Types des supraconducteurs13

I.4.1. Supraconducteurs de type I13

I.4.2. Supraconducteurs de type II.....	14
I.5. Matériaux supraconducteurs selon leur température	15
I.5.1. Supraconducteurs à basse température critique (SBTC)	15
I.5.2. Supraconducteurs à haute température critique (SHTC)	16
I.6. Types des Supraconducteurs à haute température critique	18
I.6.1.Supraconducteurs BSCCO	19
I.6.2.Supraconducteurs YBCO	22
I.7.Principales applications des supraconducteurs.....	23
I.7.1.Machines tournantes	23
I.7.2.Les aimants permanents supraconducteurs	24
I.7.3.Les transformateurs	24
I.7.4.Limitation de courant.....	24
I.7.5.Câble de transport.....	25
I.7.6.Stockage d'énergie.....	26
I.8. Conclusion	27

CHAPITRE II : Modélisation des matériaux supraconducteurs

II.1. Introduction	28
II.2. Etat de l'art	28
II.3. Equation mathématique régissent le phénomène	29
II.3.1 Relation B(H).	29
II.3.2 Relation E(J).....	29
II.4 Les modèle de comportement.....	30

II.4.1	Modèle de l'état critique ou le modèle de Bean	30
II.4.2.	Le modèle de la loi de puissance	31
II.4.3.	Modèle de KIM	32
II.4.4.	Le modèle exponentiel	32
II.4.5.	Modèle de Flux Flow et Flux Creepe	32
II.5.	Formulation des équations électromagnétiques.....	34
II.5.1.	Modèle électrostatique.....	34
II.5.2.	Modèle magnétostatique.....	34
II.5.3.	Modèle magnétostatique scalaire	35
II.5.4.	Modèle magnétostatique vectorielle.....	35
II.5.6.	Modèle magnétodynamique	35
II.2.	Conclusion	37
 CHAPITRE III : Application et résultats de simulation 		
III.1.	Introduction	39
III.2.	Définition de transformateur	39
III.3.	Historique de transformateur	40
III.4.	Principe de fonctionnement	42
III.5.	Constitution de transformateur	42
III.6.	Caractéristiques d'un transformateur	44
III.6.1.	Puissance assignée (kVA)	44
III.6.2.	Fréquence (Hz)	44
III.6.3.	Tension primaire et secondaire.....	44
III.6.4.	Courant primaire et secondaire	44

III.6.5. Rapport de transformation	44
III.6.6. Circuit magnétique.....	44
III.6.7. Refroidissement	44
III.6.8. Normes	45
III.6.9. Applications	45
III.6.10. Technologies.....	45
III.7. Le transformateur supraconducteur	48
III.8. Présentation du modèle proposé	46
III.8.1. Paramètres de la géométrie étudiée.....	47
III.8.2. Description géométrique	47
III.9. Différents résultats de simulation	59
III.10. Interprétations des résultats.....	52
III.11. Conclusion.....	54
Conclusion générale	56

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1: Température critique de certains matériaux supraconducteurs en fonction de leur année de découverte	5
Figure I.2: Évolution de la résistivité en fonction de la température	6
Figure I.3 : Illustrant l'effet de Meissner et la différence entre un supraconducteur et un conducteur parfait	7
Figure I.4 : Surface critique des matériaux supraconducteurs	8
Figure I.5 : Illustrant 3 surfaces critiques d'un supraconducteur ($Sc1, Sc2$ et $Sc3$) Entre ces surfaces, la supraconductivité apparaît sous différentes formes.....	9
Figure I.6 : La formation d'une paire de cuivre : un électron qui passe attire les ions chargés positivement du treillis, provoquant une légère ondulation dans son sillage autre électron passant à l'opposé direction est attiré par ce déplacement	10
Figure I.7: Résistance du mercure en fonction de la température	11
Figure I.8: Représentation les types de la supraconductivité en fonction du champ.....	12
Figure I.9: Dépendance du champ magnétique en fonction de la température	13
Figure I.10 : Diagramme de phase d'un supraconducteur de type I et la caractéristique $B(H)$	14
Figure I.11: Diagramme de phase d'un supraconducteur de type II et la caractéristique $B(H)$	15
Figure I.12: (a) fil de NbTi finalisé, (b) montage des barreaux avant tréfilage, (c) fil Nb ₃ Sn avant traitement thermique	16
Figure I.13: Fils supraconducteurs HTC.....	17
Figure I.14: Cellule unitaire de Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _x et présentation schématique de la Technique OPIT. Chaleur intermédiaire et finale le traitement n'est pas indiqué	20
Figure I.15: Structure cristallographique de Bi ₂ Sr ₂ CaCu ₂ O ₈	21
Figure I.16: Variation de la température critique en fonction de d dans Bi ₂ Sr ₂ CaCu ₂ O _{7+d}	21
Figure I.17: Structure cristallographique d'YBa ₂ Cu ₃ O _y	22
Figure I.18: Variation de la température critique en fonction de (7-d) dans YBa ₂ Cu ₃ O _{7-d}	23
Figure I.19: Représentation schématique d'un câble triphasé en supraconducteur à haute Température critique (SHTC) refroidi à l'azote liquide (LN ₂)	25

Figure I.20: Schéma de principe d'une bobine supraconductrice couplée à un réseau électrique par l'intermédiaire d'un convertisseur ; R_{sh} est la résistance de protection ; R_{ch} et V_{ch} forment le circuit de chauffage du shunt supraconducteur..... 26

Figure I.21: Conducteur formé de 4 rubans supraconducteurs isolés les uns des autres 26

Chapitre II

Figure II. 1: Caractéristique $B(H)$ d'un supraconducteur 29

Figure II. 2: Caractéristique $E(J)$ d'un supraconducteur 30

Figure II. 3: Caractéristique $E(J)$ basée sur le Modèle de Bean..... 31

Figure II. 4: Modèle de Flux Flow et Creep 33

Chapitre III

Figure.III.1 : schéma d'un transformateur..... 40

Figure.III.2: post 60/30 KV a Bousaâda 41

Figure.III.3 : constitution de transformateur..... 43

Figure.III.4 : Schéma des caractéristiques détaillées du transformateur. 45

Figure.III.5 : Création de la géométrie..... 48

Figure.III.6 : Localités des bobines du secondaire et du primaire 48

Figure.III.7 : Allure du maillage du noyau généré par la MEF..... 49

Figure.III.8 : Allure du flux magnétique..... 49

Figure.III.9 : la répartition de l'induction magnétique..... 50

Figure.III.10 : Allure de la température..... 50

Figure.III.11 : Allure de gradient de température.....51

Figure.III.12 : Allure de densité de courant.....51

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Supraconducteurs à Basse Température (SBTC)	16
Tableau I.2 : Supraconducteurs à Haute Température critique (HTC)	18
Tableau 1.3 : Paramètres critiques des supraconducteurs HTS pour les applications de puissance	18

Chapitre III

Tableau III.1 : Paramètres de la géométrie étudiée	47
---	-----------

Liste des symboles et abréviations

J_c	Densité de courant critique	[A/m²]
T_c	Température critique	[K]
H_c	Champ magnétique critique	[A/m]
B	Induction magnétique	[T]
μ₀	Perméabilité magnétique a vide	[H/m]
H	Champ magnétique	[A/m]
E	Champ électrique	[V/m]
B	Induction magnétique	[T]
D	Induction électrique	[C/m²]
ρ	Densité volumique des charges électriques	[C/m³]
LTS	Low Temperature Superconductors	
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage	
BTC	Base température critique	
HTC	Haute température critique	
TAFF	Le thermally activated flux-flow	
S	Puissance apparente	[kVa]
f	Fréquence d'alimentation	[Hz]
V_{pri}	Tension Primaire	[V]
V_{sec}	Tension secondaire	[V]
I_{pri}	Courant primaire	[A]
I_{sec}	Courant secondaire	[A]
T	Température ambiante	[K]
T	Température maximale	[K]
h	Coefficient. convection	

Introduction Générale

Introduction générale

L'aventure des Supraconducteurs à Haute Température Critique (SHTc) a débuté en 1986, quand G. BEDNORZ et K. A. MULLER ont découvert le premier matériau supraconducteur HTc à une température de 30K. Depuis cette découverte, la valeur de la température critique a été sans cesse augmentée. [1].

Les transformateurs sont parmi les appareillages électriques les plus utilisés dans les réseaux d'énergie électrique. Ils permettent d'augmenter le niveau de tension pour le transport de l'énergie sur de grande distance, mais aussi, de réduire celui-ci à différents niveaux pour la distribution aux clients industriels et résidentiels. Un bon rendement des transformateurs est donc primordial, surtout pour les très fortes puissances, qui peuvent atteindre plusieurs centaines de MVA. Les transformateurs conventionnels avec des enroulements en cuivre ou aluminium génèrent des pertes d'origines non seulement électriques (pertes Joule) mais aussi magnétique. L'utilisation de supraconducteurs pour les bobines permettrait, grâce aux propriétés intrinsèques du matériau, de réduire fortement les pertes du fait de l'absence de résistance au passage du courant électrique, l'impact environnemental est donc réduit avec l'amélioration du rendement. [2-7].

La supraconductivité est la zone limitée par trois grandeurs qui définissent une surface critique caractérisée par l'apparition d'un champ électrique, la température critique (T_c), la densité de courant critique (J_c) et le champ magnétique irréversible (H) qui sont des grandeurs intrinsèques dans une substance. Les matériaux supraconducteurs à haute température ont d'excellentes propriétés critiques de courant et mécaniques qui en font des matériaux appropriés pour les applications à champ magnétique élevé. Ainsi, de nombreuses études sont menées pour appliquer des bobines à champ magnétique élevé constituées des diverses applications électriques telles que les moteurs et générateurs supraconducteurs, les aimants supraconducteurs, câbles de transport, le stockage d'énergie et les limiteurs de courant de défaut, et dans les transformateurs qui est le sujet de notre thème.

L'objectif principal de ce mémoire sera d'étudier et de modéliser un transformateur supraconducteur à l'aide d'un logiciel de simulation et de comparer et d'analyser les résultats obtenus avec ceux d'un transformateur conventionnel, où nous remplacerons les matériaux classique par des matériaux supraconducteur dans le bobines et discuterons les résultats obtenus. Pour cela on a organisé notre travail comme suit :

- ✓ Dans le premier chapitre, nous fournirons des informations générales et détaillées sur les matériaux supraconducteurs afin de donner des idées sur le matériau utilisé dans notre étude. Nous présenterons également un bref historique et les propriétés les plus importantes qui caractérisent ses types, à savoir HTC **YBCO**, **BSCCO** et certaines de ses applications dans le domaine industriel.
- ✓ Dans le deuxième chapitre, nous présenterons la modélisation des Matériaux supraconducteurs et les équations mathématiques qui régissent ce phénomène physiques dans les supraconducteurs, ces modèles de comportement utilisant des formulations à base des équations électromagnétiques, qui sont utilisés pour l'étude et l'analyse des différents phénomènes a travers les logiciels de simulation.
- ✓ L'objectif du dernier chapitre est très descriptif et concerne la modélisation du prototype de transformateur supraconducteur à l'aide d'un logiciel de simulation; MATLAB, où nous allons d'abord étudier le transformateur avec ses caractéristiques classiques puis on a remplacé les bobines en cuivre, par des enroulements supraconducteurs pourrait permettre d'accéder à de nombreux avantages. Afin d'étudier et d'analyser la différence entre les deux structures proposées au terme des performances, nous allons montrer l'importance de l'introduction des matériaux HTC sur les transformateurs conventionnels plus particulièrement sur ses fonctionnalités qu'ils ajoutent et l'étendue de leurs possibilités d'application.

Enfin, nous clôturerons notre travail par une conclusion générale résumant le contenu de cette approche à travers ce mémoire et on terminera enfin, par quelques perspectives envisagées.

CHAPITRE I
Généralités
Sur
Les
Matériaux
Supraconducteurs

I.1 Introduction :

Le terme "supraconductivité" provient de la propriété de certains matériaux de présenter une résistivité non mesurable ($<10^{-25} \Omega.m$). Ce phénomène a été proposé par Kamerlingh Onnes en 1911 lorsqu'il découvrit que, pour certains matériaux, la résistance diminuait avec la température et chutait soudainement à une certaine température critique, notée T_c . Il désigna cet état comme étant supraconducteur, par opposition à un état normal, et les matériaux présentant ce comportement furent appelés supraconducteurs.

Les supraconducteurs sont des matériaux capables de conduire l'électricité sans résistance et d'expulser les champs magnétiques de leur intérieur. Tout matériau possédant ces propriétés est qualifié de supraconducteur. Contrairement aux conducteurs classiques comme le cuivre ou l'acier, un supraconducteur peut transporter du courant indéfiniment sans perte d'énergie.

Les supraconducteurs occupent une place importante dans la recherche actuelle en électrotechnique, promettant des avancées considérables que de nombreux chercheurs tentent d'exploiter. En effet, deux propriétés majeures de ces matériaux, le diamagnétisme et la capacité de transporter des courants élevés sous de forts champs magnétiques, permettent d'envisager une évolution significative des systèmes électrotechniques.

Ce chapitre est consacré à la présentation de l'histoire et de la découverte des matériaux supraconducteurs. Nous y exposerons les propriétés et les types de matériaux supraconducteurs, ainsi que leurs différentes formes industrielles et applications.

I.2. Histoire :

L'histoire de la supraconductivité a commencé en 1911 dans les laboratoires de l'Université de Leiden aux Pays-Bas. Le physicien néerlandais Kamerlingh Onnes, qui a réussi à réduire les températures en dessous de 4 Kelvin grâce à l'hélium liquéfié, a décidé de tester différents conducteurs électriques à des températures extrêmement basses. Avec l'aide de G. Holtz, il s'est rendu compte que la résistance du mercure devient soudainement démesurée lorsque la température descend en dessous de 4 K, température à laquelle le matériau devient normal.

En 1933, Walter Meissner et Robert Ochsenfeld découvrent une seconde propriété de ce matériau supraconducteur : le diamagnétisme. Tant que le champ reste en dessous du champ critique, le champ est complètement exclu. Cependant, ce phénomène ne peut être observé qu'à des valeurs de champ magnétique très faibles [7].

En 1950, la théorie de Ginzburg-Landau a expliqué les propriétés macroscopiques des supraconducteurs. Le russe Vitaly L. Ginzburg et son compatriote Lev Davidovitch Landau ont proposé deux types de supraconducteurs [7].

En 1957, John Bardeen, Leon N. Cooper et John Schrieffer (trois lauréats du prix Nobel de physique 1972) ont publié une théorie microscopique (BCS) pour expliquer la supraconductivité. Cette théorie explique qu'à très basse température, les électrons s'apparient, s'apparient d'une certaine manière. On dit qu'ils forment des paires de Cooper. Selon cette théorie, le mécanisme supraconducteur ne peut pas atteindre une température critique supérieure à environ 30 Kelvin (au-delà de laquelle les perturbations thermiques détruisent les paires). Pour cette raison, en 1986, Johannes Georg Bednorz et Karl Alexander Müller ont découvert que les oxydes synthétiques de cuivre, de lanthane et de baryum étaient supraconducteurs à une température critique de 35 K, supérieure à toute température critique connue.

Il a eu un impact considérable jusqu'à présent. Cette découverte a ensuite relancé les recherches dans le domaine, et en 1998 le phénomène a été démontré jusqu'à 164 K [8].

Depuis, les recherches sur ces matériaux céramiques ne se sont pas arrêtées, et des matériaux tels que BSCCO ou YBCO avec une température critique proche de 115K ont permis de concevoir et d'appliquer de l'azote liquide.

En 2001, un nouveau supraconducteur, le diborure de magnésium (MgB_2), a attiré l'attention. De par sa structure et le procédé de fabrication PIT (poudre en tube), ce supraconducteur se situe entre ceux à basse température critique et à haute température critique, avec l'avantage de fournir des fils faciles à réaliser. Elle permet d'envisager des applications à des températures autour de 20K, qui ont des propriétés intéressantes (matériel médical, moteurs électriques, transformateurs, etc.) [9].

Malgré un siècle de découvertes importantes en supraconductivité, de nombreuses interrogations subsistent sur les phénomènes mis en jeu dans les matériaux à hautes températures critiques. L'évolution de la température critique d'un matériau supraconducteur avec le temps est représentée sur la figure. I.1

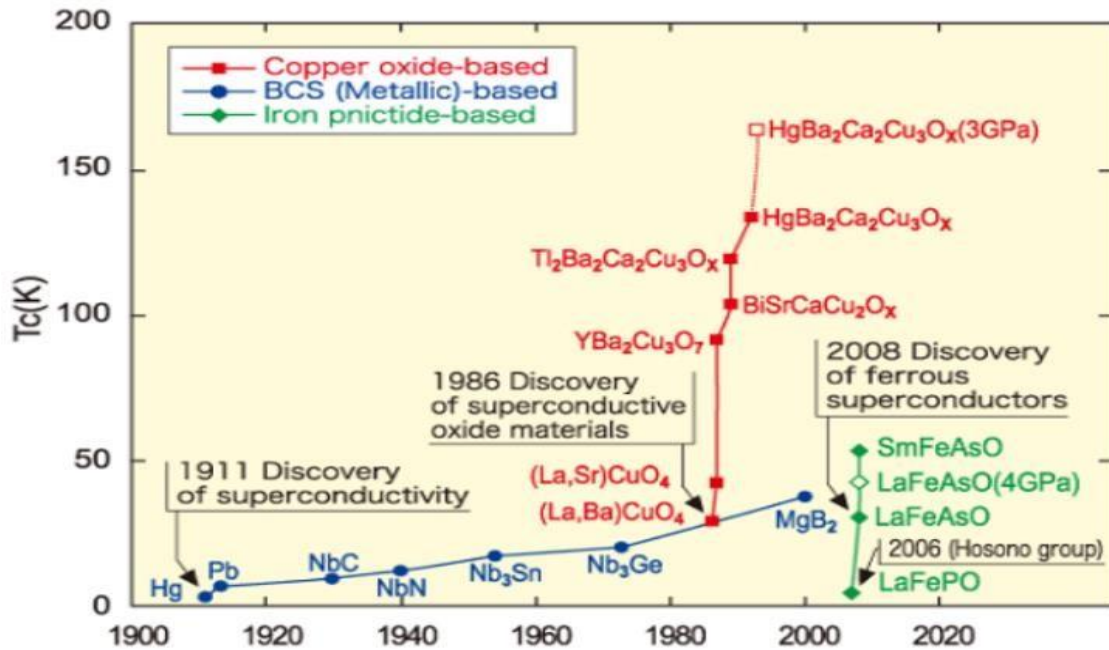
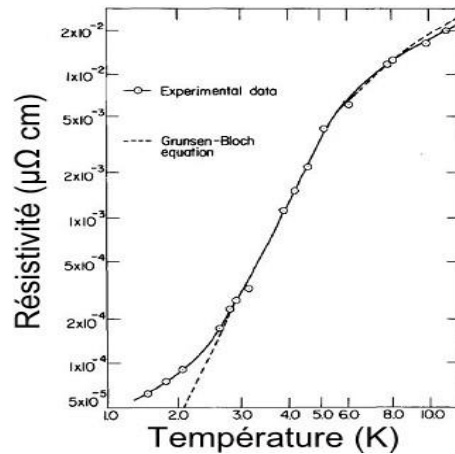
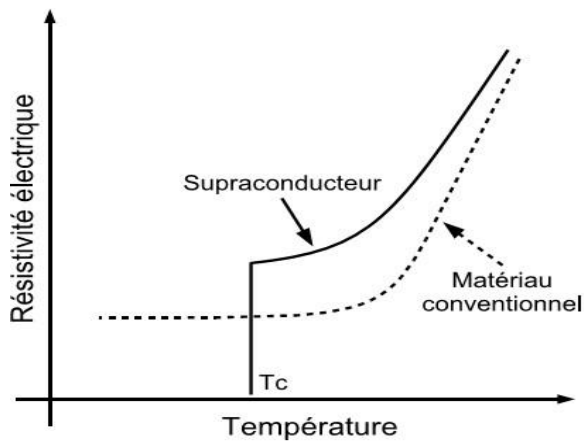


Figure I.1: Température critique de certains matériaux supraconducteurs en fonction de leur année de découverte [6].

