



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued

Faculté de la Technologie

Département de : Génie électrique

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : Réseaux électriques

Présenté par :

1. Benismail Abdellatif

2. Bek Ahmed Nadjib

Intitulé :

Étude des Différentes Classes des Matériaux Électrotechniques et leurs applications

Soutenue le : 13/06 /2026

Devant le jury composé de :

Dr : MERAZGA AZEDDINE

Encadreur

Dr : GUIA TALA

Président

Dr : MIDA IDRIS

Examineur

Année académique : 2025/2026

Remerciements

Avant tout, nous remercions Allah le Tout-Puissant qui nous a accordé la force, la patience et la volonté nécessaires pour accomplir ce modeste travail. Nous Lui demandons de nous guider et de nous accorder davantage de réussite dans notre parcours scientifique et professionnel.

*Nous adressons nos sincères remerciements à notre encadreur, **Dr.MERAZGA AZEDDINE**, pour ses précieux conseils, son soutien constant, sa disponibilité ainsi que la confiance qu'il nous a accordée tout au long de la réalisation de ce mémoire.*

Qu'il trouve à travers ces pages une infime partie de notre profonde gratitude et de notre grande reconnaissance.

Nous exprimons également nos vifs remerciements aux honorables membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer ce travail, ainsi que pour leurs remarques constructives et leur intérêt porté à cette étude.

Nos remerciements s'adressent aussi à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation universitaire, ainsi qu'à l'ensemble du personnel de la Faculté de Technologie de l'Université d'El-Oued pour leur aide et leur coopération.

Enfin, nous remercions chaleureusement toutes les personnes qui nous ont soutenus et encouragés, de près ou de loin, durant l'élaboration de ce travail.

En conclusion, nous prions Allah d'accepter ce travail et de le rendre sincèrement accompli pour Sa noble satisfaction. Louange à Lui au début et à la fin.

Dédicace

*Je dédie ce travail à Allah le Tout-Puissant, qui m'a accordé la force
et la réussite pour accomplir ce modeste travail.*

*À mes **chers parents**, ma mère et mon père, ainsi qu'à **mes frères et
sœurs***

*source de ma force et de mon soutien. Merci pour votre amour, vos
prières, votre encouragement et tous les sacrifices que vous avez faits pour
moi.*

*À **ma chère tante***

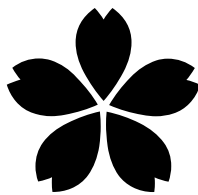
*qui m'a toujours soutenu et encouragé, et dont l'aide a été précieuse
pour la réussite de ce travail. Qu'Allah la récompense abondamment.*

*À **toute ma famille***

et à toutes les personnes qui m'ont soutenu de près ou de loin.

À vous tous, je dédie ce travail avec gratitude et affection.

B. Abd Ellatif



Dédicace

À la lumière de ma vie, la source de ma force et la raison de chaque pas de réussite que j'ai accompli.

À ma chère mère, dont les prières m'ont accompagné à chaque instant, qui a soutenu ma faiblesse et qui a toujours été fière de moi tout au long de mon parcours.

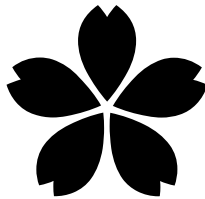
À mon cher père, qui m'a appris la patience et m'a inculqué les valeurs de la persévérance et du travail acharné, et qui a toujours été un modèle dont je suis fier.

Et à mes frères et sœurs, qui ont toujours été pour moi une source de soutien et d'amour, qu'Allah les récompense grandement.

À tous ceux qui m'ont soutenu et accompagné dans mon parcours académique, de près ou de loin.

À vous tous, j'adresse mes plus sincères sentiments de gratitude et de reconnaissance.

B. Ahmed Najib



Résumé

Dans cette étude, les matériaux électrotechniques ont été abordés en tant qu'éléments fondamentaux dans les domaines du génie électrique et de l'électronique, en raison de leurs propriétés physiques et électriques qui contribuent à l'amélioration des performances des systèmes et équipements électriques modernes. Ce mémoire a pour objectif de présenter une étude générale des différents types de matériaux électrotechniques, de leurs classifications et de leurs principales propriétés, tout en mettant en évidence leurs applications industrielles et technologiques.

L'étude a porté sur les matériaux conducteurs caractérisés par leur grande capacité à transporter le courant électrique, ainsi que sur les matériaux isolants utilisés pour protéger les équipements électriques et empêcher les fuites de courant. Elle a également traité les matériaux magnétiques employés dans les transformateurs et les machines électriques. De plus, les matériaux semi-conducteurs, qui constituent la base des industries électroniques modernes, ont été étudiés, ainsi que les matériaux composites qui combinent plusieurs propriétés améliorées telles que la légèreté, la résistance mécanique et la haute performance.

Cette étude a montré que le choix approprié des matériaux électrotechniques joue un rôle essentiel dans l'amélioration de l'efficacité des systèmes électriques, l'augmentation de leur fiabilité et la réduction des pertes énergétiques, ce qui confirme leur importance majeure dans le développement industriel et technologique moderne.

Mots-clés :

Matériaux électrotechniques, matériaux conducteurs, matériaux isolants, matériaux magnétiques, semi-conducteurs, matériaux composites, propriétés électriques, applications industrielles, systèmes électriques, génie électrique.

المخلص

في هذه الدراسة، تم التطرق إلى المواد الكهرو تقنية باعتبارها من الركائز الأساسية في مجالات الهندسة الكهربائية والإلكترونية، لما تتميز به من خصائص فيزيائية وكهربائية تساهم في تحسين أداء الأنظمة والتجهيزات الكهربائية الحديثة. هدفت هذه المذكرة إلى تقديم دراسة شاملة حول مختلف أنواع المواد الكهرو تقنية وتصنيفاتها وخصائصها الأساسية، مع إبراز أهم تطبيقاتها الصناعية والتكنولوجية.

شملت الدراسة المواد الناقلة التي تتميز بقدرتها العالية على نقل التيار الكهربائي، والمواد العازلة المستعملة لحماية الأجهزة الكهربائية ومنع تسرب التيار، بالإضافة إلى المواد المغناطيسية المستخدمة في المحولات والألات الكهربائية. كما تم التطرق إلى المواد شبه الناقلة التي تُعد أساس الصناعات الإلكترونية الحديثة، إلى جانب المواد المركبة التي تجمع بين عدة خصائص محسنة مثل الخفة والمتانة والكفاءة العالية.

وقد أظهرت هذه الدراسة أن الاختيار المناسب للمواد الكهرو تقنية يلعب دوراً أساسياً في رفع كفاءة الأنظمة الكهربائية وتحسين موثوقيتها وتقليل الفواقد الطاقوية، مما يؤكد أهميتها الكبيرة في التطور الصناعي والتكنولوجي الحديث.

الكلمات المفتاحية:

المواد الكهرو تقنية، المواد الناقلة، المواد العازلة، المواد المغناطيسية، أشباه النواقل، المواد المركبة، الخصائص الكهربائية، التطبيقات الصناعية، الأنظمة الكهربائية، الهندسة الكهربائية.

Liste des symboles et abréviations

ρ	Résistivité électrique
R	Résistance électrique
S	Section de l'échantillon
L	Longueur de l'échantillon
Ω	Ohm
$\Omega \cdot m$	Ohm mètre
ϵ_r	Permittivité relative
ϵ_0	Permittivité du vide
C	Capacité électrique
Q	Charge électrique
E	Champ électrique
E_{max}	Champ électrique maximal
V_{max}	Tension maximale admissible
σ	Densité de charge surfacique
PVC	Polychlorure de vinyle
XLPE	Polyéthylène réticulé
EPDM	Éthylène-Propylène-Diène Monomère
SF_6	Hexafluorure de soufre
AC	Courant alternatif
BT	Basse tension
E_g	Énergie de la bande interdite (gap énergétique)
E_v	Énergie du maximum de la bande de valence
∇	Opérateur gradient (variation spatiale)
e	Charge élémentaire
μ_n	Mobilité des électrons
CMM	Composites à matrice métallique
CMC	Composites à matrice céramique
CMO	Composites à matrice organique
CMP	Composites à matrice polymère
CRF	Composites renforcés par fibres

Liste des tableaux

Chapitre IV : Matériaux magnétiques

Tableau IV.1	Susceptibilité magnétique des principaux matériaux	Page 41
---------------------	--	---------

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les Matériaux Électrotechniques

Figure I.1.	Diagramme des bandes d'énergie d'un semi-conducteur	Page 6
--------------------	---	--------

Chapitre II : Matériaux Conducteurs

Figure II.1.	Structure de bandes d'énergie des matériaux conducteurs (métaux)	Page 14
Figure II.2.	Les meilleurs conducteurs électriques	Page 19

Chapitre III : Matériaux Isolants

Figure III.1.	Structure d'un câble électrique multicouche	Page 31
Figure III.2.	Étude de la capacité d'un condensateur plan	Page 32

Chapitre IV : Matériaux magnétiques

Figure IV.1.	Courbe d'hystérésis magnétique	Page 45
Figure IV.2.	Comparaison des cycles d'hystérésis des matériaux magnétiques doux et durs	Page 49
Figure IV.3.	Procédé d'atomisation de la poudre de fer	Page 50

Chapitre V : Matériaux semi-conducteurs

Figure V.1.	Structure des semi-conducteurs purs et génération des paires électron-trou dans le silicium	Page 62
Figure V.2.	Schéma d'un semi-conducteur dopé de type N (impuretés donneuses)	Page 62

Chapitre VI : Matériaux Composites

Figure VI.1.	Schéma de matériau composite	Page 67
Figure VI.2.	Types de matrice	Page 68
Figure VI.3.	Types de renfort	Page 69

Table des matières

Remerciements	Page i
Dédicaces	Page ii
Dédicaces	Page iii
Résumé	Page iv
Liste des symboles et abréviations	Page vi
Liste des tableaux	Page vii
Liste des figures	Page vii
Table des matières	Page viii
Introduction générale	Page 2
Chapitre I : Généralités sur les Matériaux Électrotechniques	
I.1. Introduction	Page 5
I.2. Définition générale des matériaux électrotechniques	Page 5
I.3. Évolution historique des matériaux électrotechniques	Page 5
I.4. Classification générale des matériaux électrotechniques	Page 6
I.4.1 Matériaux conducteurs	Page 6
I.4.2 Les matériaux isolants (diélectriques)	Page 7
I.4.3 Les semi-conducteurs	Page 7
I.4.4 Matériaux magnétiques	Page 8
I.5. Propriétés physiques et électriques des matériaux électrotechniques	Page 9
I.5.1 Propriétés électriques	Page 9
I.5.2 Propriétés physiques	Page 10
I.6. Résumé du Chapitre I	Page 11
Chapitre II : Matériaux Conducteurs	
II.1. Introduction	Page 13
II.2. Définition des matériaux conducteurs	Page 13
II.3. Structure électronique des matériaux conducteurs	Page 14
II.4. Propriétés physiques et électriques des matériaux conducteurs	Page 14
II.4.1 Propriétés électriques	Page 15
II.4.2 Propriétés physiques	Page 16
II.5. Classification des matériaux conducteurs	Page 17
II.5.1 Selon la nature du matériau	Page 17
II.5.2 Selon le niveau de conductivité électrique	Page 17
II.5.3 Selon l'état physique	Page 18

II.5.4 Selon le domaine d'utilisation	Page 18
II.6. Principaux conducteurs métalliques utilisés en électrotechnique	Page 18
II.6.1 Métaux non ferreux	Page 18
II.6.2 Métaux ferreux	Page 18
II.6.3 Matériaux les plus utilisés	Page 19
II.7. Applications des matériaux conducteurs en électrotechnique	Page 19
II.7.1 Bobinages des machines et câbles électriques	Page 19
II.7.2 Amélioration des contacts électriques	Page 19
II.7.3 Câblage et soudure	Page 20
II.7.4 Contacts glissants	Page 20
II.7.5 Résistances bobinées	Page 20
II.7.6 Lampes à incandescence	Page 21
II.7.7 Lampes à décharges	Page 21
II.7.8 Sondes de température	Page 21
II.8. Critères de choix des matériaux conducteurs	Page 21
II.9. Résumé du Chapitre II	Page 22

Chapitre III : Matériaux Isolants

III.1. Introduction	Page 24
III.2. Définition des matériaux isolants et leur importance en génie électrique	Page 24
III.3. La résistivité électrique des matériaux isolants et ses facteurs d'influence	Page 25
III.4. Propriétés physiques des matériaux isolants	Page 26
III.4.1 Propriétés thermiques	Page 26
III.4.2 Propriétés mécaniques	Page 26
III.4.3 Propriétés chimiques	Page 27
III.4.4 Propriétés électriques essentielles des isolants	Page 27
III.5. Classification des matériaux isolants	Page 28
III.5.1 Selon l'état physique	Page 28
III.5.2 Selon la nature chimique	Page 28
III.5.3 Selon le domaine d'utilisation	Page 28
III.5.4 Selon la fonction	Page 28
III.6. Utilisations des matériaux isolants dans les machines électriques	Page 29
III.6.1 Isolation des enroulements (Enroulements)	Page 29
III.6.2 Isolation entre les parties fixes et mobiles	Page 29
III.6.3 Isolation des encoches (Slots insulation)	Page 29
III.6.4 Isolation des extrémités et des connexions	Page 29

III.6.5 Isolation dans les transformateurs	Page 29
III.6.6 Protection contre les facteurs externes	Page 30
III.6.7 Amélioration des performances et de la durée de vie	Page 30
III.7. Les matériaux isolants utilisés dans les câbles électriques	Page 30
III.7.1 Rôle et importance des matériaux isolants dans les câbles électriques	Page 30
III.7.2 Les matériaux isolants utilisés dans les câbles électriques	Page 30
III.8. Rôle des diélectriques dans les condensateurs électriques	Page 31
III.8.1 Définition du diélectrique et mécanisme physique	Page 32
III.8.2 Influence du diélectrique sur la capacité	Page 32
III.8.3 Relation entre la charge et la capacité	Page 32
III.8.4 Rôle du diélectrique dans le stockage de l'énergie	Page 33
III.8.5 Influence sur le champ électrique	Page 34
III.8.6 Tension de claquage du diélectrique	Page 34
III.8.7 Pertes diélectriques et performance	Page 33
III.8.8 Types de diélectriques et stabilité	Page 34
III.9. Les matériaux isolants dans les équipements à haute tension	Page 34
III.9.1 Rôle des matériaux isolants en haute tension	Page 34
III.9.2 Propriétés requises des isolantes hautes tensions	Page 34
III.9.3 Types de matériaux isolants utilisés	Page 34
III.9.4 Applications des matériaux isolants en haute tension	Page 35
III.9.5 Importance des matériaux isolants	Page 35
III.10. Influence des facteurs externes sur les performances des isolants	Page 35
III.10.1 Effet de la température	Page 35
III.10.2 Effet de l'humidité	Page 36
III.10.3 Effet du champ électrique	Page 36
III.11. Résumé du Chapitre III	Page 36

Chapitre IV : Matériaux magnétiques

IV.1. Introduction	Page 38
IV.2. Origine du magnétisme	Page 38
IV.3. Classification des matériaux magnétiques	Page 39
IV.3.1 Matériaux diamagnétiques (Diamagnétiques)	Page 39
IV.3.2 Matériaux paramagnétiques (Paramagnétiques)	Page 40
IV.3.3 Matériaux ferromagnétiques (Ferromagnétiques)	Page 40
IV.3.4 Matériaux ferrimagnétiques (Ferrimagnétiques)	Page 41
IV.3.5 Matériaux antiferromagnétiques (Antiferromagnétiques)	Page 41
IV.4. Propriétés des matériaux magnétiques	Page 42

IV.5. Cycle d'hystérésis (Boucle d'hystérésis)	Page 44
IV.5.1 Description du cycle d'hystérésis	Page 44
IV.5.2 Paramètres caractéristiques	Page 44
IV.5.3 Pertes par hystérésis	Page 44
IV.5.4 Importance pratique	Page 45
IV.6. Matériaux magnétiques doux et durs	Page 45
IV.6.1 Matériaux magnétiques doux	Page 45
IV.6.1.1 Aciers électriques	Page 46
IV.6.1.2 Alliages Fe-Ni et Fe-Co	Page 46
IV.6.1.3 Ferrites douces	Page 46
IV.6.2 Matériaux magnétiques durs	Page 47
IV.6.3 Comparaison entre les matériaux magnétiques durs et doux	Page 48
IV.7. Matériaux magnétiques composites	Page 49
IV.7.1 Définition des matériaux magnétiques composites	Page 49
IV.7.2 Méthodes de fabrication des matériaux magnétiques composites	Page 49
IV.7.3 Propriétés physiques et magnétiques des matériaux magnétiques composites	Page 50
IV.8. Techniques de mesure des propriétés magnétiques	Page 51
IV.8.1 Mesure de la boucle d'hystérésis (Hysteresis Loop)	Page 51
IV.8.2 Appareils de mesure des courbes B-H	Page 51
IV.8.3 Mesure de la perméabilité magnétique	Page 51
IV.8.4 Mesure des pertes ferromagnétiques (Core Losses)	Page 52
IV.9. Applications des matériaux magnétiques	Page 53
IV.9.1 Matériaux magnétiques doux	Page 53
IV.9.2 Matériaux magnétiques durs	Page 53
IV.9.3 Applications modernes	Page 54
IV.10. Critères de choix des matériaux magnétiques	Page 54
IV.11. Résumé du chapitre IV	Page 55
Chapitre V : Matériaux semi-conducteurs	
V.1. Introduction	Page 57
V.2. Structure cristalline des matériaux semi-conducteurs	Page 57
V.3. Théorie des bandes d'énergie dans les matériaux semi-conducteurs	Page 58
V.4. Classification des matériaux semi-conducteurs selon leur nature et leur dopage	Page 61
V.5. Dopage des semi-conducteurs et mécanismes de transport des porteurs de charge	Page 62
V.6. Propriétés électriques des matériaux semi-conducteurs	Page 63
V.7. Applications des matériaux semi-conducteurs	Page 63

V.8.Résumé du chapitre V	Page 64
Chapitre VI : Matériaux Composites	
VI.1. Introduction	Page 66
VI.2. Définition des matériaux composites	Page 66
VI.3. Historique et évolution des matériaux composites	Page 67
VI.4. L'importance des matériaux composites dans l'ingénierie moderne	Page 67
VI.5. Éléments constituant un matériau composite	Page 68
VI .5.1 Matrice	Page 68
VI .5.2 Renforts	Page 69
VI .5.3 Additifs	Page 70
VI.6. Classification des matériaux composites	Page 70
VI.6.1 Classification selon la nature de la matrice	Page 70
VI.6.2 Classification selon la forme du renfort	Page 71
VI.6.3 Classification des composites à fibres	Page 71
VI.7. Propriétés physiques et mécaniques des matériaux composites	Page 71
VI.8.Applications des matériaux composites dans l'industrie	Page 72
VI.9.Résumé du chapitre VI	Page 73
Références Bibliographiques	Page 74
Conclusion Générale et Perspectives	Page 78

Introduction générale

Introduction Générale

Au cours des dernières décennies, les sciences et les technologies ont connu un essor considérable, particulièrement dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. Cette évolution fulgurante a engendré un besoin croissant en matériaux avancés, capables de satisfaire des exigences de performance et d'efficacité de plus en plus élevées au sein de diverses applications industrielles et technologiques [1].

Dans cet écosystème technologique, les matériaux électrotechniques s'affirment comme des éléments fondamentaux pour la conception et le fonctionnement des systèmes électriques. Ils jouent un rôle déterminant dans chaque étape de la chaîne énergétique : le transport, l'isolation, la transformation ainsi que le contrôle de l'énergie [2].

Le rôle central des matériaux en Génie Électrique

Dans le contexte actuel, les matériaux occupent une place névralgique au cœur du génie électrique. Leur fonction ne se limite plus à celle de simples composants passifs des systèmes électriques ; ils représentent désormais un facteur essentiel qui conditionne directement l'efficacité globale et les performances dynamiques des équipements.

Il n'est donc pas exagéré d'affirmer que la majeure partie des défis rencontrés par les ingénieurs contemporains, ainsi que les solutions innovantes qu'ils proposent, sont intrinsèquement liés au développement de nouveaux matériaux et à la pertinence de leur sélection technique [3].

L'évolution des matériaux électrotechniques se caractérise par une diversification croissante, en parfaite adéquation avec les progrès technologiques rapides. Cette dynamique a permis non seulement d'améliorer leurs propriétés intrinsèques, mais aussi d'élargir considérablement leurs spectres d'application.

Parallèlement, l'ère électrique moderne impose de nouveaux défis structurels aux acteurs de l'industrie, notamment :

- La réduction drastique des pertes énergétiques.
- L'amélioration continue du rendement des systèmes.
- La garantie de la stabilité et de la fiabilité opérationnelle dans des conditions de fonctionnement parfois extrêmes.

