



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique
Université Dr. Tahar Moulay de Saida
Faculté de Technologie

Département d'Électrotechnique

Matériaux d'électrotechniques et leurs applications

Présenté par :

Dr. BENOUIS ALI

Maître de conférences « A » en Génie Mécanique

Février 2024

Avant-propos

Les matériaux d'électrotechniques vont au-delà de la simple description du comportement des composants électriques. En tant que discipline fondamentale, l'électrotechnique joue un rôle crucial dans des domaines variés tels que l'énergie, l'électronique, et l'automatisation industrielle. L'objectif de cette polycopie est de fournir une compréhension approfondie des matériaux utilisés dans ce domaine dynamique, ainsi que de leurs nombreuses applications.

Les matériaux et leurs applications sont des éléments clés dans cette discipline. Leur influence complexe agit indépendamment des idées préconçues, rendant cette science incontournable pour une compréhension approfondie des applications quotidiennes. En général, les matériaux dans leurs structures présentent des défis, engendrant parfois la défaillance de la structure ou des défauts de fabrication, notamment lors de l'usinage des pièces mécaniques.

Ce document est une synthèse de quatre chapitres du parcours de la première année du master 1 (électrotechnique, électronique, génie biomédical, génie mécanique, etc.). Des exemples concrets sont utilisés comme point de départ, revenant toujours à l'interprétation physique des concepts.

Le polycopié "Matériaux d'électrotechniques et leurs applications" est divisé en quatre chapitres.

Le premier chapitre rappelle l'importance des matériaux conducteurs, essentiels au passage du courant électrique et crucial dans la fabrication de composants électroniques et de câbles électriques. Cette introduction souligne leur rôle fondamental dans la transmission de l'énergie et la création de dispositifs électroniques avancés.

Le deuxième chapitre explore l'importance des matériaux isolants qui préviennent les fuites de courant, jouant un rôle essentiel dans la création de câbles, d'isolateurs et de revêtements protecteurs. La compréhension de leurs propriétés spécifiques garantit la sécurité des systèmes électriques, tout en encourageant l'innovation pour améliorer leurs performances.

Le troisième chapitre se concentre sur les matériaux magnétiques, tels que le fer et le nickel, essentiels en électrotechnique grâce à leurs propriétés magnétiques uniques. Ils sont utilisés

dans la fabrication de composants clés comme les transformateurs, permettant la manipulation efficace des champs magnétiques. Ces matériaux jouent un rôle central dans diverses applications, des moteurs électriques aux dispositifs de stockage de données.

Le quatrième chapitre explore les semi-conducteurs, occupant une position centrale en électronique en raison de leur nature intermédiaire entre conducteurs et isolants. Essentiels à la fabrication de composants électroniques, ils permettent la modulation du courant, offrant une flexibilité cruciale pour les circuits intégrés.

Nous espérons que cette polycopie permettra aux étudiants de se familiariser avec l'utilisation de ces matériaux dans différents domaines, en particulier en électrotechnique.

Table des matières

Avant-propos

Introduction générale 1

CHAPITRE I : MATERIAUX CONDUCTEURS 3

I.1. introduction..... 3

I.1.1. Classification 3

I.1.2. Productions 4

I.2. Lexique des matériaux conducteurs 8

I.2.1. Propriétés physiques 9

I.2.2. Bobinages de machines et câbles électriques..... 9

I.2.3. Amélioration des contacts électriques 10

I.2.4. Câblage et soudure10

I.2.5. Contacts glissants 10

I.2.6. Résistances bobinées10

I.2.7. Lampes à incandescence11

I.2.8. Lampes à décharges11

I.2.9. Sondes de température11

I.3. Caractérisation des conducteurs11

I.3.1. Conductivité électrique	11
I.3.1.1 Loi d'Ohm locale	11
- Loi d'Ohm en régime permanent	11
I.3.1.2 Classification des matériaux en électricité	15
I.3.1.3 Nature de la conduction électrique	15
I.3.2 Résistance	15
I.3.2.1 Calcul de la résistance	16
I.3.3 Résistivité	16
I.3.3.3 Résistivité et température	17
I.3.3.4 Echelle des résistivités	17
I.4. Caractéristiques des métaux conducteurs	19
I.5. Caractéristiques des alliages métalliques conducteurs	20
I.6. Les fils conducteurs	20
I.6.1 Fils de bobinage	20
I.6.2 Caractéristiques nécessaires	21
6.3 Matériaux employés	21
I.7. Lignes aériennes	21
I.7.1. Constitution	21

I.7.2 Géométrie	21
I.7.3 Conditions d'établissement	22
I.7.4 Effet du vent sur les conducteurs	23
I.7.5 Choix des sections des lignes aériennes	24
I.7.6 Calcul du diamètre des lignes aériennes en fonction de l'échauffement admissible	24
CHAPITRE II. MATERIAUX ISOLANTS	26
II.1. Introduction	26
II.1.1. Echelle des résistivités	26
II.1.2. Lexique	27
II.1.3. Propriétés physiques	28
II.1.4. Classification	28
II.2. Caractéristiques diélectriques des isolants	29
II.2.1. Permittivité relative	29
II.2.2 Rigidité diélectrique	30
II.2.2.1 Circuit équivalent d'une isolation en courant alternatif	31
II.2.2.2 Calcul de l'angle de pertes diélectriques	32
II.2.2.3 Calcul des pertes diélectriques	32

II.2.2.4 Calcul du champ électrique dans un isolant	32
II.2.2.5 Résistance à l'arc	34
II.2.2.6 Influence de la température sur les isolants	34
II.2.2.6.1 Loi expérimentale de vieillissement des isolants	35
II.2.2.5 Classification thermique des isolants	35
II.3. Types d'isolants utilisés dans l'industrie électrique	35
II.3.1. Isolants solides	36
II.3.1.1. Isolants naturels	36
II.3.1.1.1 Minéraux	36
II.3.1.1.2 Organiques	36
II.3.1.2. Isolants synthétiques : matières plastiques	37
II.3.1.2.1 Caractéristiques des matières plastiques	37
II.3.1.2.2 Matières plastiques utilisées en électrotechnique	37
II.3.2. Isolants liquides	37
II.3.2.1. Huiles minérales	37
II.3.2.2. Huiles synthétiques	38
II.3.2.3. Vernis	38
II.4. polarisation diélectrique	38

II.4.1. Moment électrique d'un dipôle	38
II.4.2. Description de la polarisation	39
II.4.3. Diélectriques polaires et non polaires	40
II.4.3.1 Exemple	41
II. 5. Appareillages	41
II.5.1 Bobinages de machines	41
II.5.2. Câbles électriques	42
II.5.3. Condensateurs	43
II.5.4. Isolateurs	44
II.5.5. Appareillages haute tension	44
II.6. Classification en fonction de la température	46
II.7. Classification en fonction de l'état physique	47
II.8. Classification en fonction de l'état physique (suite)	48
CHAPITRE III : MATERIAUX MAGNETIQUES	49
III.1. Rappels	49
III.1.1. Induction B et excitation H	49
III.1.2. Substance ferromagnétique	49
III.1.3. Saturation du circuit magnétique	50

III.1.4. Hystérésis du circuit magnétique	51
III.1.5. Cycle d'hystérésis -- pertes par hystérésis	51
III.1.6. Courants induits -- pertes par courants de Foucault	53
III.1.7. Pertes magnétiques ou pertes fer	54
III.2. Matériaux magnétiques doux	55
III.2.1. Aciers électriques	55
III.2.2. Alliages Fe/Ni ou Fe/Co	56
III.2.3. Ferrites douces	56
III.2.4. Guide de choix des matériaux doux	57
III.3. Matériaux magnétiques durs	57
III.4. Matériaux aux propriétés magnétiques	59
III.4.1. Tableau Mendeleïev	59
III.4.1.1. Alnico	59
III.4.1.2. Ferrites dures	60
III.4.1.3. Aimants à base de terres rares	60
III.4.1.4. Domaines d'applications des aimants permanents	61
III.4.1.5. Guide de choix des matériaux durs : propriétés	61
III.5. Critères de choix	62

III.6. Cycle d'hystérésis de différents matériaux 64

III.6.1. Exercice 65

III.6.2. Réponse 66

CHAPITRE IV : LES SEMI-CONDUCTEURS 68

IV .1. Introduction 68

IV.2. Avantages des composants à semi-conducteurs 69

IV.3. Un problème épineux: les dipôles non-linéaires 70

IV.4. Composants 71

IV.4.1. Le transistor 71

IV.4.2. Diodes ordinaires ("standard") 71

IV.4.3. Le thyristor 72

IV.4.3.1 Constitution et fonctionnement du thyristor 72

IV.4.4. Le triac 72

IV.5. Semi-conducteur dopé : exemples 74

IV.6. Dopage d'un transistor MOS 75

BIBLIOGRAPHIE

Liste des symboles

Grandeurs :

$q(t)$	---	Coordonnées généralisées
E	(V)	champ électrique
j	(A)	courant électrique
σ	(A)	la conductivité électrique
T	(°)	la température
u	(Volt)	Tension d'alimentation
i	(ampère)	Intensité de courant
R	(ohm)	Resistance électrique
s	(m ²)	La surface
l	(m)	La longueur
ρ	(Ohm.mètre)	la résistivité électrique
T_c	(N)	La tension du câble
p_0	(N/m)	poids linéique du câble
f	(m)	flèche
e	(m)	Ecartement
C_x	---	coefficient de trainée
d	(m)	diamètre du conducteur
Δl	(m)	élément de longueur du câble
μ	(kg/m ³)	masse volumique de l'air
V	(m/s)	vitesse du vent
F	(N)	La poussée de vent exercé sur les conducteurs.
T_a		la température ambiante.
θ	(°)	L'échauffement ($T - T_a$)
P	(W)	la puissance dissipée
K	(W [°] C/m ²)	coefficient de dissipation thermique
S_l	(m ²)	surface latérale du conducteur
j	(A/mm ²)	La densité de courant
dx	(m)	Tranche d'élément entre les positions x et x+dx

ε_0	(F/m)	la permittivité absolue ($8,85 \cdot 10^{-12}$)
ε_r	(F/m)	la permittivité relative
C	(F)	Capacité électrique
C_0	(F)	Capacité électrique à vide
G	(kV/mm)	La rigidité diélectrique
L	(m)	la distance entre les électrodes
δ	(rad)	L'angle de pertes diélectriques
Φ	(rad)	Déphasage
ω	(rad/s)	La pulsation
Pu	(W/cm ³)	pertes diélectriques, (la puissance par unité de volume)
ε_r''	----	indice de pertes
f	(Hz)	fréquence
E	(V/cm)	valeur efficace du champ électrique
d	(m)	la hauteur d'isolant
p_0	(C·m)	moment électrique d'un dipôle
q	(A)	la charge positive (ou la valeur absolue de la charge négative)
a'	(mm)	la longueur du dipôle.
P	(C/m ²)	La polarisation
χ	---	susceptibilité diélectrique
σ_s	(C/m ²)	la charge de polarisation apparaissant à la surface du condensateur
B	(tesla)	d'Induction
H	(A/m)	excitation
μ_0	(Kg.m.A ⁻² .s ⁻²)	la perméabilité du vide (= $4\pi 10^{-7}$)
μ_R	(T.m/A)	perméabilité relative.
P_h	(W/kg)	Pertes par hystérésis
k_I	----	Coefficient dépend du matériau et est proportionnel à la surface du cycle
P_c	(W/kg)	Pertes par courants de Foucault
C_{FER}	(W/kg)	coefficient de pertes fer en (donnée constructeur)
M	(kg)	masse du circuit

Introduction générale

La connaissance approfondie des matériaux en électrotechnique revêt une importance cruciale dans divers domaines tels que la physique, l'ingénierie Ces matériaux naturels suscitent l'intérêt de professionnels tels que les géophysiciens et les ingénieurs civils. Leur utilisation est une préoccupation majeure pour plusieurs catégories d'experts, notamment les ingénieurs d'études, les architectes, les ingénieurs civils, les ingénieurs en mécanique, les physiciens de l'instrumentation et les ingénieurs biomédicaux. La conception et la construction des machines électrotechniques représentent souvent un objectif central pour les ingénieurs.

La mesure et l'interprétation des propriétés des matériaux sont également des tâches essentielles pour les ingénieurs de maintenance et les physiciens.

Il est fortement recommandé aux étudiants de chercher à comprendre les applications associées à chaque chapitre. L'étude de ce texte serait considérablement enrichie si elle était accompagnée d'une expérience pratique en laboratoire.

Les étudiants engagés dans la lecture de ce document devraient posséder des connaissances préalables, notamment dans les domaines suivants : en mathématiques, physique et chimie, ainsi qu'une introduction à l'électrotechnique. Une compréhension de l'électrotechnique d'environ le niveau de première année collective est également souhaitable, tout comme une étude parallèle de l'électricité.

Une connaissance fondamentale des matériaux est essentielle pour les spécialistes travaillant dans ces divers domaines technologiques. L'objectif de ce document est de fournir une théorie suffisante pour permettre une compréhension approfondie des concepts et de leurs utilisations.

- Le premier chapitre souligne l'importance des matériaux conducteurs, indispensables au passage du courant électrique et cruciaux dans la fabrication de composants électroniques et de câbles électriques. Cette introduction met en lumière leur rôle essentiel dans la transmission de l'énergie et la création de dispositifs électroniques avancés.

- Le deuxième chapitre explore l'importance des matériaux isolants, qui préviennent les fuites de courant et jouent un rôle essentiel dans la création de câbles, d'isolateurs et de revêtements protecteurs. La compréhension de leurs propriétés spécifiques garantit la sécurité des systèmes électriques, tout en encourageant l'innovation pour améliorer leurs performances.
- Le troisième chapitre se concentre sur les matériaux magnétiques, tels que le fer et le nickel, essentiels en électrotechnique en raison de leurs propriétés magnétiques uniques. Ils sont utilisés dans la fabrication de composants clés tels que les transformateurs, permettant une manipulation efficace des champs magnétiques. Ces matériaux jouent un rôle central dans diverses applications, des moteurs électriques aux dispositifs de stockage de données.
- Le quatrième chapitre explore les semi-conducteurs, qui occupent une position centrale en électronique en raison de leur nature intermédiaire entre conducteurs et isolants. Essentiels à la fabrication de composants électroniques, ils permettent la modulation du courant, offrant une flexibilité cruciale pour les circuits intégrés.

À la fin de ce document, vous trouverez une brève liste de livres pour référence ultérieure. Dans la mesure du possible, les étudiants devraient les consulter pour compléter et élargir la couverture de ce texte, obtenir des idées alternatives, approfondir des sujets spécifiques et trouver des problèmes supplémentaires.

Ce cours est accessible sur la plateforme d'enseignement à distance.

<https://e-learning.univ-saida.dz/course/view.php?id=17298>

CHAPITRE I : MATERIAUX CONDUCTEURS

I.1. INTRODUCTION

Les machines électriques, présentes depuis le siècle dernier, ainsi que l'ensemble du matériel électrique, évoluent vers une compacité accrue grâce aux améliorations des matériaux. Les matériaux conducteurs, tels que le cuivre et le silicium, jouent un rôle essentiel en facilitant le passage du courant électrique. Leur capacité à promouvoir le déplacement des charges électriques les rend indispensables dans la conception de composants électroniques, de câbles électriques, et d'autres applications en électrotechnique. La diversité de ces matériaux, avec leurs propriétés distinctes et les défis qui les accompagnent, constitue un domaine d'étude essentiel pour l'innovation technologique.