I.3. Propriétés des supraconducteurs :

I.3.1. Résistivité électrique nulle :

La résistance électrique nulle et l'effet Meissner sont les deux caractéristiques de la supraconductivité. La propriété principale d'un matériau supraconducteur est sa résistance nulle, sous une température bien définie appelée température critique T_c . Ainsi, la température spécifique sépare le comportement à l'état normal de la matière de l'état supraconducteur. Cela indique que l'état de supraconducteur est un nouvel état de la matière, c'est-à-dire un état qui correspond à une disposition spécifique du système électronique. On peut donc dire que le transit de température critique correspond à la transition de phase [10-11].



a) Pour un matériau conventionnel et supra [11]

b) Pour un fil de mercure [11]

($T_c = 4.2 \text{ K}$)

Figure I.2: Évolution de la résistivité en fonction de la température

I.3.2. Effet Meissner :

Un conducteur idéal $R=0$ signifie que l'induction magnétique dans le matériau ne peut pas changer $dB/dt=0$. De plus, lorsqu'un conducteur idéal est refroidi en dessous de T_c sous un champ nul à température ambiante puis soumis à un champ magnétique, un courant de blindage sera induit à l'intérieur du matériau pour maintenir $B = 0$. Au contraire, le champ magnétique externe subi par un conducteur idéal est réduit à zéro. dB/dt doit être conservé et va induire un courant de capture pour capter l'induction magnétique à l'intérieur, (Figure. I.3)

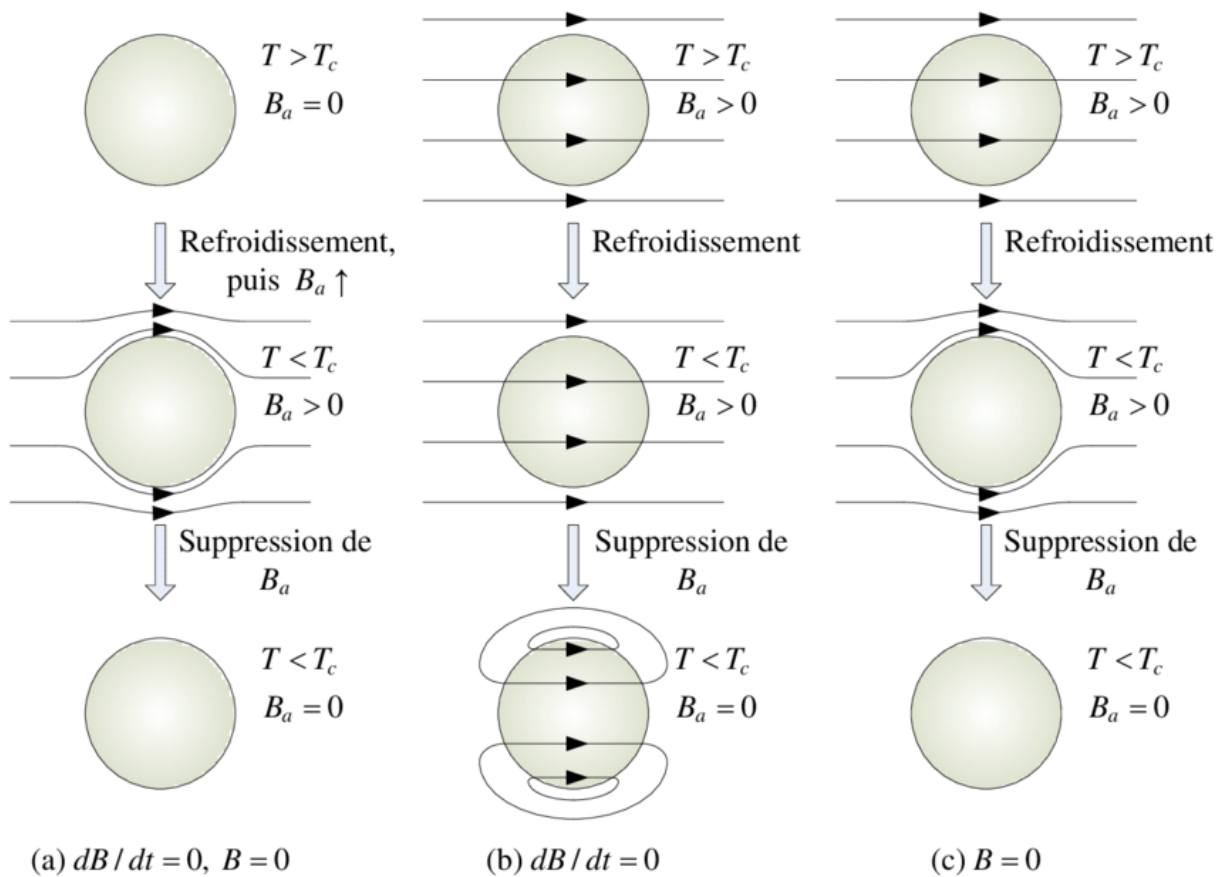


Figure I.3 : Illustrant l'effet de Meissner et la différence entre un supraconducteur et un conducteur parfait.

1. Le champ magnétique externe est supprimé. L'induction magnétique reste nulle dans le supraconducteur. S'il n'existe aucun champ magnétique extérieur $B_a = 0$ avant que le matériau soit refroidi chaque matériau possède un flux magnétique interne nul en dessous de T_c .
2. Un conducteur parfait piège le flux magnétique appliqué avant refroidissement

$$B = \text{cts} \Rightarrow dB/dt = 0 \tag{I.1}$$

3. Le flux magnétique est toujours exclu par les supraconducteurs en dessous de T_c , qu'un champ magnétique $B = 0$ soit appliqué ou non avant le refroidissement. Le cas des supraconducteurs est différent :

□ Dans le premier cas, conducteurs idéaux et supraconducteurs se comportent de la même manière lorsqu'un champ magnétique est appliqué après refroidissement, puisque l'induction magnétique dans le matériau est toujours nulle (Fig. I.3(a)).

□ Dans le second cas, une fois que le supraconducteur $B = 0$ refroidit en dessous de sa température critique, l'induction magnétique est évacuée de l'intérieur du supraconducteur, voir (Fig. I.3(c)). Ce comportement est connu sous le nom d'effet Meissner : c'est l'expulsion de toute induction magnétique de l'intérieur du supraconducteur. Le diamagnétisme parfait est une propriété inhérente aux supraconducteurs, mais ne fonctionne que lorsque la température et le champ magnétique sont inférieurs à leurs valeurs critiques $T < T_c$, H en tout point.

I.3.3. La surface critique :

La supraconductivité ne se manifeste que lorsque $T < T_c$, $H < H_c$, et $J < J_c$. D'autre part, les valeurs critiques : T_c , H_c et J_c dépendent des deux autres paramètres. Nous devons donc définir une surface critique (Fig.I.4) en dessous de laquelle le matériau est à l'état supraconducteur et au contraire au-dessus, il est à l'état normal.

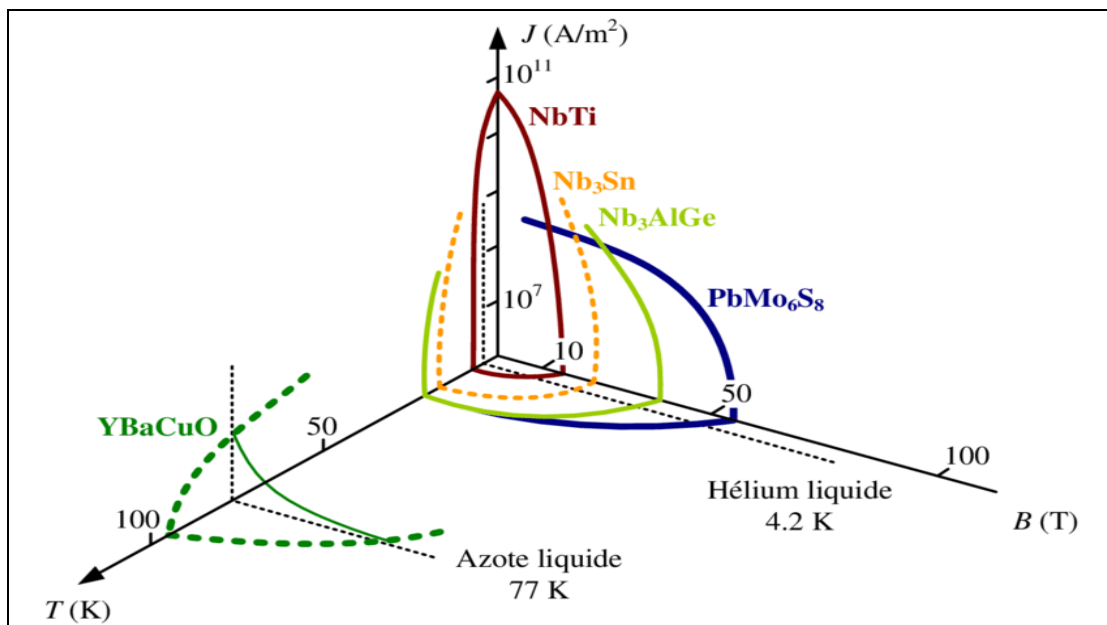


Figure I.4: Surface critique des matériaux supraconducteurs. [12]

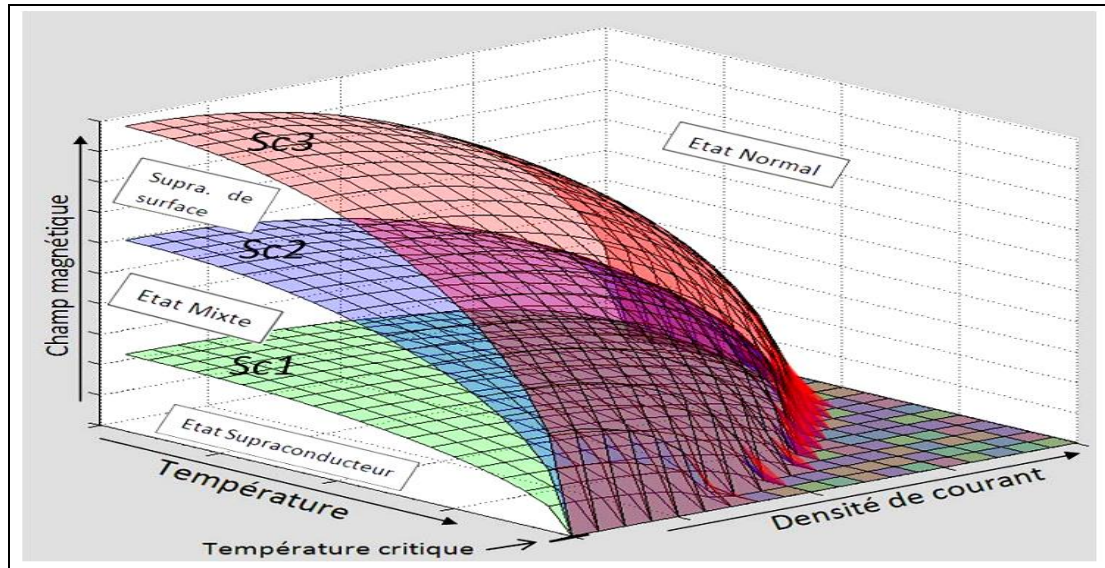


Figure I.5: Illustrant 3 surfaces critiques d'un supraconducteur ($Sc1$, $Sc2$ et $Sc3$). Entre ces surfaces, la supraconductivité apparaît sous différentes formes. [10]

Les surfaces critiques ne sont que le prolongement dans la troisième dimension des lignes critiques. Ainsi, ils définissent les mêmes états de supraconductivité. [10]

I.3.4. Théorie BCS :

La première théorie microscopique de la supraconductivité, maintenant connue sous le nom de théorie BCS, a été proposée en 1957 par John Bardeen, Leon Cooper et Robert Schrieffer. Un élément conceptuel clé de la théorie est que les électrons proches du niveau de Fermi se couplent en paires de Cooper qui interagissent avec le réseau. L'image ressemble essentiellement à ceci, comme le montre la figure 1.6 : Un électron se déplaçant à travers un conducteur attire les charges positives à proximité dans le réseau. Cette distorsion du réseau amène un autre électron avec l'impulsion et le spin opposés à se déplacer vers une région de densité de charge positive plus élevée. Il semble qu'un électron attire un autre électron par vibration du réseau, ce qui peut surmonter la répulsion coulombienne, puis les deux électrons se lient l'un à l'autre. Les célibataires ne restent pas bloqués pour toujours. Ils sont constamment cassés et réparés. Il n'y a aucun moyen d'identifier les électrons individuels, donc au lieu de les voir comme des paires changeant dynamiquement, ils sont considérés comme un appariement permanent. Les paires d'électrons peuvent se comporter très

différemment des électrons uniques en tant que fermions et doivent obéir au principe d'exclusion de Pauli. Les paires d'électrons, comme les bosons, peuvent se condenser au même niveau d'énergie. Il existe de nombreuses paires d'électrons dans un supraconducteur, elles se chevauchent donc fortement, formant un "condensateur" très collectif. L'énergie du condensateur à travers l'espace est fortement séparée du premier état excité [13]

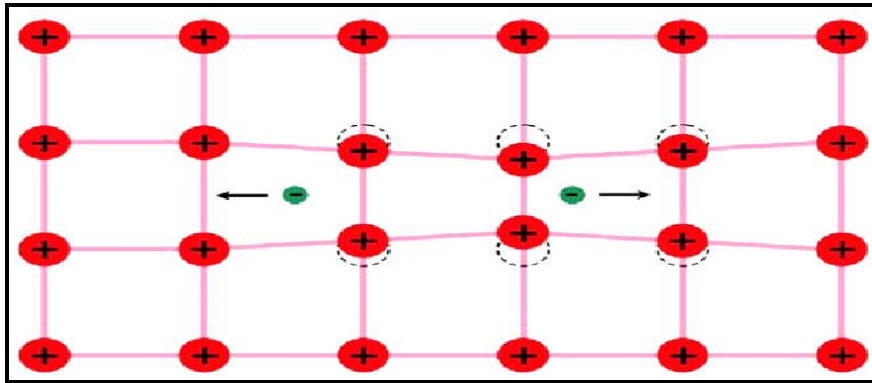


Figure I.6: La formation d'une paire de cuivre : un électron qui passe attire les ions chargés positivement du treillis, provoquant une légère ondulation dans son sillage. Un autre électron passant à l'opposé direction est attiré par ce déplacement. [13]

Théorie BCS D'après l'effet isotopique que nous observons dans les matériaux supraconducteurs, la température critique est inversement proportionnelle à la masse de l'isotope utilisé dans le matériau, et l'effet isotopique a été observé dans un grand nombre de supraconducteurs. Les deux prédictions les plus importantes de la théorie BCS concernent la température de transition supraconductrice T_c et le gap : dans la limite de couplage faible. [13]

I.3.5. Température critique :

La température critique est la température à laquelle la résistance commence à tomber à zéro à laquelle un matériau devient supraconducteur. La supraconductivité se caractérise par une résistance électrique nulle en dessous d'une certaine température appelée « température critique T_c ». Autrement dit, c'est aussi la propriété des matériaux de perdre en résistivité sous certaines conditions de température, de champ magnétique et de courant électrique. Par conséquent, le courant électrique circule dans le matériau supraconducteur sans aucune perte d'énergie. Par conséquent, tant que le courant est maintenu en dessous de sa température

critique, le courant peut circuler indéfiniment dans un circuit supraconducteur [14]. image. I.7 illustre la variation de la chute de résistance d'un supraconducteur (mercure) avec la température.

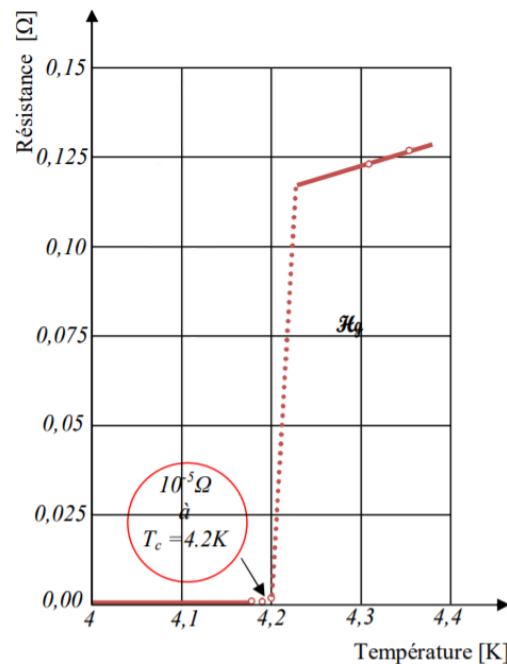


Figure I.7: Résistance du mercure en fonction de la température.