Pour relever ces défis, il est devenu indispensable pour l'ingénieur de disposer de connaissances appliquées et approfondies concernant les principes fondamentaux de la science des matériaux. Cela inclut la compréhension de leurs propriétés physiques et électriques, ainsi que leur comportement complexe sous l'influence des champs électromagnétiques. Cette maîtrise théorique et pratique a conduit au déploiement de nombreux dispositifs et technologies qui définissent le génie électrique contemporain [4].

Classification et propriétés des matériaux

Les matériaux électrotechniques sont classés en plusieurs catégories majeures, définies selon leurs propriétés physiques et leurs fonctions spécifiques au sein des circuits [5] :

1. **Les matériaux conducteurs** : Reconnus pour leur forte capacité à véhiculer le courant électrique.
2. **Les matériaux isolants (diélectriques)** : Utilisés pour empêcher le passage du courant, assurant ainsi la sécurité et la séparation des potentiels.
3. **Les matériaux magnétiques** : Essentiels à la fabrication des transformateurs, des inductances et des machines électriques tournantes.
4. **Les semi-conducteurs** : Ils constituent la pierre angulaire de l'électronique de puissance et des composants modernes comme les diodes et les transistors.
5. **Les matériaux composites** : Plus récents, ils combinent les avantages de plusieurs matériaux pour offrir des performances hybrides et ouvrir de nouveaux domaines d'utilisation.

L'étude rigoureuse de ces matériaux repose sur l'analyse de grandeurs physiques et électriques fondamentales telles que la conductivité, la résistivité, la permittivité et la perméabilité magnétique. À cela s'ajoutent les caractéristiques thermiques et mécaniques, qui influencent directement la pérennité des dispositifs en service. Le choix judicieux d'un matériau devient alors un enjeu crucial pour garantir l'optimum entre performance et fiabilité.

Objectifs et structure du mémoire

Le présent travail a pour objectif d'exposer une étude globale et détaillée des matériaux électrotechniques. Nous explorerons leur définition, leur classification ainsi que leurs propriétés spécifiques, en allant des concepts généraux jusqu'aux applications des matériaux composites les plus modernes.

Pour répondre à cet objectif, le mémoire est structuré en six chapitres distincts:

- **Chapitre 1** : Généralités sur les matériaux électrotechniques.
- **Chapitre 2** : Matériaux conducteurs.
- **Chapitre 3** : Matériaux isolants (diélectriques)
- **Chapitre 4** : Matériaux magnétiques.
- **Chapitre 5** : Matériaux semi-conducteurs.
- **Chapitre 6** : Matériaux composites.

À travers cette étude, nous ambitionnons de mettre en exergue l'importance vitale de ces matériaux dans le développement technologique actuel. Ce travail vise également, à travers l'étude de leurs propriétés fondamentales, à offrir une compréhension claire des critères de leur sélection et de leur utilisation optimale dans le domaine de l'électrotechnique, ainsi qu'à mettre en lumière leurs diverses applications dans les différents domaines industriels et technologiques.

Chapitre I:
Généralités sur les Matériaux
Électrotechniques

I.1. Introduction

Le domaine des matériaux électrotechniques constitue l'un des piliers fondamentaux du génie électrique et électronique, en raison de son rôle central dans la détermination des performances et de l'efficacité des différents systèmes et équipements électriques. En effet, la conception et le fonctionnement de ces systèmes dépendent fortement de la nature des matériaux utilisés ainsi que de leurs propriétés physiques et électriques, lesquelles régissent leur comportement sous l'influence des champs électriques et magnétiques. Avec le développement technologique accéléré, le besoin de matériaux aux propriétés améliorées s'est accru afin de répondre aux exigences des applications modernes, que ce soit en termes d'efficacité énergétique, de fiabilité ou de capacité à fonctionner dans des conditions d'exploitation sévères. Cela a conduit à un essor considérable de la science des matériaux, notamment en ce qui concerne la compréhension de la relation entre la structure microscopique des matériaux et leurs propriétés fonctionnelles.

Ce chapitre vise à présenter les concepts fondamentaux relatifs aux matériaux électrotechniques, en abordant leur définition et leur évolution historique, puis leur classification selon leur comportement électrique, tout en mettant en évidence leurs principales propriétés physiques et électriques.

I.2. Définition générale des matériaux électrotechniques

Les matériaux électrotechniques sont considérés comme des éléments essentiels dans les domaines du génie électrique et électronique. Ils regroupent un ensemble varié de matériaux utilisés pour le transport, la conversion ou le stockage de l'énergie électrique. Le choix de ces matériaux dépend principalement de leurs propriétés physiques, électriques et magnétiques, qui déterminent leur comportement lorsqu'ils sont soumis à des champs électriques et magnétiques [2]. Ces matériaux sont employés dans de nombreuses applications industrielles, allant des systèmes simples tels que les fils électriques aux systèmes complexes comme les circuits électroniques, les transformateurs, les machines électriques et les systèmes de communication modernes. Ils contribuent également de manière significative à l'amélioration des performances des dispositifs électriques, à l'augmentation de leur efficacité et à la réduction des pertes d'énergie, ce qui rend leur étude indispensable pour suivre l'évolution technologique [6].

I.3. Évolution historique des matériaux électrotechniques

Le développement des matériaux électrotechniques est étroitement lié aux progrès des concepts en physique électrique et en physique de l'état solide. Les premières observations des phénomènes électriques remontent à l'Antiquité, où l'on a constaté l'apparition de l'électricité statique due au frottement de certains matériaux. La science de l'électricité a connu un essor important à partir du XVIII^e siècle, notamment grâce aux travaux de Benjamin Franklin, qui ont permis de mieux comprendre la nature des charges électriques [7]. Au XIX^e siècle, les lois fondamentales de l'électricité et du

magnétisme ont été établies, permettant d'expliquer les phénomènes électriques et de favoriser l'émergence des applications industrielles.

Au début du XXe siècle, le développement de la mécanique quantique a contribué à expliquer la conduction électrique et à faire émerger les semi-conducteurs, ce qui a révolutionné le domaine de l'électronique [8]. De nos jours, le XXIe siècle est marqué par une évolution rapide dans le domaine des matériaux avancés, notamment les nanomatériaux et les supraconducteurs, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour les applications technologiques modernes [9].

I.4. Classification générale des matériaux électrotechniques

I.4.1 Matériaux conducteurs

Les matériaux conducteurs se caractérisent par leur grande capacité à laisser passer le courant électrique. Cela s'explique par la présence d'un grand nombre d'électrons libres capables de se déplacer à l'intérieur du réseau cristallin. De plus, la bande interdite (gap énergétique) de ces matériaux est nulle ou très faible, ce qui facilite le passage des électrons de la bande de valence à la bande de conduction. Parmi les matériaux conducteurs les plus utilisés dans les applications électrotechniques, on trouve le cuivre et l'aluminium. Le cuivre se distingue par une conductivité électrique élevée, tandis que l'aluminium est apprécié pour sa légèreté et son faible coût. Ainsi, ces deux matériaux sont largement employés dans la fabrication des fils, des câbles et des lignes de transport d'énergie électrique.

Malgré leurs avantages, les matériaux conducteurs présentent certaines limites, notamment les pertes thermiques dues à leur résistance électrique, ce qui entraîne une dissipation d'une partie de l'énergie sous forme de chaleur [3].

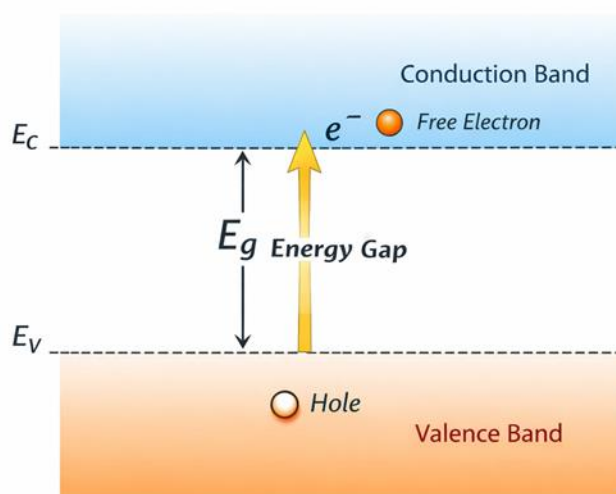


Figure I.1 : Diagramme des bandes d'énergie d'un semi-conducteur

I.4.2 Les matériaux isolants (diélectriques)

Les matériaux isolants (ou diélectriques) sont définis comme des matériaux à très faible conductivité électrique, en raison de l'absence ou de la faible densité de porteurs de charge libres dans leur structure, ainsi que de la présence d'une large bande interdite E_g entre la bande de valence et la bande de conduction, ce qui empêche le déplacement des électrons sous l'effet d'un champ électrique. Lorsqu'un champ électrique E est appliqué à un matériau diélectrique, il n'y a pas de conduction électrique comme dans les conducteurs, mais plutôt un phénomène de polarisation. Celui-ci correspond à un déplacement relatif des centres de charges positives et négatives au sein des atomes ou des molécules, conduisant à la formation de dipôles électriques [10]. La polarisation totale est donnée par la relation :

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi_e \vec{E} \quad (\text{I.1})$$

Où :

$\vec{P}$: est le vecteur de polarisation

ϵ_0 : est la permittivité du vide

χ_e : est la susceptibilité électrique

$\vec{E}$: est le champ électrique appliqué

Les matériaux diélectriques sont largement utilisés dans les applications électrotechniques, notamment pour l'isolation des câbles, la protection des équipements électriques et la fabrication des condensateurs. Leur choix dépend de plusieurs paramètres, tels que la permittivité, la résistance au claquage et la stabilité thermique [11].

I.4.3 Les semi-conducteurs

Les semi-conducteurs sont classés parmi les matériaux à conductivité électrique intermédiaire, leurs propriétés se situant entre celles des conducteurs et des isolants. Ce comportement s'explique par la théorie des bandes d'énergie (Band Theory).

En effet, ces matériaux se caractérisent par la présence d'une bande interdite E_g relativement faible (de l'ordre de 1 eV), séparant la bande de valence de la bande de

conduction, ce qui permet le passage des électrons lorsqu'une énergie suffisante leur est fournie [12].

La conductivité des semi-conducteurs peut être améliorée par un procédé appelé dopage (**Doping**), qui consiste à introduire des impuretés spécifiques afin d'obtenir :

- un semi-conducteur de type **N** (porteurs majoritaires : électrons libres).
- un semi-conducteur de type **P** (porteurs majoritaires : trous)

Le silicium est le matériau le plus utilisé dans ce domaine, car il possède de bonnes propriétés et il est disponible en grande quantité. Le germanium, quant à lui, est utilisé dans certaines applications spécifiques.

Les semi-conducteurs sont très importants, car ils sont utilisés pour fabriquer des composants électroniques comme les diodes et les transistors, qui sont à la base des appareils électroniques modernes [13].

I.4.4 Matériaux magnétiques

Les matériaux magnétiques sont largement utilisés dans les dispositifs électrotechniques tels que les transformateurs et les machines électriques. Leurs propriétés magnétiques sont liées à l'organisation des moments magnétiques des électrons au sein de la structure cristalline, formant des domaines magnétiques (domains). Lorsqu'un champ magnétique externe est appliqué, ces domaines tendent à s'orienter, entraînant l'aimantation du matériau [14].

Le comportement magnétique est généralement décrit par la relation :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (I.2)$$

Où **B** représente l'induction magnétique, **H** l'intensité du champ magnétique et μ la perméabilité du matériau.

Cette perméabilité s'exprime par :

$$\mu = \mu_0 \mu_t \quad (I.3)$$

L'aimantation est définie par :

$$\vec{M} = \chi \vec{H} \quad (I.4)$$

Et la relation fondamentale reliant les grandeurs magnétiques devient :

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (I.5)$$

Ainsi, l'aimantation d'un matériau résulte de l'alignement progressif des domaines magnétiques sous l'effet d'un champ extérieur, ce qui augmente sa réponse magnétique globale.

I.5. Propriétés physiques et électriques des matériaux électrotechniques

I.5.1 Propriétés électriques

Les propriétés électriques regroupent un ensemble de paramètres qui décrivent le comportement d'un matériau soumis à un champ électrique externe [15] :

- **Conductivité électrique**

Elle représente la capacité d'un matériau à conduire le courant électrique et est liée à la densité de courant par la loi d'Ohm locale :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{I.6})$$

Où $\vec{J}$ est la densité de courant, σ la conductivité électrique et $\vec{E}$ le champ électrique.

- **Résistivité électrique**

Elle exprime l'opposition d'un matériau au passage du courant électrique. Elle est liée à la résistance par la relation :

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (\text{I.7})$$

Où R est la résistance, ρ la résistivité, L la longueur et A la section. La résistivité est l'inverse de la conductivité.

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (\text{I.8})$$

- **Permittivité électrique**

Elle représente la capacité d'un matériau à se polariser et à stocker l'énergie électrique sous l'effet d'un champ électrique. Elle est décrite par la relation :

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (\text{I.9})$$

Où $\vec{D}$ est le déplacement électrique, ϵ la permittivité et $\vec{E}$ le champ électrique. L'énergie stockée dans un champ électrique est donnée par :

$$\overline{W} = \frac{1}{2} \varepsilon |\vec{E}|^2 \quad (\text{I.10})$$

- **Rigidité diélectrique**

Elle correspond à la valeur maximale du champ électrique qu'un matériau peut supporter sans rupture électrique. Elle s'exprime par :

$$\vec{E}_{bd} = \frac{\vec{V}_{rupture}}{d} \hat{n} \quad (\text{I.11})$$

Où $\vec{E}_{bd}$ est le champ de claquage, $\vec{V}_{rupture}$ la tension de rupture et d l'épaisseur du matériau.

I.5.2 Propriétés physiques

En complément des propriétés électriques, les matériaux électrotechniques présentent également des propriétés physiques essentielles qui influencent fortement leur comportement et leur performance dans les applications industrielles et électroniques.

- **Propriétés thermiques**

Les propriétés thermiques, notamment la conductivité thermique, décrivent la capacité d'un matériau à transférer la chaleur. Une conductivité élevée permet une dissipation efficace de la chaleur générée dans les dispositifs électriques, ce qui améliore leur stabilité et leur durée de vie. À l'inverse, les matériaux à faible conductivité thermique sont utilisés comme isolants thermiques pour limiter les pertes de chaleur et protéger les composants sensibles.

- **Dilatation thermique**

La dilatation thermique correspond à la variation des dimensions d'un matériau en fonction de la température. Ce phénomène peut entraîner des contraintes mécaniques internes, surtout lorsque des matériaux de natures différentes sont assemblés. Ainsi, ce paramètre est crucial dans la conception des systèmes fonctionnant sous des variations thermiques importantes afin d'assurer leur stabilité dimensionnelle et leur fiabilité.

- **Densité**

La densité représente la masse par unité de volume d'un matériau. Elle joue un rôle important dans la sélection des matériaux, en particulier dans les applications où la réduction du poids est essentielle, comme dans les équipements électriques portables ou les systèmes aéronautiques. Un bon compromis entre faible densité et bonnes performances mécaniques est souvent recherché.

- **Propriétés mécaniques**

Les propriétés mécaniques regroupent des caractéristiques telles que la dureté, la résistance mécanique, la ténacité et la rigidité. Elles déterminent la capacité d'un matériau à résister aux forces et aux contraintes appliquées durant son fonctionnement. Ces propriétés sont indispensables pour garantir la durabilité, la sécurité et la fiabilité des composants électrotechniques soumis à des efforts mécaniques continus ou variables.

I.6. Résumé du Chapitre I

Ce premier chapitre a été consacré à une étude générale des matériaux électrotechniques, considérés comme des éléments essentiels dans le domaine du génie électrique et de l'électronique. Dans un premier temps, leur évolution historique et leur importance dans le développement technologique et l'amélioration des performances des systèmes électriques modernes ont été présentées.

Ensuite, une classification générale des matériaux électrotechniques a été abordée, en distinguant les matériaux conducteurs, les matériaux isolants, les semi-conducteurs ainsi que les matériaux magnétiques, tout en mettant en évidence les caractéristiques spécifiques de chaque catégorie et leur rôle dans les différentes applications électrotechniques.

Par ailleurs, ce chapitre a permis d'étudier les principales propriétés électriques de ces matériaux, notamment la conductivité électrique, la résistivité, la permittivité et la rigidité diélectrique, qui influencent directement leur comportement et leur efficacité en fonctionnement. Les propriétés physiques telles que les propriétés thermiques, mécaniques et la densité ont également été présentées afin de mieux comprendre leur impact sur le choix des matériaux.

Enfin, cette étude constitue une base théorique fondamentale permettant de comprendre le comportement des matériaux électrotechniques et de faciliter leur sélection selon les exigences des applications industrielles et technologiques étudiées dans les chapitres suivants.

Chapitre II :

Matériaux Conducteurs

II.1. Introduction

Les matériaux conducteurs constituent l'un des éléments fondamentaux dans le domaine de l'électrotechnique et de l'électronique, en raison de leur rôle dans l'assurance du transport efficace du courant électrique au sein des différents systèmes. Cette propriété est due à la présence d'un grand nombre d'électrons libres dans leur structure, ce qui facilite le déplacement des charges sous l'effet du champ électrique.

Ces matériaux sont largement utilisés dans la fabrication de nombreux équipements électriques, tels que les câbles, les machines électriques et les circuits électroniques. Leur choix repose sur plusieurs critères, notamment la conductivité électrique, les propriétés mécaniques et thermiques, ainsi que le coût. Par ailleurs, les matériaux conducteurs se classent en plusieurs catégories principales, notamment les conducteurs métalliques, électrolytiques et gazeux, chaque type présentant des caractéristiques qui le rendent adapté à des applications spécifiques. Ainsi, l'étude des matériaux conducteurs est essentielle pour comprendre les mécanismes de conduction électrique et améliorer les performances des systèmes électriques.

Ce chapitre a pour objectif de présenter les différents types de matériaux conducteurs, d'analyser leurs propriétés physiques et électriques, ainsi que d'examiner leurs principales applications dans le domaine de l'électrotechnique.

II.2. Définition des matériaux conducteurs

Les matériaux conducteurs sont des matériaux capables de laisser passer le courant électrique avec une grande facilité, grâce à la présence d'un grand nombre d'électrons libres dans leur structure. Ils se caractérisent par une faible résistivité électrique et une conductivité élevée, ce qui permet le déplacement des charges électriques sous l'effet d'un champ électrique [16].

La relation entre la conductivité électrique et la résistivité est donnée par :

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (\text{II.1})$$

Où :

σ : conductivité électrique (S/m)

ρ : résistivité électrique ($\Omega \cdot \text{m}$)

La résistance d'un conducteur dépend de ses dimensions selon la relation :

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

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (\text{II. 3})$$

Où :

R : résistance électrique

L : longueur du conducteur

S : section du conducteur

II.3. Structure électronique des matériaux conducteurs

Les matériaux conducteurs se caractérisent par une structure électronique particulière qui permet la circulation facile du courant électrique. Dans ces matériaux, la bande de valence (Bande de valence) et la bande de conduction (Bande de conduction) sont soit chevauchées, soit très proches, ce qui entraîne une absence ou quasi-absence de gap énergétique entre elles.

Grâce à ce chevauchement, les électrons peuvent passer librement de la bande de valence à la bande de conduction sans fournir une énergie importante, ce qui explique la présence d'un grand nombre d'électrons libres dans le matériau.

$E_g \approx 0$

Ces électrons libres se déplacent ensuite sous l'effet d'un champ électrique, ce qui génère un courant électrique important [17].

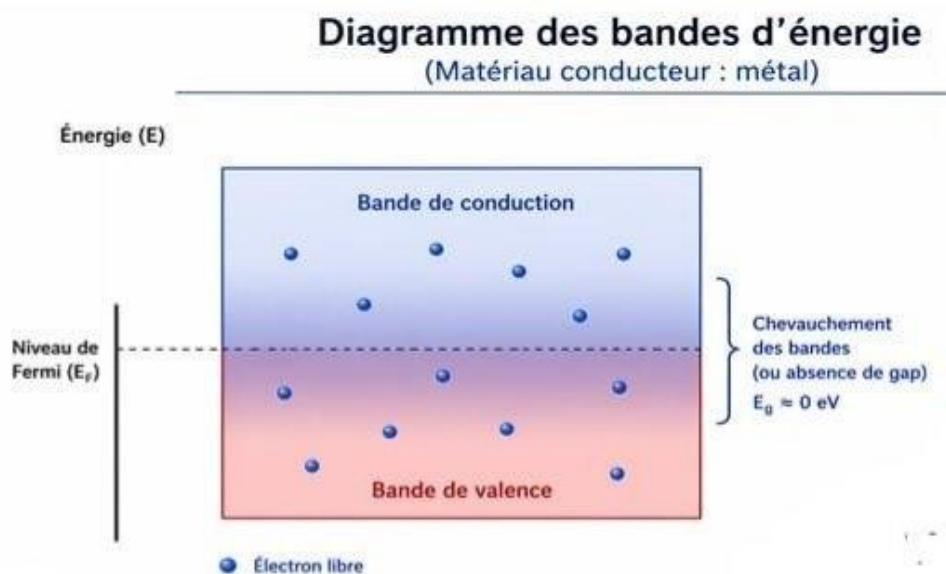


Figure II.1 : Structure de bandes d'énergie des matériaux conducteurs (métaux)

II.4. Propriétés physiques et électriques des matériaux conducteurs

Les matériaux conducteurs, en particulier les métaux, se caractérisent par des propriétés électriques et physiques étroitement liées, dues à la présence d'électrons

libres dans leur structure cristalline, ce qui permet le transport efficace de la charge et de l'énergie [15].