I.1.1. Classification

Ces matériaux peuvent être classés en quatre groupes selon leur fonction figure I.1:

- * Les matériaux conducteurs pour véhiculer le courant électrique.
- * Les matériaux isolants pour isoler les conducteurs électriques.
- * Les matériaux magnétiques pour créer ou canaliser l'induction magnétique.
- * Les matériaux semi-conducteurs pour la fabrication des interrupteurs électroniques de puissance.

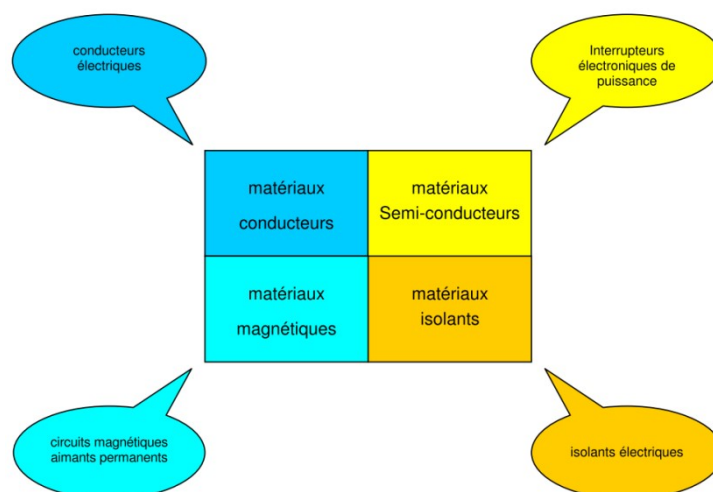


Figure I.1 : classifications de différents matériaux

Le choix de ces matériaux dépend, en premier lieu de leurs propriétés électriques (résistivité, perméabilité, constante diélectrique...) et de leur coût, mais aussi de leurs propriétés physiques et mécaniques (densité, dilatation, point de fusion, sensibilité à la corrosion, dureté, élasticité...).

Les éléments principaux de ces matériaux sont :

- * le cuivre et l'aluminium pour les conducteurs électriques.
- * le fer pour les circuits magnétiques.
- * le silicium pour les composants d'électronique de puissance.
- * la silice (oxyde de silicium), le bois et les dérivés du pétrole pour les isolants électriques.

I.1.2. Productions

La plupart de ces éléments se trouvent en abondance sur la terre figure I.2 :

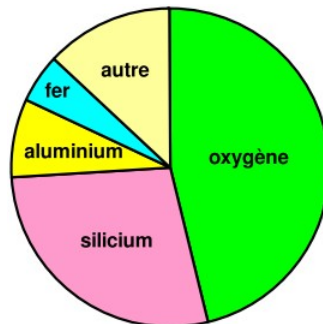
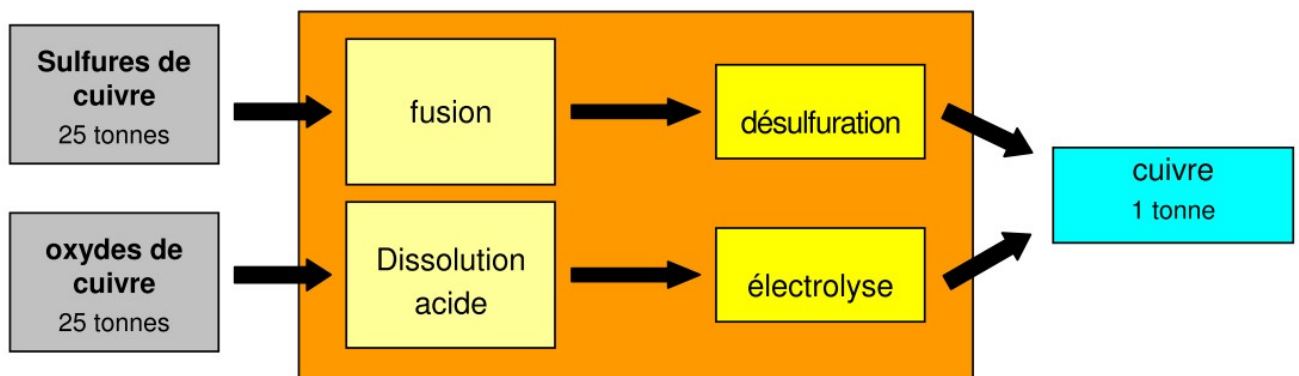


Figure I.2 : éléments en abondance sur la terre.



(a)

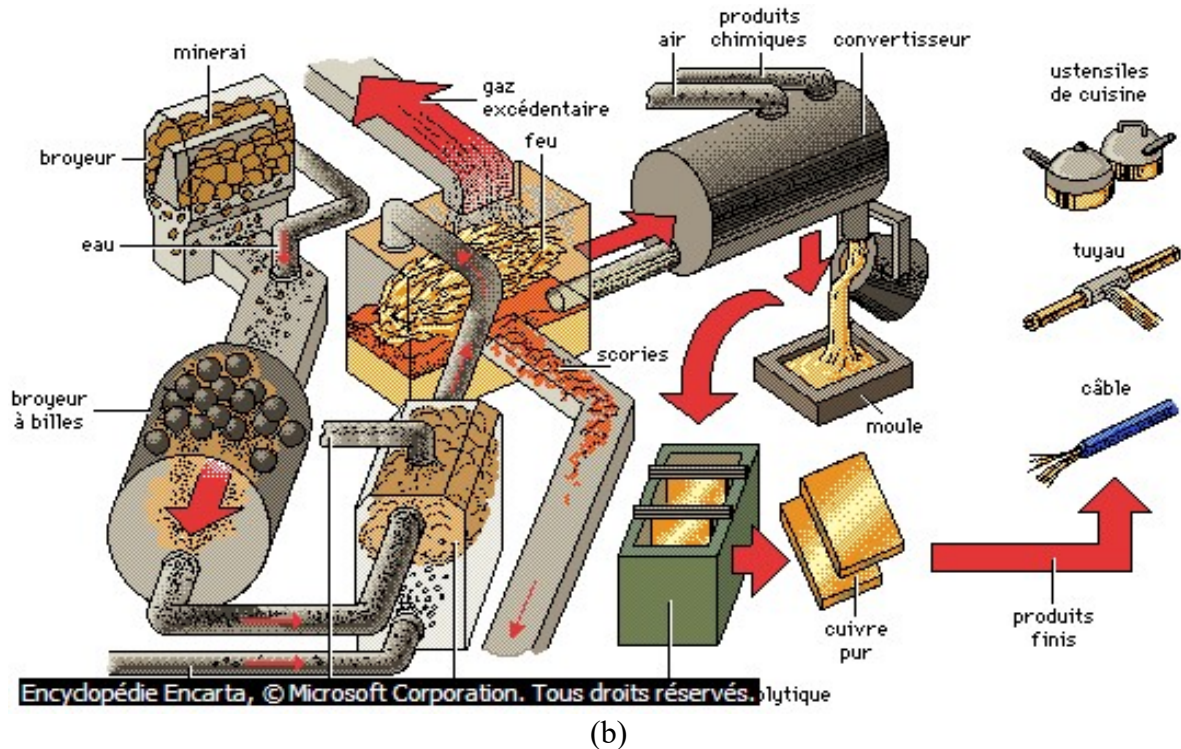
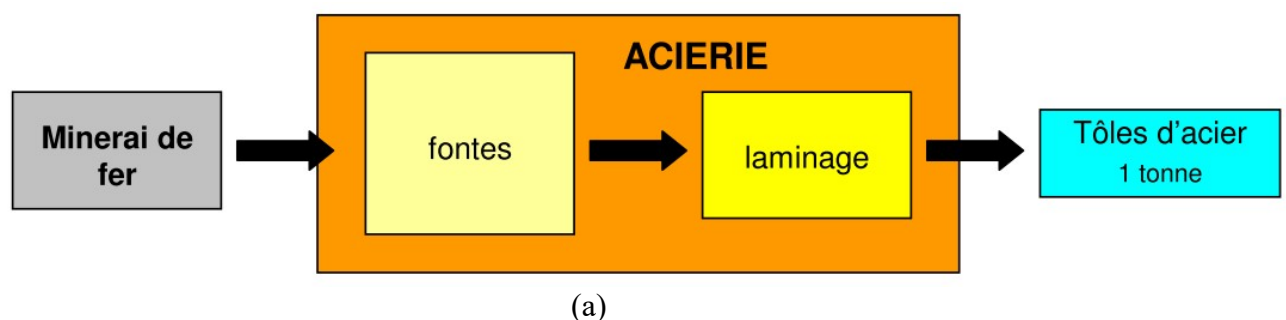
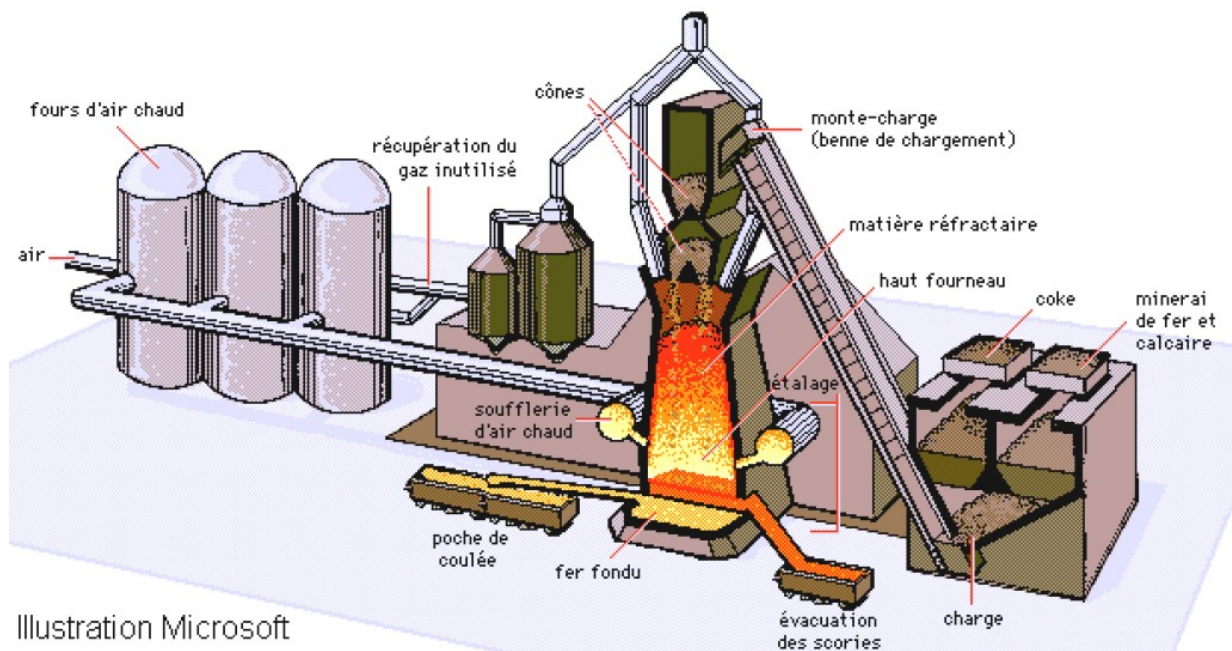


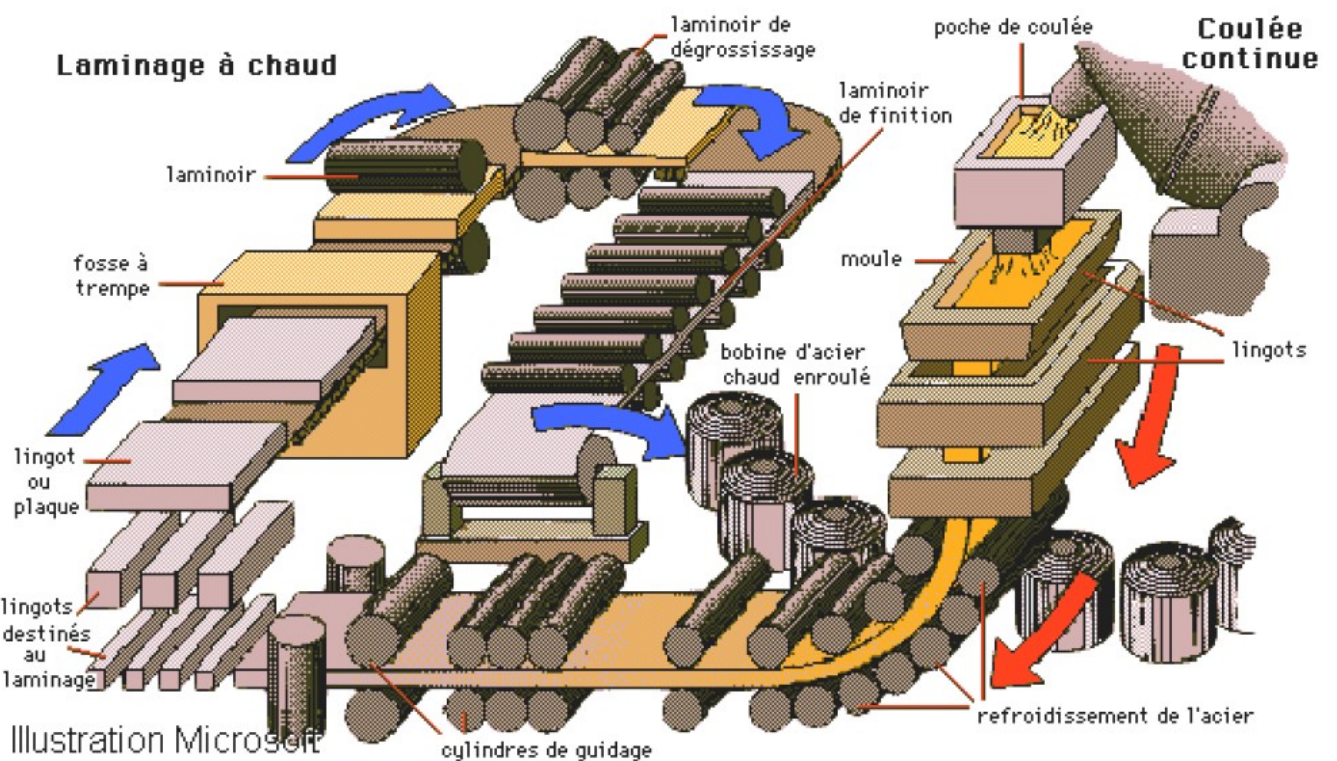
Figure I.3 : (a) schéma de fabrication et (b) fabrication du cuivre.

La majorité des éléments présents sur Terre se trouvent en abondance dans la croûte terrestre. Le cuivre, un métal essentiel, est extrait de minerais comme la chalcopirite, puis broyé et traité par flottation pour obtenir un concentré. Celui-ci est fondu pour produire du cuivre brut, ensuite purifié par électrolyse pour atteindre une pureté de 99,99%. Grâce à sa conductivité électrique et thermique élevée, le cuivre est indispensable dans la fabrication de fils électriques, de composants électroniques et d'alliages figure I.3.





(b)



(c)

Figure I.4 : fabrication de fer ((a) schéma de fabrication, laminage a froid (b) et a chaud (c)).