I.3.6. Champ magnétique critique :

L'intensité du champ magnétique est également une condition d'existence de la supraconductivité. Au-delà d'une certaine valeur de champ magnétique, le supraconducteur passe à l'état normal et perd ses propriétés supraconductrices. On distingue alors deux types de supraconducteurs : Les supraconducteurs de type I et de type II. Le supraconducteur de type I est caractérisé par une valeur de champ magnétique critique H_c en dessous duquel il devient supraconducteur et expulse intégralement les champs magnétiques de l'intérieur du matériau (diamagnétique parfait) c'est l'effet Meissner. Au-delà de cette valeur ce matériau passe à l'état normal. Les supraconducteurs de type II possèdent, quant à eux, deux champs critiques H_{c1} et H_{c2} [15].

L'induction magnétique à l'intérieur du matériau est donnée par la relation suivante :

$$B = \mu_0(H + M) \tag{I.2}$$

μ_0 : La perméabilité magnétique du vide.

H: le champ magnétique à l'intérieur du matériau.

M: l'aimantation.

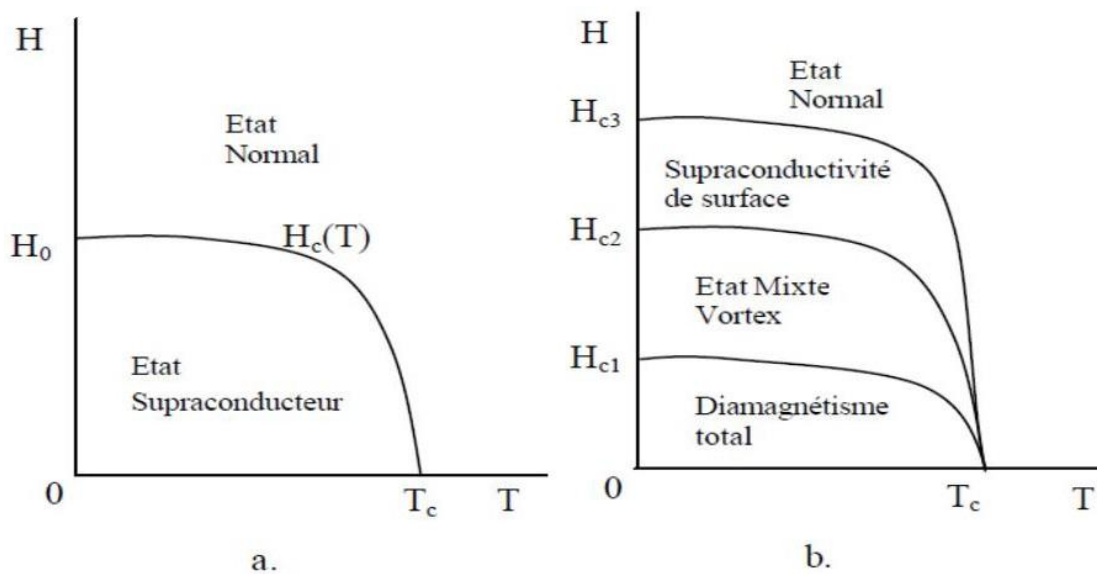


Figure I.8. Représentation des types de la supraconductivité en fonction du champ.

I.3.7. Densité de courant critique $J_c(H, T)$:

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

° Pour les supraconducteurs de type I, la répartition du courant n'est pas homogène. Le courant de transport circule uniquement à la surface, dans l'épaisseur de pénétration de London.

° Pour les supraconducteurs de type II la densité de courant critique est fortement dépendante de l'induction B donc de la présence de vortex dans la structure du matériau. Pour une induction transverse, dans l'état mixte, un supraconducteur idéal présente une densité de courant nulle. Le courant de transport réagit avec les vortex et ceux-ci se déplacent lorsque la

force créée de Lorentz (JcB) est supérieure aux forces d'ancrage (ou de pinning), entraînant une dissipation dans le matériau. Lorsque la densité de courant dépasse une valeur critique J_c les vortex sont arrachés. C'est le régime de flux-flow (Fig.I.9) Libérés, les vortex se déplacent, un champ électrique est créé, proportionnel à $J-J_c$. Dans le régime de flux flow une résistivité dépendante de l'induction magnétique apparaît. Pour obtenir des grandes densités de courant critique les vortex doivent être solidement ancrés dans le matériau.

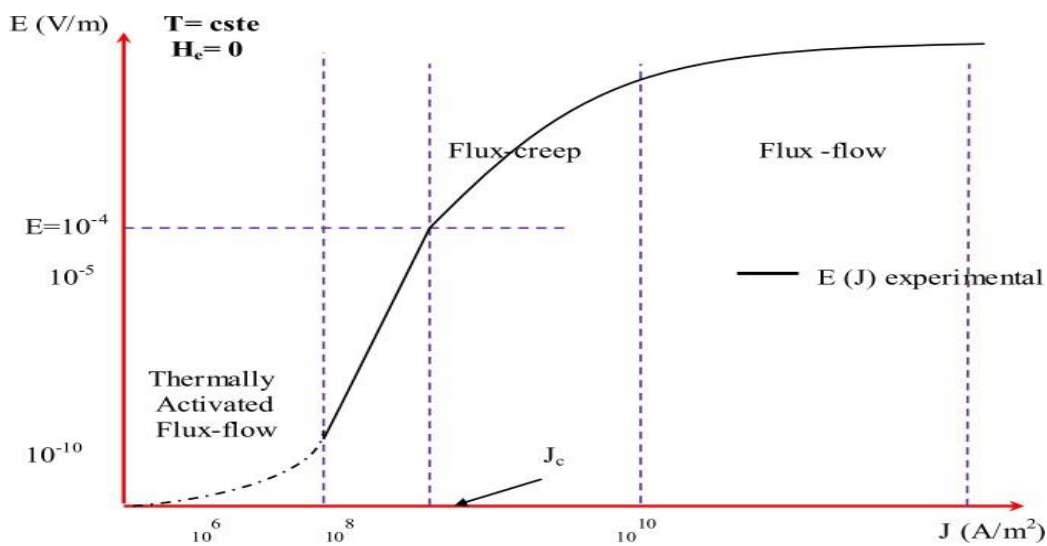


Figure I.9: Dépendance du champ magnétique en fonction de la température, [16].

I.4. Types des supraconducteurs :

Selon la valeur du champ magnétique critique H_c , on distingue deux types de matériau supraconducteur. Les matériaux supraconducteurs de type I et les matériaux supraconducteurs de type II.

I.4.1. Supraconducteurs de type I :

Les supraconducteurs type I ne possèdent qu'un seul champ critique H_c . Le champ magnétique pénètre sur une épaisseur appelée Longueur de pénétration de London dans laquelle se développent des super courants. Le comportement de ce type de

supraconducteurs est simple car il n'existe que deux états. L'état normal correspond à une valeur élevée de la résistance du matériau et l'état supraconducteur correspond à un diamagnétisme presque parfait. Les supraconducteurs de type I sont essentiellement des corps purs, comme le plomb (Pb), le mercure (Hg), l'indium (In) et l'étain (Sn). Les champs magnétiques critiques des corps purs, supraconducteurs de type I, sont relativement faible puisqu'ils ne dépassent pas 0.2 Tesla, [17] [18].

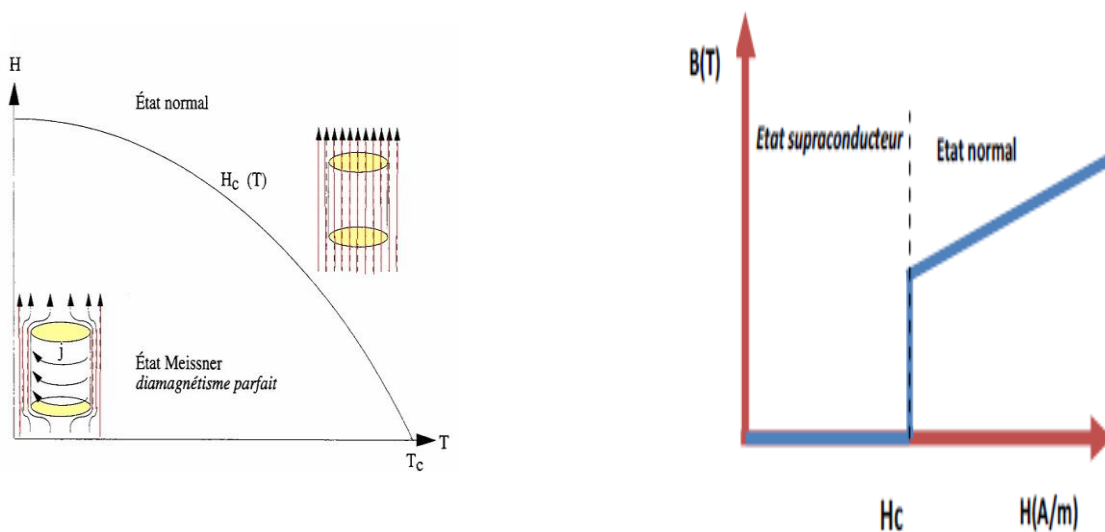


Figure I.10: a – Diagramme de phase d'un supraconducteur de type I b – la caractéristique $B(H)$

I.4.2. Supraconducteurs de type II :

Les supraconducteurs de type II ont deux seuils contrairement aux supraconducteurs de type I qui ont un seul champ magnétique critique H_c . Excepté pour les éléments Vanadium, Technétium et niobium, la catégorie des supraconducteurs de Type II est faite de composés métalliques et d'alliages. C'est dans les années 30, avec la découverte de la supraconductivité dans les alliages que la différenciation des supraconducteurs a commencé. En dessous de la température critique, l'évolution de l'induction et de l'aimantation est différente que celle observée avec les métaux purs. 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 plus appropriés à des utilisations pratiques particulier dans le domaine du génie électrique. Le comportement d'un

supraconducteur du type II en présence d'un champ magnétique est décrit sur la figure I.11. On distingue trois zones différentes :

- Zone 1 : Etat supraconducteur ou L'état Meissner, 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 partiellement par le champ extérieur sous forme de vortex.
- Zone 3 : Etat normal avec une forte résistance électrique, pour des valeurs de champ supérieures à H_{c2} .

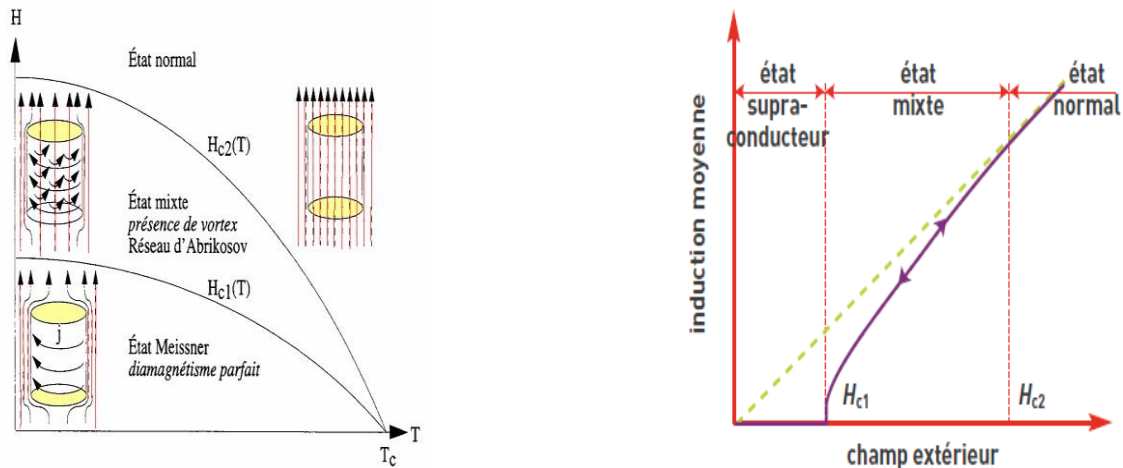


Figure I.11: a – Diagramme de phase d'un supraconducteur de type II b – la caractéristique $B(H)$

I.5. Matériaux supraconducteurs selon leur température :

I.5.1. Supraconducteurs à basse température critique (SBTC) :

Il s'agit des premiers supraconducteurs utilisés pour des applications réelles.

Appartenant aux supraconducteurs de premier type. Leur température critique est inférieure à 20K et on les utilise essentiellement avec de l'hélium liquide.

Des matériaux tels que le NbTi ou le Nb₃Sn sont majoritairement utilisés, ils présentent une grande facilité de mise en forme pour des bobines à fort champ magnétique. On les retrouve par exemple dans les appareils d'imagerie médicale. La longueur maximale de ces fils atteint plusieurs kilomètres. Les alliages métalliques ils sont assez vigoureux pour être manipulés et montrent un rayon de courbure intéressant [19].

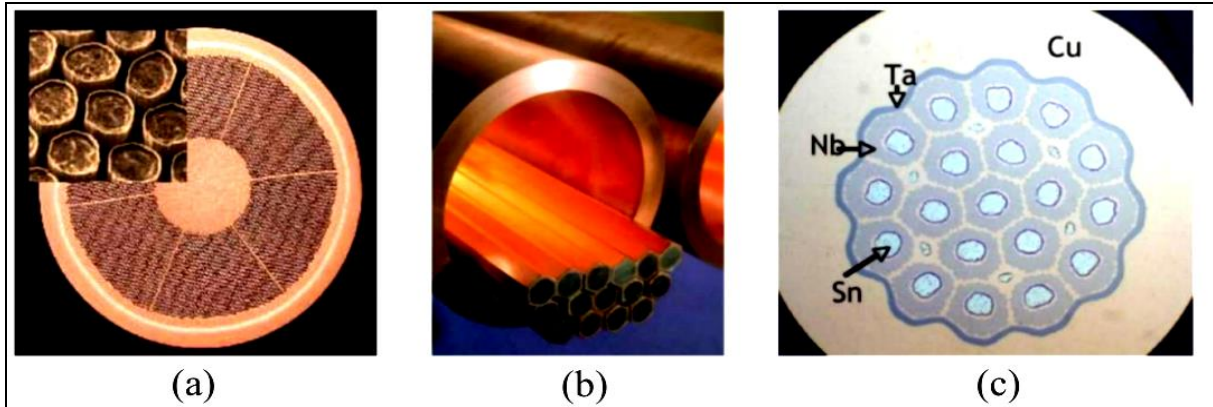


Figure I.12: (a) fil de NbTi finalisé, (b) montage des barreaux avant tréfilage, (c) fil Nb₃Sn avant traitement thermique [20].

Le tableau I.1 donne quelques exemples des matériaux supraconducteurs à basse température critique, ainsi que leur température critique

<i>Supraconducteur</i>	<i>T_c(K)</i>
Nb-Ti	9
Nb ₃ Sn	18
Nb ₃ Al	19
Nb ₃ Ga	20
Nb ₃ Ge	22

Tableau I. 1 : Supraconducteurs à Basse Température (SBTC)

I.5.2. Supraconducteurs à haute température critique (SHTC) :

La découverte des supraconducteurs à haute température critique en 1986, somnolent sur des matériaux céramiques comme le Barium et l'Yttrium. Deux catégories ressortent donc, les

BSCCO et YBCO. La première cité a une structure de type PIT (Powder In Tube), ce qui en fait un fil robuste et pouvant facilement composer des bobines pour des applications comme les moteurs électriques, une longueur maximale de câble de 1000m est atteinte actuellement. Le second, de structure multicouche de matériaux cuits et recuits, a des caractéristiques qui permettent d'envisager une utilisation à une densité de courant et un champ magnétique plus important, il peut atteindre actuellement près de 500m. Il trouve une utilisation avantageuse dans le domaine des lignes de transport.

On parle ici essentiellement de fil supraconducteur, des longueurs maximales disponibles ainsi que de la possibilité de les mettre sous forme de bobine. Les recherches actuelles sur ces matériaux sont principalement dédiées à l'YBCO. On doit également considérer le cas des matériaux massifs réalisés avec des mono domaines, ils peuvent permettre de s'opposer à des flux magnétiques très élevés, pour réaliser un écran magnétique, ou de piéger du champ magnétique pour concevoir un aimant supraconducteur. Actuellement les pastilles réalisées peuvent atteindre des diamètres de 50mm, des formes rectangulaires voire même hexagonales [21] [12].

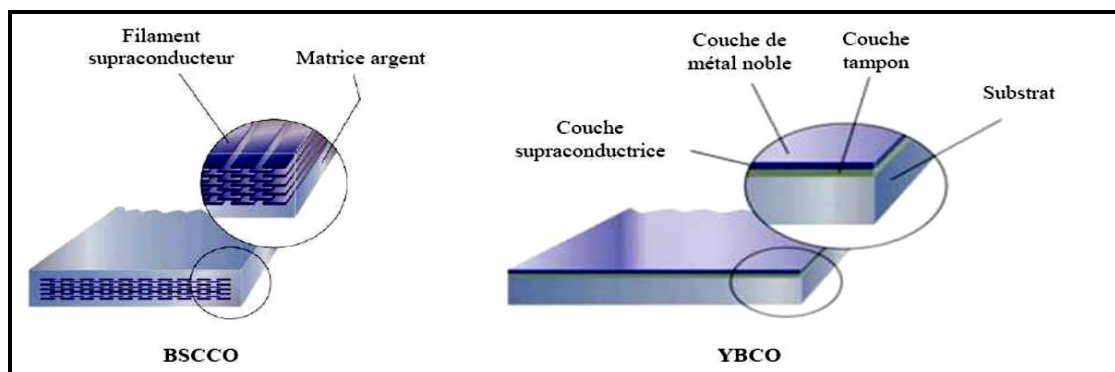


Figure I.13: Fils supraconducteurs HTC [9].

Le tableau I.2 donne quelques exemples des matériaux supraconducteurs à haute température critique, ainsi que leur température critique.