II.4.1 Propriétés électriques

Conductivité électrique : La conductivité électrique exprime la capacité d'un matériau à conduire le courant électrique. Elle est élevée dans les conducteurs en raison de la forte densité d'électrons libres.

$$\sigma = \eta q \mu \quad (\text{II. 4})$$

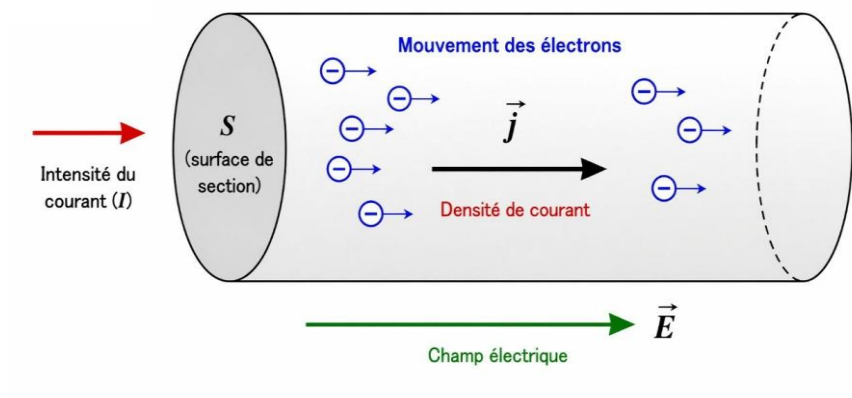
η : densité des électrons

μ : mobilité des électrons

Densité de courant et loi d'Ohm microscopique : Sous l'effet d'un champ électrique E , un courant apparaît :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II.5})$$

Cette relation représente la forme microscopique de la loi d'Ohm.



Résistivité et résistance : La résistivité est une propriété intrinsèque du matériau :

$$\rho = \frac{\vec{E}}{\vec{J}} \quad ; \quad \rho = \frac{1}{\sigma} \quad (\text{II.6})$$

La résistance dépend des dimensions du conducteur :

$$\vec{J} = \frac{I}{S} \hat{n} \quad \Rightarrow \quad |\vec{J}| = \frac{I}{S} \quad (\text{II.7})$$

$$|\vec{E}| = \frac{V}{L} \quad (\text{II.8})$$

$$\frac{V}{L} = \rho \frac{I}{S} \Rightarrow R = \rho \frac{L}{S} \quad (\text{II.9})$$

Influence de la température : Dans les matériaux conducteurs la résistance augmente avec la température en raison de l'augmentation des collisions entre électrons et atomes.

$$\vec{E}(T) = \rho(T)\vec{j} = \rho_0(1 + \alpha T)\vec{j} \quad (\text{II.10})$$

Effet Joule : Le passage du courant électrique entraîne une dissipation d'énergie sous forme de chaleur :

$$P = \vec{E} \cdot \vec{j} \Rightarrow P = \rho |\vec{j}|^2 \Rightarrow P = \frac{|\vec{E}|^2}{\rho} \quad (\text{II.11})$$

$$P = \iiint \vec{E} \cdot \vec{j} dV \Rightarrow P = RI \quad (\text{II.12})$$

Cela représente une perte d'énergie électrique

II.4.2 Propriétés physiques

Les matériaux conducteurs sont généralement des métaux ou des alliages métalliques, et ils se caractérisent par un ensemble de propriétés physiques distinctives, notamment :

Une très faible résistivité électrique : inférieure à $< 10^{-6} \Omega \text{ m}$, ce qui leur permet de transporter efficacement le courant électrique, contrairement aux isolants dont la résistivité est extrêmement élevée.

bonne conductivité thermique : de l'ordre de $100 \text{ W/ (m}^\circ\text{C)}$, ce qui facilite la dissipation de la chaleur, alors que les isolants présentent une conductivité thermique très faible.

Ils sont généralement solides et présentent une dureté élevée à l'exception de certains cas particuliers comme le mercure qui est liquide, ainsi que le sodium et le plomb qui sont plus tendres.

Une densité relativement élevée : autour de **10** en général, avec des exceptions comme l'aluminium (≈ 2.6), tandis que des métaux lourds tels que l'or, le platine et le tungstène

peuvent atteindre des densités proches de 20.

influence importante de la température sur :

La résistivité : 40 % en plus pour 100 °C d'élévation

La dilatation linéique : qq. mm/m pour 100 °C d'élévation

Une influence importante de la fréquence en régime alternatif, due à l'**effet de peau**, où le courant ne circule pas dans toute la section du conducteur mais se concentre à sa périphérie, ce qui augmente la résistance. Pour limiter cet effet, on utilise des conducteurs composés de plusieurs fils fins, comme le fil de Litz en haute fréquence.

II.5. Classification des matériaux conducteurs

Les matériaux conducteurs peuvent être classés de manière détaillée selon plusieurs critères physiques et techniques, notamment la nature du matériau, le mode de transport de la charge, l'état physique ainsi que le domaine d'application, comme suit [18] :

II.5.1 Selon la nature du matériau

Conducteurs métalliques (Conducteurs métalliques) : Ce sont les plus utilisés dans les applications électriques et industrielles. Ils comprennent des métaux tels que le cuivre, l'aluminium, l'argent et l'or, ainsi que certains alliages métalliques. Ils se caractérisent par une structure cristalline contenant des électrons de valence libres, ce qui permet une circulation facile du courant électrique avec de faibles pertes.

Conducteurs non métalliques : Ils ne reposent pas sur les électrons libres pour la conduction. On y trouve le graphite et certaines solutions électrolytiques (sels fondus ou solutions aqueuses). Dans ce cas, le courant est transporté par le déplacement des ions positifs et négatifs dans le milieu.

II.5.2 Selon le niveau de conductivité électrique

Très bons conducteurs : Comme l'argent et le cuivre, caractérisés par une très faible résistivité et une conductivité élevée, utilisés pour minimiser les pertes d'énergie.

Conducteurs moyens : Comme le fer et le nickel, qui présentent une conductivité plus faible mais de bonnes propriétés mécaniques, ce qui permet leur utilisation dans diverses applications.

Conducteurs relativement faibles : Comme le plomb et certains alliages, ayant une résistivité plus élevée, utilisés principalement dans des applications spécifiques.

II.5.3 Selon l'état physique

Conducteurs solides : Les plus courants, comme le cuivre et l'aluminium, où les électrons se déplacent dans une structure cristalline stable.

Conducteurs liquides : Comme le mercure et certains sels fondus, où la conduction est assurée par les ions ou les électrons dans un milieu liquide.

Conducteurs gazeux (rares) : Observés uniquement dans des conditions particulières d'ionisation, comme le plasma, où le gaz devient conducteur grâce à la présence d'ions et d'électrons libres.

II.5.4 Selon le domaine d'utilisation

Conducteurs pour le transport d'énergie électrique : Comme les câbles en cuivre et en aluminium utilisés dans les réseaux de transport et de distribution, où l'objectif est de réduire les pertes d'énergie.

Conducteurs spéciaux : Comme les alliages utilisés dans des applications thermiques ou électroniques précises, conçus pour répondre à des exigences spécifiques (résistance à la chaleur, stabilité mécanique, etc.).

Conducteurs haute fréquence : Comme le fil de Litz, constitué de plusieurs brins fins isolés entre eux, utilisé pour réduire l'effet de peau (skin effect) qui augmente la résistance à haute fréquence.

II.6. Principaux conducteurs métalliques utilisés en électrotechnique

Les conducteurs métalliques constituent des éléments essentiels dans les applications électrotechniques. Leur choix dépend de leurs propriétés électriques, mécaniques et économiques. Ils peuvent être classés en deux grandes catégories [19] :

II.6.1 Métaux non ferreux

Cette catégorie comprend un ensemble de métaux tels que le cuivre, l'aluminium, le magnésium, le mercure, le molybdène, le nickel, le zinc, ainsi que leurs alliages. Ces matériaux se caractérisent généralement par une bonne conductivité électrique, une résistance à la corrosion et, dans certains cas, une faible densité, ce qui les rend adaptés à la fabrication des câbles, des fils électriques et de divers équipements électriques.

II.6.2 Métaux ferreux

Ils regroupent le fer, la fonte et l'acier, ainsi que leurs alliages. Bien que leur conductivité électrique soit inférieure à celle des métaux non ferreux, ils présentent une grande résistance mécanique et une forte robustesse, ce qui les rend adaptés aux

applications nécessitant une bonne tenue structurelle, comme les structures et les circuits magnétiques.

II.6.3 Matériaux les plus utilisés

Parmi la grande diversité des matériaux conducteurs, deux d'entre eux occupent une place prépondérante en électrotechnique :

Le cuivre et ses alliages : grâce à leur très bonne conductivité électrique, leur ductilité et leur facilité de mise en forme, ils sont largement utilisés dans les fils et les installations électriques.

L'aluminium et ses alliages : ils se distinguent par leur faible masse volumique et leur coût relativement bas, tout en offrant une bonne conductivité, ce qui les rend très utilisés dans les lignes de transport et de distribution d'énergie électrique, notamment à haute tension.

Les meilleurs conducteurs électriques

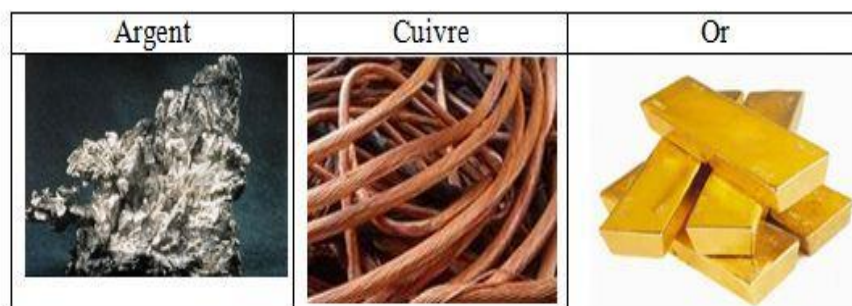


Figure II. 2: Les meilleurs conducteurs électriques

II.7. Applications des matériaux conducteurs en électrotechnique

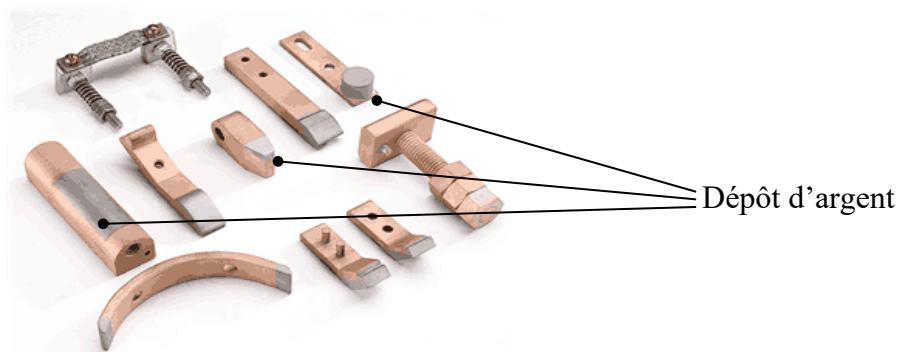
II.7.1 Bobinages des machines et câbles électriques

Le cuivre et l'aluminium sont parmi les matériaux les plus utilisés dans ce domaine en raison de leur faible résistivité et de leur coût relativement faible. Bien que l'aluminium présente une résistivité environ deux fois plus élevée que celle du cuivre, il est largement employé dans les lignes de transport à haute tension grâce à sa faible masse volumique, environ trois fois inférieure à celle du cuivre, ce qui réduit la charge mécanique sur les supports [15].

II.7.2 Amélioration des contacts électriques

Des métaux nobles tels que le platine et l'or, et surtout l'argent, qui possède une très bonne conductivité électrique ainsi qu'une excellente résistance à la corrosion, aux

chocs et aux arcs électriques, sont utilisés. Ils sont déposés sur les surfaces du cuivre ou de l'aluminium afin d'améliorer la qualité des contacts électriques, de réduire la résistance de contact et d'augmenter la durée de vie des éléments tels que les fusibles, les bras de sectionneurs haute tension et les dispositifs de contact électrique.



II.7.3 Câblage et soudure

Le plomb et l'étain sont utilisés dans les opérations de soudage et de câblage des circuits imprimés, grâce à leur faible température de fusion qui facilite l'assemblage des composants électroniques.

En microélectronique, l'argent est employé pour la brasure des puces électroniques (chips) en raison de sa très bonne conductivité, tandis que l'or ou l'aluminium sont utilisés pour le câblage par fils fins (bonding), avec des diamètres très réduits compris entre 10 et 500 μm , assurant une grande précision d'interconnexion dans les circuits miniaturisés.

II.7.4 Contacts glissants

Le carbone amorphe (charbon) est utilisé dans la fabrication des balais électriques des machines à courant continu ainsi que dans les machines synchrones et asynchrones. Malgré sa résistivité relativement élevée, il ne provoque pas d'usure importante des bagues ou des collecteurs tournants et présente de bonnes performances de contact ainsi qu'une grande stabilité en fonctionnement.

Le bronze est également utilisé pour les contacts avec les caténaires, grâce à sa bonne résistance mécanique et à sa tenue à l'usure.

II.7.5 Résistances bobinées

Ces résistances nécessitent des matériaux ayant une résistivité plus élevée que celle des conducteurs classiques (environ 100×10^{-8}). Ces propriétés sont obtenues grâce à l'utilisation d'alliages spécifiques tels que :

- Fe-Cu-Ni (maillechort)
- Ni-Cr
- Fe-Ni-Cr
- Fe-Cr-Al

Ces alliages se distinguent par leur stabilité thermique et leur capacité à fonctionner à haute température sans variation significative de leurs caractéristiques électriques.

II.7.6 Lampes à incandescence

Le tungstène est utilisé pour la fabrication du filament des lampes à incandescence en raison de sa très haute température de fusion (environ 3400 °C), ce qui lui permet de fonctionner à des températures élevées sans fondre. Il présente également une bonne résistance à l'évaporation dans les conditions de fonctionnement.

II.7.7 Lampes à décharges

Ces lampes fonctionnent grâce à des vapeurs de mercure ou de sodium qui émettent un rayonnement lumineux lorsqu'elles sont soumises à une décharge électrique dans un tube rempli de gaz. Elles se caractérisent par un rendement lumineux élevé par rapport aux lampes classiques.

II.7.8 Sondes de température

Thermocouple : Il couvre une large plage de températures allant de $[-185^{\circ}\text{C}, 300^{\circ}\text{C}]$ jusqu'à $[20^{\circ}\text{C}, 2300^{\circ}\text{C}]$. Il repose sur la jonction de deux métaux différents (fer, cuivre, platine, etc.) générant une tension électrique fonction de la température, permettant ainsi des mesures sur de très larges plages thermiques.

Thermorésistance : Elle fonctionne généralement dans des plages de $[0^{\circ}\text{C}, 200^{\circ}\text{C}]$ ou jusqu'à $[600^{\circ}\text{C}, 850^{\circ}\text{C}]$. Elle est le plus souvent réalisée en platine (capteur PT100), et sa résistance varie avec la température. Cette variation est mesurée à l'aide d'un courant connu afin de déterminer la température avec une grande précision [18].

II.8. Critères de choix des matériaux conducteurs

Le choix des matériaux conducteurs en électrotechnique repose sur un ensemble de facteurs physiques, mécaniques et économiques, afin d'assurer un fonctionnement optimal et fiable dans différentes conditions d'utilisation. Les principaux critères sont les suivants [18] :

Conductivité électrique : C'est le critère fondamental. On privilégie les matériaux capables de transporter le courant électrique avec un minimum de pertes énergétiques.

Résistivité électrique : Une faible résistivité permet de réduire les pertes par effet Joule

et limite ainsi l'échauffement du conducteur, améliorant l'efficacité globale du système.

Conductivité thermique : Elle favorise l'évacuation de la chaleur produite par le passage du courant, ce qui contribue à maintenir une température stable et à protéger les composants environnants.

Propriétés mécaniques : Elles regroupent la résistance mécanique, la ductilité et la malléabilité, essentielles pour la fabrication des fils et câbles soumis à des contraintes mécaniques.

Résistance à la corrosion et à l'oxydation : Cette propriété assure une bonne durabilité du matériau face aux agressions environnementales telles que l'humidité et l'air, prolongeant ainsi sa durée de vie.

Densité et masse volumique : Ce critère est important dans les applications de transport d'énergie, où les matériaux légers comme l'aluminium sont préférés afin de réduire les charges mécaniques.

Stabilité thermique et température de fusion : Le matériau doit conserver ses propriétés physiques et électriques même à des températures élevées, notamment en cas de fortes charges ou de fonctionnement intensif.

Coût économique : Il s'agit d'un facteur déterminant dans l'industrie, où le choix se fait en fonction du meilleur compromis entre performance et coût global.

Aptitude à la fabrication : Le matériau doit être facilement transformable en fils, câbles ou composants adaptés aux besoins industriels.

II.9.Résumé du Chapitre II

Ce chapitre a été consacré à l'étude des matériaux conducteurs en tant qu'éléments essentiels dans le domaine du génie électrique. Dans un premier temps, leur définition ainsi que leur structure électronique ont été présentées afin de comprendre le mécanisme de conduction électrique et le déplacement du courant à travers ces matériaux. Les principales propriétés électriques et physiques ont également été abordées, notamment la conductivité électrique, la résistivité ainsi que l'influence de la température sur leurs performances.

Par ailleurs, une classification des matériaux conducteurs selon différents critères a été présentée, tout en mettant en évidence leurs principaux types et leurs applications dans les câbles, les machines électriques ainsi que les dispositifs de connexion et de transmission électrique. Enfin, les principaux critères de sélection des matériaux conducteurs ont été exposés en tenant compte des aspects électriques, thermiques, mécaniques et économiques, afin d'assurer un fonctionnement optimal, une meilleure efficacité et une plus grande fiabilité des équipements électriques.

Chapitre III :

Matériaux Isolants

III.1. Introduction

Les matériaux isolants constituent un élément fondamental dans le domaine du génie électrique. Ils se caractérisent par leur capacité à s'opposer au passage du courant électrique, ce qui permet d'isoler les parties conductrices et de protéger les circuits contre les différents défauts. Leur importance réside dans la sécurité des installations électriques et des utilisateurs, ainsi que dans l'amélioration des performances et la réduction des pertes d'énergie.

Ces matériaux sont utilisés dans plusieurs domaines, notamment les câbles électriques, les machines électriques, les condensateurs et les équipements à haute tension, où ils permettent d'éviter les fuites de courant et les courts-circuits. Leur efficacité dépend de propriétés essentielles telles qu'une résistivité élevée, une bonne rigidité diélectrique, ainsi que leur capacité à résister aux conditions environnementales comme la température et l'humidité.

Ce chapitre a pour objectif de présenter les principaux aspects des matériaux isolants, en abordant leur définition, leurs propriétés, leur classification, ainsi que leurs différentes applications et les critères de sélection nécessaires pour assurer un fonctionnement fiable et sécurisé des systèmes électriques.

III.2. Définition des matériaux isolants et leur importance en génie électrique

Les matériaux isolants sont définis comme des matériaux possédant une très forte résistivité électrique, ce qui leur permet de s'opposer au passage du courant électrique ou de le bloquer presque totalement. Ils se caractérisent par une très faible présence d'électrons libres, ce qui limite fortement le déplacement des charges électriques à l'intérieur du matériau, contrairement aux matériaux conducteurs. Ils sont donc utilisés principalement pour séparer les parties conductrices dans les circuits électriques et éviter tout contact direct entre elles.

Les matériaux isolants se présentent sous différentes formes : solides (comme le plastique, le verre et le caoutchouc), liquides (comme les huiles isolantes) et gazeux (comme l'air et le gaz SF₆). Leur choix dépend de l'application, du niveau de tension électrique et des conditions de fonctionnement [20].