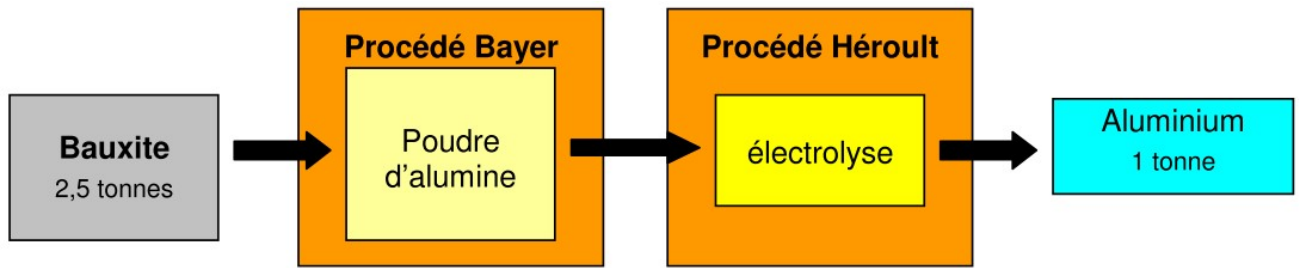


Figure I.5 : fabrication de l'aluminium

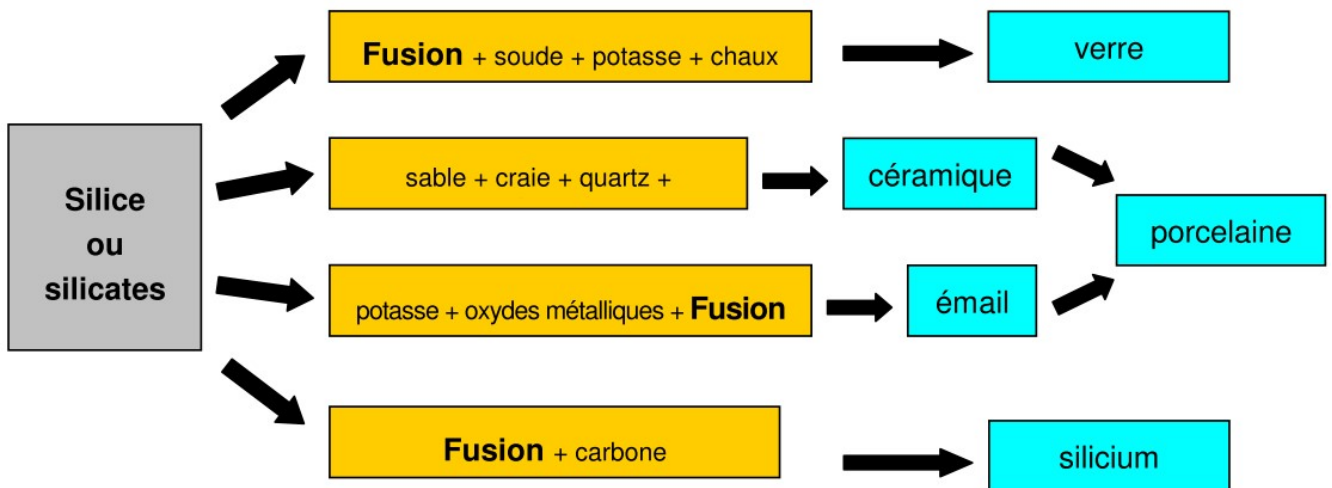


Figure I.6 : Fabrication des isolants minéraux

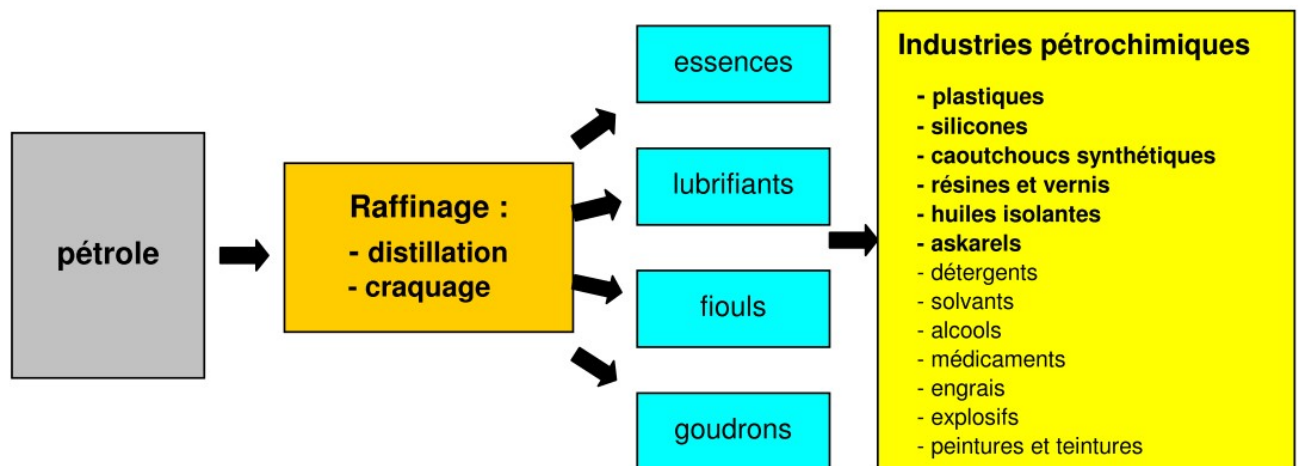


Figure I.7: Fabrication des isolants organiques

La fabrication du fer commence par l'extraction du minerai de fer, suivi de son traitement dans un haut-fourneau pour obtenir le métal. Le fer est ensuite laminé à froid pour produire des feuilles et des plaques fines, utilisées dans l'automobile et les emballages. Le laminage à

chaud, réalisé à des températures élevées, produit des barres et des plaques épaisses pour la construction (figure I.4).

Pour l'aluminium, la bauxite est extraite puis transformée en alumine, réduite pour obtenir l'aluminium. Ce dernier est utilisé dans divers produits après laminage, extrusion ou moulage, comme les pièces automobiles et les emballages (figure I.5).

Les isolants minéraux, fabriqués à partir de roches volcaniques ou de laine de verre, et les isolants organiques, créés avec des polymères synthétiques, servent à isoler thermiquement et acoustiquement les bâtiments et les équipements industriels (figure I.6, I.7).

I.2. Lexique des matériaux conducteurs

Le lexique des matériaux conducteurs comprend les métaux usuels, les éléments de transition et les non-métaux, chacun ayant des propriétés distinctes. Les métaux usuels, comme le cuivre et l'aluminium, se distinguent par leur haute conductivité électrique, les rendant essentiels pour les applications électriques et électroniques.

Tableau I.I : Lexique des matériaux conducteurs

METAUX USUELS (éléments de transition)						NON METAUX	
Al	Aluminium	Sn	étain	Au	Or	C	Carbone
Ag	Argent	Fe	fer	Pt	platine	Ge	germanium
Cr	Chrome	Hg	mercure	Pb	plomb	O	Oxygène
Co	Cobalt	Mo	molybdène	W	tungstène	P	phosphore
Cu	Cuivre	Ni	nickel	Zn	zinc	Si	silicium

Les éléments de transition, trouvés dans le bloc d de la table périodique, englobent des métaux comme le fer, le zinc et le nickel. Leurs caractéristiques comprennent la résistance à la corrosion et la capacité à former des alliages, les rendant vitaux dans des secteurs comme la construction et l'industrie manufacturière. Les non-métaux, tels que l'oxygène et le carbone, diffèrent des métaux par leur conductivité électrique plus faible et d'autres propriétés. Ils sont utilisés pour créer des matériaux isolants, des plastiques et des composés chimiques utilisés dans diverses industries.

Fontes : fer (92 %) + 2 à 5 % de carbone + impuretés

Aciers : fer (97 % min) + 0,05 à 1,5 % de C + traitements thermiques

Bronzes : Cu + ≈ 10 % de Sn

Laitons : Cu + ≈ 50 % de Zinc

Constantan : Cu + Ni

I.2.1. Propriétés physiques

Les conducteurs électriques, composés principalement de métaux, se distinguent par leur capacité à transporter efficacement l'électricité grâce à la présence d'électrons libres. Leur conductivité électrique élevée est complétée par une bonne conductivité thermique, permettant la dissipation de la chaleur. Leur malléabilité et ductilité permettent de les façonner en diverses formes pour des applications telles que les câbles électriques et les composants électroniques. En outre, leur faible résistance électrique réduit les pertes d'énergie lors du transport sur de longues distances, en faisant des matériaux indispensables dans le domaine de l'énergie et de l'électronique.

Les conducteurs électriques sont essentiellement des métaux ou des alliages métalliques. Ils possèdent tous à peu près les caractéristiques suivantes :

- faible résistivité électrique : $< 10^{-6} \Omega\text{m}$ (≈ 1 million de milliard fois plus pour les isolants)
- bonne conductivité thermique : $\approx 100 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C})$ (≈ 500 fois moins pour les isolants)
- solide de grande dureté sauf pour le mercure (liquide), le sodium et le plomb
- densité élevée : ≈ 10 sauf pour Al : 2,6 et Au, Pt et W : ≈ 20
- influence importante de la température sur :
 - . La résistivité : 40 % en plus pour 100 °C d'élévation
 - . La dilatation linéique : α_l . mm/m pour 100 °C d'élévation
- influence importante de la fréquence sur la résistivité : effet de peau : en alternatif, le courant n'utilise pas la totalité de la section du conducteur mais a tendance à circuler sur sa périphérie. Ce phénomène se traduit par l'augmentation de la résistance du conducteur. C'est la raison pour laquelle on fractionne le câble en plusieurs brins (fil de Litz en HF).

I.2.2. Bobinages de machines et câbles électriques

Les moins résistifs et les plus économiques sont le cuivre et l'aluminium. Ce dernier, étant quasiment 2 fois plus résistif mais 3 fois plus léger, est utilisé pour les lignes de transport haute tension.

I.2.3. Amélioration des contacts électriques

Le platine, l'or et surtout l'argent, qui ont une très bonne résistivité, et qui sont difficilement altérable (par choc, par corrosion ou par arc électrique) sont déposés en surface du cuivre ou de l'aluminium pour améliorer les résistances de contact et la durée de vie des fusibles, des bras de sectionneur HT, des contacteurs...

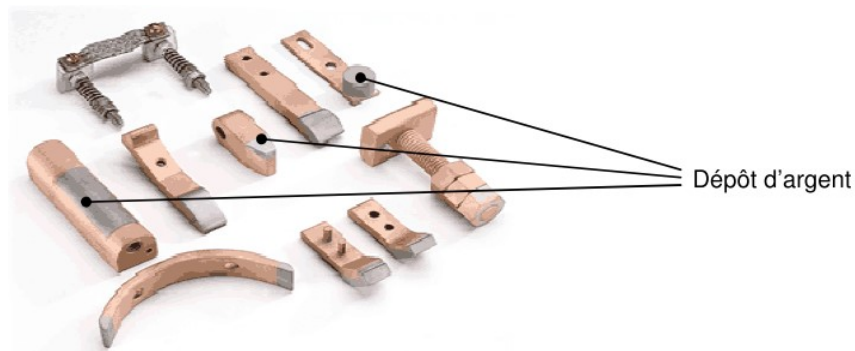


Figure I.8: exemple sur le dépôt d'argent

I.2.4. Câblage et soudure

L'étain et le plomb, grâce à leur faible température de fusion sont utilisés pour le câblage des circuits imprimés.

En micro-électronique, on utilise l'argent pour braser les « puces », et l'or ou l'aluminium pour effectuer le câblage par fils de très faible diamètre (bondings de 10 à 500 μ).

I.2.5. Contacts glissants

Le carbone amorphe (« charbon ») entre dans la constitution des balais de machines à courant continu et de machines synchrones ou asynchrones. Malgré sa résistivité médiocre, il n'altère pas les bagues ou collecteurs tournants et présentent une bonne résistance de contact.

Le bronze est utilisé dans les contacts avec les caténaires.

I.2.6. Résistances bobinées

Il faut une résistivité plus élevée que pour les câbles ($\approx 100 \cdot 10^{-8}$). On les atteint avec des alliages :

* Fe Cu Ni (maillage)

* Ni Cr

* Fe Ni Cr

* Fe Cr Al

I.2.7. Lampes à incandescence

Le tungstène, grâce à sa température de fusion élevée (3400 °C), constitue le filament des lampes à incandescence.

I.2.8. Lampes à décharges

Le mercure et le sodium, sous forme de vapeur, émettent un rayonnement lumineux.

I.2.9. Sondes de température

thermocouple : plages de [-185 °C , 300 °C] à [20 °C , 2300 °C] : la jonction de 2 métaux différents (fer, cuivre, platine...) génère une tension fonction de la température.

thermorésistance : plages de [0 °C, 200 °C] à [600 °C, 850 °C] : le plus souvent en fil de platine

(Sonde PT 100). La résistance, parcourue par un courant connu, génère une tension fonction de la température.

I.3. Caractérisation des conducteurs

I.3.1. Conductivité électrique

I.3.1.1 Loi d'Ohm locale

La loi d'Ohm est fondamentale en électrotechnique et décrit la relation entre la tension électrique, le courant électrique et la résistance dans un circuit électrique.

- Loi d'Ohm en régime permanent

Expression : Un champ électrique E provoque un courant j . Si $j = \sigma \cdot E$, on dit que la loi d'Ohm est vérifiée dans le matériau.

σ : S'appelle alors la conductivité électrique du milieu

Discussion : C'est une loi phénoménologique (correspond à un DL au premier ordre), et macroscopique.

- Elle est analogue à la loi de Fourier $j = -\lambda \cdot \nabla T$
- Elle traduit un phénomène irréversible
- La loi est valable uniquement dans un matériau isotrope
- Domaines de validité :
 - Dans les métaux et les solutions ioniques, la loi est généralement très bien vérifiée.
 - Pour les mauvais conducteurs ou les gaz, les résultats sont moins bons :

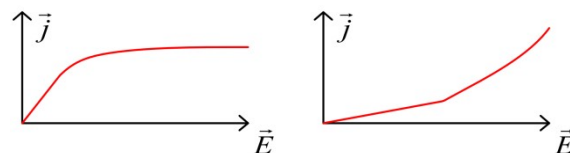


Figure I.9 : schéma de la loi d'Ohm locale.

On peut avoir un « plat », ou des termes d'ordre 2 qui apparaissent rapidement :

(Dans le deuxième cas, on a un claquage diélectrique : les électrons sont arrachés)

- des matériaux pour lesquels $j \propto E^2$ C'est une loi locale.

Dans un graphe de la densité de courant (j) en fonction du champ électrique (E), plusieurs scénarios peuvent se produire en fonction des propriétés du matériau et des conditions auxquelles il est soumis :

Loi d'Ohm linéaire (matériau conducteur) :

- Pour un matériau conducteur où la loi d'Ohm est vérifiée, le graphe montrera une relation linéaire entre j et E .
- La courbe sera une droite dont la pente est donnée par la conductivité électrique (σ) du matériau : $j = \sigma \cdot E$.
- À mesure que le champ électrique augmente, la densité de courant augmente de manière proportionnelle.

Saturation de la densité de courant (plage de "plat") :

- Lorsque le matériau atteint un certain seuil de tension, on peut observer une saturation de la densité de courant malgré une augmentation continue du champ électrique.
- Cette saturation se traduit par une portion horizontale sur le graphe, appelée "plat", indiquant que la densité de courant ne varie pas de manière significative malgré une augmentation du champ électrique.
- Ce phénomène peut être observé dans les matériaux soumis à des tensions élevées et est souvent associé au claquage diélectrique, où les électrons sont arrachés du matériau.