<i>Supraconducteur</i>	<i>T_c(K)</i>
La _{1.85} Ba _{0.15} CuO ₄	35
La _{1.85} Sr _{0.5} CuO ₄	40
YBa ₂ Cu ₃ O ₇	95
Bi ₂ Sr ₂ CaCu ₂ O ₈	85
Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	110
Tl ₂ Ba ₂ CaCu ₂ O ₈	108
Tl ₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₂ O ₁₀	125
HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₆₊₅	133.5

Tableau I. 2 : Supraconducteurs à Haute Température critique (HTC)

I.6. Types des Supraconducteurs à haute température critique :

Les supraconducteurs à haute température sont des composés constitués d'unités répétitives de nombreux atomes et éléments différents, que l'on peut appeler une cellule unitaire. La cellule unitaire du supraconducteur HTS-Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_x- est représentée. Ce sont de minuscules cristaux formés de trillions de cellules unitaires appelées perles. La fabrication d'échantillons macroscopiques nécessite des millions de particules. Les HTS sont des matériaux céramiques cassants, principalement des oxydes - ils sont environ 100 fois plus résistants que le cuivre à température ambiante. [22].

	YBCO	Bi-2212	Bi-2223
T_c(K)	93	78	110
B_{irr} 4.7 K (T)	>30	>30	>30
B_{irr} 77 K (T)	>5	0.005	0.5
J_c 4.7 K (A/mm²)	>100,000	5,000	3,000
J_c 77 K (A/mm²)	>10,000	100	500

Tableau I.3: Paramètres critiques des supraconducteurs HTS pour les applications de puissance [23].

Bednorz et Müller ont découvert le premier supraconducteur Tc, l'oxyde de cuivre de lanthane (La, Ba) 2CuO_4 , avec un Tc juste au-dessus de 30 K. Le matériau supraconducteur à haute température le plus élevé avec $T_C = 134$ K découvert à ce jour est $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$. Le premier supraconducteur avec $T_c > 77$ K était l'oxyde de cuivre baryum yttrium $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$, mieux connu sous le nom de YBCO ou Y-123, qui, avec les oxydes de bismuth $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ et $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$, actuellement connus sous le nom de Bi-2212 et Bi-2223 HTS, sont les plus avancés matériaux. Les deux derniers composés sont également connus sous le nom de BSCCO, qui signifie strontium bismuth et cuivre oxyde de calcium. Les tableaux 1 à 3 montrent les paramètres clés de YBCO, Bi-2212 et Bi-2223 - les plus HTS largement utilisés. [23]

I.6.1. Supraconducteur BSCCO :

Les connecteurs BSCCO constituent la base de toutes les grandes applications HTS existantes. Ils sont connus comme la première génération de pilotes. Les connecteurs BSCCO et commerciaux sont disponibles en plus grandes longueurs (jusqu'à 1 km). Les connecteurs BSCCO sont utilisés dans les applications de transmission d'aujourd'hui. Ils sont produits par le procédé OPIT (poudre d'oxyde en tube), dont un schéma simple est illustré à la figure 1. I-14. Le courant dans un conducteur BSCCO doit traverser les joints de grains, qui bloquent le flux de courant à tous les angles sauf les petits, donc une texture solide est nécessaire, mieux les grains sont alignés, plus la densité de courant critique du conducteur est élevée. Pour obtenir la texture et l'alignement des grains initialement orientés de manière aléatoire dans les poudres d'oxyde, un laminage est nécessaire dans le processus de fabrication et les supraconducteurs sont formés en fines bandes ; Généralement 2-4 mm de large et 0,2-0,4 mm d'épaisseur. Les composés HTS sont des matériaux très fragiles. Pour améliorer significativement les propriétés mécaniques des rubans, le matériau supraconducteur est placé dans un tube en Ag, qui a été choisi pour ses bonnes propriétés mécaniques et de diffusion de l'oxygène. Les bandes peuvent avoir un noyau BSCCO simple ou multi filament. [23]

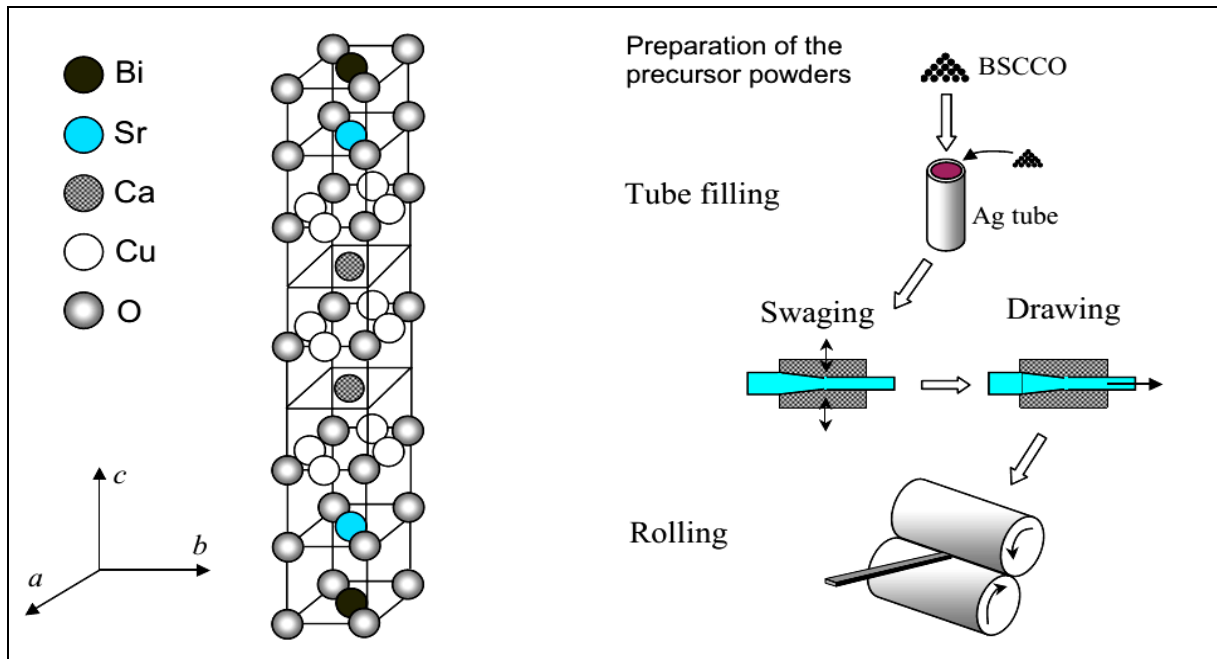


Figure I.14: Cellule unitaire de $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ et présentation schématique de la Technique OPIT. Chaleur intermédiaire et finale le traitement n'est pas indiqué. [23]

BSCCO est caractérisé par la variabilité inhérente de la structure multicouche de la cellule unitaire le long des plans a, b et c de son cristal et les propriétés anisotropes des bandes résultantes dues à la stratification pendant la fabrication. Une propriété très importante des matériaux BSCCO est le fort contraste de densité de courant critique - en appliquant un champ magnétique perpendiculaire au bord de la bande passante ($B \perp c$), J_c diminue rapidement, tandis qu'en appliquant un champ magnétique parallèle ($B \parallel a, b$), la baisse de J_c est plus douce. À des fins de modélisation, l'anisotropie de J_c dans les bandes Bi-2223 est discutée. BSCCO a une bicouche Bi-O qui est presque isolante, faisant du composé un empilement supraconducteur, isolant et supraconducteur idéal pour les applications électroniques. Le champ irréversible à 4.2K est très important pour Bi-2212 et Bi-2223. Cependant, la densité de courant du Bi-2223 diminue plus rapidement que celle du Bi-2212 dans le champ appliqué. À 4,2 K, le Bi-2212 peut supporter des courants jusqu'à 1000 A/mm² dans un champ de 26 T, tandis que le Bi-2223 a une densité de courant proportionnellement plus faible. C'est pourquoi le Bi-2212 est préféré pour les applications d'aimants supraconducteurs à haute température à des températures de 4,2 K et supérieures à 20 K, cependant, les performances du Bi-2212 sont sévèrement dégradées par un fluage extrême et son champ magnétique irréversible à 77 K Seulement 0,005T . D'autre part, 77 K Bi-2223 a

un champ magnétique irréversible de 0,5 T, ce qui n'est pas critique pour la conception de l'aimant mais très utile pour les applications de courant continu. Par conséquent, le Bi-2223 est actuellement le matériau de fil et de câble le plus largement utilisé avec une température de fonctionnement de 77 K. [24]

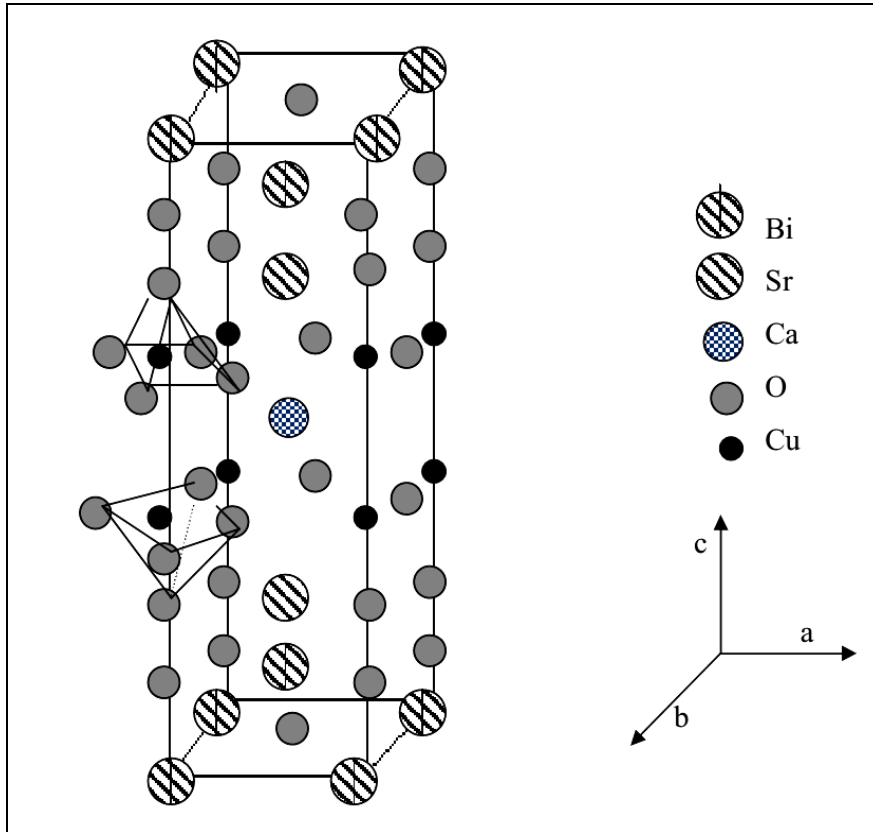


Figure I.15: Structure cristallographique de Bi₂Sr₂CaCu₂O₈. [24]

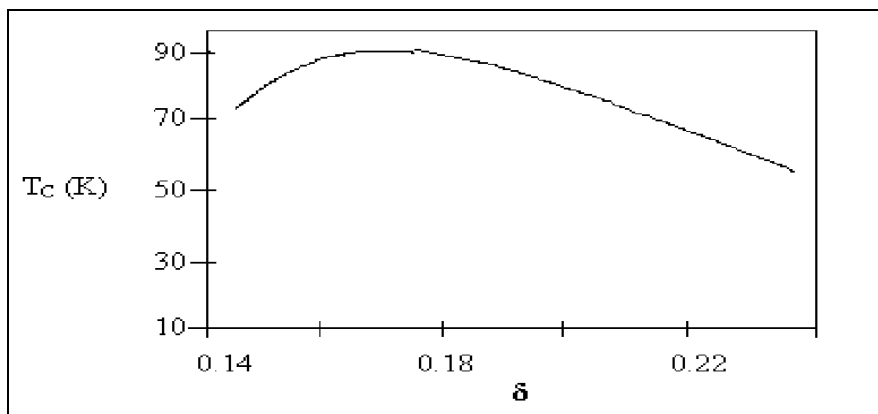
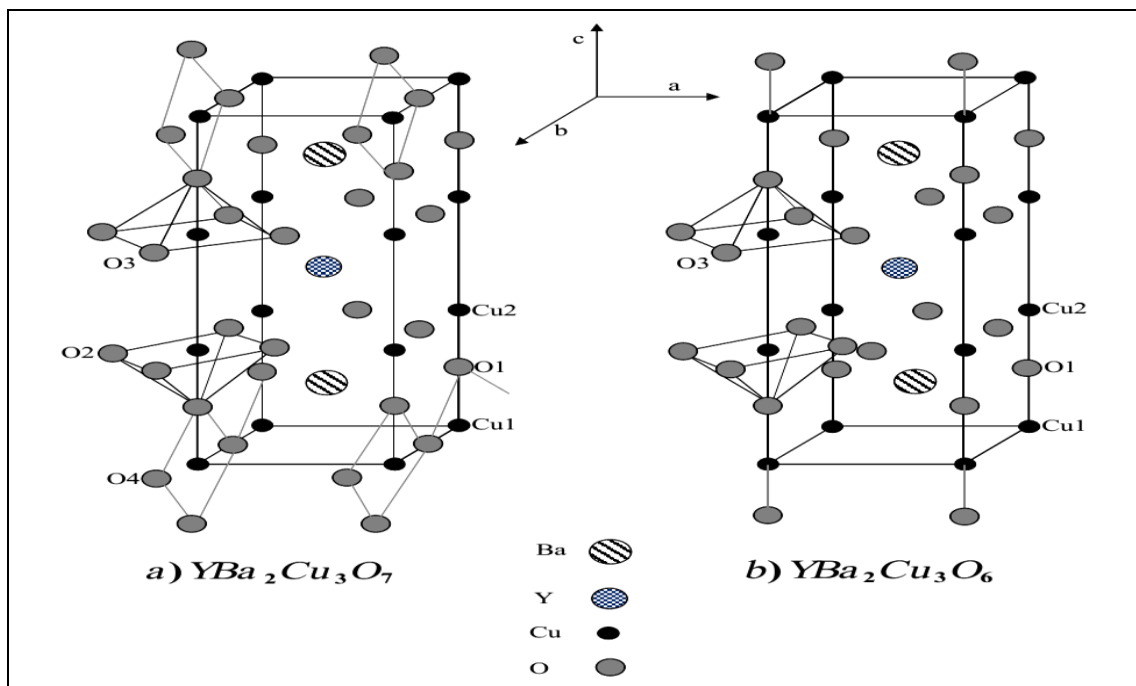


Figure I.16: Variation de la température critique en fonction de d dans Bi₂Sr₂CaCu₂O_{7+d}.

[24]

I.6.2. Supraconducteur YBCO :

Parmi les principales différences entre BSCCO et YBCO en termes de structure principale où le remplissage de la couche de réservoir pour ce dernier est métallique et non isolant comme le premier. Donc YBCO a moins de variance. YBCO a des densités de courant très élevées qui sont atteintes dans les matériaux YBCO - atteignant plus de 10 000 A/mm² à 77 K. La difficulté d'obtenir le conducteur long YBCO est due à sa technologie de fabrication, qui est assez différente de celle d'YBCO. Le BSCCO est un conducteur enrobé, constitué d'un film mince de quelques micromètres de HTS déposé sur un substrat souple. Une forme de ce processus est le dépôt assisté par faisceau d'ions, appelé IBAD. Dans ce processus, des fils de HTS sont déposés sur une couche isolante alignée (couche IBAD), qui est placée sur un substrat flexible. Ce procédé vise à améliorer l'alignement des fils HTS et ainsi améliorer leurs performances électriques. D'autres facteurs présentent un défi majeur - substrat composite renforcé (RABiTS) et dépôt de substrat incliné (ISD), et YBCO est considéré comme le matériau le plus approprié pour les conducteurs de deuxième génération. Cependant, il n'est actuellement pas possible d'obtenir de longs conducteurs auprès d'YBCO, de sorte que les chercheurs font beaucoup d'efforts de recherche pour résoudre ce problème. [23]



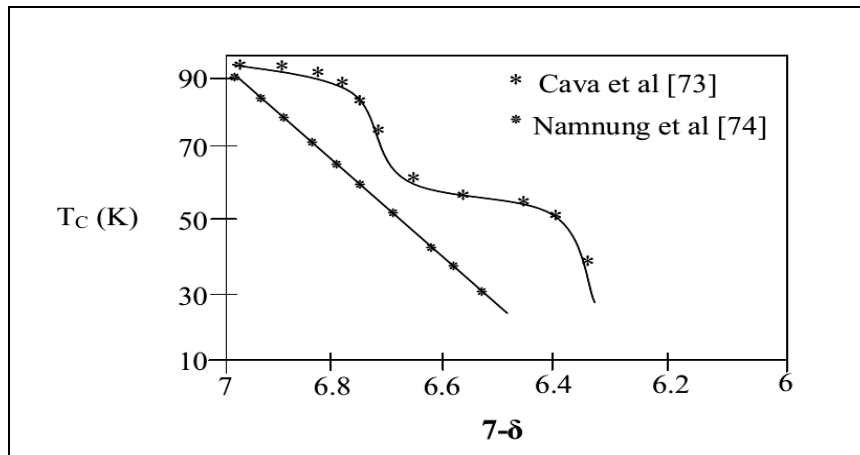


Figure I.18: Variation de la température critique en fonction de (7-d) dans YBa₂Cu₃O_{7-d} [24].

I.7. Principales applications des supraconducteurs :

Il existe trois catégories d'applications des supraconducteurs en électrotechnique selon la valeur utile de l'induction magnétique produite par un supraconducteur :

- ✚ -Champs magnétiques extrêmement puissants : Cette catégorie concerne les bobines de champ et les systèmes de stockage d'énergie.
- ✚ -Champs magnétiques puissants : cette catégorie concerne les moteurs, les générateurs, les transformateurs et les systèmes de stockage d'énergie.
- ✚ -Champ magnétique faible : Cette catégorie concerne les lignes de transport d'énergie, les transformateurs et les limiteurs de courant. [25]

I.7.1. Machines tournantes :

Les supraconducteurs sont largement appliqués dans les machines tournantes dans diverses parties en raison de l'efficacité qu'ils procurent en termes de performances. L'application des supraconducteurs dans les refroidisseurs est une source de nombreux prototypes. Le remplacement des enroulements en cuivre par des enroulements supraconducteurs permet une augmentation de la masse grâce aux densités de courant élevées de le fil et la disparition du circuit magnétique. Le couple massique élevé de ces machines en fait une application intéressante pour les systèmes embarqués. [26]

I.7.2. Les Aimants permanents supraconducteurs :

Un supraconducteur massif peut aussi être utilisé comme aimant permanent. En refroidissant à champ nul un supraconducteur à haute température critique, puis en l'exposant à une variation rapide du champ magnétique, il va piéger le champ magnétique. Le champ piégé dans le supraconducteur est lié à des courants induits par la loi de Lenz. Ces courants se développent comme dans un métal normal, à partir de la surface extérieure, mais contrairement aux matériaux résistifs, ils ne s'amortissent pas puisque la résistivité est nulle. Lorsque le champ extérieur diminue, la répartition des courants change pour s'opposer à cette nouvelle variation et tendre à piéger l'induction. Pour que le supraconducteur piège efficacement le champ magnétique il faut que le champ extérieur atteigne une valeur appelée champ de pénétration H_P . [27]

I.7.3. Les transformateurs :

Les enroulements dans le transformateur représentent le point de base, et donc une amélioration positive sur ce point est préférable pour le transformateur dans son ensemble. En raison de la chaleur émise par les bobines dans les transformateurs, sous la forme d'un effet joule, ce dernier reste contraint par divers facteurs, mais le domaine de la supraconductivité à bientôt ouvert ces limites. Le remplacement des enroulements classiques par d'autres en supraconducteur, permet d'avoir des transformateurs très performants. Selon les études, une comparaison a été faite entre les transformateurs conventionnels et les nouvelles générations (dans les mêmes conditions), comme suit : Les pertes peuvent diminuer de 30 %, le volume de 50 % et le poids de 70 % [27].