L'importance des matériaux isolants en génie électrique réside dans plusieurs aspects essentiels, notamment :

La protection des équipements électriques contre les dommages causés par les fuites de courant ou les courts-circuits.

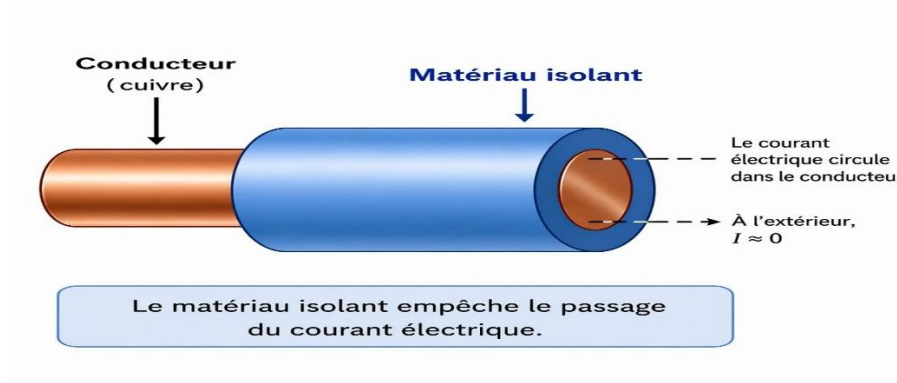
La garantie de la sécurité des utilisateurs face aux chocs électriques.

L'amélioration de l'efficacité des systèmes électriques en réduisant les pertes et les courants indésirables.

La possibilité de faire fonctionner les équipements à haute tension de manière sûre et stable.

L'allongement de la durée de vie des appareils électriques grâce à une isolation efficace et continue.

Ainsi, les matériaux isolants constituent un élément indispensable dans la conception et le fonctionnement des différents systèmes électriques modernes.



III.3. La résistivité électrique des matériaux isolants et ses facteurs d'influence

La résistivité électrique (Résistivité électrique) est l'une des propriétés physiques les plus importantes utilisées pour évaluer la performance des matériaux isolants. Elle exprime la capacité d'un matériau à s'opposer au passage du courant électrique à travers lui. La résistivité électrique est notée ρ (*rho*). Il s'agit d'une propriété caractéristique de chaque matériau, qui dépend de sa structure interne, de sa pureté et de la température.

La résistivité électrique est définie comme la résistance qu'offre un matériau au passage du courant électrique. Elle est mesurée sur un échantillon de dimensions données et est exprimée par la relation suivante :

$$\rho = R \frac{S}{L} \quad (\text{III.1})$$

ρ : résistivité électrique ($\Omega \cdot \text{m}$)

R : résistance électrique (Ω)

S : section de l'échantillon (m^2)

L : longueur de l'échantillon (m)

Les matériaux isolants se caractérisent par une résistivité électrique très élevée par rapport aux matériaux conducteurs, généralement comprise entre 10^7 et $10^{16} \Omega \cdot \text{m}$. Plus

la valeur de la résistivité est élevée, meilleur est le pouvoir isolant du matériau, car le passage des électrons y est presque nul.

La résistivité électrique des matériaux isolants est influencée par plusieurs facteurs, notamment la température, puisque la résistivité diminue généralement lorsque la température augmente. La pureté du matériau joue également un rôle important, car la présence d'impuretés réduit la qualité de l'isolation électrique. De plus, la structure interne est déterminante : les matériaux amorphes présentent souvent de meilleures propriétés isolantes que les matériaux cristallins. Enfin, l'humidité constitue l'un des facteurs les plus défavorables, car la présence d'eau entraîne une diminution importante de la résistivité [10].

III.4. Propriétés physiques des matériaux isolants

Les matériaux isolants sont parmi les plus importants en électrotechnique. Leur choix dépend d'un ensemble de propriétés physiques qui déterminent leurs performances et leur efficacité en isolation. Ces propriétés sont généralement classées en trois groupes principaux : thermiques, mécaniques et chimiques, auxquelles s'ajoutent des propriétés électriques essentielles [21].

III.4.1 Propriétés thermiques

Les propriétés thermiques décrivent le comportement du matériau isolant lorsqu'il est soumis à la chaleur, ce qui est crucial car les appareils électriques fonctionnent souvent à des températures élevées.

Stabilité thermique : capacité du matériau à conserver ses propriétés isolantes sans dégradation lorsque la température augmente. La plupart des isolants supportent généralement moins de 200°C, sauf certains matériaux comme le verre, le mica et l'amiante.

Dilatation thermique : variation des dimensions (longueur ou volume) du matériau avec la température. Une forte dilatation peut entraîner des fissures ou des déformations.

Température de fusion ou de dégradation : limite à partir de laquelle le matériau perd sa structure physique ou chimique, ce qui définit son domaine d'utilisation.

Faible conductivité thermique : la plupart des isolants sont également de bons isolants thermiques, ce qui protège les équipements contre la surchauffe.

III.4.2 Propriétés mécaniques

Elles concernent la capacité du matériau à résister aux forces mécaniques externes.

Dureté : résistance de la surface aux rayures et aux déformations, élevée dans le verre

Résistance à la traction : capacité à supporter des forces d'étirement sans rupture.

Résistance à la compression : capacité à supporter des forces de pression sans déformation ou rupture.

Élasticité : certains matériaux comme le caoutchouc et les plastiques peuvent se déformer puis retrouver leur forme initiale, ce qui est utile pour l'isolation des câbles.

Fragilité : certains matériaux comme la céramique sont résistants à la compression mais cassants aux chocs.

III.4.3 Propriétés chimiques

Elles déterminent la stabilité du matériau dans différents environnements.

Résistance à la corrosion chimique : capacité à résister aux acides, bases et huiles sans dégradation.

Stabilité chimique : absence de modification de la structure du matériau au cours du temps ou sous l'effet de facteurs externes.

Absorption d'humidité : l'eau réduit fortement la résistivité électrique et diminue la qualité de l'isolation.

Résistance à l'oxydation : capacité à résister à la réaction avec l'oxygène afin de conserver ses propriétés sur le long terme.

III.4.4 Propriétés électriques essentielles des isolants

En plus des propriétés physiques, les isolants possèdent des caractéristiques électriques importantes :

Très forte résistivité électrique : généralement supérieure à $10^6 \Omega \cdot m$, pouvant atteindre jusqu'à $10^{16} \Omega \cdot m$.

Rigidité diélectrique : environ 10 kV/mm, représentant le champ électrique maximal avant claquage.

Constante diélectrique relative (ϵ_r) : supérieure à 1, généralement entre 2 et 8 selon le matériau.

Très faible conductivité électrique : le passage du courant est quasiment nul.

État physique : les isolants peuvent être solides, liquides ou gazeux selon les applications.

Densité : souvent proche de 1 g/cm^3 pour de nombreux polymères, mais variable selon les matériaux magnétiques

III.5. Classification des matériaux isolants

Les matériaux isolants peuvent être classés en électrotechnique selon plusieurs critères principaux, afin de faciliter leur choix en fonction de la nature de l'application et des conditions de fonctionnement [22].

III.5.1 Selon l'état physique

Isolants solides : tels que le verre, la céramique, les plastiques, le papier et le mica. Ils sont utilisés pour l'isolation des câbles, des transformateurs et des supports électriques.

Isolants liquides : comme les huiles isolantes (huile de transformateur). Ils assurent à la fois l'isolation et le refroidissement dans les transformateurs et les condensateurs.

Isolants gazeux : tels que l'air et le gaz SF_6 . Ils sont utilisés dans l'isolation à haute tension et dans les disjoncteurs.

III.5.2 Selon la nature chimique

Matériaux isolants organiques : comme le papier, le bois, le caoutchouc et les plastiques. Ils se caractérisent par leur légèreté et leur facilité de fabrication, mais présentent une faible résistance thermique.

Matériaux isolants inorganiques : tels que le verre, la céramique et le mica. Ils offrent une excellente résistance thermique et chimique, mais sont généralement fragiles.

III.5.3 Selon le domaine d'utilisation

Isolants pour basse tension : utilisés dans les appareils domestiques et les câbles simples.

Isolants pour moyenne tension : utilisés dans les réseaux de distribution électrique.

Isolants pour haute tension : utilisés dans les lignes de transport et les postes électriques, nécessitant des propriétés d'isolation très élevées.

III.5.4 Selon la fonction

Matériaux assurant uniquement l'isolation électrique : leur rôle principal est

d'empêcher le passage du courant électrique.

Matériaux assurant une isolation électrique et thermique : comme certains polymères.

Matériaux isolants multifonctionnels : ils offrent, en plus de l'isolation électrique, des propriétés mécaniques ou chimiques spécifiques selon l'application.

III.6. Utilisations des matériaux isolants dans les machines électriques

Les matériaux isolants jouent un rôle essentiel dans le fonctionnement des machines électriques avec efficacité et sécurité. Ils sont utilisés pour isoler les parties conductrices du courant et éviter les fuites électriques ou les courts-circuits. Leurs applications dans les machines électriques sont les suivantes [23] :

III.6.1 Isolation des enroulements (Enroulements)

Les matériaux isolants sont utilisés pour isoler les fils constituant les enroulements des moteurs et des générateurs, afin d'éviter le contact entre les spires ou entre les enroulements et le noyau métallique.

Exemple : revêtement des fils par un vernis isolant (émail), utilisation de papier isolant ou de rubans isolants.

III.6.2 Isolation entre les parties fixes et mobiles

Dans les machines électriques telles que les moteurs, le stator (partie fixe) est séparé du rotor (partie mobile) à l'aide de matériaux isolants, afin d'éviter tout passage de courant indésirable.

III.6.3 Isolation des encoches (Slots insulation)

Des matériaux isolants sont placés dans les encoches du noyau ferromagnétique de la machine afin d'isoler les enroulements du fer et de réduire les pertes électriques.

III.6.4 Isolation des extrémités et des connexions

Les matériaux isolants protègent les connexions et les extrémités des enroulements contre les contraintes électriques, thermiques et les décharges électriques.

III.6.5 Isolation dans les transformateurs

Les matériaux isolants (solides et liquides) servent à isoler les enroulements des transformateurs, tandis que les huiles isolantes assurent également le refroidissement.

III.6.6 Protection contre les facteurs externes

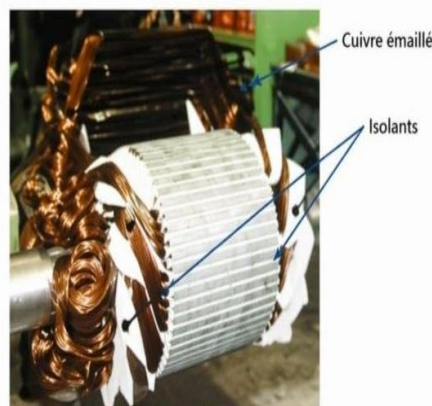
Les matériaux isolants protègent les composants des machines contre :

- l'humidité
- la poussière
- les produits chimiques
- les températures élevées

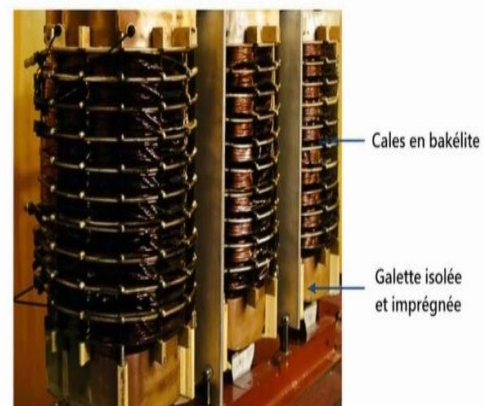
III.6.7 Amélioration des performances et de la durée de vie

Une bonne isolation permet de :

- réduire les pertes électriques
- éviter les pannes
- améliorer le rendement de la machine
- prolonger sa durée de vie



— Rotor bobiné de moteur asynchrone —



— Transformateur triphasé —

III.7. Les matériaux isolants utilisés dans les câbles électriques

III.7.1 Rôle et importance des matériaux isolants dans les câbles électriques

Les matériaux isolants dans les câbles électriques jouent un rôle essentiel en empêchant les fuites de courant, en évitant les courts-circuits, en protégeant les conducteurs des facteurs extérieurs et en garantissant la sécurité et la stabilité du fonctionnement électrique. [24].

III.7.2 Les matériaux isolants utilisés dans les câbles électriques

PVC (polychlorure de vinyle)

Le PVC est le matériau isolant le plus couramment utilisé dans les câbles domestiques. Il est économique, facile à produire et présente une bonne résistance à l'humidité. Il supporte également des températures modérées. Il est utilisé dans les installations domestiques et les câbles basse tension.

XLPE (polyéthylène réticulé)

Le XLPE est un isolant de haute performance. Il peut supporter des températures élevées, supérieures à 90°C, et offre une excellente résistance au vieillissement électrique. Il est utilisé dans les câbles de moyenne et haute tension.

Caoutchouc (Rubber)

Le caoutchouc est un matériau très flexible, offrant une bonne résistance aux chocs et aux flexions. Il assure une isolation efficace même dans des conditions difficiles. Il est utilisé pour les câbles mobiles et les équipements industriels.

Papier imprégné d'huile

C'est l'une des techniques d'isolation les plus anciennes. Le papier est imprégné d'huiles isolantes afin d'améliorer ses performances électriques. Bien qu'il assure une bonne isolation, son utilisation est aujourd'hui limitée. Il est principalement utilisé dans les anciens câbles à haute tension.

PTFE (Téflon)

Le PTFE est un excellent isolant électrique, capable de résister à des températures très élevées allant jusqu'à 250°C. Il possède également une forte résistance chimique. Il est utilisé dans les applications industrielles avancées et l'aéronautique [29].

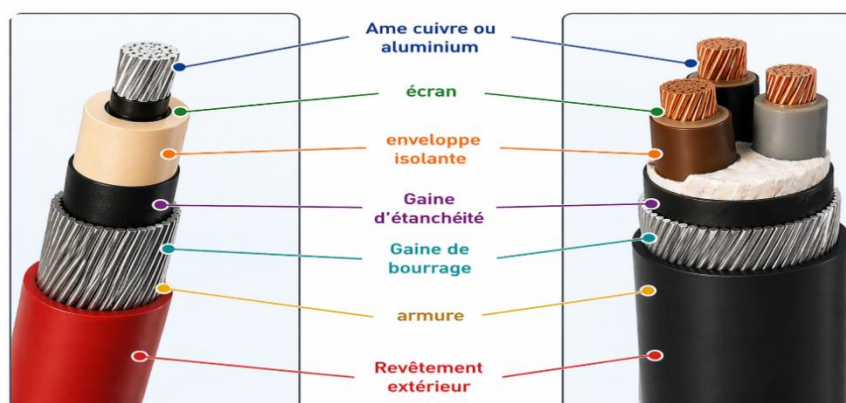


Figure III.1 : Structure d'un câble électrique multicouche

III.8. Rôle des diélectriques dans les condensateurs électriques

III.8.1 Définition du diélectrique et mécanisme physique

Le diélectrique est un matériau isolant placé entre les armatures d'un condensateur. Sa fonction principale est d'empêcher le passage direct des charges électriques entre les deux plaques, évitant ainsi tout court-circuit, tout en permettant l'établissement d'un champ électrique nécessaire au stockage de l'énergie. Lorsqu'une différence de potentiel est appliquée, le matériau diélectrique subit un phénomène de polarisation caractérisé par un léger déplacement des charges au sein des atomes ou des molécules. Cette polarisation engendre des dipôles électriques qui créent un champ interne opposé au champ externe, ce qui réduit l'intensité du champ électrique global à l'intérieur du condensateur [25].

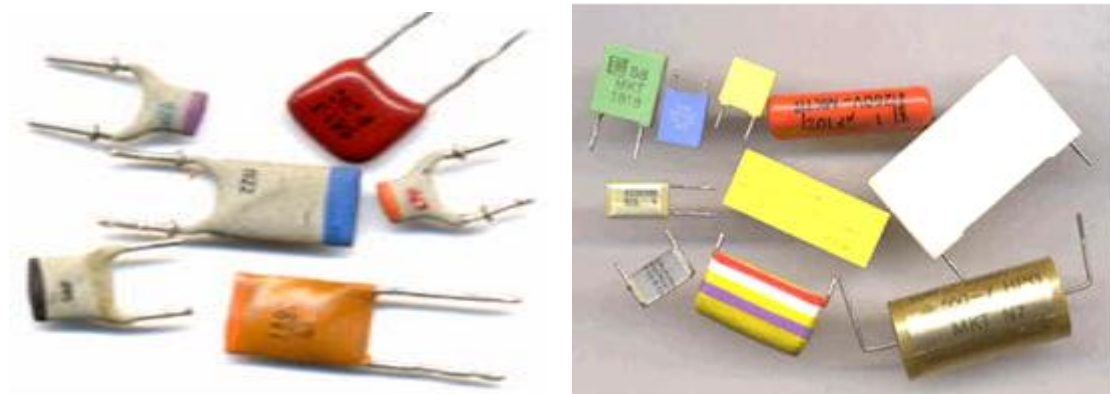


Figure III.2 : Étude de la capacité d'un condensateur plan

III.8.2 Influence du diélectrique sur la capacité

L'introduction d'un diélectrique entre les armatures entraîne une augmentation significative de la capacité du condensateur, qui dépend de la permittivité du matériau. Elle est donnée par la relation suivante :

$$C = \epsilon_T \epsilon_0 \frac{S}{e} \quad (\text{III.2})$$

Où ϵ_T est la permittivité relative du diélectrique. On peut également écrire :

$$C = \epsilon_T C_0 \quad (\text{III.3})$$

Ce qui montre que la présence du diélectrique multiplie la capacité par un facteur égal à ϵ_T .

III.8.3 Relation entre la charge et la capacité

La charge stockée dans le condensateur est liée à la capacité et à la tension appliquée par la relation :

$$Q = CV \quad (\text{III.4})$$

Ainsi, toute augmentation de la capacité due au diélectrique entraîne une augmentation proportionnelle de la charge stockée.

III.8.4 Rôle du diélectrique dans le stockage de l'énergie

L'énergie électrique stockée dans un condensateur est donnée par :

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (\text{III.5})$$

Par conséquent, l'augmentation de la capacité résultant de l'utilisation d'un diélectrique permet d'accroître l'énergie stockée, ce qui améliore les performances du condensateur dans les applications de stockage d'énergie.

III.8.5 Influence sur le champ électrique

L'intensité du champ électrique entre les armatures est donnée par :

$$E = \frac{V}{e} \quad (\text{III.6})$$

Elle peut également être exprimée en fonction de la densité de charge surfacique :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (\text{III.7})$$

avec $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$

Ainsi, une augmentation de la permittivité du diélectrique entraîne une diminution de l'intensité du champ électrique, favorisant le stockage de charges plus importantes.

III.8.6 Tension de claquage du diélectrique

Chaque matériau diélectrique possède une limite maximale de champ électrique qu'il peut supporter, appelée champ de claquage. La tension maximale admissible est donnée par Au-delà de cette limite, le matériau perd ses propriétés isolantes et devient conducteur, ce qui peut entraîner la défaillance du condensateur. Le choix d'un diélectrique approprié est donc essentiel pour garantir la sécurité de fonctionnement.

$$V_{max} = E_{max}e \quad (\text{III.8})$$

III.8.7 Pertes diélectriques et performance

Les matériaux diélectriques ne sont pas parfaitement isolants et présentent des pertes énergétiques dues au retard de la polarisation par rapport aux variations du champ électrique. Ces pertes se traduisent par une dissipation d'énergie sous forme de chaleur, ce qui réduit l'efficacité du condensateur, notamment à haute fréquence.

III.8.8 Types de diélectriques et stabilité

Les condensateurs utilisent différents matériaux diélectriques dont le choix influence leurs performances, notamment la stabilité, la capacité, les pertes et la durée de vie. Les matériaux à faibles pertes offrent de meilleures performances à long terme [26].

III.9. Les matériaux isolants dans les équipements à haute tension

Les matériaux isolants utilisés dans les équipements à haute tension assurent l'isolation des parties conductrices, préviennent les décharges électriques et garantissent un fonctionnement sûr grâce à leurs bonnes propriétés électriques, mécaniques et thermiques. [27].