Non-linéarité de la loi d'Ohm (matériaux non linéaires) :

- Certains matériaux peuvent présenter des comportements non linéaires où la relation entre j et E n'est pas strictement linéaire.
- Dans ce cas, la courbe sur le graphe peut avoir une forme courbe, indiquant une relation non proportionnelle entre la densité de courant et le champ électrique.
- Cela peut être dû à des effets de seuil, des phénomènes non linéaires dans la conductivité du matériau ou des processus physiques complexes.

La loi globale correspondante est $u = Ri$.

En effet :

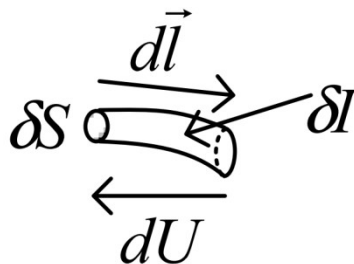


Figure I.10 : Volume élémentaire d'un conducteur électrique

On a $\delta I = j \cdot \delta S$, $dU = E \cdot dl$

Comme : $\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}$, on a $dU = \vec{E} \cdot \vec{dl} = \frac{j \cdot dl}{\sigma} = \frac{j \cdot \delta S \cdot dl}{\sigma} = \delta S \underbrace{\left(\frac{1}{\sigma} \frac{dl}{\delta S} \right)}_R$

σ dépend de la température :

- dépend de la température : $\frac{d\sigma}{dT} < 0$

Pour les métaux, $\frac{d\sigma}{dT} < 0$; les métaux sont moins bons conducteurs à haute température).

- Pour une solution ionique, $\frac{d\sigma}{dT} > 0$;

- Supraconducteurs :

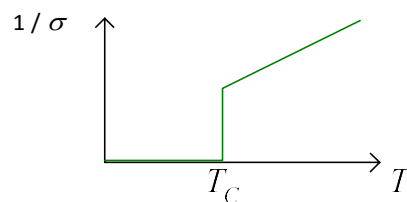


Figure I.11 : résistivité en courant continu.

La transition vers l'état supraconducteur, souvent abrupte, est caractérisée par une baisse de la température critique (T_0), atteignant 10^{-3} K dans les métaux purs et quelques K dans les alliages. Cette transformation est analogue à une transition de phase classique, avec des termes tels que "phase normale" et "phase supraconductrice" utilisés pour décrire respectivement l'état normal et l'état supraconducteur. Quant à la résistivité en dessous de T_0 , elle n'est pas strictement nulle, mais extrêmement faible, inférieure à 10^{-21} Ωm dans certains cas, comparée à la résistivité du cuivre à des températures similaires (environ 10^{-10} Ωm). Cette faible résistivité permet à un courant continu de circuler dans un anneau supraconducteur pendant des années sans atténuation significative. Ces propriétés uniques des supraconducteurs, avec leur capacité à transporter des courants sans perte d'énergie due à la résistance, en font des matériaux essentiels pour de nombreuses applications technologiques, de la recherche en physique à l'industrie électronique et aux aimants de haute technologie.

(En dessous d'un certain seuil, la résistivité devient indétectable)

- Pour appliquer la loi d'Ohm, la seule force motrice doit être E :
- Il ne doit pas y avoir de champ magnétique, ou il faut pouvoir le négliger.
- Lorsqu'on a un gradient de température, la loi s'écrit sous la forme

$$j = \sigma (E - s \nabla T) \quad (I.1)$$

- Ordres de grandeur :

Pour l'argent, $\sigma = 6,2 \cdot 10^7 \text{ S.m}^{-1}$

Pour le soufre, $\sigma = 5,0 \cdot 10^{-22} \text{ S.m}^{-1}$

La conductivité varie sur un très grand domaine.

I.3.1.2 Classification des matériaux en électricité

Les matériaux utilisés en électricité sont classés suivant leur conductivité :

- Pour les conducteurs : $\sigma > 10^5 \text{ } \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$;
- Pour les isolants : $\sigma < 10^{-5} \text{ } \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$;
- Pour les semi-conducteurs : $\sigma \approx 1 \text{ } \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.

I.3.1.3 Nature de la conduction électrique

- Conducteurs métalliques → électrons libres ;
- Electrolytes → ions positifs ou négatifs ;
- Semi-conducteurs purs → électrons libres et trous ;
- Semi-conducteurs dopés → dépend de la nature du dopage.

I.3.2 Résistance

La résistance d'une solution R se calcule à partir de la loi d'Ohm : ($U = R \times I$)

$$R = U/I \quad (1.2)$$

Avec :

U = tension (volts)

I = courant (ampères)

R = résistance de la solution (ohms)

I.3.2.1 Calcul de la résistance

Les mesures faites simultanément par Ohm et Pouillet sur des conducteurs de section cylindrique ont conduit séparément ces deux savants à énoncer la loi suivante :

La résistance R d'un conducteur filiforme si sa section est constante est :

Proportionnelle à sa longueur l ,

Inversement proportionnelle à sa section s ,

Variable avec la nature du conducteur.

Cette loi se traduit par la formule :

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (1.3)$$

l est en mètre,

s en m^2 ,

ρ en $\Omega.m$

R en Ω

ρ étant un coefficient de proportionnalité qui exprime le pouvoir conducteur d'un matériau.

I.3.3 Résistivité

Dans l'expression précédente ρ caractérise la nature du conducteur. Ce coefficient ρ

(prononcer ro) s'appelle la résistivité. Plus cette valeur est faible, plus le matériau est conducteur. Par exemple, la résistivité du fer est environ 6 fois plus grande que celle du cuivre, on en déduit que le cuivre est 6 fois plus conducteur ; elle se mesure en Ohm.mètre.

L'unité de résistivité d'un échantillon de conducteur a $R = 1 \Omega$, $l = 1 \text{ m}$ et $s = 1 \text{ m}^2$ est égale à :

$$\rho = R \frac{s}{l} \quad (I.4)$$

Avec :

ρ en $\Omega.m$

R en Ω

s en m^2

l en mètre

Remarque : Dans les mesures sur des eaux ultra pures où la valeur de la conductivité est extrêmement faible, on préférera utiliser la résistivité.

I.3.3.3 Résistivité et température

La résistivité est liée à la température par la relation :

$$\rho (T) = \rho_0(1 + \alpha (T - T_0)) \quad (I.5)$$

Avec :

- α : coefficient de température ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) ;

- ρ_0 : résistivité a la température T_0 .

En général, α dépend du domaine de température dans lequel on travaille. Il est positif pour les conducteurs métalliques (ρ augmente lorsque T augmente).

I.3.3.4 Echelle des résistivités

Les matériaux supraconducteurs sont des conducteurs qui, en dessous d'une certaine température critique (-148°C pour la plus élevée connue actuellement), ne présentent plus aucune résistance au passage du courant (résistivité électrique nulle).

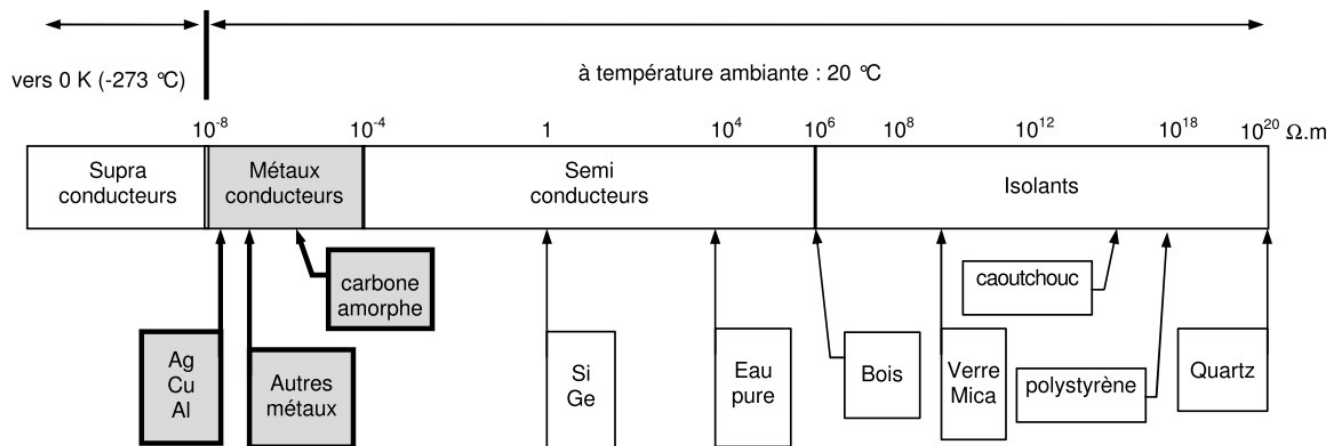


Figure I.12 : Echelle des résistivités pour les matériaux conducteurs.

L'échelle des résistivités met en évidence les variations significatives de conductivité électrique entre différents types de matériaux. Les conducteurs, comme les métaux usuels, affichent des résistivités relativement basses, facilitant le passage efficace du courant électrique en raison de la mobilité élevée des électrons libres. À l'opposé, les isolants présentent des résistivités beaucoup plus élevées, entravant le mouvement des électrons et limitant la conductivité électrique. Les semi-conducteurs se situent entre ces deux extrêmes, offrant des résistivités modérées et des propriétés électriques modulables, ce qui les rend précieux pour diverses applications électroniques et optoélectroniques. Cette échelle met en lumière la diversité des comportements électriques des matériaux en fonction de leur structure et de leurs propriétés intrinsèques.

I.4. Caractéristiques des métaux conducteurs

Désignation et composition	Masse volumique (Kg /m ³)	Température de fusion (°C)	Conductivité thermique (W/(m.K))	Coefficient dilatation thermique (10 ⁻⁶ /°C)	Résistivité à 20 °C (10 ⁻⁸ Ω.m)	Coefficient de température (10 ⁻⁴ /°C)	Résistance à la rupture (N/mm ²)	Allongement (%)	Dureté (H.B.)	Propriétés et emploi
Argent -- Ag	10,5	960	408	20	1,6	38	157		55	Excellentes propriétés électriques. Grande résistance à l'oxydation. Allié au Cd, Ni : contacts électriques. Fusibles. Elément d'alliage du cuivre et du tungstène.
Cuivre -- Cu	8,9	1085	400	17	1,7	39	25 à 30	10 à 40	50 à 90	bon conducteur. Ductile, malléable (laminage, filage, emboutissage, pliage...). Pur ou faiblement allié : fils, câbles, barres, lames collecteur, caténares, bagues de moteurs, appareillages en alliages... alliages : laitons, bronzes, maillechort, constantan
Or -- Au	19,3	1064		19	2,1	30			36	Métal rare. Inaltérable et inoxydable Câblage microélectronique. Contacts.
Aluminium -- Al	2,7	660	222	23	2,8	43	80 à 170	1 à 45	15 à 45	Très léger. Protégé par la faible couche d'alumine qui se forme à sa surface. Très malléable (moulage, laminage, filage, emboutissage, pliage, usinage...). Câbles, câbles aériens, barres, cages de moteur
Sodium -- Na	1	98	134	71	4,2					Très mou, léger. Très réactif avec l'eau. Fluide caloporteur. Lampes à décharge
Rhodium -- Rh	12,4	1960	88	8	4,5					Très rare (3 tonnes/an). Inaltérable et difficile à travailler. Thermocouple. Contacts électriques.
Tungstène -- W	19,1	3410	201	4	5,5	48	900		34 0	Très dur. Grande résistance à température très élevée. Filaments de lampes à incandescence. Contacts électriques (alliés avec Cu et à Al).
Zinc -- Zn	7,1	420	113	29	5,9	42				Malléable à chaud (150 °C). Protégé par la faible couche d'oxyde qui se forme à sa surface. Revêtement anti-corrosion. Allié au cuivre dans les laitons.
Cadmium -- Cd	8,7	320	92	7	6,8	38	50			Bonne résistance à la corrosion. Toxique. Batterie nickel-cadmium
Nickel -- Ni	8,9	1455	92	13	6,8	47			15 5	Bonne dureté. Inoxydable. Allié au fer (matériaux magnétiques, acier inoxydable). Batterie nickel-cadmium. Thermocouples. Résistances.
Fer -- Fe	7,9	1540	75	12	9,7	55				Facilement oxydable, magnétique. Grand nombre d'alliages : maillechort, constantan, aciers. Matériau magnétique. Résistances.
Platine -- Pt	21,5	1773	71	89	10	48	180		70	Très Bonne résistance à la corrosion et à l'arc électrique. Grande dureté. Contacts. Electrodes. Thermocouple. Thermorésistance
Etain -- Sn	7,3	232	27		11,5	43	80			Faible température de fusion. Allié au cuivre dans les laitons et au plomb pour les soudures électriques.
Plomb -- Pb	11,3	327	35	29	21	42	50			Mou, ductile et malléable. Bonne résistance à la corrosion. Toxique. Batteries. Soudures électriques. Armure de câbles électriques.
Mercure -- Hg	13,6	-39			96	9	xxx	xx	xx	Liquide à température ambiante. Toxique. Contacts électriques. Tubes fluorescents. Lampes à vapeur de mercure.

I.5. Caractéristiques des alliages métalliques conducteurs

Les alliages métalliques conducteurs se distinguent par leur capacité à combiner les propriétés des métaux de base tout en offrant des performances améliorées dans divers domaines. Leur conductivité électrique élevée reste un atout majeur malgré une légère diminution par rapport aux métaux purs, en raison de la présence d'impuretés. Cependant, ces alliages compensent souvent cette réduction par d'autres avantages, tels qu'une résistance accrue à la corrosion, une meilleure résistance mécanique, ou encore des propriétés magnétiques spécifiques selon leur composition et traitement thermique. En ajustant ces paramètres, il est possible de concevoir des alliages avec des propriétés électriques ou thermiques adaptées à des applications spécifiques. Ces caractéristiques en font des matériaux polyvalents et indispensables dans des secteurs variés tels que l'industrie électronique, l'aérospatiale, l'automobile et la construction.

Tableau I.2 : Caractéristiques des alliages métalliques conducteurs

Désignation et composition	Masse volumique (Kg /m ³)	Température de fusion (°C)	Conductivité thermique (W/(m.K))	Coefficient dilatation thermique (10 ⁻⁶ /°C)	Résistivité à 20 °C (10 ⁻⁸ Ω.m)	Coefficient de température (10 ⁻⁴ /°C)	Résistance à la rupture (N/mm ²)	Allongement (%)	Dureté (H.B.)	Propriétés et emploi
Laitons Cu+15 à 40%Zn	≈ 8	≈ 940		18	6,5	10	300 à 600	10 à 45	50 à 80	résistance à l'oxydation. Emboutissage. Usinage. Petites pièces de matériels électriques. Cosses, douilles, culots, raccords..
Bronzes Cu+10% Sn+Zn Cu+10% Al+Zn	≈ 9	900		17	12 à 15	5	200 à 240	5 à 20	60 à 70	Moulage. Pièces moulées, pièces frottantes. collecteur, caténares, portes balais
Constantan Cu+45% Ni		1240			49	0	320	6		Résistivité indépendante de la température. Thermocouples. Appareils de mesure.
mailechort Cu+25% Ni+25%Zn	8,5	1000		23	30 à 50	2,5	520	1 à 45	140	Malléable, ductile, inaltérable. Usinable, résistant à la rupture. Résistivité importante résistances, ressorts conducteurs

I.6. Les fils conducteurs

On distingue les fils de bobinage et les fils de câblage. Il y a deux sortes de câbles : les câbles aériens nus, en contact avec l'atmosphère, suspendus à des pylônes et les câbles isolés, souterrains, sous-marins ou suspendus sur de courtes distances.