La société SIEMENS a réalisé et testé avec succès un transformateur de 1 MVA [22]. La société US Navy a fabriqué un transformateur de $40\text{ MVA } 13,8\text{ kV} - 3\text{ kV} ; 60\text{ Hz}$ avec des enroulements en YBaCuO à 74 K et en MgB_2 à 24 K .

I.7.4. Limitation de courant :

Les limiteurs de courant sont des éléments de circuit non linéaires utilisés pour protéger des grilles en cas d'erreur. Cependant, une nouvelle génération de limiteurs supraconducteurs est apparue. Tout système supraconducteur nécessite un environnement cryogénique composé d'un cryostat et d'un fluide cryogénique ou d'un Cryo-générateur. Le principe des limiteurs de courant supraconducteur repose sur le passage de l'état supraconducteur à l'état normal

quand la valeur du courant électrique dépasse la valeur critique (I_c). Cette transition doit s'effectuer dans un temps généralement très bref pour limiter le premier pic de courant à une valeur seuil ne dépassant pas trois à cinq fois le courant nominal. [28]

I.7.5. Câbles de transport :

Les pertes dans les supraconducteurs sont beaucoup plus faibles que dans les câbles conventionnels, et ils sont très utiles pour les applications de transmission de puissance. Cependant, le problème de la cryogénie est difficile à résoudre à long terme. Une solution consiste à faire circuler le liquide de refroidissement dans un tube au milieu du câble et à enrouler le fil supraconducteur autour de celui-ci. Certaines lignes électriques doivent être renforcées à mesure que la demande d'énergie augmente, mais l'espace requis pour poser de nouveaux câbles n'est pas toujours suffisant, de sorte que l'utilisation de supraconducteurs comme solution alternative résout le problème. [26]

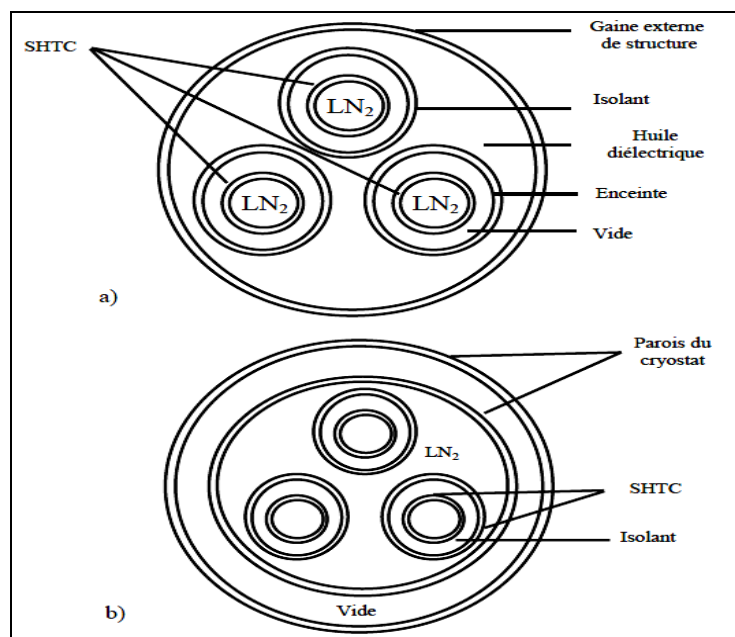


Figure I.19: Représentation schématique d'un câble triphasé en supraconducteur à haute Température critique (SHTC) refroidi à l'azote liquide (LN₂) :

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

I.7.6. Stockage d'énergie :

Cette technologie repose sur le stockage d'énergie sous la forme d'un champ magnétique créé par la circulation d'un courant électrique dans une bobine supraconductrice court-circuitée et refroidie sous sa température critique, ces bobines sont appelées SMES « *Superconducting Magnetic Energy Storage* ». Donc le courant circule sans perte dans ces bobines, stocke ainsi une certaine quantité d'énergie pour une durée théoriquement infinie. [26]

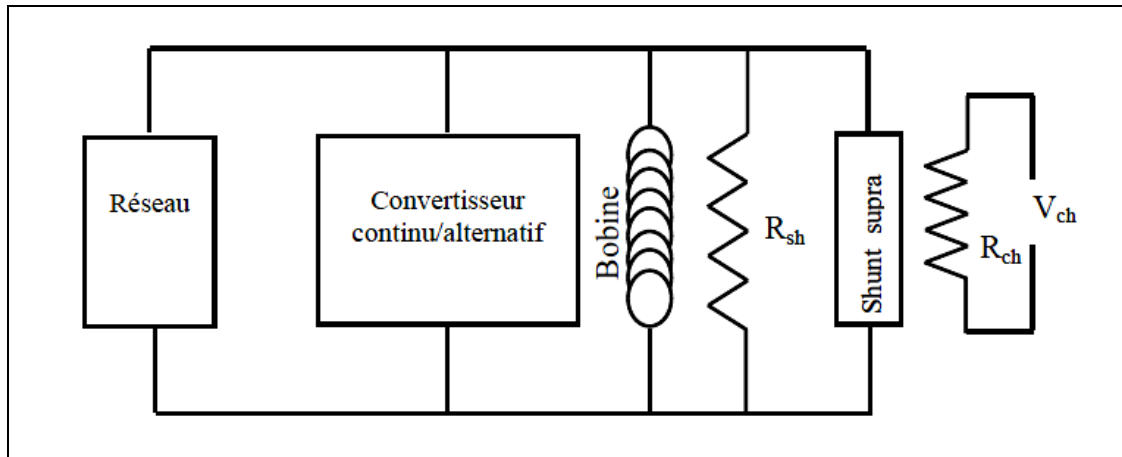


Figure I.20: Schéma de principe d'une bobine supraconductrice couplée à un réseau électrique par l'intermédiaire d'un convertisseur ; R_{sh} est la résistance de protection ; R_{ch} et V_{ch} forment le circuit de chauffage du shunt supraconducteur. [30-31]

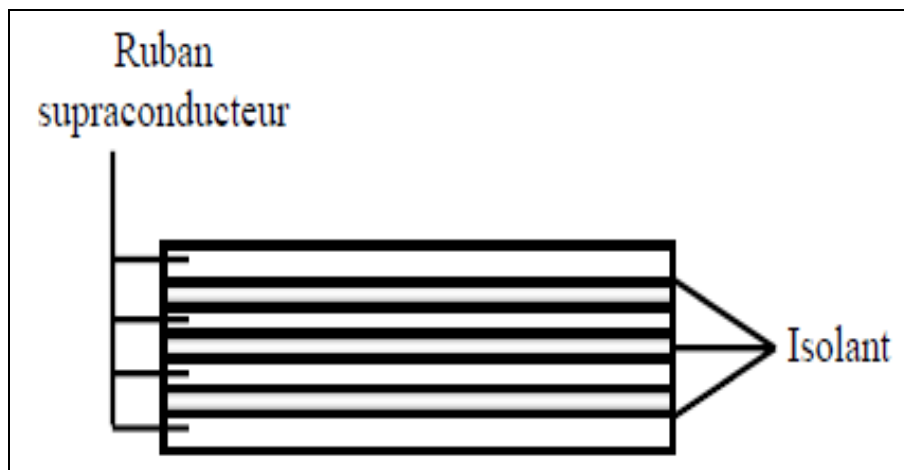


Figure I.21: Conducteur formé de 4 rubans supraconducteurs isolés les uns des autres.

[30-31].

I.8. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude sur les matériaux supraconducteurs. Il existe deux types de supraconducteurs : les types I et II. Ces matériaux sont caractérisés par des grandeurs critiques magnétiques et thermiques, à savoir la température critique (T_c), le champ magnétique critique (H_c) et la densité de courant critique (J_c).

Les supraconducteurs, notamment ceux à haute température critique, possèdent des propriétés remarquables qui rendent leur utilisation envisageable dans divers domaines d'application industrielle. Ils sont des candidats sérieux pour des applications liées à l'électromagnétisme en génie électrique et en électronique. L'optimisation de ces dispositifs nécessite une compréhension approfondie de leur comportement électromagnétique.

Les matériaux supraconducteurs ont diverses applications dans le domaine du génie électrique. Nous avons présenté les applications les plus courantes et les plus prometteuses. La modélisation de ces matériaux sera abordée dans le chapitre suivant.

CHAPITRE II
Modélisation
Des
Matériaux
Supraconducteurs

II.1. Introduction :

Dans le modèle électromagnétique, les phénomènes physiques sont souvent décrits par des équations aux dérivées partielles (EDP), parfois non linéaires et complexes à résoudre. Le modèle thermique est obtenu à partir de l'équation de transfert de la chaleur, à laquelle il faut ajouter les conditions d'échange avec le milieu extérieur.

Sous certaines hypothèses simplificatrices, ces équations peuvent se transformer en équations différentielles ordinaires, permettant l'utilisation de solutions analytiques. Cependant, pour des problèmes plus réalistes comme ceux étudiés ici (conditions aux limites, géométries complexes et hypothèses moins restrictives), une résolution analytique de ces équations n'est plus possible.

On utilise alors des méthodes d'approximation numérique pour transformer les équations aux dérivées partielles en un système d'équations algébriques, que l'ordinateur peut résoudre. Dans ce chapitre, nous présenterons les équations mathématiques caractérisant l'évolution spatio-temporelle du champ électromagnétique dans un matériau supraconducteur, ainsi que les lois de comportement associées.

II.2. Etat de l'art :

Précédemment (chapitre I), on a présenté une vue d'ensemble du comportement des supraconducteurs à haute température critique (SHTc) où il y a une forte dépendance entre les grandeurs caractéristiques. Il y a plusieurs régimes de fonctionnement pour les SHTc et il est difficile d'avoir un modèle analytique qui peut caractériser tous ces régimes, en particulier pour la résolution des problèmes bidimensionnel ou tridimensionnel. Cependant, quelques-uns ont été mis au point pour modéliser l'état supraconducteur dans certaines conditions et hypothèses. Ces modèles représentent assez bien la réalité physique et permettent de mener complètement les calculs analytiques dans le cas de géométries simples. Pour la dépendance de J_c en fonction de l'induction magnétique, les modèles de Kim ou exponentiel peuvent être utilisés si le supraconducteur fonctionne autour de sa densité de courant critique

II.3. Equations mathématiques régissent le phénomène physique

II.3.1. Relation B(H) :

L'induction magnétique B à l'intérieur du matériau est donnée par l'expression suivante en fonction du champ extérieur H et de l'aimantation M :

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

Nous avons vu que les supraconducteurs sont diamagnétiques, c'est-à-dire que lorsque $H < H_{c1}$, B à l'intérieur du matériau est nul. Cela signifie que $M = -H$ et $\chi = -1$. En revanche, lorsque le champ magnétique H_{c1} est supérieur à H, le matériau supraconducteur ne présente plus de diamagnétisme. Du fait de la faible valeur du champ critique H_{c1} des supraconducteurs de type II, l'induction B qu'ils reçoivent lors de leur utilisation est généralement supérieure à μ_0 . Par conséquent, il peut être considéré comme non magnétique à l'échelle macroscopique.

Alors on peut écrire $(B)^\rightarrow = \mu_0(H)^\rightarrow$ (Fig. II.1),[32]

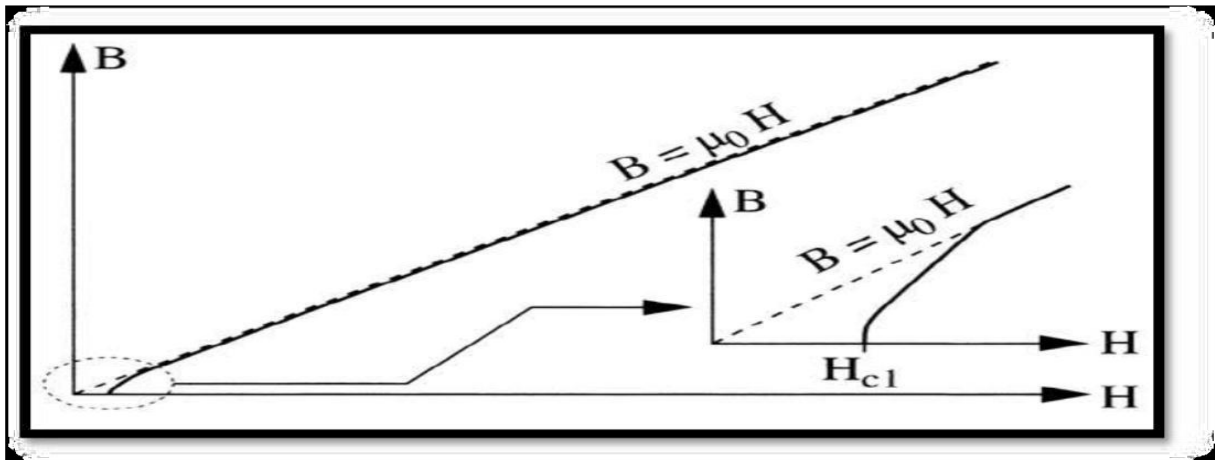


Figure II. 1 : Caractéristique B(H) d'un supraconducteur [32].

II.3.2. Relation E (J) :

A partir des mesures courant-tension de l'échantillon, les propriétés expérimentales $V(I)$ peuvent être déduites, généralement sous la forme d'une loi de puissance. Si l'on admet que cette propriété est toujours valable pour la densité de courant, la relation E (J) s'écrit

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

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

Le paramètre n est parfois considéré comme un indicateur de la qualité de la bande supraconductrice : plus il est élevé, meilleur est le matériau. En effet, dans ce cas, le courant critique peut être déterminé sans ambiguïté dès qu'une tension apparaît aux bornes de l'échantillon

La relation (II.2) peut être résolue au moyen d'un programme informatique afin de déterminer les grandeurs électromagnétiques. Analytiquement, elle devient cependant difficilement utilisable, sauf dans le cas où « n » est grand. [29]

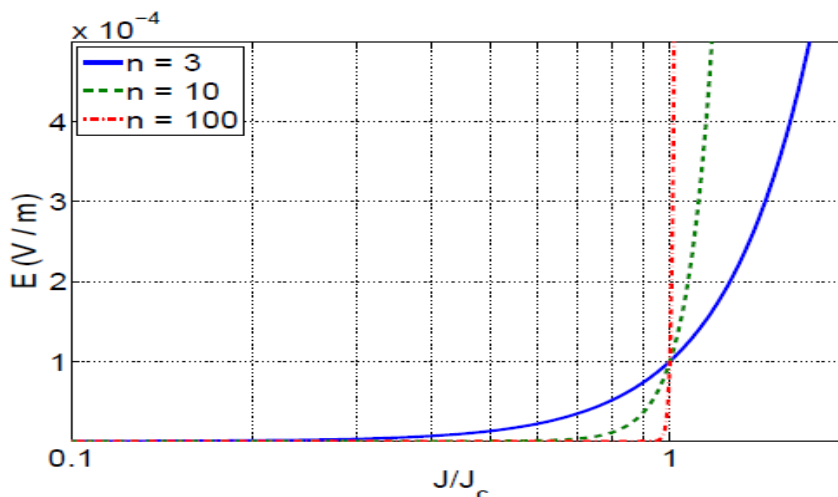


Figure II. 2 : Caractéristique $E(J)$ d'un supraconducteur. [29]

II.4. Les Modèles de comportement :

II.4.1. Modèle de l'état critique ou le modèle de Bean :

C'est le modèle le plus stipule qu'à température donnée la densité de courant dans un supraconducteur est, soit nulle, soit égale à la densité de courant critique J_c .

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

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

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

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

Le modèle de Bean (1962) suppose, en plus, que la densité de courant critique est indépendante de la valeur de l'induction magnétique B. [8]

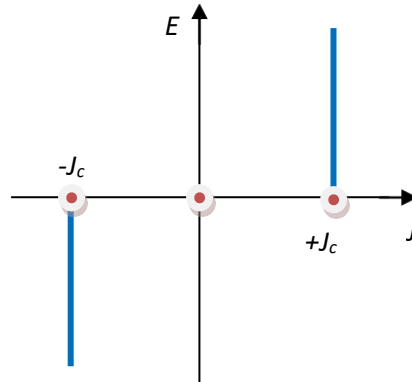


Figure II. 3 : Caractéristique E(J) basée sur le Modèle de Bean [8]

Ce modèle à plusieurs formes existe pour calculer les distributions de courant, de champ et évaluer les pertes AC des supraconducteurs sous différentes conditions. Le plus connu est certainement le modèle de l'état critique, également appelé modèle de Bean

II.4.2. Le modèle de la loi de puissance :

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

L'expression mathématique de ce modèle est donnée comme suit :

$$B(\mathbf{H}) = \mu_0 \mathbf{H}$$

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 $n > 100$.

II.4.3. Modèle de KIM :

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

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

C'est le modèle le plus utilisé pour la modélisation de la dépendance de la densité de courant critique avec l'induction magnétique. [33].

II.4.4. Le modèle exponentiel :

Un autre modèle utilisé en développements numériques est le modèle de dépendance $J_c(B)$ suivant : [3]

$$J_c(|B|) = J_{c0} \exp\left(-\frac{|B|}{B_0}\right)$$

Les modèles de Kim et exponentiel sont employés pour les développements numériques. De plus, le modèle de Kim est le plus utilisé pour la modélisation de $J_c(B)$.