III.9.1Rôle des matériaux isolants en haute tension

Les matériaux isolants jouent plusieurs rôles importants, notamment :

- Empêcher les fuites de courant vers la terre ou les structures métalliques
- Supporter les hautes tensions sans claquage électrique
- Assurer la stabilité des équipements tels que les transformateurs, les disjoncteurs et les lignes de transport
- Réduire les risques de décharges superficielles et de claquage interne

III.9.2Propriétés requises des isolantes hautes tensions

Pour être efficaces dans les systèmes à haute tension, les matériaux isolants doivent posséder :

- Une très forte résistivité électrique
- Une rigidité diélectrique élevée
- Une bonne résistance thermique et climatique
- Une résistance à la pollution et à l'humidité
- Une grande stabilité à long terme sous contrainte électrique

III.9. 3Types de matériaux isolants utilisés

❖ Porcelaine

- Très utilisée dans les isolateurs traditionnels
- Offre une grande résistance mécanique et une bonne tenue aux conditions environnementales

❖ Verre

- Permet de détecter facilement les fissures et défauts
- Bonne résistance au vieillissement électrique

❖ Matériaux polymères

- Légers
- Très résistants à la pollution et à l'humidité
- Utilisés dans les réseaux modernes

❖ Huiles isolantes et isolants liquides

- Utilisés dans les transformateurs et les disjoncteurs
- Assurent à la fois l'isolation et le refroidissement

III.9.4 Applications des matériaux isolants en haute tension

Ces matériaux sont utilisés dans :

- Les isolateurs des lignes de transport
- Les transformateurs électriques
- Les disjoncteurs haute tension
- Les câbles électriques isolés
- Les équipements des postes électriques

III.9.5 Importance des matériaux isolants

Les matériaux isolants sont essentiels pour :

- Garantir la sécurité électrique
- Prévenir les défaillances et les décharges électriques
- Améliorer la fiabilité du réseau électrique
- Prolonger la durée de vie des équipements
- Permettre le transport de l'énergie sur de longues distances à haute tension

III.10. Influence des facteurs externes sur les performances des isolants

Les matériaux isolants utilisés en génie électrique sont soumis à différents facteurs environnementaux et électriques qui influencent directement leurs performances. Les principaux facteurs sont la température, l'humidité et le champ électrique [28].

III.10.1 Effet de la température

- Une élévation de la température accélère le phénomène de vieillissement thermique des matériaux isolants.
- Elle peut provoquer le ramollissement ou la dégradation de certains isolants comme le PVC, entraînant une diminution de leurs propriétés isolantes.

- L'augmentation prolongée de la température entraîne une baisse de la résistivité électrique du matériau.
- Certains matériaux tels que le XLPE et le mica présentent une meilleure stabilité thermique et conservent leurs propriétés isolantes à des températures élevées.

III.10.2 Effet de l'humidité

- L'humidité constitue un facteur critique car elle réduit significativement la résistance électrique des isolants.
- La pénétration de l'eau dans le matériau peut créer des chemins conducteurs favorisant le passage du courant.
- Avec le temps, cela peut conduire à des phénomènes de claquage électrique ou de court-circuit.
- Des matériaux comme le XLPE et l'EPDM offrent une meilleure résistance à l'humidité que certains isolants classiques.

III.10.3 Effet du champ électrique

- Sous l'effet d'un champ électrique élevé, les charges internes du matériau subissent une polarisation.
- Si le champ dépasse la limite critique du matériau, il se produit un claquage diélectrique.
- Les défauts internes tels que les bulles d'air ou les microfissures peuvent concentrer le champ électrique.
- Cela entraîne l'apparition de décharges partielles, provoquant une dégradation progressive de l'isolant.

III.11. Résumé du Chapitre III

Ce chapitre a été consacré à l'étude des matériaux isolants et à leur importance dans le domaine du génie électrique, où ils jouent un rôle essentiel dans la protection des équipements et la sécurité des installations électriques. Dans un premier temps, la définition des matériaux isolants ainsi que leurs caractéristiques générales ont été présentées afin de comprendre leur capacité à empêcher le passage du courant électrique. Ensuite, les principales propriétés des matériaux isolants ont été étudiées, notamment les propriétés électriques, thermiques, mécaniques et chimiques qui influencent directement leurs performances et leur efficacité dans les différentes conditions de fonctionnement. Une attention particulière a été portée à la résistivité électrique et aux facteurs pouvant affecter le pouvoir isolant des matériaux.

Par ailleurs, une classification des matériaux isolants selon leur état physique, leur nature chimique, leurs domaines d'utilisation et leurs fonctions a été présentée. Enfin, les principales applications des matériaux isolants dans les machines électriques, les câbles, les transformateurs et les équipements à haute tension ont été mises en évidence afin d'assurer une meilleure protection, une réduction des pertes électriques et une amélioration de la fiabilité des systèmes électriques.

Chapitre IV :
Matériaux magnétiques

IV.1. Introduction

Les matériaux magnétiques constituent un élément fondamental en génie électrique et électronique, en raison de leur rôle essentiel dans le fonctionnement de nombreux dispositifs et systèmes. Leur importance repose sur leur capacité à interagir avec le champ magnétique, soit en le produisant, soit en y répondant, ce qui les rend indispensables dans les processus de conversion et de contrôle de l'énergie. Ces matériaux sont largement utilisés dans diverses applications telles que les transformateurs électriques, les machines électriques (moteurs et générateurs), ainsi que dans les dispositifs électroniques et les systèmes de stockage magnétique. Ils se distinguent par des propriétés physiques et magnétiques spécifiques, notamment une perméabilité élevée, une forte aptitude à l'aimantation et la présence de pertes par hystérésis, qui influencent directement les performances et le rendement des équipements.

Par ailleurs, les avancées technologiques ont permis le développement de nouveaux types de matériaux magnétiques, tels que les matériaux composites et les matériaux nanostructurés, offrant de meilleures performances en termes d'efficacité énergétique et de réduction des pertes.

Dans ce chapitre, nous aborderons les notions fondamentales du magnétisme, la classification des matériaux magnétiques, leurs principales propriétés ainsi que leurs domaines d'application. Une attention particulière sera également accordée aux matériaux magnétiques composites et aux techniques de mesure de leurs propriétés.

IV.2. Origine du magnétisme

Le magnétisme provient du comportement microscopique des électrons au sein des atomes. Chaque électron possède un moment magnétique résultant de son spin ainsi que de son mouvement orbital autour du noyau. Le moment magnétique total d'un atome correspond à la somme des contributions de tous ses électrons :

$$\vec{m} = \sum \vec{m}_i \quad (\text{IV.1})$$

Où $\vec{m}_i$ représente le moment magnétique de chaque électron.

En l'absence d'un champ magnétique extérieur, les moments magnétiques sont généralement orientés de manière aléatoire, ce qui entraîne leur compensation mutuelle :

$$\sum \vec{m}_i = 0 \quad \Rightarrow \quad \vec{M} = 0 \quad (\text{IV.2})$$

Dans les matériaux ferromagnétiques, les interactions internes favorisent l'alignement des moments magnétiques dans des zones appelées domaines magnétiques, ce qui engendre une aimantation globale non nulle :

$$\vec{M} = \frac{1}{V} \sum \vec{m}_i \quad (\text{IV.3})$$

Sous l'effet d'un champ magnétique externe H , ces domaines s'orientent progressivement dans la direction du champ, entraînant une augmentation de l'aimantation. Le champ magnétique dans le matériau est alors exprimé par :

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (\text{IV.4})$$

Par ailleurs, l'aimantation est proportionnelle au champ appliqué selon la susceptibilité magnétique :

$$\vec{M} = \chi \vec{H} \quad (\text{IV.5})$$

Où χ désigne la susceptibilité magnétique du matériau.

Enfin, lorsque le champ externe augmente, l'aimantation atteint une valeur limite appelée saturation magnétique. L'élévation de la température perturbe cet ordre magnétique, et au-delà de la température de Curie, le matériau perd son aimantation spontanée en passant de l'état ferromagnétique à l'état paramagnétique [6].

IV.3. Classification des matériaux magnétiques

Les matériaux magnétiques sont classés selon la manière dont les moments magnétiques des électrons répondent à un champ magnétique externe $\vec{H}$. Ce comportement dépend essentiellement de [9] :

- la présence ou l'absence de moments magnétiques internes.
- l'organisation de ces moments.
- et l'intensité des interactions entre eux.

IV.3.1 Matériaux diamagnétiques (Diamagnétiques)

Ce sont les matériaux les plus simples sur le plan magnétique. Ils ne possèdent pas de moments magnétiques permanents en raison de l'appariement des électrons.

Lorsqu'un champ magnétique externe est appliqué, il se produit une faible modification du mouvement des électrons, ce qui induit un champ magnétique opposé au champ appliqué :

$$\vec{M} = \chi \vec{H} \quad (\chi < 0) \quad (\text{IV.6})$$

Comportement physique :

- Le champ externe induit des courants microscopiques dans les atomes
- Ces courants créent un champ opposé

- Résultat : une très faible répulsion

Cet effet existe dans tous les matériaux, mais il est généralement masqué par des effets plus forts.

IV.3.2 Matériaux paramagnétiques (Paramagnétiques)

Ces matériaux possèdent des électrons non appariés, ce qui leur confère des moments magnétiques, mais ceux-ci sont orientés de manière aléatoire en absence de champ.

Sous l'action d'un champ magnétique externe, ces moments s'alignent partiellement avec le champ :

$$\vec{M} = \chi \vec{H} \quad (\chi > 0) \quad (\text{IV.7})$$

Comportement physique :

- Le champ tend à ordonner les moments magnétiques
- L'agitation thermique s'oppose à cet ordre
- Résultat : alignement partiel uniquement
- L'aimantation disparaît dès la suppression du champ.

IV.3.3 Matériaux ferromagnétiques (Ferromagnétiques)

Ce sont les matériaux les plus importants en pratique. Ils présentent de fortes interactions entre moments magnétiques, ce qui entraîne leur alignement spontané même en absence de champ externe.

Ces matériaux sont organisés en **domaines magnétiques** :

À l'intérieur de chaque domaine, les moments sont alignés

Mais les domaines sont orientés différemment → aimantation globale faible sans champ

Sous champ externe :

- les domaines favorables s'agrandissent
- les autres disparaissent progressivement

$$\vec{M} \gg \vec{H}$$

- Aimantation très forte
- Possibilité de conserver l'aimantation (mémoire magnétique)
- Présence du phénomène d'hystérésis

IV.3.4 Matériaux ferrimagnétiques (Ferrimagnétiques)

Ces matériaux sont similaires aux ferromagnétiques, mais les moments magnétiques sont :

- opposés
- et de valeurs différentes

Ainsi, l'annulation n'est pas complète, ce qui donne une aimantation résultante :

$$\vec{M} \neq 0$$

Propriétés :

- Aimantation plus faible que les ferromagnétiques
- Pertes réduites (intéressant pour les hautes fréquences)

IV.3.5 Matériaux antiferromagnétiques (Antiferromagnétiques)

Dans ces matériaux, les moments magnétiques sont :

- égaux
- et strictement opposés

Ce qui conduit à une annulation totale :

$$\vec{M} = 0$$

Comportement :

- Absence d'aimantation globale
- Effet magnétique très faible dans les applications électriques

Tableau IV.1 : Susceptibilité magnétique des principaux matériaux

Type de matériau	Susceptibilité magnétique (χ)	Exemples
Diamagnétique	$\sim -1 \times 10^{-5}$	Cu, Au
Paramagnétique	$10^{-5} \text{ à } 10^{-3}$	Al, Pt
Ferromagnétique	50 à 10000	Fe, Ni, Co
Ferrimagnétique	~ 3000	FeO, MnO, ZnO

IV.4. Propriétés des matériaux magnétiques

Le magnétisme est un ensemble de phénomènes physiques caractérisés par l'apparition de forces d'attraction ou de répulsion entre les corps, résultant du mouvement des charges électriques et des moments magnétiques des particules élémentaires. Ces moments constituent la source du champ magnétique responsable de ces interactions. Tous les matériaux sont influencés, à des degrés divers, par un champ magnétique externe, et leur comportement magnétique dépend fortement de la température.

À l'échelle macroscopique, l'aimantation $\vec{M}$ décrit la réponse magnétique du matériau. Elle représente la somme des moments magnétiques microscopiques issus du mouvement orbital et du spin des électrons. Elle est exprimée en ampère par mètre (A/m) et est liée au champ magnétique par la relation :

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (\text{IV.8})$$

Où :

$\vec{B}$: induction magnétique

$\vec{H}$: champ magnétique

μ_0 : perméabilité du vide

On peut également écrire :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_0 \mu_T \vec{H} \quad (\text{IV.9})$$

Où :

μ : perméabilité magnétique du matériau

μ_T : perméabilité relative

La valeur de μ_T varie selon la nature du matériau : proche de 1 pour les matériaux diamagnétiques, légèrement supérieure à 1 pour les matériaux paramagnétiques, et très élevée pour les matériaux ferromagnétiques. Elle n'est pas constante et dépend de l'état magnétique précédent du matériau.

Les matériaux magnétiques présentent plusieurs propriétés physiques qui déterminent leur comportement sous l'action d'un champ magnétique externe, ainsi que leur efficacité dans les applications électriques telles que les transformateurs et les machines électriques.

Parmi ces propriétés, la perméabilité magnétique exprime la capacité d'un matériau à canaliser le champ magnétique. Elle est donnée par :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_0 \mu_T \vec{H} \quad (\text{IV.10})$$

Plus la perméabilité est élevée, plus le matériau concentre les lignes de champ, comme c'est le cas du fer.

La susceptibilité magnétique caractérise la réponse du matériau au champ externe et s'écrit :

$$\mu = \mu_0 \mu_T \quad (\text{IV.11})$$

où χ représente la susceptibilité magnétique. Elle est positive pour les matériaux attirés par le champ et négative pour ceux présentant un comportement répulsif.

$$\vec{M} = \chi \vec{H} \quad (\text{IV.12})$$

L'aimantation $\vec{M}$ représente la densité de moment magnétique par unité de volume :

$$\vec{M} = \frac{\vec{m}}{v} \quad (\text{IV.13})$$

Elle augmente lorsque l'alignement des moments magnétiques dans le matériau devient plus ordonné.

Lorsque le champ magnétique augmente, certains matériaux atteignent un état appelé saturation magnétique, où tous les moments magnétiques sont alignés dans la même direction. Dans cet état, l'aimantation ne peut plus augmenter.

Un autre phénomène important est l'hystérésis magnétique, qui traduit le retard de la réponse du matériau lors de la variation du champ magnétique. Elle est représentée par une boucle $\vec{B} - \vec{H}$ l'aimantation rémanente et le champ coercitif, et entraînant des pertes d'énergie sous forme de chaleur.

Les pertes magnétiques se divisent principalement en :

- pertes par hystérésis
- pertes par courants de Foucault

Ces pertes augmentent avec la fréquence.

Enfin, la température joue un rôle essentiel dans le comportement magnétique. Une augmentation de la température perturbe l'orientation des moments magnétiques, entraînant une diminution progressive de l'aimantation. À la température critique appelée **température de Curie** T_C , les matériaux ferromagnétiques perdent leurs propriétés et deviennent paramagnétiques [34].

IV.5. Cycle d'hystérésis (Boucle d'hystérésis)

Le cycle d'hystérésis décrit le comportement d'un matériau magnétique soumis à un champ magnétique variable. Il met en évidence le décalage entre le champ appliqué et la réponse du matériau, représenté par la relation entre l'induction magnétique $\vec{B}$ et le champ magnétique $\vec{H}$ [35].

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (\text{IV.14})$$

IV.5.1 Description du cycle d'hystérésis

Lorsqu'un matériau ferromagnétique est soumis à un champ magnétique variable, son comportement suit un cycle fermé appelé boucle d'hystérésis.

Après avoir aimanté le matériau jusqu'à la **saturation**, si l'on diminue progressivement l'excitation $\vec{H}$, l'induction $\vec{B}$ diminue également mais en suivant une trajectoire différente de celle de la première aimantation. Cette différence traduit un **retard à la désaimantation**, appelé phénomène d'hystérésis.

Lorsque le champ est ramené à zéro, il subsiste une **induction** magnétique non nulle appelée induction **rémanente** $\vec{B}_T$.

Pour annuler cette induction, il est nécessaire d'appliquer un champ dans le sens opposé (en inversant le courant), jusqu'à atteindre une valeur appelée **champ coercitif**

$\vec{H}_c$, pour laquelle $B=0$.

En poursuivant l'augmentation du champ dans le sens inverse, le matériau atteint une **saturation opposée**. Le retour vers les conditions initiales forme alors une **boucle fermée**, caractéristique du cycle d'hystérésis.

IV.5.2 Paramètres caractéristiques

Induction de saturation : valeur maximale de $\vec{B}$

Induction rémanente $\vec{B}_T$: induction restante lorsque $\vec{H}=0$

Champ coercitif $\vec{H}_c$: champ nécessaire pour annuler B

Surface du cycle : représente les pertes d'énergie

IV.5.3 Pertes par hystérésis

L'aire de la boucle correspond à l'énergie dissipée sous forme de chaleur à chaque cycle :

- plus la surface est grande → pertes élevées
- plus la surface est petite → matériau adapté aux applications électriques (transformateurs)

IV.5.4 Importance pratique

Le cycle d'hystérésis permet de distinguer :

- Matériaux magnétiques doux : faible $\vec{H}_C$, faibles pertes
- Matériaux magnétiques durs : fort $\vec{H}_C$, forte rémanence

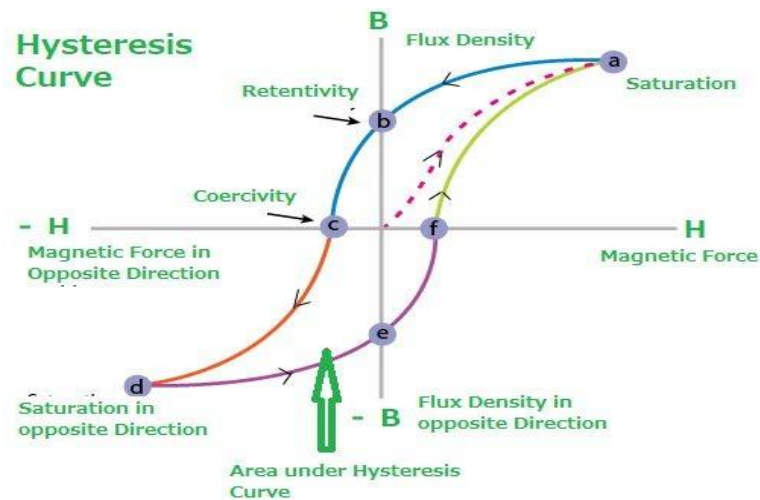


Figure IV.1 : Courbe d'hystérésis magnétique

IV.6. Matériaux magnétiques doux et durs

IV.6.1 Matériaux magnétiques doux

Les matériaux magnétiques doux se caractérisent par une boucle d'hystérésis étroite, ce qui permet de minimiser les pertes d'énergie dues au phénomène d'hystérésis. Ils sont largement utilisés dans les applications électriques grâce à leur capacité à s'aimanter et à se désaimanter facilement.

Ces matériaux sont généralement feuilletés afin de réduire les courants de Foucault, et sont principalement à base de fer, auquel on ajoute certains éléments pour améliorer leurs propriétés [36].

On distingue trois grandes catégories selon le domaine de fréquence :

- **Aciers électriques (au silicium)** → basses fréquences $f=50\text{Hz}$
- **Alliages Fe-Ni ou Fe-Co** → fréquences moyennes $f<100\text{kHz}$
- **Ferrites** → hautes fréquences $f<1000\text{kHz}$

IV.6.1.1 Aciers électriques

Les aciers électriques sont principalement utilisés dans les transformateurs et les machines électriques tournantes fonctionnant aux fréquences industrielles.

Ils sont constitués de tôles d'acier alliées au silicium (entre 1 % et 5 %), ce qui permet :

- d'augmenter la résistivité électrique (réduction des courants de Foucault)
- mais rend le matériau plus fragile

➤ Types d'aciers électriques

• Tôles à grains non orientés

Les pertes fer sont d'environ 5 W/kg. Elles sont fabriquées par plusieurs étapes : laminage à chaud, décapage chimique, laminage à froid puis traitement thermique.

Elles sont utilisées principalement dans les machines tournantes et les transformateurs de faible puissance (< 100 kW).

• Tôles à grains orientés

Les pertes fer sont plus faibles, environ 1 W/kg. Leur fabrication est plus complexe et nécessite plusieurs laminages et traitements thermiques.

Elles présentent une forte perméabilité magnétique, une induction de saturation élevée et de très faibles pertes, avec des propriétés optimales dans le sens du laminage.

Elles sont utilisées dans les transformateurs de forte puissance (> 1 MW).

IV.6.1.2 Alliages $Fe - Ni$ et $Fe - Co$

Ces alliages contiennent des proportions importantes de nickel ou de cobalt (30 % à 80 %), ce qui les rend coûteux par rapport aux aciers électriques.

Ils sont utilisés à des fréquences moyennes $f < 100$ kHz, généralement dans des applications de faible puissance.

- **Applications**
- électrotechnique miniaturisée (appareils de mesure, tachymètres, relais)
- télécommunications
- dispositifs de protection (disjoncteurs différentiels, blindage magnétique)

IV.6.1.3 Ferrites douces

Les ferrites sont largement utilisées en électronique de puissance, notamment dans les alimentations à découpage fonctionnant à haute fréquence.