I.6.1 Fils de bobinage

Ils sont très utilisés dans l'industrie électrotechnique pour la production ou l'utilisation des champs magnétiques. Ils sont souvent placés autour d'un noyau ferromagnétique.

I.6.2 Caractéristiques nécessaires

- Faible résistance électrique pour éviter l'échauffement et les chutes de tension ;
- Bonne résistance mécanique à la rupture par traction ou par pliage répétés, intervenant lors de l'opération de bobinage.

6.3 Matériaux employés

Les fils de bobinage sont en cuivre ou en aluminium.

- Rotors de moteurs à cage → aluminium pur à 99,5 % ;
- Fils de faible section → cuivre électrolytique ;
- Enroulements rotoriques des turbo-alternateurs de grande puissance → cuivre faiblement allié à l'argent.

I.7. Lignes aériennes

I.7.1. Constitution

Alliages d'aluminium, ex : l'aluméc, moins conducteur que le cuivre mais plus solide et moins cher. Propriété importante : résistance à la rupture ≥ 350 N/ mm. Câbles nus, formés d'une âme en acier recouverte par des fils d'aluminium : acier → solidité, aluminium → bonne conductivité.

I.7.2 Géométrie

La géométrie des lignes aériennes de conducteurs est essentielle pour assurer l'efficacité et la fiabilité des réseaux électriques. Ces lignes, composées de conducteurs alignés parallèlement et suspendus à des structures de support, sont configurées en fonction de la tension, de la capacité de charge, de la résistance au vent et des contraintes mécaniques. Les configurations les plus courantes incluent les lignes simples, doubles ou multiples, chaque type étant adapté à des besoins spécifiques en termes de puissance et de redondance du réseau. En tenant compte de ces aspects géométriques, les ingénieurs conçoivent des lignes aériennes de conducteurs robustes et efficaces pour garantir un transfert d'énergie fiable et sécurisé.

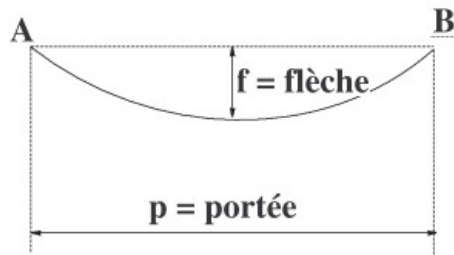


Figure I.13 : Géométrie de la ligne Lignes aériennes

On montre que l'équation de la ligne peut s'écrire :

$$y - y_0 = a \operatorname{ch} \frac{x - x_0}{a} \quad (1.6)$$

Où a est le paramètre de la ligne, défini par :

$$a = \frac{T}{p_0} \quad (1.7)$$

Avec :

- T : tension du câble (en N) ;
- p_0 : poids linéique du câble (en N/m).

Le paramètre a possède la dimension d'une longueur (m).

Relation entre flèche f et portée p :

$$f = \frac{p^2}{8.a} \quad (1.8)$$

Longueur du câble suspendu entre A et B :

$$l(AB) = 2.a.\operatorname{sh} \frac{p}{a} \quad (1.9)$$

I.7.3 Conditions d'établissement

Les conducteurs doivent être hors d'atteinte : le point le plus bas de la ligne doit être à au moins 6 m au dessus du sol et à 3m au dessus des bâtiments. Dans le cas des lignes presque horizontales (faible flèche), l'écartement entre les conducteurs (phases + neutre) est donné par :

Tableau I. 3 : l'écartement entre les conducteurs

Portée	Ecartement
$p \leq 4 \text{ m}$	$e \geq 15 \text{ cm}$
$4 \text{ m} \leq p \leq 6 \text{ m}$	$e \geq 20 \text{ cm}$
$46\text{m} \leq p \leq 15 \text{ m}$	$e \geq 25 \text{ cm}$
$p \geq 15 \text{ m}$	$e \geq 35 \text{ cm}$

Les conducteurs sont fixés à des isolateurs rigides par des attaches en fil d'aluminium ou de cuivre.

I.7.4 Effet du vent sur les conducteurs

Le vent exerce sur les conducteurs une poussée :

$$F = C_x \cdot \Delta l \cdot \mu \cdot \frac{V^2}{2} \quad (\text{I.10})$$

Avec :

- C_x : coefficient de traînée ;
- d : diamètre du conducteur ;
- Δl : élément de longueur du câble ;
- μ : masse volumique de l'air ;
- V : vitesse du vent.

Cette poussée se transmet aux supports. Elément de dimensionnement de ces supports, elle s'ajoute au poids des câbles augmentation de leur tension mécanique.

I.7.5 Choix des sections des lignes aériennes

La section à donner à un conducteur dépend des pertes et des échauffements admissibles :

- Echauffements en régime permanent (e et Joule + rayonnement solaire) ;
- Echauffements dus aux surcharges transitoires.

L'échauffement acceptable par un conducteur est limité par la température qu'il atteint : température élevée → dilatation → augmentation de la longueur du câble : la ligne peut trainer à terre ; température + tension mécanique détérioration irréversible des lignes.

I.7.6 Calcul du diamètre des lignes aériennes en fonction de l'échauffement admissible

Les pertes par effet Joule dans la ligne sont évacuées par la surface latérale des conducteurs. Soit T la température du conducteur et T_a la température ambiante. L'échauffement $\theta = T - T_a$ en régime permanent est lié à la puissance P dissipée, par l'expression :

$$P = K \cdot S_t \cdot (T - T_a) \quad (\text{I.11})$$

avec :

- K : coefficient de dissipation thermique (en $\text{W}/^\circ\text{C}/\text{m}^2$), dépend de la nature et de la forme du conducteur ;
- S_l : surface latérale du conducteur.

Bilan de puissance : Pertes Joule = Puissance dissipée.

$$\Rightarrow R \cdot I^2 = K \cdot S_t \cdot (T - T_a) \quad (\text{I.12})$$

$$\Rightarrow \frac{\rho \cdot L}{\pi \cdot d^2} \cdot I^2 = K \cdot \pi d \cdot L \cdot (T - T_a)$$

$$\Rightarrow \rho \cdot I^2 = \frac{K \cdot \pi^2 d^3 \cdot (T - T_a)}{4}$$

$$\Rightarrow d^3 = \frac{4 \cdot \rho \cdot I^2}{K \cdot \pi^2 \cdot \theta}$$

$$\Rightarrow d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot \rho \cdot I^2}{K \cdot \pi^2 \cdot \theta}} \quad (\text{I.13})$$

Exemple : pour l'aluméc, on a : $\rho = 3,5 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ et $K = 20 \text{ W}/^\circ\text{C}/\text{m}^2$. On impose :

$I_{max} = 500 \text{ A}$, $T_{max} = 60^\circ\text{C}$ et $T_a = 20^\circ\text{C}$. On a alors $d = 16,4 \text{ mm}$. La densité de courant correspondante est : $j = I/S = 2,35 \text{ A}/\text{mm}^2$.

CHAPITRE II. MATERIAUX ISOLANTS

II.1. Introduction

Les isolants ou diélectriques sont des matériaux ayant une résistivité très élevée : 10^8 à $10^{16} \Omega \cdot m$, car ils contiennent très peu d'électrons libres. Un isolant est caractérisé par ses propriétés électriques, mécaniques, chimiques et thermiques. Les isolants sont utilisés pour :

- assurer une séparation électrique entre des conducteurs portés à des potentiels différents afin de diriger l'écoulement du courant dans les conducteurs désirés → protection des personnes et des équipements ;
- supporter les éléments d'un réseau électrique et les isoler les uns par rapport aux autres et par rapport à la terre ;
- remplir les fonctions de diélectrique d'un condensateur.

Un système d'isolation est un isolant ou un ensemble d'isolants associés dans une machine électrique.

II.1.1. Echelle des résistivités

L'échelle des résistivités met en évidence la conductivité électrique variée des matériaux isolants, qui se caractérisent par leurs résistivités élevées, généralement supérieures à 10^8 ohm-mètres (Ωm).

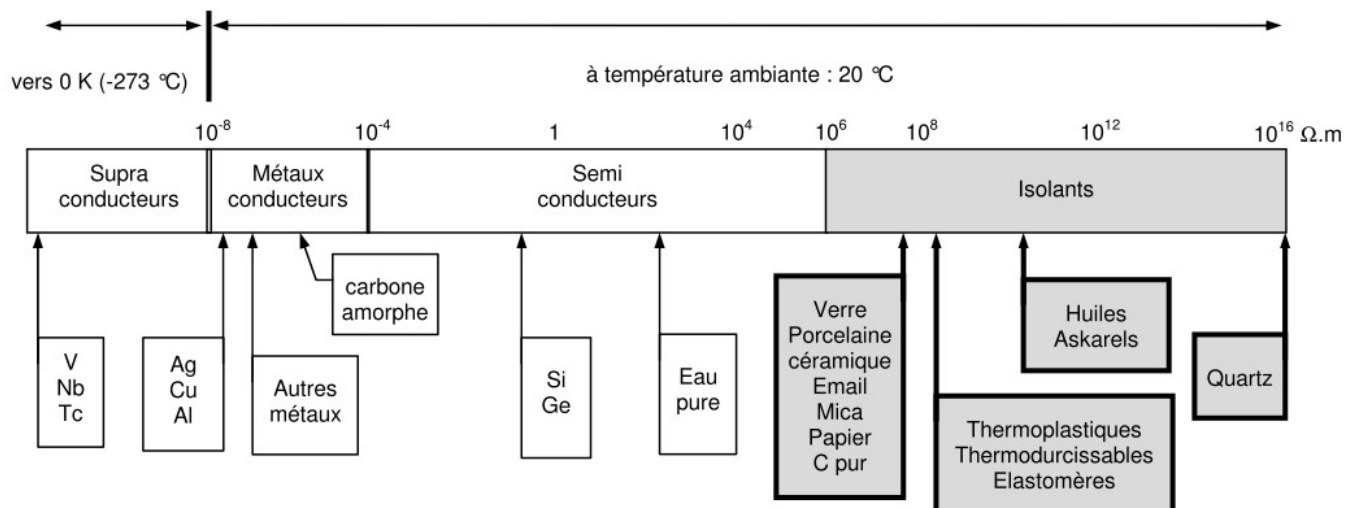


Figure II.1 : Echelle des résistivités des matériaux isolants.

Ces matériaux, tels que le verre, la céramique, le plastique et le caoutchouc, jouent un rôle crucial dans l'isolation électrique et thermique. Leur utilisation est essentielle dans de nombreux domaines, notamment l'électronique, l'ingénierie électrique et la construction, pour garantir la sécurité et l'efficacité des systèmes électriques et électroniques en limitant le passage du courant électrique à travers eux.

II.1.2. Lexique

Diamant : cristal de carbone pur

Silice : nom commun de l'oxyde de silicium. Dissous dans l'eau, on obtient de l'acide silicique qui donne des sels métalliques ou non appelés silicates. Silice et silicates sont très répandus dans la nature (27 % de la croûte terrestre) sous forme de roches et d'argiles.

Quartz : cristal de Silice pure SiO_2

Silicone : matière plastique mais avec du silicium à la place du carbone

Mica : Silicate alumino-potassique

Micanite : Aggloméré de mica et de gomme-laque

Verre : solide amorphe obtenu par fusion à base de silicates et de silice additionnée de potasse, de soude, de chaux et d'éléments divers.

Email : enduit vitreux (à base de silice, de potasse et d'oxydes métalliques) appliqué à froid sur verre ou métal et fixé après fusion.

Céramique : nom commun donné au mélange d'argiles (silicate d'aluminium) plus ou moins pures avec d'autres substances (sable, craie, quartz...) façonnée puis durcie par cuisson au four. Les produits obtenus vont de la poterie grossière à la porcelaine.

Huile minérale : par opposition à huile végétale ; en fait, il vaudrait mieux dire huile organique.

Produit visqueux organique, extrait du pétrole ou synthétisée. Certaines ont des qualités isolantes.

Huile silicone : idem huile minérale avec du silicium à la place du carbone.

Askarels : liquides organiques chlorés (PCB, PCT), aux bonnes qualités isolantes.

Elastomères : haut polymère possédant de bonnes qualités élastiques.

Plastiques : colloïde à très grosses molécules malléables à chaud et durcissant à froid (thermoplastique, thermodurcissables).

II.1.3. Propriétés physiques

Les isolants électriques possèdent tous à peu près les caractéristiques suivantes :

- mauvaise tenue en température $< 200^{\circ}\text{C}$ en général (sauf pour l'amiante, le verre et le mica)
- rigidité électrique élevée : $\approx 10 \text{ kV/mm}$
- très forte résistivité électrique : $> 10^6 \Omega\text{m}$
- constante diélectrique relative $\epsilon_R > 1$ (≈ 2 à 8)
- mauvaise conductivité thermique : isolant thermique
- Solide, liquide ou gaz
- densité voisine de 1

II.1.4. Classification

Plusieurs méthodes peuvent être adoptées pour classer les isolants :

** classification en fonction de la tenue en température (*voir tableau II.2*) :

La norme NFC 51-111 définit des classes d'isolant selon leur tenue en température, qui dépend de la matière isolante, mais aussi des matières d'agglomération et d'imprégnation.

** classification en fonction de l'état physique (*voir tableau II.2*) :

- solide : mica, bois, céramiques, plastiques ...

* liquide : huiles, pyralène, vernis...

* gaz : air sec, azote, SF₆...

** classification en fonction de l'origine (*voir tableau II.3*) :

* minérale : mica, porcelaine, verre, amiante,...

* organique : bois, papier, coton, soie, caoutchouc (latex),...

* synthétique : plastiques (thermoplastiques ou thermodurcissables), silicones :

. Silicones : molécules dont les atomes de carbone ont été remplacés par du silicium.

. Thermoplastiques: plastiques ramollis à chaud (il peut alors être moulé, formé ou extrudé), et durci à froid. Le processus est réversible.

. Thermodurcissables: plastiques durcis par un procédé thermique. Le processus est irréversible.

II.2. Caractéristiques diélectriques des isolants

II.2.1. Permittivité relative

Soit un condensateur plan à vide (ou à air) :

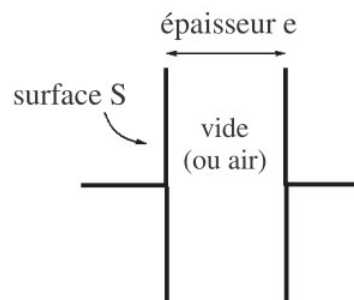


Figure II.2 : exemple de condensateur plan à vide.

Sa capacité est :

$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{S}{e} \quad (\text{II.1})$$

Ou $\varepsilon_0 = 8,85.10^{-12}$ F/m est la permittivité absolue du vide (ou de l'air). Si le même condensateur est rempli par un isolant, sa capacité devient :

$$C = \varepsilon_r C_0 = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{S}{e} \quad (\text{II.2})$$

La permittivité relative est définie par le rapport :

$$\varepsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad (\text{II.3})$$

La permittivité absolue est : $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$

Pour l'air, les gaz et le vide, $\epsilon_r = 1$. Donc, $\epsilon = \epsilon_0 = 8,85.10^{-12}$ F/m

Pour tous les autres isolants, $\epsilon_r > 1$.