II.4.5. Modèle de Flux Flow et Flux Creep :

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

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

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

K : Constant de Boltzmann.

θ : Température.

ρ_c : Résistivité de Flux Creep.

U_0 : Potentiel de profondeur.

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

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

ρ_f : Résistivité de Flux Flow

La densité de courant critique peut alors être définie comme étant la limite entre le régime de flux creep et le régime de flux flow. Cette limite étant très floue, la densité critique de courant est souvent déterminée par la valeur d'un champ électrique critique E_c . [32]

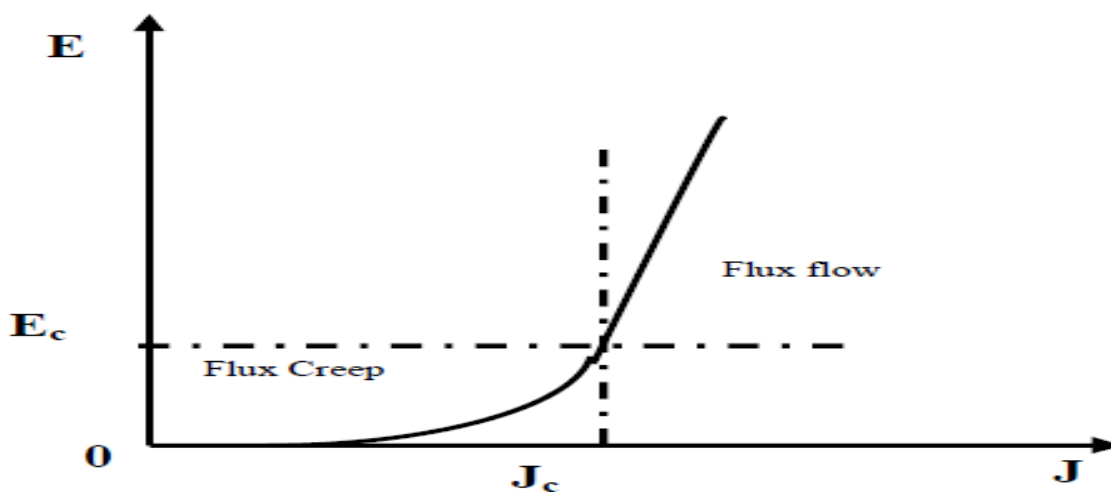


Figure II. 4 : Modèle de Flux Flow et Creep [32]

II. 5. Formulation des Équations Électromagnétiques :

Les modèles de J. C. Maxwell décrivent globalement tous les phénomènes électromagnétiques, mais suivant les dispositifs que l'on étudie, certains phénomènes deviennent négligeables [35]. Les équations se découplent donnant alors naissance à des modèles plus simples. Parmi ces modèles, nous citons : le modèle électrostatique, électrocinétique, magnétostatique, magnétodynamique.

II. 5.1 : Modèle électrostatique [33] :

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

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

Les équations de ce modèle se simplifient comme suit :

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

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

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

On a :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V$$

(II.12)

Le modèle se ramène alors à l'équation

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

II. 5. 2 Modèle magnétostatique :

Dans ce modèle, le terme $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ est nul. Ceci s'explique par le fait que le champ magnétique est produit par des sources indépendantes du temps. Deux modèles existent [34] :

II. 5. 2.1 Modèle magnétostatique scalaire :[33]

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

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

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

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

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

Le modèle se ramène alors à l'équation :

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

II. 5. 2.2 Modèle magnétostatique vectorielle :

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

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

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

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

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

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

D'où le système d'équation :

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

II. 5.3 Modèle magnétodynamique : [33]

Ce modèle convient aux appareils électromagnétiques où la source de courant ou de tension varie avec le temps. Autrement dit, le terme représentant la variation du vecteur d'induction magnétique avec le temps est non nul, de sorte que les champs électrique et magnétique sont couplés en raison de la présence de courants de Foucault.

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

A partir des équations de JC Maxwell, on peut formuler des équations décrivant l'évolution spatio-temporelle des phénomènes électromagnétiques.

Il existe plusieurs formulations en électromagnétisme. Parmi ces formulations, on choisit la formulation en champ électrique \vec{E} . [33]

En termes d'équations, nous avons :

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

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

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

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

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

En prenant le rotationnel :

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

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

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

On considère μ constante dans le temps, d'où l'équation précédente devient :

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

Finalement on obtient :

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

Avec :

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

On a:

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

Où :

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

II.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes formulations du problème électromagnétique ainsi que les outils mathématiques nécessaires à la modélisation des matériaux supraconducteurs à haute température critique (SH T_c). Nous nous sommes particulièrement intéressés au modèle magnétostatique dans un milieu supraconducteur, en retenant également la formulation en potentiel vecteur magnétique.

La modélisation du comportement électromagnétique des supraconducteurs, conduite par une approche numérique, rencontre de nombreuses difficultés. Une méthode numérique pour modéliser les matériaux supraconducteurs a été développée avec le logiciel PDETOOL/MATLAB. Elle repose sur la résolution des équations de Maxwell, qui sont fortement non linéaires. L'étude des bobines supraconductrices, leur réalisation et leur impact sur les propriétés des nouvelles structures de transformateurs supraconducteurs, ainsi que l'intégration des matériaux supraconducteurs dans les transformateurs, seront abordés dans le chapitre trois.

CHAPITRE III

Application et résultats de simulation

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, l'objectif principal est d'établir une comparaison approfondie entre les transformateurs utilisant des matériaux supraconducteurs et ceux utilisant des matériaux classiques en utilisant la méthode des éléments finis via le logiciel PDETOOL dans MATLAB. Le choix de ce programme permettra d'analyser en détail les divers aspects du transformateur, en mettant en lumière les différences significatives entre les deux types de transformateurs. Une fois l'étude réalisée, les résultats obtenus par MATLAB seront extrêmement précis. Ces résultats permettront de mettre en évidence les distinctions essentielles entre le transformateur supraconducteur et le transformateur classique, en se basant sur les données recueillies tout au long du processus de simulation. Cette analyse comparative approfondie permettra de mieux comprendre les avantages et les limitations de chaque type de transformateur, offrant ainsi des informations précieuses pour l'optimisation des performances et l'amélioration de l'efficacité énergétique.

En conclusion, des observations détaillées seront consignées pour documenter les divers résultats obtenus. Ces notes serviront de base pour une évaluation approfondie des performances des transformateurs supraconducteurs par rapport à leurs homologues classiques, fournissant des insights précieux pour l'avancement de la technologie des transformateurs et pour orienter les futures recherches dans ce domaine en constante évolution.

III.2 Définition de transformateur :

La définition de transformateur est un appareil statique à induction électromagnétique, à deux enroulements ou plus, destiné à transformer un système de tensions et courants alternatifs en un autre système de tensions et courants, de même fréquence mais généralement de valeurs différentes, dans le but de transmettre une énergie électrique. Ce composant central d'un poste de transformation convertit les valeurs d'intensité et de tension d'un courant électrique alternatif, soit en les abaissant, soit en les augmentant, par induction électromagnétique, sans altérer la forme ni la fréquence du courant. Les transformateurs assurent la conversion entre les lignes de très haute, haute, moyenne et basse tension dans un réseau de transport électrique, garantissant ainsi la sécurité du transfert d'énergie depuis la centrale de production jusqu'à l'utilisateur final [34].

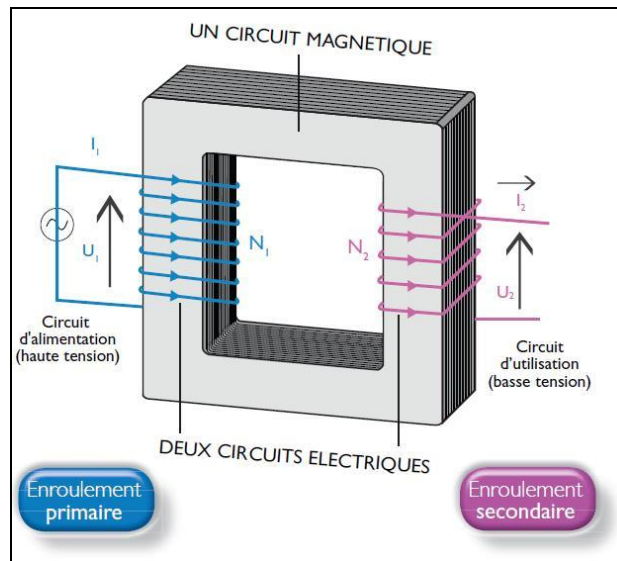


Figure.III.1 : schéma d'un transformateur. [34]

III.3. Historique de transformateur :

L'histoire des transformateurs électriques remonte à la fin du 19^{ème} siècle, lorsque des scientifiques tels que Nikola Tesla et Lucien Gaulard ont développé des inventions qui ont permis l'utilisation de l'électricité dans la vie quotidienne des ménages et des entreprises¹. Le transformateur, inventé par Lucien Gaulard, a joué un rôle clé dans le développement de l'électricité, car il permet de modifier la tension efficace délivrée par une source d'énergie électrique³. Les transformateurs sont utilisés dans les réseaux électriques pour adapter la tension à des niveaux appropriés pour la distribution et la consommation d'électricité [35]. Ils sont essentiels pour le transport et la distribution de l'électricité sur de longues distances. Les transformateurs électriques sont utilisés dans les postes électriques, qui sont des points clés du réseau électrique. Ces postes électriques sont équipés de systèmes de contrôle et de dispositifs de protection, tels que des disjoncteurs qui permettent de couper automatiquement l'alimentation d'une ligne en cas de surcharge⁵. Les transformateurs électriques de puissance sont les plus fréquents et permettent de transmettre un courant électrique d'une ligne à une autre en modifiant sa tension sans perte [35]. Ils fonctionnent en monophasé ou en triphasé et utilisent le principe de l'induction magnétique pour abaisser ou élever la tension [36]. Il existe trois grandes catégories de transformateurs de puissance : les transformateurs de distribution, les transformateurs de moyenne puissance et les transformateurs de grande puissance [36].

En résumé, l'histoire des transformateurs électriques remonte à la fin du 19^{ème} siècle et ils sont essentiels pour le transport et la distribution de l'électricité sur de longues distances. Les transformateurs électriques sont utilisés dans les postes électriques, qui sont des points clés du réseau électrique, et ils permettent de transmettre un courant électrique d'une ligne à une autre en modifiant sa tension sans perte.



Figure.III.2: post 60/30 KV a Bousaâda.

III.4. Principe de fonctionnement :

Le principe de fonctionnement d'un transformateur repose sur le phénomène d'induction électromagnétique. Il est constitué de deux enroulements isolés électriquement l'un de l'autre, appelés le bobinage primaire et le bobinage secondaire. Ces enroulements sont enroulés autour d'un noyau ferromagnétique, qui concentre le flux magnétique généré par le courant alternatif traversant le bobinage primaire. Lorsque le courant alternatif traverse le bobinage primaire, il crée un champ magnétique variable qui induit une force électromotrice (tension) dans le bobinage secondaire. Le nombre de spires de fil dans chaque bobinage détermine le rapport de transformation entre la tension d'entrée et la tension de sortie. Si le bobinage secondaire a moins de spires que le bobinage primaire, la tension de sortie sera inférieure à la tension d'entrée, et inversement. Les transformateurs sont largement utilisés dans le transport et la distribution de l'énergie électrique, car ils permettent de changer la tension de l'électricité pour la transmettre sur de longues distances avec une efficacité énergétique accrue. Ils sont également utilisés pour protéger les appareils électriques sensibles en isolant les circuits électriques et en empêchant les courants de court-circuit. Les transformateurs triphasés, qui sont constitués de trois bobinages primaires et secondaires, sont particulièrement utiles pour les applications de grande puissance. Ils peuvent être connectés de différentes manières pour

fournir des tensions simples ou composées, et sont souvent utilisés dans les centrales électriques, les postes d'interconnexion et les réseaux de distribution d'électricité [37].

III.5. Constitution de transformateur :

La constitution d'un transformateur triphasé se compose de trois enroulements primaires et secondaires disposés sur trois colonnes du circuit magnétique feuilleté.

Chaque colonne est constituée d'un enroulement primaire de N_1 spires et d'un enroulement secondaire de N_2 spires.

Ces enroulements sont enroulés sur un noyau magnétique constitué d'un empilage de tôles minces en acier. Le noyau magnétique permet de relier magnétiquement le primaire et le secondaire en canalisant les lignes de champ magnétiques produites par le primaire.

Un transformateur monophasé, quant à lui, est constitué de deux bobines en fil de cuivre, l'une dite primaire et l'autre secondaire, enroulées sur un noyau magnétique.

Le rapport du nombre de spires primaires sur le nombre de spires secondaires détermine le rapport de transformation du transformateur.

Les transformateurs sont utilisés pour adapter, selon les besoins, une tension alternative sinusoïdale en l'élevant ou en l'abaissant sans en modifier la fréquence. Ils sont indispensables pour le transport de l'énergie électrique, où l'on préfère « transporter des volts plutôt que des ampères ». Les transformateurs sont réalisés en toutes puissances et tensions, de quelques VA et à basse tension pour l'alimentation de circuits électroniques à quelques centaines de MVA et de kV pour l'alimentation ou le couplage des réseaux de transport de l'énergie électrique. Le transformateur est également utilisé comme adaptateur d'impédance en électronique.

Les transformateurs triphasés sont des machines passives qui transmettent l'énergie électrique entre les circuits. Dans le circuit secondaire, un flux magnétique induit une force électromotrice (emf), ce qui permet d'augmenter ou de diminuer la tension sans modifier la fréquence. [38]

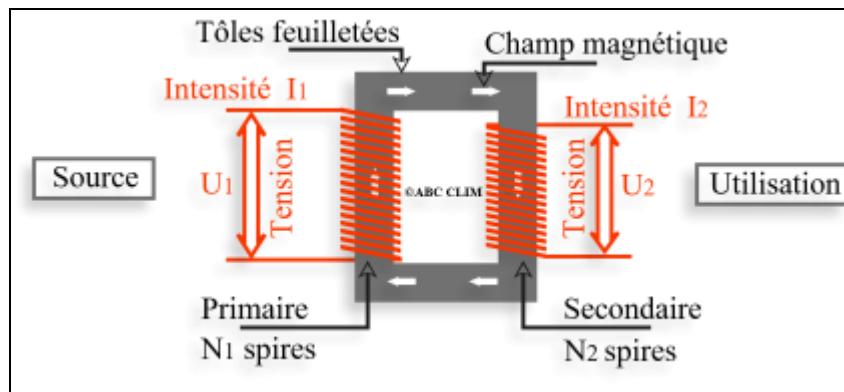


Figure.III.3 : constitution de transformateur. [38]

Isolation : Cette partie agit comme une barrière séparant les enroulements du noyau.

Huile de transformateur : L'huile de transformateur a deux fonctions principales : l'isolation et le refroidissement.

Les propriétés isolantes de l'huile empêchent les courts-circuits et les arcs électriques. Cette huile agit comme un réfrigérant en évacuant la chaleur du noyau et des enroulements.

Thermomètres : Les thermomètres contrôlent la température de l'huile.

Systèmes de décompression : Les systèmes de décompression font partie du protocole de sécurité. Ils désamorcent les situations de surpression lorsque l'huile clignote en raison de courts-circuits.

Refroidisseur : Le système de refroidissement refroidit le liquide de refroidissement. Il refroidit l'huile chaude par l'intermédiaire de tubes refroidis à l'eau ou à l'air. Le liquide de refroidissement est ensuite renvoyé vers le noyau et les enroulements.

Réservoir : Le réservoir protège les enroulements et le noyau du transformateur des conditions extérieures et contient le liquide de refroidissement.

Conservateur d'huile : Le conservateur d'huile est un récipient installé séparément du réservoir. Il aide à retenir l'huile après qu'elle s'est dilatée sous l'effet de l'échauffement des enroulements et du noyau.

Régulateurs de tension : Les régulateurs de tension modifient la tension de sortie, qui a tendance à diminuer en cas de charge. La modification des tours de prise à l'aide d'un changeur de prise permet d'ajuster le rapport de tension.

Relais actionné par le gaz : Les relais à gaz ont un autre nom : le relais Buchholz. Il retient le gaz libéré qui bouillonne dans le réservoir du transformateur, et le fait de voir ce gaz libre indique qu'il y a un problème avec le transformateur.

Respirateurs : Les reniflards permettent de maintenir l'huile du transformateur au sec. Ces reniflards éliminent l'humidité des poches d'air situées au-dessus du niveau d'huile du restaurateur.

III.6. Caractéristiques d'un transformateur :

Un transformateur est un appareil électrique qui permet de modifier les caractéristiques d'un courant électrique, en particulier sa tension. Il est constitué de deux enroulements électriques, appelés le primaire et le secondaire, qui sont isolés électriquement l'un de l'autre mais reliés par un circuit magnétique. [39]

Les caractéristiques d'un transformateur peuvent être résumées comme suit :

III.6.1. Puissance assignée (kVA) : C'est la puissance maximale que peut fournir le transformateur. Elle est exprimée en kilovoltampères (kVA).

III.6.2. Fréquence (Hz) : C'est la fréquence du courant électrique qui traverse le transformateur. Elle est généralement de 50 ou 60 Hz.

III.6.3. Tension primaire et secondaire : Ce sont les tensions électriques aux bornes du primaire et du secondaire du transformateur. Elles sont exprimées en volts (V).

III.6.4. Courant primaire et secondaire : Ce sont les courants électriques qui traversent le primaire et le secondaire du transformateur. Ils sont exprimés en ampères (A).

III.6.5. Rapport de transformation : C'est le rapport entre la tension primaire et la tension secondaire. Il est exprimé sous la forme de " $n : 1$ ", où n est le nombre de tours de l'enroulement primaire par rapport à l'enroulement secondaire.

III.6.6. Circuit magnétique : C'est le circuit qui relie les deux enroulements du transformateur. Il est constitué de matériaux ferromagnétiques, tels que le fer, qui ont la propriété de se magnétiser en présence d'un champ magnétique.

III.6.7. Refroidissement : Les transformateurs peuvent être refroidis de différentes manières, par exemple par air ou par huile. Le type de refroidissement est important car il influence la puissance maximale que peut délivrer le transformateur et sa durée de vie.