Elles sont utilisées pour des fréquences élevées $f > 100kHz$.

- **Composition chimique**

Ce sont des céramiques ferromagnétiques à base d'oxydes de fer, de formule :



- **Procédé de fabrication**

1. mélange et broyage des composants
2. mise en forme des poudres
3. frittage à haute température ($\approx 1200^\circ C$) sous atmosphère inerte

- **Propriétés**

1. très grande résistivité électrique
2. réduction importante des courants de Foucault
3. matériau dur mais fragile (cassant)

IV.6.2 Matériaux magnétiques durs

Les matériaux magnétiques durs sont des matériaux capables de conserver une aimantation importante même après la suppression du champ magnétique externe. Ils sont donc principalement utilisés pour fabriquer des aimants permanents, qui ne nécessitent pas d'alimentation électrique pour maintenir leur champ magnétique [37].

- **Principe physique**

Lorsqu'un matériau magnétique dur est soumis à un champ magnétique externe, il s'aimante comme les autres matériaux. Cependant, sa particularité est qu'il conserve cette aimantation de façon durable après la disparition du champ appliqué.

Cela s'explique par une structure interne où les domaines magnétiques sont fortement stables et difficiles à réorienter.

- **Propriétés principales**

1. Champ coercitif élevé : Ces matériaux nécessitent un champ magnétique très intense pour annuler ou inverser leur aimantation.
2. Forte rémanence magnétique : Ils conservent une aimantation élevée même après la suppression du champ extérieur.
3. Boucle d'hystérésis large : Cela indique une forte capacité de stockage d'énergie magnétique, mais aussi des pertes énergétiques importantes sous forme de chaleur.
4. Grande stabilité magnétique : Ils résistent fortement aux variations du champ magnétique externe.

- **Interprétation simple**

On peut considérer ces matériaux comme possédant des domaines magnétiques rigides et stables, qui restent alignés dans une direction donnée même lorsque le champ externe disparaît.

- **Exemples de matériaux magnétiques durs**

NdFeB (néodyme-fer-bore) : aimant permanent très puissant

SmCo (samarium-cobalt) : excellente résistance à la température

Acier dur : utilisé dans les aimants traditionnels

Ferrites dures : économiques et largement utilisés

- **Applications**

Les matériaux magnétiques durs sont utilisés dans plusieurs domaines :

- Fabrication des aimants permanents
- Moteurs électriques
- Haut-parleurs
- Disques durs
- Capteurs magnétiques
- Systèmes de séparation magnétique industriels

IV.6.3 Comparaison entre les matériaux magnétiques durs et doux

Aimantation rémanente : Les matériaux magnétiques durs conservent leur aimantation après la suppression du champ magnétique, alors que les matériaux doux la perdent rapidement.

Champ coercitif : Les matériaux durs présentent un champ coercitif élevé, contrairement aux matériaux doux qui possèdent un champ coercitif faible.

Démagnétisation : La démagnétisation des matériaux durs est difficile et nécessite un champ intense, tandis que celle des matériaux doux est facile.

Boucle d'hystérésis : Les matériaux durs ont une boucle d'hystérésis large, alors que les matériaux doux présentent une boucle étroite.

Pertes énergétiques : Les matériaux durs engendrent des pertes magnétiques plus importantes, tandis que les matériaux doux ont des pertes faibles.

Réponse au champ magnétique : Les matériaux durs réagissent lentement aux variations du champ magnétique, contrairement aux matériaux doux qui réagissent rapidement.

Applications : Les matériaux durs sont utilisés pour les aimants permanents, tandis que les matériaux doux sont utilisés dans les transformateurs et les machines électriques.

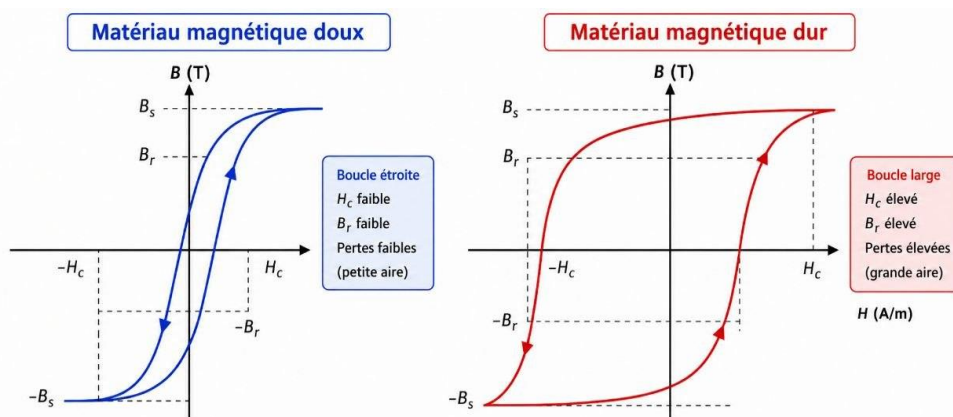


Figure IV.2 : Comparaison des cycles d'hystérésis des matériaux magnétiques doux et durs

IV.7. Matériaux magnétiques composites

IV.7.1 Définition des matériaux magnétiques composites

Les matériaux magnétiques composites sont des matériaux multiphasiques formés par l'incorporation de particules magnétiques (fer, ferrites) dans une matrice non magnétique, généralement polymère ou résineuse. Cette combinaison permet d'obtenir des propriétés magnétiques satisfaisantes tout en améliorant les caractéristiques mécaniques et physiques du matériau.

La dispersion homogène des particules dans la matrice isolante limite leur contact électrique, ce qui réduit les courants de Foucault et donc les pertes énergétiques, notamment à haute fréquence. Grâce à ces avantages, ces matériaux sont largement utilisés dans les applications de génie électrique et électronique, où l'efficacité énergétique est essentielle. [9].

IV.7.2 Méthodes de fabrication des matériaux magnétiques composites

La fabrication des matériaux magnétiques composites comprend plusieurs étapes visant à assurer une bonne dispersion des particules magnétiques dans une matrice non magnétique et à optimiser les propriétés finales du matériau.

Elle commence par la préparation des constituants, où les poudres magnétiques (fer ou ferrites) sont sélectionnées selon leur taille et leur pureté, puis mélangées à une matrice polymère ou résineuse pour obtenir un mélange homogène. L'étape de mélange est

essentielle pour garantir une répartition uniforme des particules et éviter leur agglomération.

Le mélange est ensuite compacté par pressage, à froid ou à chaud, afin d'obtenir la forme désirée et d'améliorer la densité du matériau. Dans certains cas industriels, le moulage par injection est utilisé pour fabriquer des pièces complexes avec une bonne précision dimensionnelle. Pour certains matériaux métalliques, un frittage peut également être appliqué afin de renforcer la cohésion entre les particules.

Enfin, un traitement thermique peut être réalisé pour réduire les contraintes internes et améliorer la stabilité structurale, ce qui permet d'optimiser les performances magnétiques.

Globalement, ces procédés permettent d'obtenir des matériaux composites aux bonnes propriétés magnétiques, mécaniques et adaptés aux applications industrielles. [9].

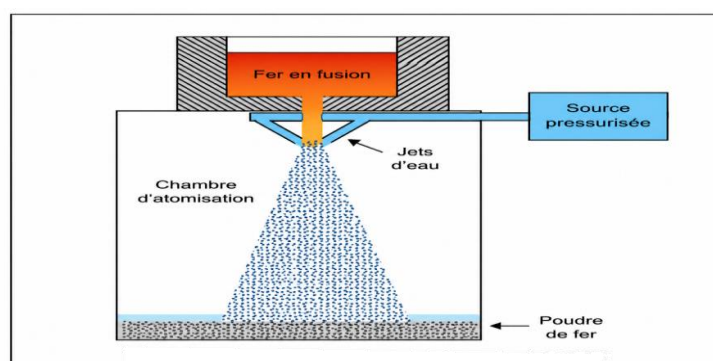


Figure IV.3 : Procédé d'atomisation de la poudre de fer

IV.7.3 Propriétés physiques et magnétiques des matériaux magnétiques composites

Les matériaux magnétiques composites possèdent une structure granulaire formée de particules fines de fer isolées par une couche organique ou inorganique, ce qui leur confère des propriétés différentes des matériaux laminés classiques.

Sur le plan physique, ils présentent une densité élevée (90 à 95 % de celle du fer), mais une cohésion mécanique modérée en raison de la discontinuité de la structure. Leur conductivité thermique est d'environ $30 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ et leur comportement isotrope favorise une bonne diffusion de la chaleur.

Sur le plan magnétique, ils montrent une perméabilité et une induction à saturation plus faibles à cause de l'isolation entre particules. Cependant, les pertes par courants de Foucault sont fortement réduites grâce à la petite taille des particules et à leur forte résistivité. Les pertes par hystérésis restent présentes et dépendent de la qualité du matériau et de sa structure. Globalement, leurs performances dépendent de la taille des particules, de la fréquence et de la qualité de l'isolation, ce qui les rend adaptés aux applications électromagnétiques à moyenne et haute fréquence [9].

IV.8. Techniques de mesure des propriétés magnétiques

L'étude expérimentale des propriétés magnétiques constitue une étape essentielle dans la caractérisation des matériaux magnétiques utilisés notamment dans les machines électriques, les transformateurs et les actionneurs. Ces techniques permettent de déterminer le comportement du matériau sous un champ magnétique variable et d'évaluer des paramètres fondamentaux tels que la boucle d'hystérésis, la perméabilité magnétique et les pertes ferromagnétiques [38].

IV.8.1 Mesure de la boucle d'hystérésis (Hysteresis Loop)

La boucle d'hystérésis représente la relation entre l'induction magnétique B et le champ magnétique H lorsque le matériau est soumis à une excitation magnétique cyclique. Elle est obtenue en appliquant un courant alternatif dans un enroulement primaire entourant l'échantillon, tandis que la réponse magnétique est mesurée à l'aide d'un enroulement secondaire.

- **Paramètres extraits de la boucle :**

1. Induction rémanente B_r : aimantation résiduelle après suppression du champ.
2. Champ coercitif H_c : champ nécessaire pour annuler l'aimantation.
3. Induction de saturation B_s : valeur maximale atteinte par B .

- **Interprétation :**

1. Une boucle étroite correspond aux matériaux magnétiques doux (faibles pertes).
2. Une boucle large correspond aux matériaux magnétiques durs (forte rétention magnétique).

IV.8.2 Appareils de mesure des courbes $B - H$

Les courbes $B - H$ sont mesurées à l'aide d'appareils spécialisés appelés analyseurs $B - H$ ($B - H$ Analyzer) ou systèmes à fluxmètre.

- **Principe de fonctionnement :**

1. Un champ magnétique est généré par un enroulement primaire alimenté en courant alternatif.
2. La réponse magnétique du matériau est captée par un enroulement secondaire.
3. Les signaux sont traités pour tracer la courbe $B - H$.

- **Avantage :**

1. Haute précision de mesure.
2. Possibilité de variation de fréquence.
3. Analyse du comportement dynamique du matériau.

IV.8.3 Mesure de la perméabilité magnétique

La perméabilité magnétique caractérise la capacité d'un matériau à se magnétiser sous l'effet d'un champ appliqué.

- **Relation fondamentale :**

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (\text{IV.15})$$

et la perméabilité relative :

$$\mu_T = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (\text{IV.16})$$

- **Types de perméabilité :**

Perméabilité initiale : à faible champ.

Perméabilité maximale : valeur optimale du matériau.

Perméabilité différentielle : pente de la courbe $B - H$.

- **Importance :**

Elle est essentielle dans la conception des circuits magnétiques (transformateurs, moteurs, inductances).

IV.8.4 Mesure des pertes ferromagnétiques (Core Losses)

Les pertes ferromagnétiques correspondent à l'énergie dissipée sous forme de chaleur lorsque le matériau est soumis à un champ magnétique alternatif.

Elles se composent de :

- **Pertes par hystérésis**
 1. Liées au mouvement irréversible des domaines magnétiques.
 2. Proportionnelles à la surface de la boucle d'hystérésis.
 3. Dépendent de la fréquence.
- **Pertes par courants de Foucault**
 1. Générées par des courants induits dans le matériau.
 2. Réduites par l'utilisation de tôles minces isolées.
- **Méthodes de mesure**

Cadre Epstein (Epstein Frame)

1. Méthode standard pour les tôles magnétiques.
2. Permet une mesure précise des pertes spécifiques.

Méthode du wattmètre

1. Compare la puissance absorbée et la puissance utile.
2. La différence correspond aux pertes dans le matériau.

IV.9. Applications des matériaux magnétiques

Les matériaux magnétiques occupent une place essentielle dans les systèmes électrotechniques et électroniques. Leurs applications dépendent principalement de leur nature : matériaux magnétiques doux ou matériaux magnétiques durs [39].

IV.9.1 Matériaux magnétiques doux

Ces matériaux se caractérisent par une **perméabilité élevée** et de **faibles pertes**, ce qui les rend adaptés aux champs magnétiques variables.

Transformateurs électriques : Ils assurent le transfert d'énergie entre circuits, tout en concentrant le flux magnétique dans le noyau afin de réduire les pertes.

Machines électriques (moteurs et générateurs) : Utilisés dans les circuits magnétiques, ils améliorent le rendement de conversion d'énergie

(électrique↔ mécanique).

Inductances (bobines) : Permettent de stocker l'énergie sous forme de champ magnétique et de stabiliser le courant dans les circuits.

Filtres électriques : Réduisent les perturbations et améliorent la qualité du signal électrique.

Relais électromagnétiques : Assurent la commande automatique des circuits grâce à l'action du champ magnétique.

Solénoïdes : Convertissent l'énergie électrique en mouvement mécanique linéaire.

IV.9.2 Matériaux magnétiques durs

Ces matériaux présentent une **forte rémanence** et une **grande coercivité**, ce qui les rend adaptés aux champs magnétiques permanents.

Aimants permanents : Utilisés dans les haut-parleurs, moteurs miniatures et dispositifs électromécaniques pour produire un champ magnétique constant.

Capteurs magnétiques : Permettent la détection de position, de vitesse ou de champ magnétique dans les systèmes intelligents.

Stockage magnétique (disques durs) : Les données sont enregistrées sous forme d'états magnétiques représentant l'information numérique.

Imagerie médicale (IRM) : Exploite des champs magnétiques intenses pour obtenir des images précises des structures internes du corps.

Levage magnétique : Utilisé dans l'industrie pour manipuler et transporter des charges métalliques lourdes.

Séparation des matériaux : Permet de séparer les matériaux ferromagnétiques des autres substances dans les procédés industriels.

IV.9.3 Applications modernes

Énergies renouvelables : Utilisation dans les éoliennes et systèmes de conversion pour améliorer le rendement énergétique.

Transport électrique : Applications dans les véhicules électriques et les trains à lévitation magnétique (Maglev).

Électronique avancée : Intégration dans les smartphones et capteurs pour des mesures précises du champ magnétique.

IV.10. Critères de choix des matériaux magnétiques

Le choix d'un matériau magnétique approprié repose sur un ensemble de critères physiques et techniques étroitement liés à la nature de l'application (transformateur, machine électrique, stockage, etc.), afin d'assurer des performances optimales et un rendement élevé [35].

Perméabilité magnétique (μ): Elle doit être élevée afin de faciliter la circulation du flux magnétique et d'améliorer l'efficacité globale du système.

Champ coercitif (H_c) : Il est faible pour les matériaux magnétiques doux afin de réduire les pertes, et élevé pour les matériaux magnétiques durs afin de garantir la conservation de l'aimantation.

Induction rémanente (B_r) : Elle est essentielle pour maintenir un champ magnétique résiduel après suppression du champ extérieur.

Induction de saturation (B_s) : Elle représente la valeur maximale du flux magnétique que le matériau peut supporter avant d'atteindre la saturation.

Pertes magnétiques : Elles comprennent les pertes par hystérésis et les pertes par courants de Foucault, qui doivent être minimisées pour améliorer le rendement énergétique.

Résistivité électrique : Une résistivité élevée est souhaitable afin de limiter les courants de Foucault et réduire les pertes thermiques.

Température de Curie : Elle doit être supérieure à la température de fonctionnement pour garantir la stabilité des propriétés magnétiques

Propriétés mécaniques : Telles que la résistance mécanique et l'aptitude à la mise en forme, nécessaires pour assurer la durabilité et faciliter la fabrication.

Coût et disponibilité : Le matériau doit être économiquement viable et disponible en quantité suffisante pour une utilisation industrielle.

IV.11.Résumé du chapitre IV

Ce chapitre a porté sur l'étude des matériaux magnétiques, considérés comme des éléments essentiels dans le domaine de l'électrotechnique et de l'électronique. Il a d'abord présenté la notion de magnétisme, son origine physique ainsi que les facteurs influençant le comportement magnétique des matériaux. Une classification générale des matériaux magnétiques a ensuite été exposée, distinguant les matériaux diamagnétiques, paramagnétiques, ferromagnétiques et ferrimagnétiques, tout en décrivant les caractéristiques et les domaines d'application de chacun. Le chapitre a également abordé les principales propriétés magnétiques, notamment la perméabilité magnétique, l'aimantation et la saturation magnétique, ainsi que le phénomène d'hystérésis et les pertes associées, en soulignant leur impact sur le rendement des dispositifs électriques. Les matériaux magnétiques mous, durs et composites ont aussi été étudiés, avec leurs propriétés spécifiques.

Enfin, les principales techniques de mesure des propriétés magnétiques ont été présentées, ainsi que les applications de ces matériaux dans les transformateurs, les machines électriques et les systèmes modernes. Les critères de choix des matériaux magnétiques ont été mis en évidence afin d'améliorer les performances, réduire les pertes et optimiser l'efficacité des systèmes électriques.

Chapitre V :

Matériaux semi-conducteurs

V.1. Introduction

Les matériaux semi-conducteurs constituent la pierre angulaire de la physique de l'état solide et de l'électronique moderne, en raison de leurs propriétés électriques spécifiques qui les situent à mi-chemin entre les matériaux conducteurs et isolants. L'intérêt majeur de ces matériaux réside dans la possibilité de moduler finement leur comportement électronique à travers des mécanismes physiques contrôlés, tels que la variation de la température, l'application de champs électriques, ou encore l'introduction d'impuretés maîtrisées dans leur réseau cristallin, processus connu sous le nom de dopage. La description microscopique des semi-conducteurs repose essentiellement sur la théorie des bandes d'énergie, qui fournit un cadre rigoureux pour interpréter la distribution des états électroniques ainsi que les mécanismes de transport des charges. Dans ces matériaux, la largeur de la bande interdite joue un rôle déterminant dans les propriétés de conduction, en contrôlant la transition des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction. Ce processus, activé thermiquement ou électriquement, conduit à la génération de paires électron-trou participant au transport électrique.

Par ailleurs, le transport des charges dans les semi-conducteurs présente un caractère dual, résultant de la superposition de deux mécanismes fondamentaux : le transport par dérive sous l'effet d'un champ électrique, et le transport par diffusion dû aux gradients de concentration des porteurs. Cette dualité nécessite une modélisation mathématique rigoureuse faisant intervenir les équations de continuité, les lois de transport et la relation d'Einstein reliant la mobilité aux coefficients de diffusion. D'autres phénomènes, tels que la génération-recombinaison et l'effet d'écrantage caractérisé par la longueur de Debye, influencent également de manière significative le comportement global du matériau.

Dans ce contexte, ce chapitre a pour objectif de proposer une étude approfondie des matériaux semi-conducteurs, en abordant leurs fondements physiques, les mécanismes de transport des porteurs de charge, ainsi que les principaux paramètres influençant leurs propriétés électriques, afin de mieux comprendre les principes de fonctionnement des dispositifs électroniques modernes.

V.2. Structure cristalline des matériaux semi-conducteurs

Les matériaux semi-conducteurs se caractérisent par une structure cristalline ordonnée, qui constitue le facteur fondamental déterminant leurs propriétés physiques et électriques. La plupart de ces matériaux, notamment le silicium (Si) et le germanium (Ge), cristallisent selon la structure diamant (Diamond cubic structure), dans laquelle chaque atome est lié à quatre atomes voisins par des liaisons covalentes fortes résultant du partage des électrons de valence. Ce comportement est exprimé par le nombre de coordination :

$$Z = 4 \quad (\text{V.1})$$

Cette organisation périodique conduit à la formation d'un réseau cristallin tridimensionnel stable, caractérisé par un arrangement régulier des atomes dans la maille cubique. La densité atomique (nombre d'atomes par unité de volume) peut être exprimée par la relation :

$$N = \frac{8}{a^3} \quad (\text{V.2})$$

où a représente le paramètre de maille cristalline (lattice parameter). De plus, la distance entre deux atomes les plus proches dans cette structure est donnée par :

$$d = \frac{\sqrt{3}}{4} a \quad (\text{V.3})$$

Ces relations traduisent la géométrie précise du réseau cristallin, qui contrôle directement la stabilité de la structure et la force des liaisons covalentes. Grâce à cet ordre cristallin, le comportement des électrons dans le matériau peut être décrit à l'aide de la théorie des bandes d'énergie. À basse température, les électrons restent liés dans les liaisons covalentes, ce qui rend le matériau faiblement conducteur. En revanche, lorsque la température augmente ou sous l'effet d'excitations externes, certains électrons acquièrent une énergie suffisante pour passer de la bande de valence à la bande de conduction, générant ainsi des paires électron-trou responsables de la conduction électrique.