II.2.2 Rigidité diélectrique

Si on augmente la tension à laquelle est soumis un isolant au delà d'une certaine valeur appelée tension de claquage, il apparait un arc électrique dans l'isolant : courant intense traversant l'isolant en suivant un chemin formé par des molécules ionisées. Dans ce cas, l'isolant est percé : il y a rupture diélectrique ou claquage destruction de l'isolant, irréversible pour les isolants solides (carbonisation), réversible pour les isolants gazeux et liquides (recombinaison des ions avec des électrons).

La rigidité diélectrique G d'un isolant est définie par le rapport entre la tension U à laquelle se produisent le claquage et la distance L entre les électrodes entre lesquelles est appliquée la tension :

$$G = \frac{U}{L} \quad (\text{II.4})$$

G est généralement exprimé en kV/mm.

Par rapport aux positions relatives de la direction du champ électrique et des surfaces principales de l'isolant, la rigidité diélectrique peut être transversale ou longitudinale. La rigidité diélectrique dépend de :

- la fréquence, la forme et la durée d'application de la tension ;
- la température, la pression et l'humidité de l'atmosphère ;
- la présence d'impuretés dans l'isolant (bulles d'air, humidité, ...).

II.2.2.1 Circuit équivalent d'une isolation en courant alternatif

Un isolant placé entre deux conducteurs peut être modélisé de manière simplifiée par le circuit équivalent suivant :

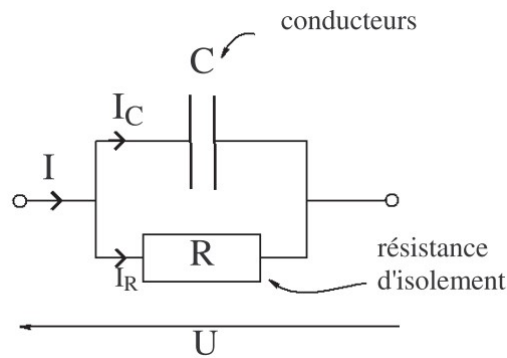


Figure II.3 : Circuit équivalent

C représente la capacité entre les deux conducteurs et la résistance R est la résistance d'isolement de l'isolant, elle est toujours $\geq 10^{12} \Omega$.

II.2.2.2 Calcul de l'angle de pertes diélectriques

L'angle de pertes δ est défini comme étant l'angle complémentaire du déphasage entre la tension U entre les conducteurs et le courant de fuite I traversant l'isolant :

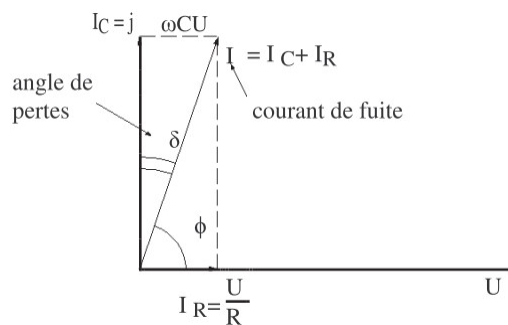


Figure II.4 : Angle de pertes diélectriques.

On a :

$$\tan\varphi = \frac{C \cdot U \cdot \omega}{\frac{U}{R}} = RC\omega \quad (\text{II.5})$$

$$\Rightarrow \tan\delta = \frac{1}{\tan\varphi} = \frac{1}{RC\omega} \quad (\text{II.6})$$

La valeur $\tan\delta$ est appelée facteur de dissipation diélectrique.

On définit également l'indice de pertes : $\epsilon_r = \epsilon_r \tan \delta$

L'angle de pertes caractérise la qualité d'un isolant :

- bon isolant → résistance d'isolement R élevée == δ faible ;
- mauvais isolant → R faible == δ élevé.

En pratique, le facteur de dissipation ***tanδ*** varie entre 10^{-2} et 10^{-4} . Il dépend de la fréquence de la tension appliquée selon une loi plus complexe que celle déterminée précédemment à partir du modèle simplifié : ***tanδ*** présente des maxima pour certaines fréquences.

II.2.2.3 Calcul des pertes diélectriques

Un isolant est le siège d'un dégagement de chaleur dû aux pertes diélectriques. On montre que la puissance par unité de volume des pertes diélectriques est :

$$p_u = \frac{5}{9} \cdot \epsilon_r'' \cdot f \cdot E^2 \cdot 10^{-12} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

- P_u : pertes diélectriques (en W/cm³) ;
- ϵ_r'' : indice de pertes $\epsilon_r \cdot \tan\delta$;
- f : fréquence (Hz) ;
- E : valeur efficace du champ électrique (en V/cm).

II.2.2.4 Calcul du champ électrique dans un isolant

Soit un condensateur dont les plaques sont séparées par deux isolants :

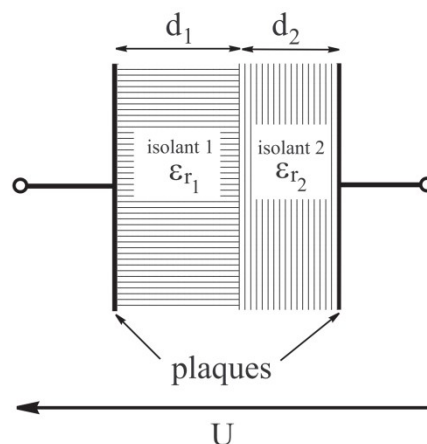


Figure II.5 : Des plaques séparées par deux isolants.

On veut calculer les champs E_1 et E_2 respectivement dans l'isolant 1 et dans l'isolant 2.

On a :

$$\begin{cases} E_1 d_1 + E_2 d_2 = U \\ \varepsilon_{r1} E_1 = \varepsilon_{r2} E_2 \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

$$\Rightarrow \begin{cases} E_1 = \frac{U}{d_1 + \frac{\varepsilon_{r1}}{\varepsilon_{r2}} d_2} \\ E_2 = \frac{U}{\frac{\varepsilon_{r2}}{\varepsilon_{r1}} d_1 + d_2} \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

Application : calcul du champ dans les isolants contenant des inclusions d'impuretés (bulles d'air, ...).

Considérons une plaque diélectrique d'épaisseur d , à l'intérieur de laquelle se trouve une cavité en forme de disque plat de hauteur d_1 et de surface S .

La capacité de la cavité est :

$$C_1 = \varepsilon_0 \varepsilon_{r1} \frac{S}{d_1} \quad (\text{II.10})$$

Avec $\varepsilon_{r1} = 1$, permittivité relative de la cavité gazeuse.

La capacité du diélectrique voisin (supposé sans pertes), de surface S et de hauteur $d - d_1$ est :

$$C_2 = \varepsilon_0 \varepsilon_{r2} \frac{S}{d - d_1} \quad (\text{II.11})$$

Avec ε_{r2} permittivité relative du diélectrique

La tension U_{c1} aux bornes de la cavité vaut donc :

$$U_{c1} = \frac{C_2}{C_1 + C_2} U \quad (\text{II.12})$$

Avec U : tension totale appliquée.

En remplaçant les capacités par leurs expressions, on trouve :

$$U_{c1} = \frac{U}{1 + \frac{1}{\epsilon_{r2}} \left(\frac{d}{d_1} - 1 \right)} \quad (\text{II.13})$$

Exemple : Application numérique

$$d = 10 \text{ mm}$$

$$\epsilon_{r2} = 4$$

$$d_1 = 0,1 \text{ mm}$$

$$U = 20 \text{ kV}, 50 \text{ Hz}$$

Par conséquent:

$$U_{c1} = \frac{20}{1 + \frac{1}{4} \left(\frac{10}{0,1} - 1 \right)} = \frac{20}{25,8} = 0,78 \text{ kV} \quad (\text{II.14})$$

Le champ électrique moyen à l'intérieur de la cavité vaut :

$$E_c = U_c / d_1 = 0,78/0,01 \approx 78 \text{ kV/cm.}$$

Or nous savons que, dans l'air à la pression atmosphérique, le champ critique de claquage est de l'ordre de 21 kV/cm en valeur efficace et 30 kV/cm en valeur crête. Nous aurons donc un claquage ou DP dans la cavité.

II.2.2.5 Résistance à l'arc

C'est la durée maximale d'application d'une tension supérieure à la tension de claquage d'un isolant avant l'apparition d'un arc électrique. Elle se mesure en secondes.

II.2.2.6 Influence de la température sur les isolants

Une élévation de température contribue à diminuer la durée de vie d'un isolant :

- diminution de la résistance d'isolement (les isolants ont généralement un coefficient de température négatif) ;
- diminution de la rigidité diélectrique ;

- oxydation ;
- ramollissement pouvant atteindre la fusion.

II.2.2.6.1 Loi expérimentale de vieillissement des isolants

Une augmentation de 10°C de la température d'un isolant conduit à doubler sa vitesse de vieillissement. L'élévation de température est provoquée par les pertes diélectriques et l'échauffement des conducteurs. La chaleur est difficilement évacuée par les isolants car ceux-ci ont une conductivité thermique très faible.

II.2.2.5 Classification thermique des isolants

Les isolants sont classés suivant la température maximale en dessous de laquelle ils ont une durée de vie d'une dizaine d'années.

Tableau I.1 : Classification thermique des isolants

classe	température max. (°C)
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
C	>180

II.3. Types d'isolants utilisés dans l'industrie électrique

- **Isolants naturels :**
 - minéraux ;
 - organiques.
- **Isolants synthétiques :**
 - matières plastiques
 - élastomères ;
 - composites.
- **Les isolants sont classés en trois types :**

- solides ;
- liquides ;
- gazeux.

II.3.1. Isolants solides

II.3.1.1. Isolants naturels

II.3.1.1.1 Minéraux

- Verres : sable siliceux + chaux + soude. Utilisés pour les isolateurs. Résistent à la chaleur et aux agents chimiques.

Propriétés : $T_{max} = 400$ à 500 °C ; $G \approx 7$ kV/mm ; $\tan\delta = 0,02$ à $0,04$; $\epsilon_r = 7$.

- Céramiques : argile + quartz + fondants + oxydes métalliques. Utilisées dans les isolateurs de lignes aériennes et d'antennes, les supports d'inductances HF et UHF, les condensateurs HF, les composants piézo-électriques.

Propriétés : $T_{max} = 200$ à 500 °C ; $G \approx 10$ à 20 kV/mm ; $\tan\delta = 5.10^{-4}$ à $1,2.10^{-2}$; $\epsilon_r = 10$ à 3000 .

- Mica et produits micacés : silicates hydratés de métaux alcalins. Utilisés pour l'isolation à haute température des radiateurs de composants de puissance (feuilles de mica).

Propriétés : $T_{max} = 500$ à 1000 °C ; $G \approx 210$ à 240 kV/mm ; $\tan\delta = 3.10^{-4}$ à 26.10^{-4} ; $\epsilon_r = 6$ à 7 .

II.3.1.1.2 Organiques :

- Papiers : cellulose extraite du bois ou de l'alfa. Imprégnés de diélectrique liquide pour éviter l'absorption d'eau, ils sont utilisés dans les transformateurs secs et les condensateurs.

Propriétés : $T_{max} = 105$ °C ; $G \approx 50$ à 80 kV/mm (papier sec) ; 100 kV/mm (papier imprégné d'huile) $\tan\delta = 2.10^{-3}$ à 4.10^{-3} ; $\epsilon_r = 4$ à 6 .

- Textiles : coton, soie naturelle, fibres artificielles. Rubans, toiles pour l'isolation, de conducteurs de faible diamètre, bobines.

Propriétés : $T_{max} = 90$ à 120 °C ; $G \approx 5$ à 10 kV/mm ; $\epsilon_r = 3$.

- Caoutchouc : résine naturelle, latex de l'hévéa. Isolation de conducteurs et de câbles.

Propriétés : $T_{max} = 60 \text{ °C}$; $G \approx 20 \text{ à } 30 \text{ kV/mm}$; $\epsilon_r = 3$.

II.3.1.2. Isolants synthétiques : matières plastiques

Une matière plastique est le résultat d'un mélange qui comprend :

- une résine de base ou polymère, obtenue à partir de réactions chimiques complexes de polymérisation effectuées sur des matières de base :

- dérivés du pétrole ou du charbon ;

- calcaires, sable, fluorures, sels marins ;

- bois.

Les procédés de fabrication des matières plastiques sont principalement basés sur des traitements à haute température, sous des pressions élevées.

II.3.1.2.1 Caractéristiques des matières plastiques

- très bonne rigidité diélectrique : toujours $\geq 10 \text{ kV/mm}$;

- résistivité élevée : $10^8 \leq \rho \leq 10^{17} \text{ } \Omega \cdot \text{m}$;

- faibles pertes diélectriques ;

- propriétés mécaniques inférieures à celles des métaux mais pouvant être améliorées par les procédés de fabrication (charges).

II.3.1.2.2 Matières plastiques utilisées en électrotechnique

Bakélite, Epoxydes, PVC, Polyéthylène, Téflon.

II.3.2. Isolants liquides

Les isolants liquides présentent l'avantage de se régénérer après un claquage ; ils servent aussi au refroidissement par convection ou par évaporation (les isolants liquides ont généralement une bonne conductivité thermique). Ils sont utilisés seuls ou bien ils imbibent un isolant solide dont ils remplissent les vides.

II.3.2.1. Huiles minérales

Dérivés du pétrole, utilisées dans les transformateurs, les disjoncteurs, les condensateurs et les câbles.

Propriétés :

- rigidité diélectrique : $G \approx 9$ à 10 kV/mm
- facteur de dissipation : $\tan\delta = 4.10^{-4}$
- permittivité relative : $\epsilon_r = 4$ à 6 .

II.3.2.2. Huiles synthétiques

Huiles chlorées : ininflammables (pas de risque d'incendies), utilisées pour les transformateurs, les disjoncteurs, les condensateurs.

Huiles silicones : résistent à des températures élevées, prix élevés.

Huiles végétales (ricin) : plastifiant dans la fabrication des vernis et des résines.

II.3.2.3. Vernis

Ce sont des associations résine + solvant + siccatif. Utilisés pour l'imprégnation des bobinages.

II.4. polarisation diélectrique

II.4.1. Moment électrique d'un dipôle

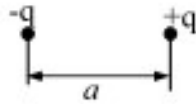
Un dipôle est formé de deux charges égales et de signes opposés.

La valeur du moment électrique d'un dipôle est :

$$p_0 = q \cdot a' \tag{II.15}$$

Où q est la charge positive (ou la valeur absolue de la charge négative) et a' la longueur du dipôle. Il va de soit que pour les molécules où $a' = 0$, le moment dipolaire est nul.

Remarque : jusqu'à présent, les scientifiques ne se sont pas mis d'accord quant au sens à donner au dipôle électrique, de la charge positive vers la charge négative ou vice versa.



II.4.2. Description de la polarisation :

La propriété la plus importante d'un diélectrique est la polarisation sous l'action d'un champ électrique externe.