III.6.8. Normes : Les transformateurs doivent respecter des normes de sécurité et de qualité, telles que les normes CEI ou ANSI. Ces normes définissent les caractéristiques techniques minimales que doit respecter un transformateur pour être commercialisé.

III.6.9. Applications : Les transformateurs peuvent être utilisés dans de nombreuses applications, telles que la distribution d'électricité, la transmission de données ou la régulation de tension.

III.6.10. Technologies : Il existe deux principales technologies de transformateurs : les transformateurs de type sec et les transformateurs de type immergé. Les transformateurs de type sec sont refroidis à l'air, tandis que les transformateurs de type immergé sont refroidis par de l'huile. [40], [41]

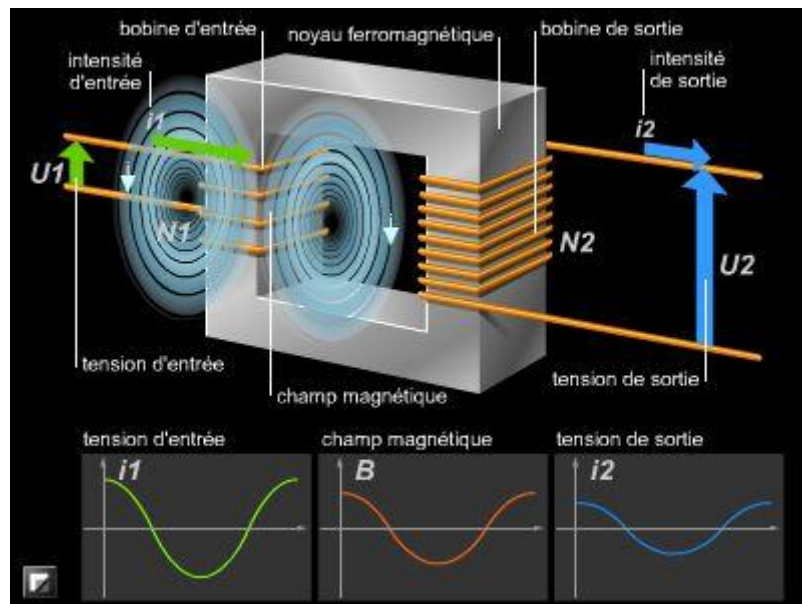


Figure.III.4 : Schéma des caractéristiques détaillées du transformateur. [40]

III.7. Le transformateur supraconducteur :

Le transformateur supraconducteur est un type de transformateur électrique qui utilise des matériaux supraconducteurs pour réduire les pertes de puissance. Contrairement aux transformateurs conventionnels, les transformateurs supraconducteurs fonctionnent à des températures très basses, généralement à l'aide de systèmes de refroidissement cryogéniques. [42]

Les principaux avantages des transformateurs supraconducteurs sont leur haute efficacité énergétique, leur faible encombrement et leur poids réduit par rapport aux transformateurs classiques.

Cela en fait une technologie intéressante pour les réseaux électriques, en particulier pour le transport d'électricité sur de longues distances avec des pertes minimales. [43]

Cependant, les coûts de fabrication et d'exploitation des transformateurs supraconducteurs restent encore élevés comparés aux transformateurs conventionnels. Le défi principal est de réduire ces coûts tout en améliorant la fiabilité et la durabilité de cette technologie émergente.

Le problème qui nous préoccupe et que nous cherchons à résoudre dans ce travail comprend plusieurs types de matériaux qui se comportent différemment d'un point de vue magnétique (noyau ferromagnétique non-linéaire, cuivre, supraconducteur, . . .). Le comportement physique du champ magnétique est imposé par les équations de Maxwell présentées dans le chapitre II. La résolution se fera de manière approchée en basant notre étude sur la magnétostatique, ce qui permet de s'affranchir de la modélisation physique de la partie supraconductrice et de ces lois de comportement complexes.

Les simulations auront pour but d'évaluer les deux structures proposées et de voir la répartition des champs magnétiques appliqués aux bobines. Ainsi, nous serons en mesure de déterminer laquelle des deux prototypes est la plus avantageux en termes des propriétés magnétothermiques. Ces simulations permettront également d'évaluer un élément important du transformateur, soit la répartition de la température et son flux thermique.

Le choix de la méthode des éléments finis n'est pas banal, puisqu'elle fait désormais partie des outils régulièrement utilisés pour la résolution de problèmes variés, autant en électromagnétisme que dans bien d'autres domaines où l'on trouve des équations aux dérivées partielles. Autre avantage important, cette méthode permet de modéliser des géométries complexes et de grande taille grâce à un découpage des sous-domaines continus en éléments beaucoup plus simples.

III.8. Présentation du modèle proposé :

Le modèle proposé dans ce travail est constitué d'un noyau ferromagnétique en deux types qui peuvent être présentés :

- Le premier comprend trois enroulements dans lesquels on ferait cohabiter deux bobines en cuivre dans le primaire et une bobine en cuivre dans le secondaire.
- Le second comprend trois enroulements dans lesquels on ferait cohabiter deux bobines en cuivre dans le primaire et une bobine supraconductrice dans le secondaire.

III.8.1. Paramètres de la géométrie étudiée :

Les paramètres de base portés pour la conception du transformateur sont affichés dans le tableau III.1.

Tableau III.1: Paramètres de la géométrie étudiée:

Paramètres	Valeurs
Puissance apparente (S)	10 kVA
Fréquence d'alimentation (f)	60 Hz
Tension Primaire (V_{pri})	600 V
Tension Secondaire (V_{sec})	200 V
Courant primaire (I_{pri})	16.6667 A
Courant secondaire (I_{sec})	50 A
Température ambiante (T)	295 K
Température maximale (T)	348 K
Coefficient. convection h	10 W/ (m ² .K)
Bobine primaire	Cuivre
Bobine secondaire	YBCO

III.8.2. Description géométrique :

La phase de description géométrique est la première phase dans la procédure d'implémentation du modèle mathématique du domaine à étudier.

Avant la mise en œuvre du modèle et la description géométrique, nous définissons les différentes parties du problème et leurs paramètres physiques.

Cette section offre une présentation moins exhaustive de la géométrie et du maillage du transformateur. L'objectif est de fournir à l'utilisateur une compréhension globale des différentes parties du transformateur (primaire, secondaire, circuit magnétique), telles qu'illustrées dans les (figures.III.5, III.6 et III.7).

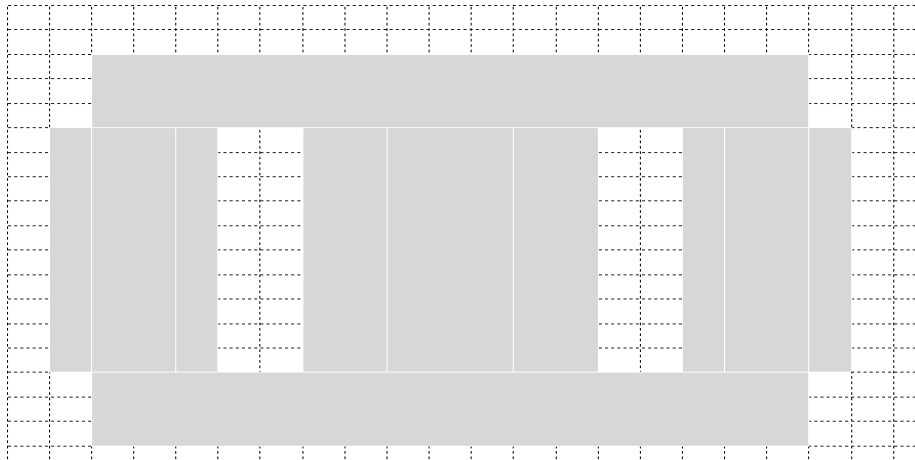


Figure.III.5 : Création de la géométrie.

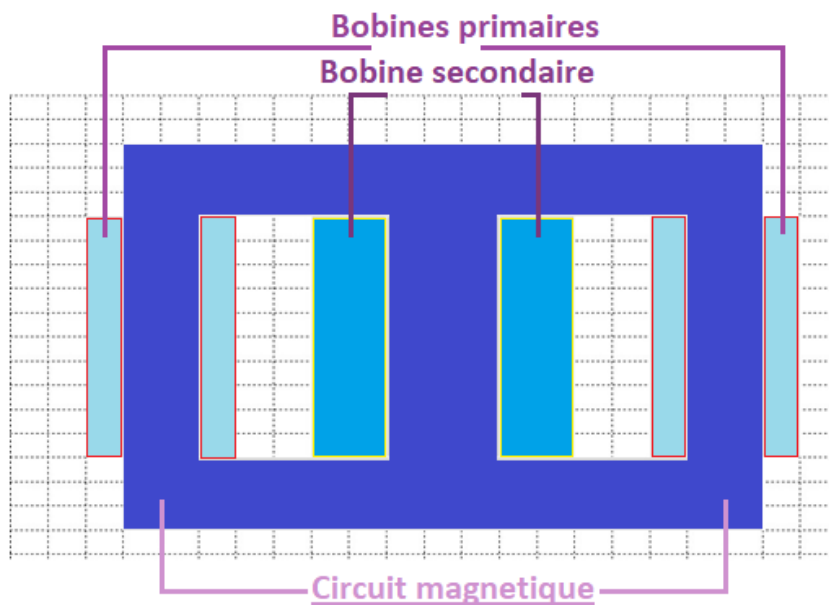


Figure.III.6 : Localités des bobines du secondaire et du primaire.

Comme on peut le constater sur la figure III.6, la partie primaire du transformateur est constituée de deux bobines qui seront montrées sur les jambes latérales du noyau, tandis que la bobine constituant le secondaire du transformateur sera autour de la jambe centrale.

Le maillage d'éléments finis est généré sur toute la structure proposée, comme on peut le voir sur la figure (III.6), Il se compose de plusieurs nœuds et de plusieurs éléments surfaciques.

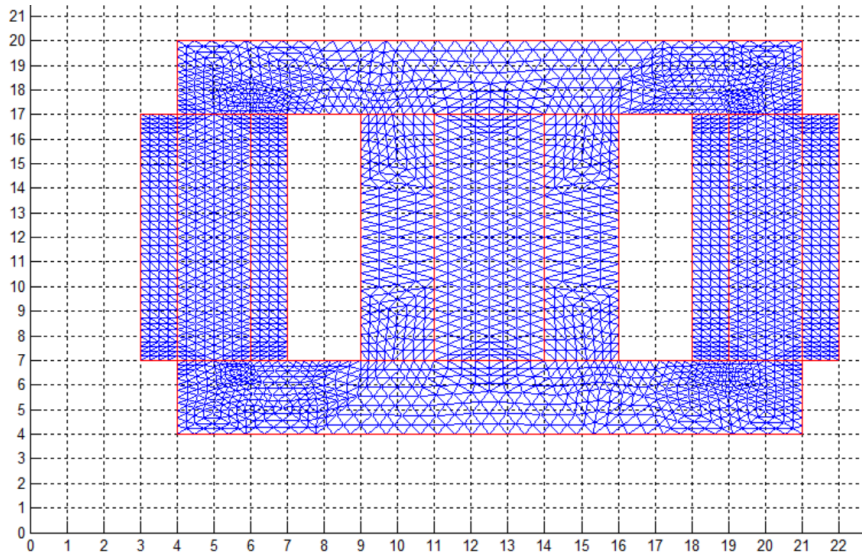


Figure.III.7 : Allure du maillage du noyau généré par la MEF.

III.9. Différents résultats de simulation

Les résultats de simulation ci-dessous représentent respectivement : la répartition de flux magnétique, des champs magnétiques, dans les trois prototypes étudiés

Pour donner les différents résultats de simulation, nous avons basé sur les équations qui font le lien entre les différents grandeurs électromagnétiques au sein des matériaux constituant le modèle proposé.

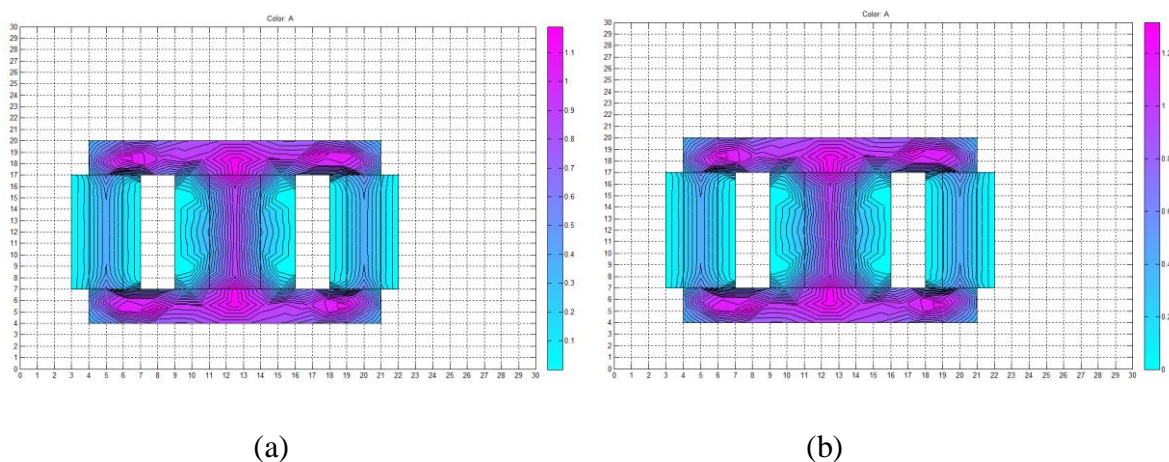


Figure.III.8 : Allure du flux magnétique ; (a) Transformateur Classique.

(b) Transformateur Supraconducteur.

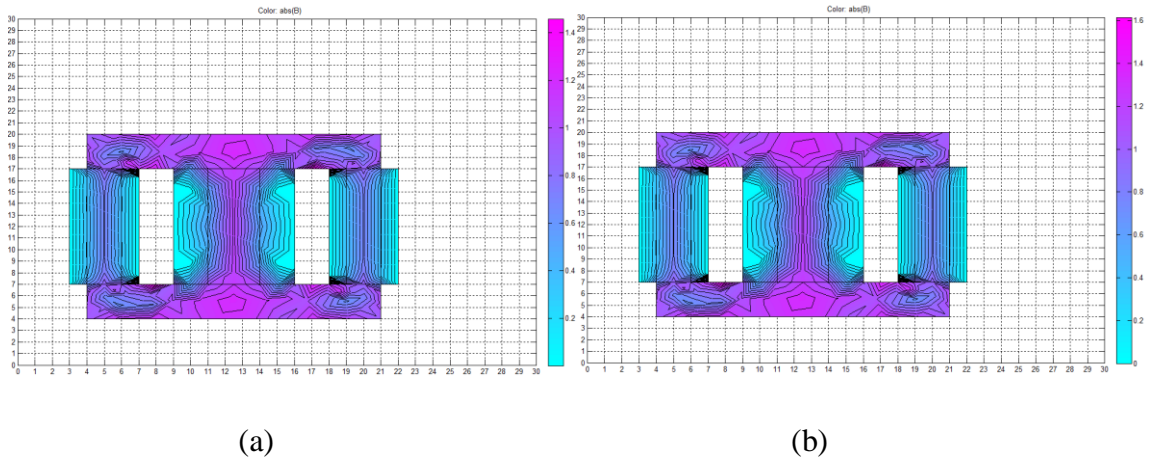


Figure.III.9 : la répartition de l'induction magnétique ;

- (a) Transformateur Classique.
- (b) Transformateur Supraconducteur.

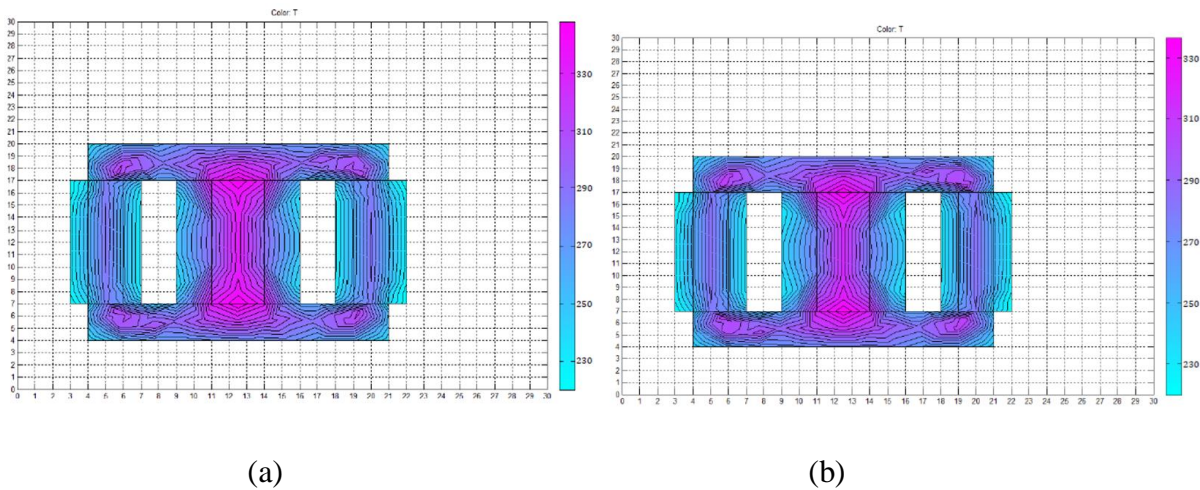


Figure.III.10 : Allure de la température :

- (a) Transformateur Classique.
- (b) Transformateur Supraconducteur.

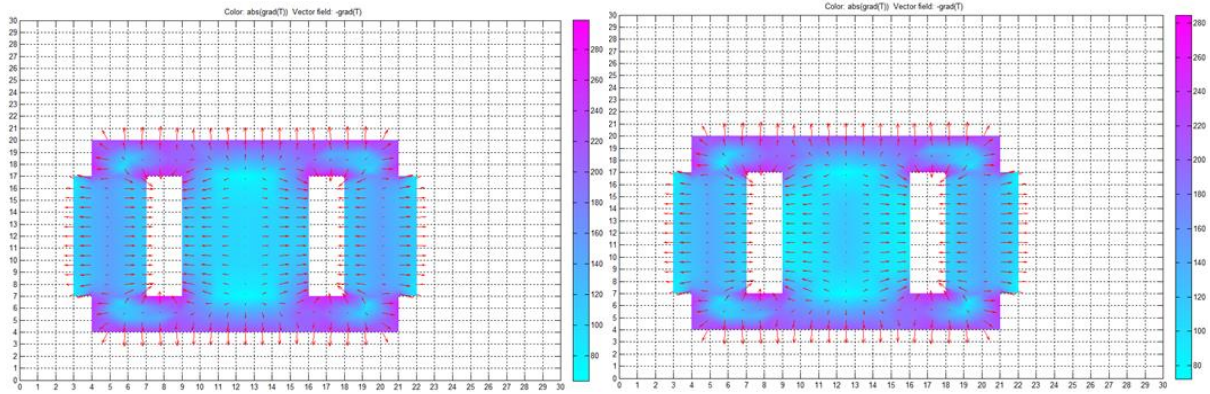


Figure.III.11 : Allure de gradient de température :

(a) Transformateur Classique.