Cette transition est décrite par la différence d'énergie entre les deux bandes :

$$E_g = E_c - E_v \quad (\text{V.4})$$

où E_g représente la bande interdite (gap énergétique), E_c l'énergie du minimum de la bande de conduction et E_v l'énergie du maximum de la bande de valence. Par ailleurs, la présence de défauts cristallins ou d'impuretés introduites par le dopage entraîne l'apparition de niveaux d'énergie dans la bande interdite, influençant directement la concentration des porteurs de charge et le comportement de transport électrique.

Ainsi, la structure cristalline ne représente pas seulement une organisation géométrique des atomes, mais constitue un paramètre déterminant des propriétés électroniques et physiques des matériaux semi-conducteurs, expliquant leur comportement dans les différentes applications technologiques [35].

V.3. Théorie des bandes d'énergie dans les matériaux semi-conducteurs

La théorie des bandes d'énergie constitue le cadre physique fondamental permettant de décrire le comportement électronique des matériaux semi-conducteurs. Dans ce modèle, les niveaux d'énergie accessibles aux électrons dans un cristal sont regroupés en bandes autorisées, principalement la bande de valence et la bande de conduction,

séparées par une région interdite appelée bande interdite (gap énergétique). Cette dernière est définie par la relation :

$$E_g = E_c - E_v \quad (\text{V.5})$$

E_g : énergie de la bande interdite (gap énergétique)

E_c : énergie du bas de la bande de conduction

E_v : énergie du sommet de la bande de valence

La valeur de E_g joue un rôle déterminant dans la nature du matériau et dans sa capacité à conduire le courant électrique.

Sous l'application d'un champ électrique externe, le comportement des porteurs de charge peut être décrit à l'aide de grandeurs vectorielles. Le champ électrique est alors exprimé par :

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (\text{V.6})$$

où :

$\vec{E}$: vecteur champ électrique

∇ : potentiel électrique

V : opérateur gradient (variation spatiale du potentiel)

Ce champ induit le mouvement des électrons et des trous dans le matériau, générant ainsi un courant de dérive (drift current), décrit par les relations vectorielles suivantes :

$$\vec{J}_n = -ne\mu_n\vec{E} \quad (\text{V.7})$$

$$\vec{J}_p = +pe\mu_p\vec{E} \quad (\text{V.8})$$

où :

$\vec{J}_n$: densité de courant des électrons

$\vec{J}_p$: densité de courant des trous

n : concentration des électrons

p : concentration des trous

e : charge élémentaire

μ_n : mobilité des électrons

μ_p : mobilité des trous

$\vec{E}$: champ électrique

Par ailleurs, en présence d'un gradient de concentration des porteurs de charge, un courant de diffusion apparaît en raison de l'inhomogénéité de leur distribution, et s'exprime par :

$$\vec{J}_{dn} = eD_n \nabla n \quad (\text{V.9})$$

$$\vec{J}_{dp} = -eD_p \nabla p \quad (\text{V.10})$$

où:

$\vec{J}_{dn}$: courant de diffusion des électrons

$\vec{J}_{dp}$: courant de diffusion des trous

D_n : coefficient de diffusion des électrons

D_p : coefficient de diffusion des trous

∇n : gradient de concentration des électrons

∇p : gradient de concentration des trous

Ainsi, la densité de courant totale dans un semi-conducteur est la somme des contributions de dérive et de diffusion :

$$\vec{J} = \vec{J}_n + \vec{J}_p + \vec{J}_{dn} + \vec{J}_{dp} \quad (\text{V.11})$$

où :

$\vec{J}$: densité de courant totale dans le semi-conducteur

Ces relations montrent que le transport de charge dans les matériaux semi-conducteurs résulte de l'interaction entre l'effet du champ électrique (dérive) et le gradient de concentration (diffusion), ce qui explique la complexité de leur comportement électrique. Ainsi, la combinaison de la théorie des bandes d'énergie et des relations vectorielles de transport permet une compréhension globale et cohérente des propriétés électroniques des semi-conducteurs [36].

V.4. Classification des matériaux semi-conducteurs selon leur nature et leur dopage

Les matériaux semi-conducteurs se classent en semi-conducteurs intrinsèques et extrinsèques, et leur comportement électrique s'explique à partir de la théorie des bandes d'énergie et de la distribution des porteurs de charge. Dans les semi-conducteurs intrinsèques tels que le silicium et le germanium, la concentration des électrons dans la bande de conduction est égale à celle des trous dans la bande de valence ($n = p = n_i$)

, où n_i représente la concentration intrinsèque, donnée par la relation :

$$n_i = AT^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (\text{V.12})$$

où E_g est la largeur de la bande interdite, k la constante de Boltzmann et T la température absolue. La conductivité électrique s'exprime par :

$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p) \quad (\text{V.13})$$

Puisque $n = p$ dans le cas intrinsèque, le transport électrique résulte de la contribution simultanée des électrons et des trous.

Dans les semi-conducteurs extrinsèques, l'introduction d'impuretés donneuses ou accepteurs modifie profondément la concentration des porteurs. Dans le type *N* (dopage par le phosphore ou l'arsenic), on a $n \gg p$ et $n \approx N_D$ (concentration des donneurs), tandis que dans le type *P* (dopage par le bore ou l'aluminium), on a $p \gg n$ et $p \approx N_A$. Les concentrations des électrons et des trous restent liées par la relation d'équilibre fondamentale :

$$n_p = n_i^2 \quad (\text{V.14})$$

qui montre que l'augmentation d'un type de porteurs s'accompagne d'une diminution de l'autre. Le niveau de Fermi dépend du type de dopage : il se rapproche de la bande de conduction dans le type *N* et de la bande de valence dans le type *P*, ce qui facilite le transport des porteurs majoritaires.

Ainsi, le dopage introduit des niveaux d'énergie supplémentaires dans la bande interdite et entraîne une augmentation significative de la conductivité électrique, qui devient approximativement :

$$\sigma \approx qn\mu_n \quad (\text{Type N}) \quad , \quad \sigma \approx qp\mu_p \quad (\text{Type P})$$

Ce contrôle précis de la concentration des porteurs et de la position du niveau de Fermi constitue le fondement physique de la conception des jonctions semi-conductrices et des dispositifs électroniques modernes [37].

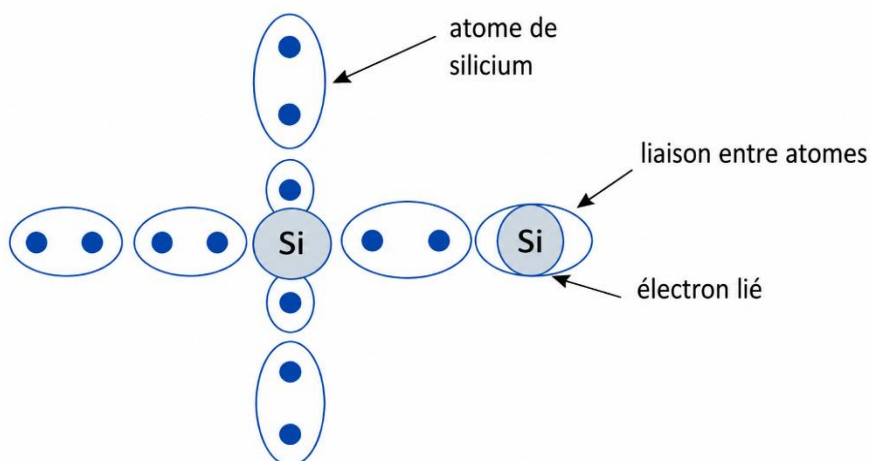


Figure V.1 : Structure des semi-conducteurs purs et génération des paires électron-trou dans le silicium

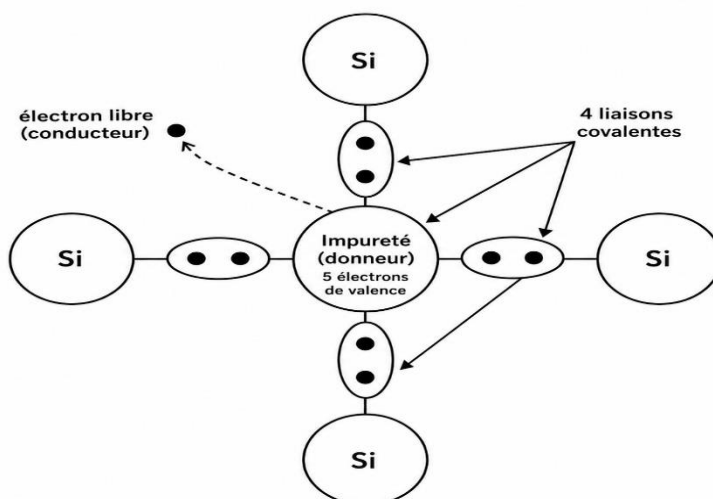


Figure V.2 : Schéma d'un semi-conducteur dopé de type N (impuretés donneuses)

V.5. Dopage des semi-conducteurs et mécanismes de transport des porteurs de charge

Le dopage des matériaux semi-conducteurs constitue un procédé fondamental permettant de contrôler leurs propriétés électriques, notamment dans des matériaux tels que le silicium et le germanium, par l'introduction contrôlée d'impuretés afin de modifier la concentration des porteurs de charge. Dans le cas du type *N*, obtenu par dopage avec des éléments pentavalents tels que le phosphore et l'arsenic, les électrons deviennent les porteurs majoritaires avec $\approx N_D$, tandis que dans le type *P*, obtenu par dopage avec des éléments trivalents tels que le bore et l'aluminium, les trous constituent

les porteurs majoritaires avec $p \approx N_A$, tout en respectant en permanence la relation d'équilibre $n_p = n_i^2$

Le transport des charges dans le semi-conducteur est décrit à l'aide de relations vectorielles prenant en compte à la fois le champ électrique et le gradient de concentration. La densité de courant totale s'écrit alors sous la forme

$$\vec{J} = \vec{J}_n + \vec{J}_p \quad (\text{V.15})$$

où les contributions électroniques et des trous sont données respectivement par

$$\vec{J}_n = qn\mu_n\vec{E} + qD_n\nabla n \quad \text{et} \quad \vec{J}_p = qn\mu_p\vec{E} + qD_p\nabla p \quad (\text{V.16})$$

De plus, le champ électrique est relié au potentiel électrique par la relation

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (\text{V.17})$$

Cette description vectorielle permet de comprendre de manière précise les mécanismes de dérive et de diffusion des porteurs de charge, et d'expliquer l'augmentation significative de la conductivité électrique dans les matériaux dopés, constituant ainsi le fondement physique du fonctionnement de la majorité des dispositifs électroniques modernes [38].

V.6. Propriétés électriques des matériaux semi-conducteurs

Les propriétés électriques des matériaux semi-conducteurs décrivent leur comportement face au courant électrique et aux champs électriques. Contrairement aux conducteurs et isolants, elles sont fortement modulables, notamment par le dopage et la température.

La conductivité dépend principalement de la concentration des porteurs de charge (électrons et trous) ainsi que de leur mobilité. Elle varie donc selon les conditions physiques et peut être exprimée en fonction de ces paramètres.

Le transport des charges se fait selon deux mécanismes principaux : la dérive sous l'effet d'un champ électrique et la diffusion due aux gradients de concentration. Ainsi, les propriétés électriques des semi-conducteurs reposent sur ces mécanismes, ce qui explique leur importance dans les dispositifs électroniques modernes [39].

V.7. Applications des matériaux semi-conducteurs

Les matériaux semi-conducteurs, notamment le silicium, constituent la base de l'électronique moderne grâce à la possibilité de contrôler leurs propriétés électriques par dopage, tension ou lumière. Ils sont utilisés en électronique pour la fabrication des diodes (redressement du courant) et des transistors (amplification et commutation), qui sont les éléments fondamentaux des circuits électroniques et des microprocesseurs. Ils

jouent aussi un rôle essentiel dans les circuits intégrés, permettant l'intégration de millions de composants sur une seule puce, ce qui a fortement réduit la taille des dispositifs tout en améliorant leurs performances.

Dans le domaine de l'énergie, ils sont utilisés dans les cellules photovoltaïques pour convertir la lumière en électricité. Enfin, en optoélectronique, ils servent dans les LED, les diodes laser et les photodétecteurs, utilisés pour l'émission et la détection de la lumière.

Ainsi, les semi-conducteurs sont indispensables dans les technologies électroniques, énergétiques et de communication modernes [37].

V.8.Résumé du chapitre V

Ce chapitre traite des matériaux semi-conducteurs, qui occupent une place essentielle dans l'électronique moderne. Il présente leur structure cristalline ainsi que la théorie des bandes d'énergie, expliquant leur comportement électrique intermédiaire entre conducteurs et isolants.

Il aborde ensuite leur classification en semi-conducteurs intrinsèques et extrinsèques, ainsi que le rôle du dopage dans l'amélioration de la conductivité électrique, permettant d'obtenir les types N et P.

Le chapitre décrit également les principales propriétés électriques, notamment la mobilité des porteurs de charge, la génération des paires électron-trou et les mécanismes de transport électrique.

Enfin, il met en évidence les principales applications des semi-conducteurs dans les diodes, les transistors et les composants de puissance, qui constituent la base des technologies électroniques actuelles.

Chapitre VI :
Matériaux Composites

VI.1. Introduction

Les matériaux composites (Matériaux Composites) représentent une avancée majeure dans le domaine des sciences et de l'ingénierie des matériaux. Ils ont été développés afin de répondre aux exigences croissantes des applications modernes, qui nécessitent des propriétés mécaniques et physiques supérieures à celles des matériaux conventionnels. Le principe fondamental des composites repose sur l'association de deux ou plusieurs constituants de nature différente, permettant d'obtenir un matériau final combinant leurs avantages tout en atténuant leurs limites. Un matériau composite est généralement constitué de deux éléments principaux : une matrice (Matrix), qui assure la cohésion de l'ensemble et la transmission des efforts, et un renfort (Renfort), qui confère au matériau sa résistance et sa rigidité mécanique. Cette structure permet d'ajuster et d'optimiser diverses propriétés, telles que la densité, la résistance mécanique, la rigidité et la résistance à la corrosion, ce qui rend ces matériaux particulièrement adaptés à de nombreuses applications industrielles. Au cours des dernières décennies, les matériaux composites ont connu un essor considérable et sont désormais largement utilisés dans des secteurs de pointe tels que l'aéronautique, l'automobile, le génie civil et les énergies renouvelables, en raison de leur légèreté associée à des performances élevées. Par ailleurs, la prise en compte des enjeux environnementaux a favorisé le développement de composites écologiques, élaborés à partir de ressources naturelles et durables.

Ainsi, les matériaux composites occupent une place centrale dans les technologies modernes et contribuent significativement à l'amélioration des performances des systèmes tout en réduisant la consommation de ressources.

Ce chapitre vise à présenter une étude globale des matériaux composites, en abordant leur définition, leurs constituants, leurs classifications, ainsi que leurs propriétés, avantages, limites et principaux domaines d'application.

VI.2. Définition des matériaux composites

Les matériaux composites sont définis comme des matériaux d'ingénierie obtenus par l'association de deux ou plusieurs constituants ayant des propriétés physiques ou chimiques différentes, tout en conservant leurs caractéristiques propres au sein de la structure finale. L'objectif de cette combinaison est de produire un matériau présentant des propriétés améliorées ou nouvelles, supérieures à celles de chacun des composants pris individuellement.

Un matériau composite est généralement constitué de deux éléments principaux :

- **La matrice (Matrix)** : elle assure la cohésion de l'ensemble et la répartition des contraintes.
- **Le renfort (Renfort)** : il confère au matériau sa résistance et sa rigidité mécanique.

Grâce à cette structure, les matériaux composites se distinguent par leur légèreté, leur haute résistance et la possibilité d'adapter leurs propriétés en fonction des exigences de l'application, ce qui explique leur large utilisation dans divers domaines industriels et techniques [40].

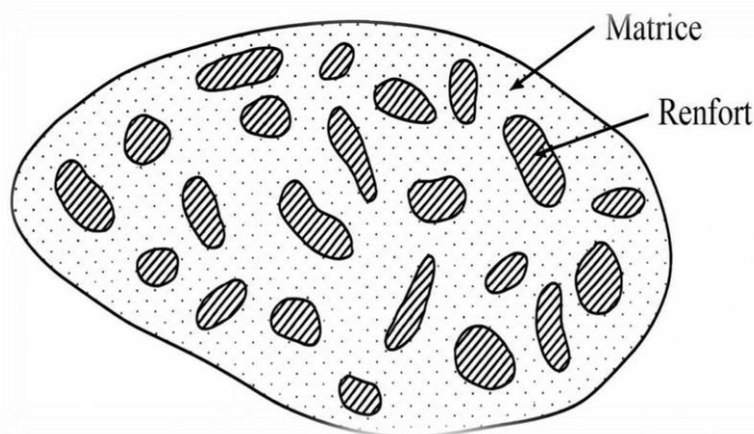


Figure VI.1 : Schéma de matériau composite

VI.3. Historique et évolution des matériaux composites

L'idée des matériaux composites remonte à l'Antiquité, où des matériaux naturels comme un mélange de boue et de paille étaient utilisés pour améliorer la résistance et réduire les fissures. La paille servait également à renforcer la poterie et les embarcations. Vers 1200, les Mongols ont développé le premier arc composite en bois, os et colle animale, offrant une grande puissance et précision. À l'époque moderne, les résines naturelles ont été remplacées progressivement par des plastiques synthétiques au XIXe et au début du XXe siècle, mais leur résistance limitée a conduit à leur renforcement par des fibres. En 1935, l'introduction des fibres de verre avec des matrices polymères a marqué le début des matériaux composites modernes (PRF).

Aujourd'hui, ces matériaux sont largement utilisés dans des secteurs avancés comme l'aéronautique, l'automobile, le génie civil et les énergies renouvelables, avec un intérêt croissant pour les composites biosourcés orientés vers la durabilité et la protection de l'environnement [5].

VI.4. L'importance des matériaux composites dans l'ingénierie moderne

Les matériaux composites sont essentiels en ingénierie moderne grâce à leur faible densité et leur haute résistance mécanique, offrant légèreté, rigidité et bonne résistance aux environnements agressifs.

Ils sont largement utilisés dans l'aéronautique, l'automobile, le génie civil et les énergies renouvelables, notamment pour réduire le poids, améliorer les performances et augmenter la durabilité des structures.

Leur capacité à intégrer plusieurs fonctions permet aussi de simplifier la conception et de réduire les coûts de fabrication et de maintenance[41].

VI.5. Éléments constituant un matériau composite

Les matériaux composites sont constitués de plusieurs éléments complémentaires qui déterminent leurs propriétés globales.

Ils comprennent principalement la matrice, qui assure la cohésion du matériau et le transfert des contraintes, les renforts, qui apportent la résistance mécanique et la rigidité, ainsi que l'interface entre les deux, qui garantit une bonne adhésion et un transfert efficace des charges. Dans certains cas, des additifs peuvent être ajoutés afin d'améliorer des propriétés spécifiques telles que la résistance thermique ou chimique.

Ainsi, la combinaison et l'interaction de ces constituants permettent d'obtenir des matériaux performants adaptés à de nombreuses applications industrielles. Les constituants des matériaux composites sont les suivants [40] :

VI .5.1 Matrice

La matrice des matériaux composites est généralement constituée de résines polymères, principalement thermodurcissables et thermoplastiques. Les premières sont les plus utilisées, mais les thermoplastiques gagnent en importance grâce aux progrès de la recherche.

La matrice assure la cohésion du composite, maintient l'alignement des fibres et transmet les contraintes vers les renforts, ce qui permet de résister aux efforts mécaniques (traction, compression, cisaillement et flexion). Elle contribue également à l'absorption des chocs et à l'amélioration des performances globales du matériau.

Par ailleurs, les composites à base de matériaux naturels font l'objet de recherches pour améliorer leurs propriétés et leurs applications industrielles.