A l'échelle atomique : en l'absence d'un champ électrique, le moment électrique est nul car la somme algébrique des charges dans toutes les molécules dans un volume donné est nulle, du fait que les centres de gravité des charges positives et négatives coïncident. Lors de l'application d'un champ électrique, les centres de gravité ne coïncident plus et les particules (atomes et molécules) sont alignées suivant la direction de E et acquièrent un moment p_0

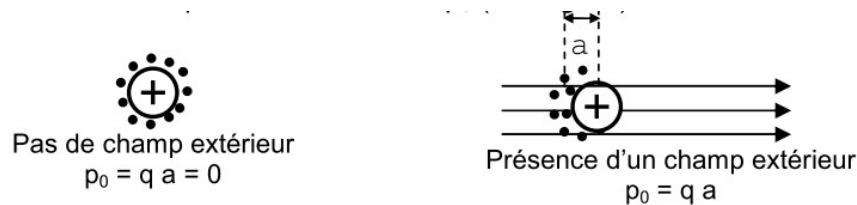


Figure II.6 : Polarisation électronique

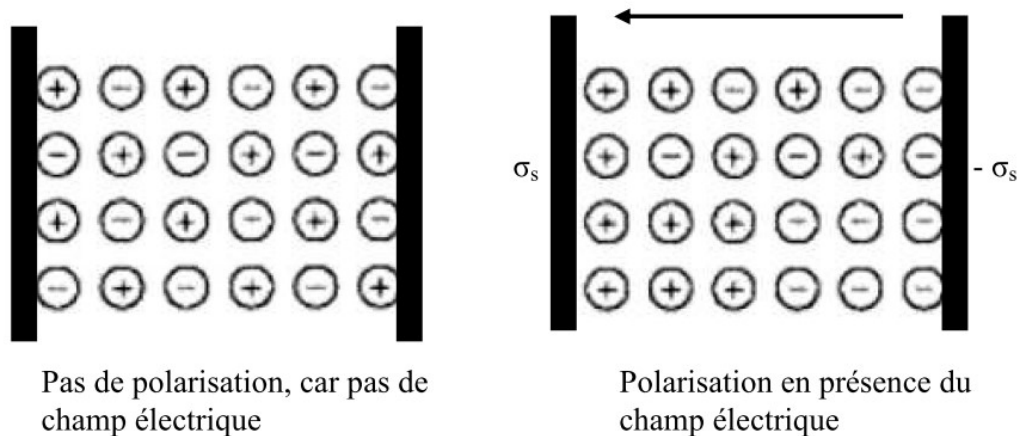


Figure II.7 : Polarisation macroscopique.

A l'échelle macroscopique : le diélectrique aura un moment diélectrique P .

La polarisation est souvent proportionnelle au champ électrique qui l'a créée (ce cas est dit linéaire) :

$$P = \chi \cdot \epsilon_0 \cdot E \tag{II.16}$$

χ : susceptibilité diélectrique

Considérons simplement un condensateur plan de surface S et d'épaisseur a (figure ci-dessus). Posons que la charge de polarisation apparaissant à chaque surface du condensateur est σ s [C/m^2].

Comme la charge totale à l'intérieur est compensée et donc nulle, le moment diélectrique total est:

$$\sigma_s \cdot S \cdot a \quad (\text{II.17})$$

En divisant par le volume $V = S \cdot a$, nous obtenons la polarisation P : $P = \sigma \cdot s$

Conclusion : la polarisation P est égale à la densité de charge apparaissant à la surface.

II.4.3. Diélectriques polaires et non polaires :

Tous les diélectriques peuvent être divisés en deux catégories :

Diélectriques polaires et diélectriques non polaires

La somme totale des charges dans une molécule est nulle, mais l'arrangement (la structure) de ces charges peut être différent d'une matière à une autre.

Les centres de gravité peuvent coïncider ou ne pas coïncider :

- Dans le 1^{er} cas : la molécule est non polaire.
- Dans le 2^{ème} cas : la molécule (et donc la matière en question) est dite polaire. Même en l'absence de champ électrique externe, la molécule possède un moment dipolaire.

Il est clair que les molécules arrangées de façon symétrique (qui possèdent un centre de symétrie) sont non polaires du moment que les centres de gravité des charges positives et négatives coïncident avec le centre de symétrie. Par contre, les molécules asymétriques sont polaires.

Les molécules monoatomiques (He , Ne , Ar , Kr , Xe) et les molécules formées de deux atomes identiques (H_2 , N_2 , Cl_2 , etc...) sont non polaires. Par contre, les molécules à composition ionique telles que l'iode de potassium KI ont un moment dipolaire élevé.

II.4.3.1 Exemple

Les molécules CH_4 et CCl_4 sont symétriques et donc non polaires. Les autres molécules sont asymétriques et donc polaires.

Différence entre la polarisation et la conduction :

1. Durant la polarisation, les charges sont mises en mouvement mais ne peuvent jamais quitter la molécule. Par contre, la conduction est le déplacement des charges sur de grandes distances, qui se libèrent et quittent les particules.
2. La conduction dans les diélectriques est pratiquement assurée par les impuretés se trouvant dans l'isolant et non pas due à sa structure de base. La polarisation peut donc être représentée comme un grand nombre de charges se déplaçant sur de très petites distances, sans jamais quitter les molécules. Tandis que la conduction dans les diélectriques comme le déplacement d'une petite quantité de charges mais sur de larges distances.
3. la polarisation peut être considérée comme un mouvement élastique. Quand l'effet du champ électrique externe disparaît, les charges reviennent à leur position initiale, ce qui ne se passe jamais pour la conduction.
4. Tandis que la conduction se produit tant que la tension continue est appliquée, la polarisation ne se produit que lors de l'application ou de la suppression de la tension. La polarisation, et donc le courant capacitif, ne subsistent que lorsqu'il s'agit d'une tension alternative.

II. 5. Appareillages

II.5.1 Bobinages de machines

- basse tension : fils conducteurs émaillés
- haute tension : barres conductrices isolées par du papier, mica, verre, bakélite, résine (enrobage, imprégnation)

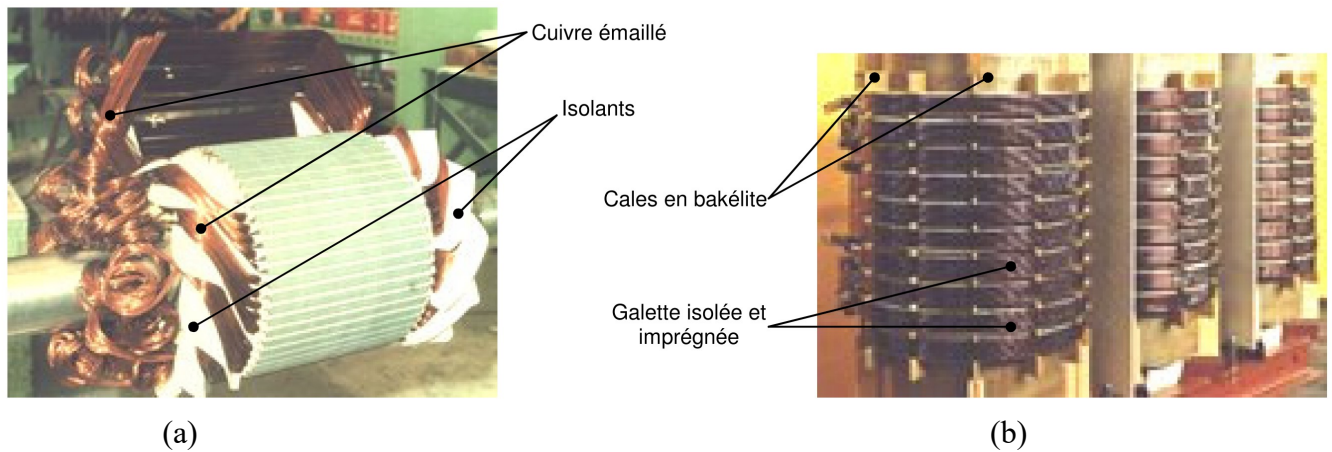


Figure II.8 : (a) Rotor bobiné de moteur, (b) Transformateur triphasé.

II.5.2. Câbles électriques

Un câble est constitué d'une âme conductrice métallique (Cu ou Al) recouvert d'un isolant, d'un écran et d'un revêtement extérieur, complété si besoin est par une gaine d'étanchéité et par une « armure ».

L'enveloppe isolante, mais aussi les gaines et revêtement extérieur sont constitués de matières synthétiques (thermoplastiques et élastomères) :

- * PVC : Polychlorure de vinyle
- * PE : Polyéthylène
- * PR : Polyéthylène réticulé
- * EPR : Ethylène-propylène
- * caoutchouc silicone

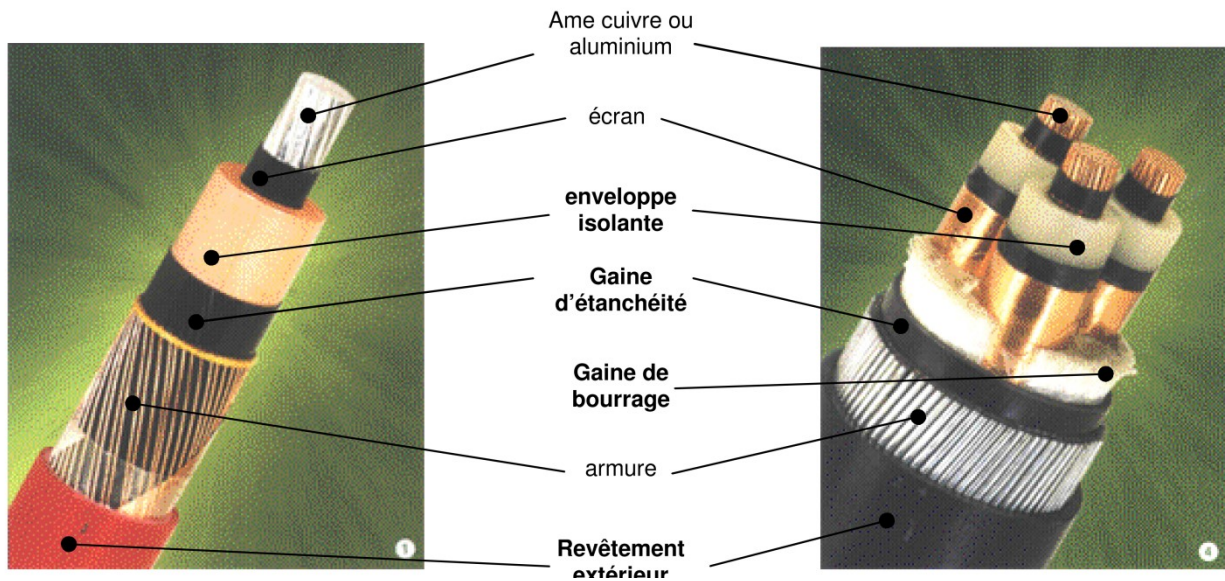


Figure II.9 : Câbles électriques

II.5.3. Condensateurs

Schématiquement, un condensateur est formé d'un diélectrique ($\epsilon_R > 1$) serré entre deux électrodes.

Les diélectriques isolants utilisés sont suivant les technologies en céramique, papier, verre, mica ou plastique.

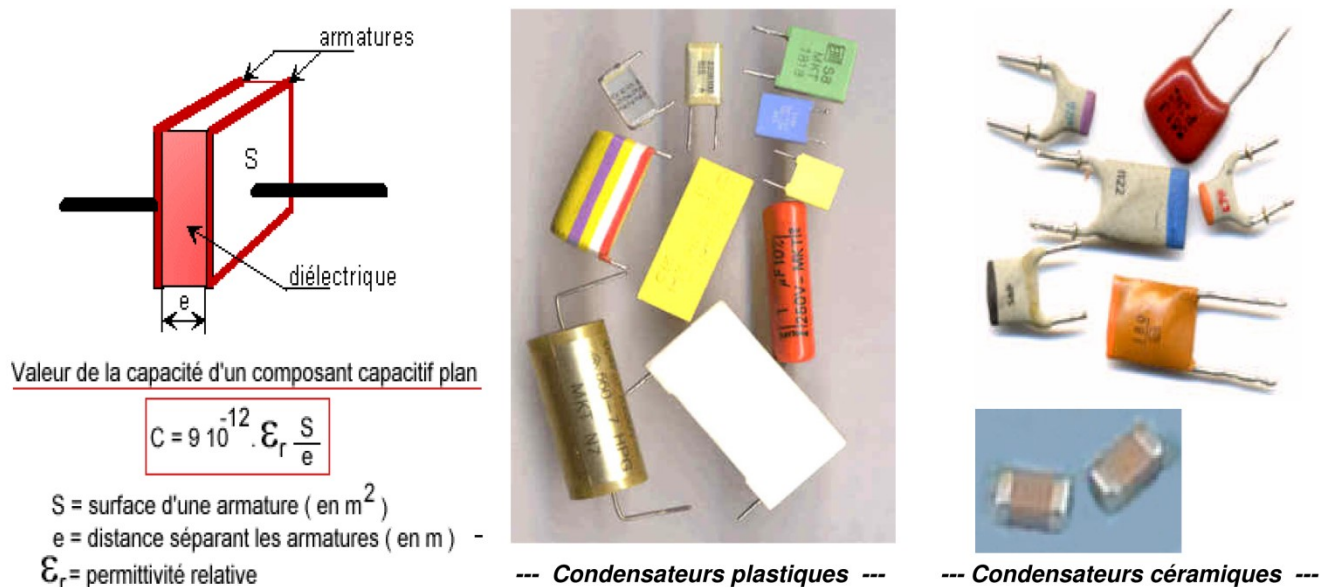
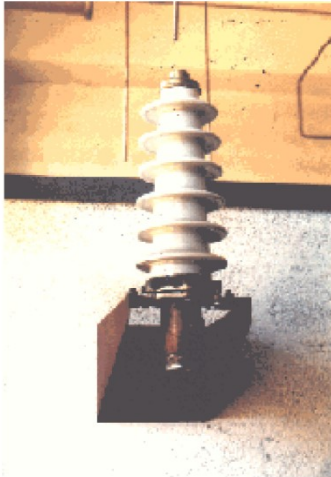


Figure II.10 : Exemples de quelques condensateurs.

II.5.4. Isolateurs

Ils sont en verre ou en porcelaine et sont utilisés pour isoler :

- * les bornes de sortie des appareillages haute tension (sectionneur, disjoncteur, transformateur, matériel roulant...).
- * les câbles haute tension des pylônes de transport d'énergie électrique



(a)



(b)

Figure II.11 : (a) isolateur de tramway, (b) Transformateur 225/63 KV immergé dans l'huile.

II.5.5. Appareillages haute tension

L'isolement interne est renforcé par un isolant supplémentaire :

- * solide : résine, élastomère (électronique haute tension).
- * Liquide : huile minérale, askarel (interdit depuis 1986) dans les transformateurs de puissance.
- * gaz : SF6 dans les disjoncteurs haute tension.