(b) Transformateur Supraconducteur.

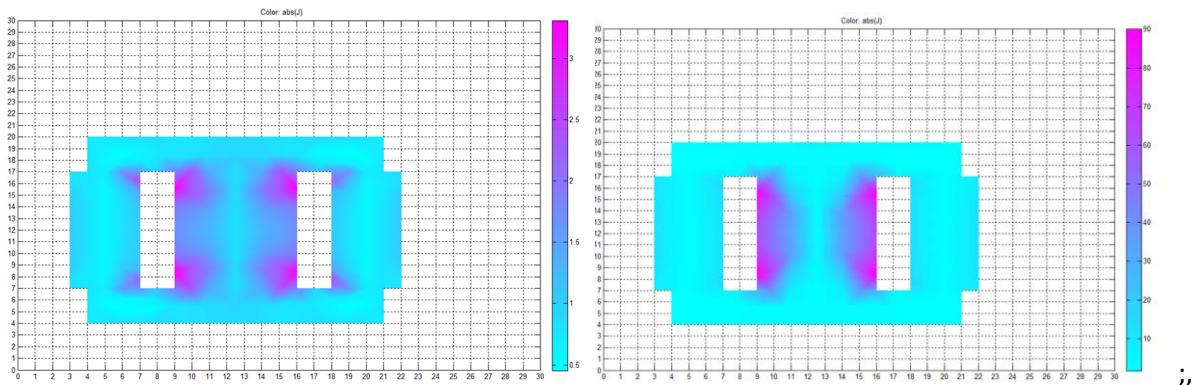


Figure.III.12 : Allure de densité de courant :

(a) Transformateur Classique.

(b) Transformateur Supraconducteur.

III.10. Interprétations des résultats :

Les figures ci-dessus présentent des différents résultats obtenus.

La figure III.8, montre l'allure du flux magnétique : Il apparaît selon ces résultats que les deux structures proposées admettent un flux magnétique qui se concentre principalement dans les noyaux en fer, comme prévu. Il y a également une distribution relativement uniforme dans les noyaux. Les lignes de flux sont aussi continuellement connectées à travers le noyau, ce qui montre que le champ magnétique est bien guidé par le noyau en fer.

La remarque attirante ici indique que pour un transformateur supraconducteur, il y a une meilleure canalisation du flux magnétique, montrant une efficacité améliorée dans la gestion du flux magnétique par rapport au transformateur classique. Ceci est essentiellement dû au diamagnétisme parfait des matériaux supraconducteurs.

Dans la figure III.9 : on s'intéresse à la répartition de l'induction magnétique et puisque le flux circulant dans chaque partie latérale du transformateur devra être environ la moitié du flux maximal imposé dans la jambe centrale, on voit clairement que :

- Pour le transformateur classique, l'induction magnétique est bien répartie à l'intérieur du noyau en fer, mais il peut y avoir des zones de saturation magnétique où le matériau atteint sa limite de capacité à canaliser le champ. Les couleurs représentent une répartition modérée de l'induction, avec des zones plus claires indiquant une induction plus basse. L'induction maximale du noyau ayant été fixée à 1.45 T, on aura donc une induction d'approximativement 0.725 T dans chaque branche latérale.
- Alors que pour le transformateur supraconducteur : l'induction magnétique est beaucoup plus élevée et mieux contrôlée dans le noyau. Les zones de haute induction sont plus prononcées, montrant l'efficacité supérieure des matériaux supraconducteurs pour créer les champs magnétiques intenses. La répartition est plus homogène et les valeurs maximales d'induction sont plus élevées, ce qui montre l'absence de pertes magnétiques et une meilleure gestion des champs magnétiques. Il apparaît selon ces résultats, que l'induction maximale du noyau ayant été établie à 1.6 T, on aura donc une induction de l'ordre de 0.8 T dans chaque branche latérale.

On ce qui concerne la figure III.10 qui présente l'allure de la température, on constat que la distribution de la température dans le transformateur classique montre des variations significatives avec des zones de haute et basse température clairement définies. Les zones centrales semblent plus chaudes vaut de 350 K, ce qui pourrait indiquer des pertes joules importantes et une dissipation thermique concentrée autour des enroulements.

Alors que la température dans le transformateur supraconducteur est plus uniformément répartie et généralement plus basse par rapport au transformateur classique elle est de l'ordre de 333 K. Cela est dû aux propriétés supraconductrices qui éliminent les pertes joules, conduisant à une meilleure efficacité thermique.

Parconséquent, le gradient de température dans le transformateur classique montre des variations significatives, surtout autour des enroulements où les différences de température sont les plus marquées. Cela indique un transfert de chaleur non uniforme, contribuant à une efficacité réduite et à des contraintes thermiques sur les matériaux.

Tandis que, dans le transformateur supraconducteur le gradient de température est beaucoup plus faible. La répartition est plus homogène, reflétant l'absence de pertes joules et une dissipation thermique beaucoup plus efficace. Cela entraîne moins de stress thermique et une durée de vie potentiellement plus longue pour les composants du transformateur.

L'allure de densité de courant exposée dans la figure III.12 montre que:

La densité de courant dans le transformateur classique montre une distribution avec des zones de haute densité de courant près des enroulements elle est de l'ordre de 1.68 A/mm^2 dans le primaire et de 3.3 A/mm^2 dans le secondaire. Cela est typique des transformateurs conventionnels où les pertes par effet joule sont plus importantes, conduisant à une génération de chaleur et à une répartition inégale du courant.

En revanche, la densité de courant dans le transformateur supraconducteur est bien plus uniforme et élevée. La capacité des matériaux supraconducteurs à transporter de grandes densités de courant sans résistance se traduit par une efficacité électrique supérieure et des pertes minimales. Cela permet au transformateur de fonctionner plus efficacement, avec une meilleure gestion de l'énergie et des performances améliorées. Il apparaît selon ces résultats, que la densité de courant atteint son maximum avec une forte concentration au centre de bobine conçu à base de YBCUO dans le secondaire qui est 84.4 A/mm^2 .

III.11. Conclusion :

L'étude comparative réalisée à l'aide de la méthode des éléments finis via PDETOOL dans MATLAB a mis en lumière des différences significatives entre les transformateurs supraconducteurs et les transformateurs classiques. Les transformateurs supraconducteurs offrent des avantages substantiels en termes d'efficacité énergétique, de réduction des pertes, de compacité, de gestion thermique et de potentiel d'application. Cependant, ces avantages sont contrebalancés par des coûts initiaux élevés et une complexité accrue en termes de fabrication et de maintenance.

Synthèse des Avantages et Inconvénients

Les transformateurs supraconducteurs se démarquent par une performance énergétique supérieure et une réduction notable des pertes, ce qui les rend particulièrement adaptés aux environnements où l'efficacité énergétique est une priorité. Leur compacité et leur gestion thermique améliorée constituent des atouts supplémentaires. Toutefois, les défis liés au coût et à la complexité doivent être pris en compte lors de l'évaluation de leur viabilité économique et technique. Les résultats de cette étude ouvrent des perspectives prometteuses pour l'utilisation des transformateurs supraconducteurs dans divers secteurs. La réduction des coûts des matériaux supraconducteurs et des technologies de refroidissement, ainsi que les avancées en ingénierie, pourraient rendre ces transformateurs plus accessibles et pratiques dans un avenir proche. En conclusion, bien que les transformateurs supraconducteurs présentent actuellement des défis, leurs avantages potentiels en termes d'efficacité énergétique et de performance justifient une poursuite des recherches et des développements dans ce domaine. L'adoption accrue de ces technologies pourrait contribuer de manière significative à l'optimisation des réseaux de distribution électrique et à la transition vers des systèmes énergétiques plus durables et résilients.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Ce travail concerne l'étude et la modélisation de transformateurs électriques bidimensionnels intégrant des matériaux supraconducteurs à hautes températures critiques. Il vise à explorer la structure d'un transformateur supraconducteur. Et pour atteindre cet objectif, nous avons utilisé la méthode des éléments finis (MEF), en tenant compte des propriétés électromagnétiques des matériaux utilisés.

Nous avons également analysé de manière indépendante les différents résultats obtenus grâce à des programmes adaptés. Après plusieurs simulations, une comparaison a été faite en termes de répartition de la densité de courant, de l'induction magnétique et de la température au sein des deux structures proposées, compte tenu de l'écart important entre les résultats, ce qui confirme que les matériaux supraconducteurs offrent de nombreux avantages et peuvent être largement utilisés dans les transformateurs électriques, ils offrent une densité de courant élevée, contribuent à améliorer le facteur de puissance du système.

La méthode de calcul a été bien étudiée afin de réduire les pertes dans les transformateurs entièrement basés sur des matériaux supraconducteurs, ce qui facilite la conception de ces transformateurs et améliore leur efficacité.

Notre approche de l'étude peut donc être résumée comme suit : Tout d'abord, nous avons étudié en profondeur les propriétés des matériaux supraconducteurs.

Dans le chapitre 1, nous avons accompli que ces matériaux sont largement utilisés dans l'industrie en raison de leur capacité à améliorer efficacement les performances des transformateurs, en particulier les matériaux supraconducteurs à haute température critique (HTS). Leurs capacités à fonctionner à des températures élevées et à fournir une conductivité électrique sans perte, tout en améliorant le stockage de l'énergie, renforce leurs attraits.

Dans le deuxième chapitre, nous avons mis en évidence l'importance capitale de la modélisation et de l'étude mathématique des matériaux, étape essentielle avant de les représenter dans des programmes de simulation. Cette première étape a jeté les bases de nos analyses ultérieures.

Enfin, dans le troisième chapitre, nous avons réussi à améliorer certaines des grandeurs qui caractérisent le transformateur. En réduisant les pertes via l'effet Joule se manifestant en température et en augmentant la densité de courant et rasant ainsi l'induction magnétique dans le noyau magnétique.

Ce travail conduit tout naturellement à envisager un certain nombre de prolongements :

- La réalisation d'un essai pratique ;
- Etude de l'intégration des transformateurs de flux externes.
- Exploitation d'autres logiciels de simulation tels qu'ANSYS, COMSOL Multiphasique.

Références bibliographiques :

- [1] Lévêque, J., Berger, K., Lubin, T., & Douine, B. (2018). Moteurs et générateurs supraconducteurs. La Revue 3 E. I, 94, 34-35.
- [2] Belkhiri, S. (2004). Contribution à l'étude des frontières libres de conduction et des pertes dans les fils supraconducteurs de type II massifs avec la loi de conduction idéale de BEAN (Mémoire de magistère, Batna, Université El Hadj Lakhder. Faculté des sciences de l'ingénieur).
- [3] Belkhiri, S., Alloui, L., & Mebarek, F. B. (2019). The Influence of the Geometrical Properties of Bulk Superconductors on Limiting Fault Current in an Electrical Network. *Advanced Electromagnetics*, 8(4), 136-142.
- [4] Belkhiri, S., Bouroubi, M., & Harrabi, A. (2020). Improvement of the Transient Stability of a 14-bus Network Using a Superconducting Fault-Current Limiter SFCL. *Advanced Electromagnetics*, 9(2), 75-83.
- [5] Belkhiri, S., Ghemari, Z. (2022). Comparative Study of Solid and Thin-Layers Superconducting Fault Current Limiters SFCL for Electrical Network Transient Stability Improvement ». [Journal of Superconductivity and Novel Magnetism](#). vol. 35, n° 3, pp.679-688.
- [6] Belkhiri, S., Ghemari, Z., Khene, M. L. , Ben Mebarek, F. and Saad, S. (2022). Implantation of Coated Superconducting Materials in the Synchronous Machine for Superconducting Energy Storage , *Journal of New Materials for Electrochemical Systems*, vol. 25, n°. 4, pp. 277-285.
- [7] Tnourji, A. (2019). les caractéristiques des matériaux supraconducteurs (mémoire de magistère université chermout auverge).
- [8] Mangin, Ph., KAHN, R. (2017). Matériaux supraconducteurs. EDP Sciences.
- [9] Wang, Z. S. (2012). The superconducting properties research of iron based-122 by transport and scanning micro-squid measurements, Thèse de doctorat, Université de Grenoble ;Académie des sciences de l'Université de Chine.

- [10] **Bouchehou, H.** (2019). Étude d'une machine synchrone à base d'éléments supraconducteurs, Thèse de doctorat, Université Mohamed Seddik Benyahia - Jijel.
- [11] **Leclerc, J.** (2013). Méthodes et outils de caractérisation électrique et magnétique des supraconducteurs, Thèse de doctorat, Université de Lorraine.
- [12] **Tnourji, A.** (2019). Les caractéristiques des matériaux supraconducteurs» Article.
- [13] **Elbaa, M.** (2020). Caractérisation et modélisation des matériaux supraconducteurs à haute température critique, Thèse de doctorat, Université de Lorraine; Université de Laghouat (Algérie).
- [14] **ABDERREZAKK, A.** (2005). Etude des propriétés structurales, électriques et magnétiques de céramiques supraconductrices YBaCuO et BiSrCaCuO, Thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine.
- [15] **BOUMARAF, R.** (2014). Modélisation par la méthode des volumes finis modifiés 3D d'une machine électrique supraconductrice, Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider–Biskra.
- [16] **Alhasan, R.** (2015). Étude et Réalisation d'une Nouvelle Structure d'un Moteur synchrone supraconducteur. Thèse doctorat de l'université de Lorraine.
- [17] **Mechekef, Z., Ayadi, A.** (2020). Etude de comportement d'un matériau supraconducteur. Mémoire de Master, Université de Jijel.
- [18] **Source :**<http://www.neel.cnrs.fr>.
- [19] **Renaud M.** (2010). Dimensionnements et essais de moteurs supraconducteurs, Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy I.
- [20] **Stavrev, S.** (2002). Modelling of high temperature superconductors for AC power applications, Thèse de doctorat, école polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL).
- [21] **BEN ALIA, Kh.** (2013). ETUDE DES SYSTEMES DE GUIDAGE MAGNETIQUE A BASE DE SUPRACONDUCTEUR HTc, Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider de Biskra.
- [22] **Yannick, C.** (2007). Limiteur Supraconducteur de Courant Continu. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 13 décembre.

REFERENCES

- [23] **BAIXIRAS, J.** (1998). Les Supraconducteurs Applications à l'électronique et à l'électrotechnique, CNRS EDITIONS France.
- [24] **KEBBAB, N.** (2007). Les Supraconducteurs, Modèles et Applications, Mémoire de Magister, Université de Batna.
- [25] **NEMDILI, S.** (2013). Modélisation et Simulation du Limiteur de Courant Supraconducteur, Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas Sétif-1.
- [26] **DAHMANI, H., DOUMIR, S.** (2018). Modalisation des Matériaux Supraconducteurs Application à la Limitation de Courant de Défaut dans un Réseau Electrique à Neuf (9) Jeux de Barres, Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf M'sila.
- [27] **KLUTSCH, I.** (2003). Modélisation des supraconducteurs et mesures, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- [28] **MARAF, H., NECIB, Zaineb.** (2018). Analyse de L'énergie Dissipative Dans Les Limiteurs de Courant Inductif Pour Les Systèmes D'énergie, Mémoire de Master, Université de Kasdi Merbah Ouargla.
- [29] **Rouahna, F.** (2012). Calcul Analytique des Pertes dans les Matériaux Supraconducteurs à Haute Température Critique (SHTc), Mémoire de Master, Université de Biskra,.
- [30] **Source : B. Gamble, G. Snitchler, T. MacDonald.** Full Power Test of a 36.5 MW HTS Propulsion Motor.
- [31] **BELHAMDI, S.** (2021). Modélisation et simulation des systèmes électromécanique. » Cours M2/S3/EM, Université Mohamed Boudiaf M'sila.
- [32] **ABDESSEMED, R.** (2011). Modélisation et simulation des machines électriques, Livre.
- [33] **BLMILOUD, R.** (2022). Commande par linéarisation entré/sortie de la MAS, mémoire de master, Université des Sciences et de la Technologie Mohamed El Bachir El Ibrahimi Bordj Bou arreridj.
- [34] **Samir, A., & Chafaa, A. L.** (2013). *Dimensionnement et calcul de courant de court-circuit d'un transformateur triphasé 100 KVA, 30KV/0.4 KV* (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).

[35] **Valentin Donnier-Valentin.** Contribution à l'étude des transformateurs supraconducteurs. Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2001. Français. ⟨NNT : ⟩. ⟨tel-00597717⟩

[36] **Moomou, J., & Luissint, C.** (2020). Fernando SANTOS-GRANERO, Slavery & Utopia. The Wars & Dreams of an Amazonian World Transformer. *Esclavages & Post-esclavages. Slaveries & Post-Slaveries*, (3).

[37] **Darkawi, A.** (2019). Transformateur monophasé.

[38] **Herrera, C. M.** (2021). Constitution et transformation, de Weimar à nos jours. *Revue française de droit constitutionnel*, 227-248.

[39] **Belkacemi, D.** (2012). Etude des caractéristiques des matériaux isolants pour transformateurs (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).

[40] **A. Masson et L. Breguet.** 1884.1840 Premier transformateur électrique,

[41] **Saber, N.** (2020). Protection et maintenance d'un transformateur industrielle.

[42] **Goodman, B. B.** (1964). Le transformateur supraconducteur. *Journal de Physique Appliquée*, 25(S11), 171-172.

[43] **Ferreira, L., Baazizi, Y., Meunier, S., Phulpin, T., Beljio, R., Trillaud, F., ... & Quéval, L.** (2023, July). Etude expérimentale de l'alimentation d'un dispositif supraconducteur à courant continu. In *Symposium de Genie Electrique (SGE 2023)*.