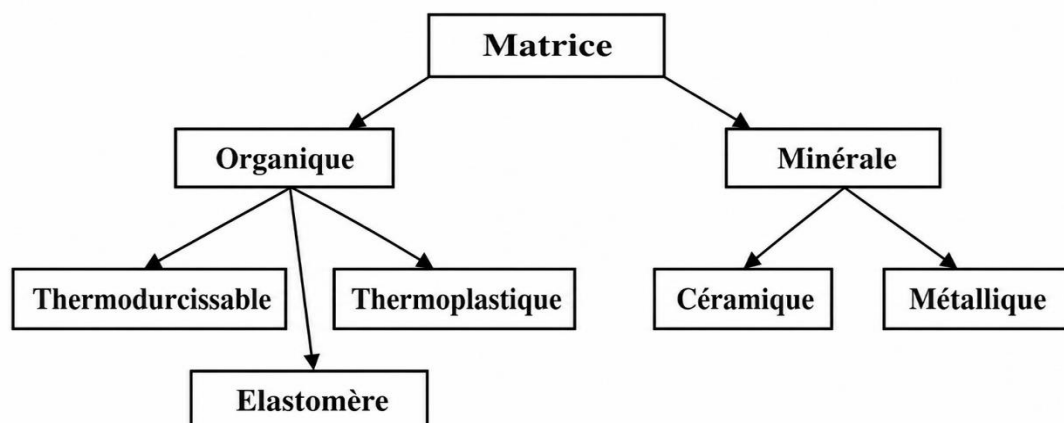


Figure VI.2 : Types de matrice

VI .5.2 Renforts

Les renforts constituent l'un des éléments essentiels des matériaux composites, car ils forment la structure porteuse capable de supporter la majorité des contraintes mécaniques appliquées au matériau. Ils jouent également un rôle principal dans l'amélioration de la résistance du composite, en lui conférant l'essentiel de sa rigidité et de sa solidité.

Les fibres représentent la forme de renforcement la plus efficace, car les contraintes sont transférées à travers la matrice, généralement plus souple, vers les fibres qui possèdent une grande rigidité et une résistance élevée. Ainsi, on obtient un matériau composite aux propriétés mécaniques améliorées par rapport à celles de la matrice seule.

L'utilisation des fibres pour le renforcement des matériaux fragiles remonte à l'Antiquité, lorsque les Égyptiens utilisaient des fibres d'amiante pour renforcer les poteries en argile il y a environ 5000 ans.

Les fibres utilisées dans le renforcement sont classées en trois catégories principales :

- Fibres minérales
- Fibres polymères
- Fibres naturelles

Elles peuvent également être classées selon plusieurs critères :

- Selon la nature : animales, végétales ou minérales
- Selon la forme : courtes, longues ou continues
- Selon la disposition : sous forme de mats ou tissées

La classification générale des types de renforts couramment utilisés est présentée dans la figure3.

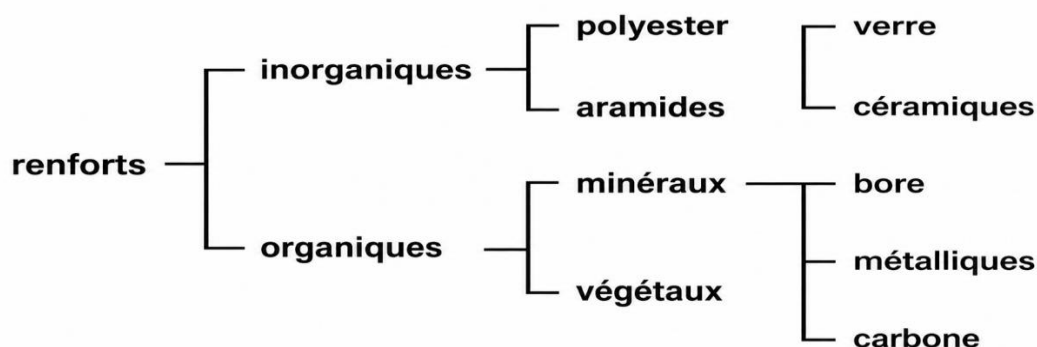


Figure VI.3 : Types de renfort

VI.5.3 Additifs

Les additifs sont des composants ajoutés en faibles quantités dans les matériaux composites afin d'améliorer leurs propriétés et leur comportement.

Ils peuvent être des charges (minérales, végétales ou synthétiques) qui augmentent la rigidité, la stabilité thermique et réduisent le retrait du polymère, ou des charges non renforçantes utilisées principalement pour réduire le coût. D'autres additifs fonctionnels, comme les colorants et les agents de démoulage, améliorent l'aspect du matériau et facilitent la fabrication.

Ainsi, les additifs contribuent à optimiser la mise en œuvre, la qualité et les performances globales des matériaux composites.

VI.6. Classification des matériaux composites

Les matériaux composites (Composites) sont classés selon plusieurs critères fondamentaux, permettant de comprendre leur comportement mécanique et de définir leurs domaines d'application en ingénierie. Les deux classifications principales sont : selon la nature de la matrice et selon la forme du renfort [42].

VI.6.1 Classification selon la nature de la matrice

Dans ce type de classification, on se base sur la nature du matériau constituant la matrice, qui assure la cohésion des éléments et le transfert des contraintes.

- **Composites à matrice métallique (CMM) :**

La matrice est un métal tel que l'aluminium ou le magnésium. Ces matériaux présentent une bonne résistance thermique et une grande rigidité, et sont utilisés notamment dans l'aéronautique.

- **Composites à matrice céramique (CMC) :**

Ils se caractérisent par une très haute résistance aux températures élevées et à l'usure, mais restent relativement fragiles. Ils sont utilisés dans des environnements extrêmes.

- **Composites à matrice organique (CMO) :**

Ce sont les plus couramment utilisés, où la matrice est généralement polymérique (résines). Ils comprennent :

- Les composites à matrice polymère (CMP)
- Les composites carbone-carbone (C/C), utilisés pour les applications à très haute température

VI.6.2 Classification selon la forme du renfort

Cette classification est basée sur la nature et la forme du matériau de renforcement, qui joue un rôle essentiel dans les propriétés mécaniques.

Composites lamellaires : Constitués de plusieurs couches superposées et liées par la matrice. Ils offrent de bonnes propriétés mécaniques dans différentes directions et sont utilisés dans les structures isolantes et industrielles.

Composites particuliers : Ils contiennent des particules dispersées dans la matrice sous forme de poudre ou de grains. Ils sont souvent utilisés pour réduire le coût ou améliorer certaines propriétés spécifiques.

Composites renforcés par fibres (CRF) : Ils représentent la catégorie la plus importante en ingénierie, car les fibres améliorent fortement les performances mécaniques.

VI.6.3 Classification des composites à fibres

Selon l'organisation des fibres :

Composites à fibres continues : Les fibres sont longues et orientées, ce qui assure une très haute résistance mécanique dans leur direction.

Composites à fibres discontinues (courtes) : Les fibres sont courtes et réparties de manière aléatoire, offrant des propriétés moyennes mais un coût de fabrication plus faible.

VI.7. Propriétés physiques et mécaniques des matériaux composites

Les matériaux composites se caractérisent par la possibilité de concevoir et d'ajuster leurs propriétés avec précision en fonction du type de matrice, de la nature du renfort et de son orientation, ce qui leur confère un avantage notable par rapport aux matériaux traditionnels [43].

➤ **Premièrement : Propriétés physiques**

Faible densité (Low Density) : Plus légers que les métaux tout en conservant de bonnes performances mécaniques.

Résistance à la corrosion et aux agents chimiques : Bonne résistance à l'humidité, aux sels, aux acides et aux environnements agressifs, les composites à matrice polymère.

Isolation thermique : Faible conductivité thermique, ce qui en fait de bons isolants.

Isolation électrique : Généralement non conducteurs, notamment les composites à matrice polymère (sauf certains comme les fibres de carbone).

Stabilité thermique : Conservent leurs propriétés dans une certaine plage de température selon le type de matrice (polymère, métallique ou céramique).

Résistance au feu : Variable selon les constituants ; les composites céramiques sont plus résistants, tandis que les polymères nécessitent des additifs ignifuges.

Faible absorption d'eau : Dépend du type de matrice et du traitement de surface.

Durabilité élevée : Bonne résistance aux conditions environnementales, réduisant la dégradation avec le temps.

➤ **Deuxièmement : Propriétés mécaniques**

Résistance à la traction (Traction) : Très élevée, dans la direction des fibres.

Résistance à la compression (Compression) : Dépend du type et de la distribution du renfort.

Résistance à la flexion (Flexion) : Bonne performance grâce à l'interaction matrice–renfort.

Résistance au cisaillement (Cisaillement) : Dépend fortement de la qualité de l'adhésion entre matrice et renfort.

Rigidité (Rigidité) : Rapport rigidité/poids élevé.

Résistance à la fatigue (Fatigue) : Bonne tenue aux chargements répétés.

Résistance aux chocs (Impact) : Capacité d'absorption d'énergie, dans les structures stratifiées.

Anisotropie (Anisotropie) : Les propriétés varient selon la direction, permettant une conception adaptée aux sollicitations.

Adhérence matrice-renfort : Facteur clé influençant les performances globales du composite.

VI.8.Applications des matériaux composites dans l'industrie

Les matériaux composites sont largement utilisés dans divers secteurs industriels grâce à leurs propriétés remarquables telles que la légèreté, la haute résistance et la résistance

à la corrosion. Ils sont devenus un choix essentiel dans de nombreuses applications modernes [5].

- **Industrie aéronautique et spatiale**

Utilisés dans les structures d'avions, les ailes et les satellites pour réduire le poids et la consommation de carburant tout en améliorant l'efficacité.

- **Industrie automobile**

Utilisés dans les carrosseries et pièces mécaniques pour réduire le poids des véhicules et améliorer leurs performances et leur efficacité énergétique.

- **Génie civil et construction**

Utilisés pour renforcer les structures, ponts et canalisations grâce à leur résistance à la corrosion et aux environnements agressifs.

- **Industrie maritime**

Ils sont employés dans la construction des navires et des bateaux, car ils résistent à l'eau et à la corrosion saline.

- **Industrie médicale**

Utilisés dans les prothèses et implants grâce à leur biocompatibilité et légèreté.

VI.9. Résumé du chapitre VI

Ce chapitre traite des matériaux composites comme des matériaux avancés obtenus par l'association d'une matrice et d'un renfort afin d'améliorer les propriétés mécaniques et physiques du matériau final. La matrice assure la cohésion de l'ensemble, tandis que les éléments de renfort, tels que les fibres ou les particules, confèrent une meilleure résistance et rigidité. Les matériaux composites sont classés selon la nature de la matrice en polymères, métaux ou céramiques, ainsi que selon la forme du renfort, ce qui permet une grande diversité de structures et d'applications. Ils se distinguent par leur faible densité, leur haute résistance mécanique et leurs performances globalement supérieures à celles des matériaux conventionnels, ce qui les rend particulièrement adaptés aux domaines de l'aéronautique, de l'automobile ainsi qu'aux applications en génie mécanique et électrique.

Références Bibliographiques

- [1] Tabti, B. (2011). Contribution à la modélisation de dispositifs filtrants et à la caractérisation de matériaux en électrotechnique (Doctoral dissertation, Université Abderrahmane Mira de Bêjaïa).
- [2] Gorbachuk, M. (2024). Matériaux électrotechniques.
- [3] Menana, H., Douine, B., Berger, K., Lévêque, J., & Hinaje, M. (2016, June). Caractérisation électromagnétique de matériaux conducteurs non conventionnels. In Symposium de Génie Electrique (SGE 2016): Electrotechnique du Futur (EF), Electronique de Puissance du Futur (EPF) et Matériaux pour le Génie Electrique (MGE) (pp. 1–6).
- [4] Thinhinane, M. (2023). Caractérisation des matériaux composites par la technique non destructive des courants de Foucault (Doctoral dissertation, FGEI, UMMTO).
- [5] Karek, R. (2022). Valorisation des matériaux composites d'origine naturelle (Doctoral dissertation, Université Kasdi Merbah Ouargla).
- [6] Kasap, S. O. (2006). Electronic Materials and Devices (pp. 336–339). New York : McGraw-Hill.
- [7] Franklin, B. (2022). Expériences et observations sur l'électricité faites à Philadelphie en Amérique. DigiCat.
- [8] Cyr, C. (2007). Modélisation et caractérisation des matériaux magnétiques composites doux utilisés dans les machines électriques (Doctoral dissertation, Arts et Métiers ParisTech).
- [9] Laval, S. (2013). L'Institut d'électronique fondamentale, cinquante ans d'histoire. Histoire de la recherche contemporaine, 2(1), 70–81.
- [10] Yahyaoui, H. (2015). Matériaux isolants pour appareillages haute tension dans le domaine du courant continu : comportement et vieillissement (Doctoral dissertation, Université de Montpellier).
- [11] Maglione, M., & Decourt, R. (2010). Matériaux diélectriques.
- [12] Salame, B. (2015). Mesure de charges dans les matériaux semi-conducteurs et les métaux avec une méthode élasto-électrique (Doctoral dissertation, Université Pierre et Marie Curie – Paris VI).
- [13] Reffas, M. (2025). Physique des semi-conducteurs.
- [14] Bergeard, N. (2010). Matériaux magnétiques pour l'étude de la dynamique de l'aimantation (Doctoral dissertation, Université Paris-Sud XI).

- [15] Kachi, M. (2025). Propriétés électriques des matériaux : une introduction.
- [16] Dihia, D. (2016). Contrôle non destructif : application pour matériaux conducteurs (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [17] Gherras, H. (2015). Synthèse et études des propriétés électroniques de nouveaux matériaux conducteurs.
- [18] Zemouri, N. (2016). Étude et réalisation d'un système multicapteurs destiné au diagnostic des matériaux conducteurs (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [19] Fatiha, M. (2013). Polymères conducteurs (Doctoral dissertation, Faculté des Sciences et Technologies).
- [20] Belkacemi, D. (2012). Étude des caractéristiques des matériaux isolants pour transformateurs (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [21] Brahim, T. M. (2025). Propriétés physiques et applications des matériaux solides.
- [22] Chabane-Sari, A. Z. (2022). Classification d'une variété de matériaux dans l'amélioration de l'isolation thermique d'un bâtiment en Algérie (Doctoral dissertation).
- [23] Mihaila, V., Nguyen, M. Q., Duchesne, S., Velu, G., Roger, D., Malec, D., & Cambronne, J. P. (2014, July). Solutions d'isolation électrique pour les machines fonctionnant à hautes températures. In Symposium de Génie Électrique 2014.
- [24] Karadjian, M. (2018). Endurance et tenue diélectrique de l'isolation de câbles électriques pour l'aéronautique (Doctoral dissertation, Université Paris-Saclay).
- [25] Graham, C. R. (2022). Propriétés électriques de certains condensateurs ferroélectriques.
- [26] Amidou, B. (2015). Impacts de la qualité du système d'isolation sur la condition et l'efficacité des transformateurs de puissance (Doctoral dissertation, Université du Québec à Chicoutimi).
- [27] Jeanneton, A. (2023). Transformateurs de mesure immergés haute tension : nouveaux matériaux isolants et diagnostic (Doctoral dissertation, École Centrale de Lyon).
- [28] Chaarani, R. (2003). Étude de l'influence des caractéristiques des isolateurs sur leurs performances électriques dans des conditions de givrage (Doctoral dissertation, Université du Québec à Chicoutimi).
- [29] Zenasni, H. (2013). Étude théorique des propriétés magnétiques, électroniques et structurales des alliages Heusler (Doctoral dissertation, Université de Tlemcen Abou Bekr Belkaid).

- [30] Bui, A. T. (2011). Caractérisation et modélisation du comportement des matériaux magnétiques doux sous contrainte thermique (Doctoral dissertation, Université Claude Bernard Lyon 1).
- [31] Vo, A. T. (2021). Modèle LS pour une meilleure prise en compte de l'hystérésis dynamique dans les matériaux magnétiques doux : amélioration, identification et validation expérimentale (Doctoral dissertation, Université Grenoble Alpes).
- [32] Ouazib, A. (2025). Contribution à l'étude des phénomènes de couplage magnéto-mécanique dans les matériaux ferromagnétiques doux et durs (Doctoral dissertation, Université Paris-Saclay).
- [33] Souad, K., & Mohamed, D. (2018). Étude des techniques et dispositifs de mesures des caractéristiques magnétiques des tôles ferromagnétiques (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [34] Waeckerlé, T. (2011). Matériaux magnétiques doux cristallins : choix des matériaux.
- [35] Souici, A. H., & de Cristallographie, G. (2013). Physique des semi-conducteurs. Université de Béjaïa.
- [36] Khaldi, A. (2019). Étude des propriétés optoélectroniques et mécaniques des semi-conducteurs magnétiques (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider Biskra).
- [37] Yu, P. Y., & Cardona, M. (2010). Fundamentals of Semiconductors: Physics and Materials Properties. Springer Science & Business Media.
- [38] Barbot, A. (2014). Dopage par co-sublimation de semi-conducteurs organiques pour la conversion en énergie : applications aux cellules photovoltaïques (Doctoral dissertation, Université de Limoges).
- [39] Slamani, A. (2019). Cours de physique des semi-conducteurs.
- [40] Perron, C. (2017). Définition et mise en œuvre d'un matériau composite à matrice métallique pour les packagings d'électronique embarquée (Doctoral dissertation, Université de Bordeaux).
- [41] Lakhdari, A. E. (2019). Modélisation en volumes finis de CND des matériaux faiblement conducteurs par courants de Foucault et de déplacement (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider Biskra).
- [42] Samir, D. E. G. H. B. O. U. D. J. Matériaux composites.
- [43] Landron, G., & Daghia, F. Génération de géométrie et de maillage pour la modélisation du comportement de matériaux composites tissés à l'échelle mésoscopique.

Conclusion Générale et Perspectives

Conclusion générale

Les matériaux électrotechniques constituent l'un des piliers fondamentaux du développement des systèmes électriques et électroniques modernes. Ils représentent la base sur laquelle reposent de nombreuses applications industrielles et technologiques dans les domaines de l'énergie, des télécommunications et de l'automatisation.

Cette étude a permis, à travers le premier chapitre, de présenter une vision globale de ce domaine, en commençant par la définition des matériaux électrotechniques, leur évolution historique, ainsi que leur classification générale selon leurs propriétés physiques et électriques. Ce cadre théorique a facilité la compréhension du comportement de ces matériaux et de leurs modes d'utilisation dans les différentes applications.

Les chapitres suivants ont abordé chaque catégorie de matériaux de manière distincte, en mettant en évidence leurs caractéristiques principales et leur rôle fonctionnel :

- **Les matériaux conducteurs** : ils se distinguent par leur forte capacité à conduire le courant électrique grâce à la présence d'électrons libres, ce qui les rend indispensables dans les circuits électriques et le transport de l'énergie.
- **Les matériaux isolants** : ils jouent un rôle de protection essentiel en empêchant le passage du courant électrique, assurant ainsi la sécurité des équipements et des utilisateurs, tout en améliorant l'efficacité des systèmes électriques.
- **Les matériaux magnétiques** : ils sont essentiels dans la conception des machines électriques telles que les transformateurs et les moteurs, grâce à leur capacité à générer et à guider efficacement les champs magnétiques.
- **Les matériaux semi-conducteurs** : ils constituent la base de l'électronique moderne et sont utilisés dans la fabrication de composants essentiels tels que les diodes, les transistors et les circuits intégrés, qui sont au cœur des technologies intelligentes.
- **Les matériaux composites** : ils représentent des matériaux avancés combinant les propriétés de plusieurs matériaux différents, permettant ainsi d'obtenir de meilleures performances mécaniques, électriques et thermiques.

Ainsi, la diversité des matériaux électrotechniques et la complémentarité de leurs propriétés en font un élément central dans le progrès technologique, contribuant directement à l'amélioration des performances des dispositifs et systèmes utilisés dans la vie quotidienne et dans l'industrie.

Perspectives

Le domaine des matériaux électrotechniques connaît une évolution rapide grâce aux avancées scientifiques et technologiques, ouvrant ainsi de nombreuses perspectives de recherche et d'innovation :

- Le développement de nouveaux matériaux conducteurs avancés à très faible résistance et à haute efficacité énergétique, afin de réduire les pertes dans les réseaux de transport et de distribution.
- L'amélioration des matériaux isolants modernes en développant des solutions écologiques capables de résister à des conditions thermiques et électriques extrêmes, tout en réduisant l'impact environnemental
- La conception de matériaux magnétiques innovants destinés aux nouvelles générations de moteurs électriques à haut rendement et aux systèmes de stockage d'énergie.
- Le renforcement de la recherche sur les semi-conducteurs avancés et nanostructurés, qui constituent la base de l'électronique de pointe, de l'intelligence artificielle et des technologies de calcul modernes.
- L'élargissement de l'utilisation des matériaux composites intelligents, combinant propriétés mécaniques, électriques et thermiques, avec des applications dans l'aéronautique, les véhicules électriques et les industries de haute technologie.

En conclusion, l'avenir des matériaux électrotechniques repose essentiellement sur l'innovation, l'optimisation des performances et la réduction de la consommation énergétique, afin de répondre aux exigences croissantes du développement scientifique et technologique moderne.