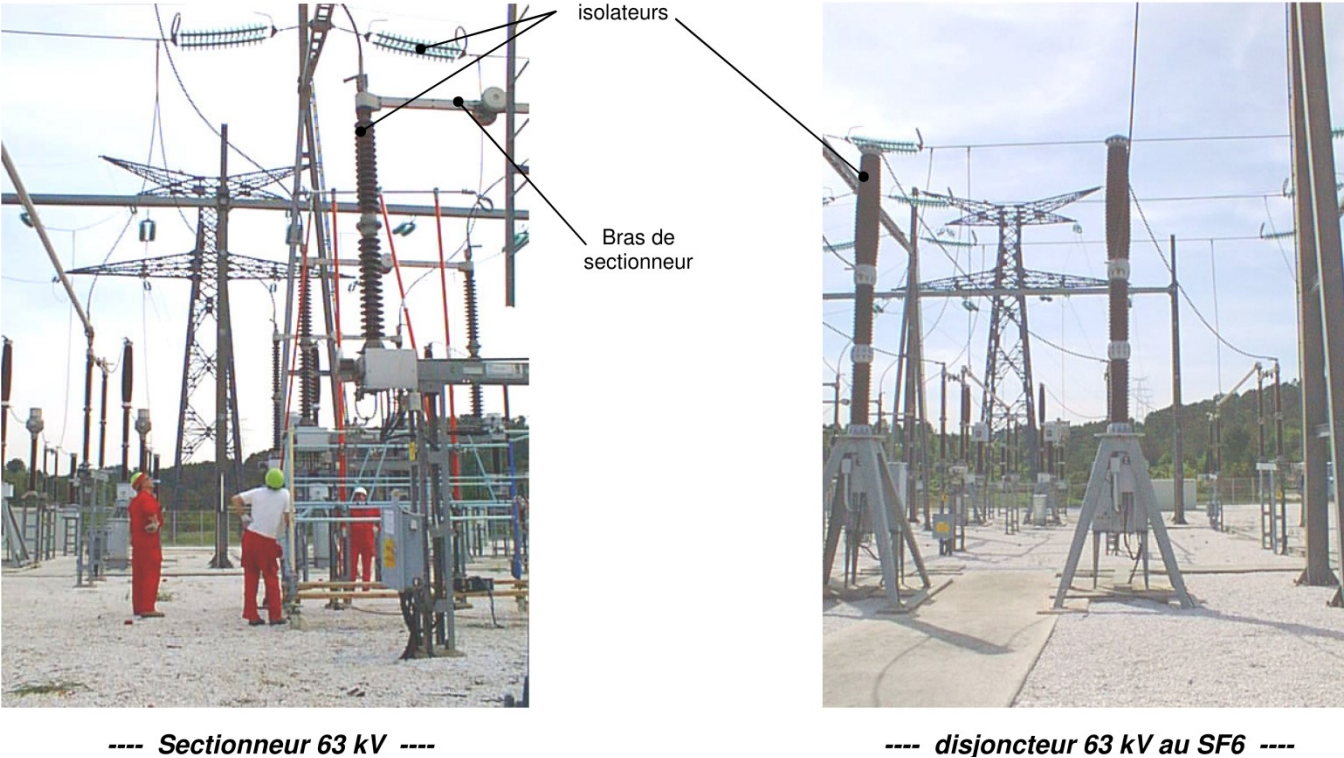


Figure II.12 : Appareillages haute tension.

II.6. Classification en fonction de la température (tableau II. 2) :

Classe	Matières Isolantes	Matières d'agglomération	Matières d'imprégnation
Y 90°C max	coton, soie, papier et dérivés, fibre d'acétate, bois, polyéthylène, polystyrène, PVC, Caoutchouc	Pas de matières d'agglomération ou d'imprégnation. Classe peu utilisée.	
A 105°C max	Isolants de classe Y imprégnés par un diélectrique liquide.		Vernis à base de résines naturelles Huiles isolantes Solutions cellulose
	Toile vernie Papier verni	Vernis à base de résines	
	Stratifié bois	Résines phénoliques	
	Emaux aux résines polyamides Résines polyesters Film d'acétate		
E 120°C max	Emaux aux résines polyvinyles Polyuréthane, époxyde		
	Résines moulées avec charge cellulosique Stratifiés coton, papier	Résines mélanines	
	Résines polyesters Film de cellulose ou de polyéthylène		
B 130°C max	Amiante, fibre de verre, émaux aux résines formol, polyvinyle		Asphaltes Résine synthétique avec huile Résines polyesters Résines époxydes
	Tissu de verre imprégnée Amiante imprégnée	Vernis à base de résines synthétiques et d'huile	
	Mica aggloméré	Résines synthétiques époxydes	
	Stratifié ou tissu de fibre de verre Stratifié d'amiante	Résines mélanines	
F 155°C max	Fibre de verre Amiante		polyesters, polyuréthanes
	Tissu de verre imprégnée Amiante imprégnée Mica aggloméré	Résines alkyles, époxydes, Silicone - alkyles	
	Stratifié ou tissu de fibre de verre Stratifié d'amiante		
H 180°C max	Fibre de verre		Résine silicone sélectionnée
	Tissu de fibres de verre et d'amiante imprégnés Elastomère de silicone Fibre de polyamide	Résines et élastomères de silicone	
	Mica aggloméré Stratifié de tissu de verre	Résine silicone sélectionnée	
C > 180°C	Polytetrafluoréthylène (250°C)		Résine silicone stable jusqu'à 225°C
	Mica aggloméré Tissu de verre ou d'amiante traité		
		Mica, porcelaine, céramiques, verre, quartz	

II.7. Classification en fonction de l'état physique (tableau II. 3).

DESIGNATION		Masse volumique	Température max	Résistance à la rupture	Résistivité	Rigidité diélectrique	Constante diélectrique ϵ_R	PROPRIETES	EMPLOIS	
UNITES		kg/m ³	°C	N/mm ²	Ωm	kV/mm				
ISOLANTS SOLIDES	Origine minérale	MICA Feuilles minces à l'état naturel	3000	200		10^{13}	100 à 200	6 à 7	Très grande Rigidité diélectrique	Agglomérés à des résines d'où : micanites, rubans micacés, micafolium
		VERRE Sable de silice + chaux + soude	2500	>180		10^{10} à 10^{17}	25 à 45	6	Grande résistance mécanique mais très fragile	Isolateurs de lignes aériennes Fibre et tissus de verre
		PORCELAINE Argile + quartz + émail	2500	>180	100	10^{12}	16	5	Résiste aux chocs thermiques et à la chaleur	Isolateurs H.T. Support de résistances électriques. Pièces moulées
		AMIANTE Silicate de chaux + magnésie	1800 à 2200	>180		10^9	3	2	bonne résistance à la chaleur et au feu mais craint l'humidité	Support de résistances. Isolant de conducteurs. En plaques, rubans, cordons
	Origine organique	BOIS Imprégné de bakélite	600 à 900	105	140	10^4	5	9	Très léger. Peu coûteux	Poteaux, tableaux, moulures, cales isolantes, panneaux
		PAPIER Cellulose agglomérée et imprégnée	800 à 1300	60	70 à 120	10^{10} à 10^{16}	60 à 80	6	Très sensible à l'humidité. souple	Rubans imprégnés pour câbles haute tension. Cartons, rubans, produits stratifiés
		CAHOUTCHOUC Résine naturelle Latex de l'hévéa	960	60	32	10^{14}	20 à 30	3	Elastique. Attaqué par les huiles. Vulcanisées par addition de soufre	Produits en bande ou moulés. Isolation des conducteurs et câbles
		COTON Fibres imprégnées		90 à 120	50 à 100	10^9	5 à 10	3 à 4	Très souple, économique et bonne résistance à la traction	Fils, rubans, toile. Isolation en bobinage avec imprégnation
ISOLANTS LIQUIDES	HUILE MINERALE Distillation du pétrole brut	850 à 950	145		10^{13}	9 à 10	2	Rigidité diélectrique chute avec la présence d' humidité	Isolation des transformateurs	
	ASKARELS diélectriques chlorés (pyralène)	1300 à 1500			10^{10}	20	5	Ininflammable.	Interdit depuis 1990	
ISOLANTS GAZEUX	AIR SEC				10^{14}	3	1	Rigidité très élevée à la pression de 10 bars : 225 kV/mm	Isolation des lignes aériennes. Interrupteurs, disjoncteur pneumatique	
	SF6 Hexafluorure de soufre					7,5	1	Rigidité diélectrique égale à 2,5 fois celle de l'air	Disjoncteurs haute tension	

II.8. Classification en fonction de l'état physique (suite) ((tableau II. 3).

DESIGNATION		Masse volumique	Température max	Résistance à la rupture	Résistivité	Rigidité diélectrique	Constante diélectrique ϵ_R	PROPRIETES	EMPLOIS
UNITES		kg/m ³	°C	N/mm ²	Ωm	kV/mm			
THERMODURCISSABLES	BAKELITE Résine phénolique + farine de bois	1400	150 à 170	3 à 5	10^{10} à 10^{12}	10 à 20	5 à 9	Résiste à la chaleur, couleur sombre	Poudre à mouler, résine, vernis. Très utilisé en produits en plaques et appareillage
	FORMICA Résine aminoplaste + charge cellulosique	1400	100 à 120	4 à 8	10^{10}	10 à 15	7 à 10	Transparent, se colore facilement	Poudre à mouler, résine, vernis. Produits stratifiés, pièces d'appareillage
	ARALDITE Résine époxy	1200	110 à 120	6,5	10^{14} à 10^{15}	70	4,5	Très bonne rigidité électrique	Résine à couler, vernis, colle, pièces isolantes moulées
	POLYESTER Résine alkyles	1200	120	4,5	10^{13}	13 à 22	2,5 à 4	Très utilisé en stratifié avec fibre de verre	Résine, poudre, pièces moulées. Produits stratifiés
	SILICONE carbone remplacé par du silicium	1800	180	40 à 80	10^{14} à 10^{16}	300	2,5	excellentes propriétés électrique et mécanique, mais coûteux	Huiles, graisses, caoutchouc Poudre à mouler, résine, vernis.
THERMOPLASTIQUES	PVC Polychlorure de vinyle	1400	60	4	10^{12}	35	5	Le plus utilisé, peut se coller facilement, très souple	Isolation et gaines pour conducteurs et câbles, feuilles plaques, tubes
	POLYSTYRENE	1000	80	5	10^{15}	25	2,5	Transparent, léger, n'absorbe pas l'humidité	Moulage de pièces isolantes
	PLEXIGLAS	1200	80	7	10^{16}	15	4	Transparence parfaite	Plaques, résine à mouler, supports et boîtiers transparents
	NYLON-RILSAN polyamides	1100	100 à 150	6	10^{11}	14	5	Très résistant à l'usure, s'obtient en fils très fins	Fils et tissus de guipage de fils Pièces isolantes d'appareillage
	TEFLON fluoréthène	2200	250	3	10^{17}	18	2	Bonnes propriétés électrique et mécanique, à haute température, mais coûteux	Rubans, stratifiés Utilisations spéciales
	CAHOUTCHOUC néoprène	1240	70	4	10^{10}	14	7	Très élastique, résiste aux huiles et aux solvants	Isolement des fils et des câbles

CHAPITRE III : MATERIAUX MAGNETIQUES

III.1. Rappels

Les matériaux magnétiques jouent un rôle fondamental dans diverses applications électrotechniques. Des substances telles que le fer et le nickel exhibent des propriétés magnétiques uniques, essentielles à la fabrication de composants tels que les transformateurs. Leur capacité à générer et à manipuler des champs magnétiques est cruciale, influençant des technologies allant des moteurs électriques aux dispositifs de stockage de données. Comprendre ces caractéristiques magnétiques permet d'optimiser la conception des systèmes électriques et de favoriser l'innovation dans le domaine de l'électromagnétisme.

III.1.1. Induction B et excitation H

Dans le vide, l'Induction \vec{B} est créée par un circuit électrique parcouru par un courant I. En un point donné M de l'espace, on a toujours une relation du type :

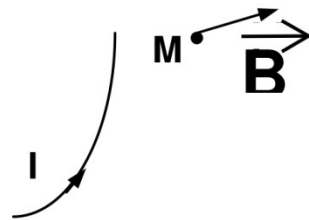


Figure III.1 : présentation d'Induction B et excitation H

$$\|\vec{B}\| = B_M = \mu_0 * kI \quad (\text{III.1})$$

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$: Est la perméabilité du vide.

Le produit « k.I » caractérise l'action en M du circuit électrique parcouru par le courant I.

On dit que le milieu magnétique caractérisé par μ_0 , est excité par le circuit électrique « k.I » et on définit ainsi le vecteur excitation magnétique \vec{H} qui vérifie la relation :

$$\vec{B} = \mu_0 * \vec{H} \quad \text{-----} > [B] \text{ en tesla et } [H] \text{ en A/m}$$

III.1.2. Substance ferromagnétique

Certaines substances dites ferromagnétiques, très souvent à base de fer, ont une perméabilité très élevée : $B = \mu \cdot H$ avec perméabilité relative. $\mu_R = \mu / \mu_0 = 10^3$ à 10^5 .

Exemple : solénoïde de 500 spires / m

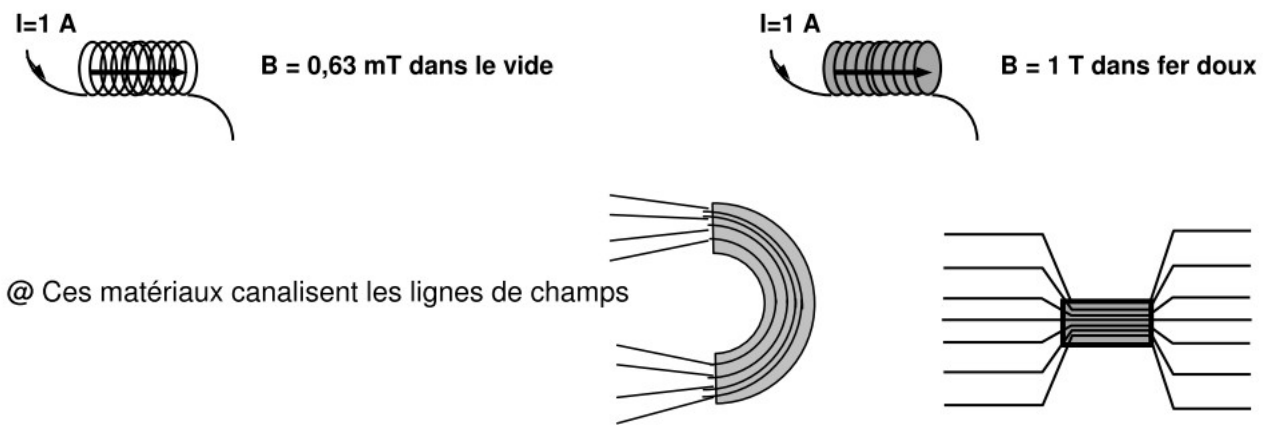


Figure III.2 : la dispersion de champ

* Ils perdent leurs propriétés magnétiques au-dessus de la température de Curie : (770°C pour le fer)

* Leur perméabilité relative diminue fortement quand H augmente - saturation - et dépend des états magnétiques antérieurs - hystérésis magnétique.

III.1.3. Saturation du circuit magnétique

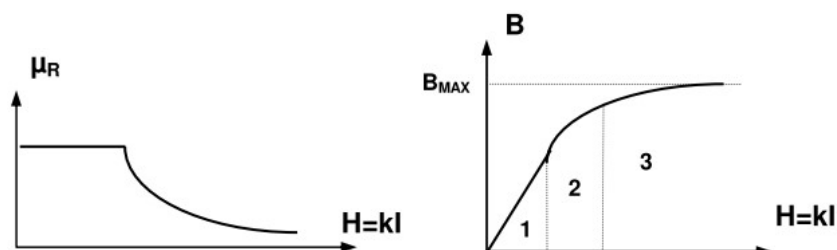


Figure III.3 : Schéma de Saturation du circuit magnétique

Les machines électriques fonctionnent dans la zone utile « 2 » (légèrement saturée). En zone saturée « 3 », le courant I créant B est trop élevé (échauffement de la machine). En zone linéaire « 1 », le champ B est trop faible.

III.1.4. Hystérésis du circuit magnétique

L'induction B présente dans un matériau ferromagnétique dépend des états magnétiques antérieurs :

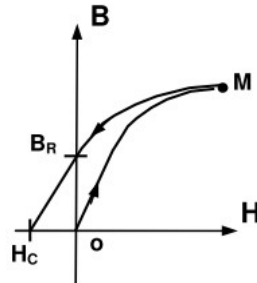


Figure III.4 : les points d'hystérésis du circuit magnétique

* après une première aimantation « OM », le circuit magnétique reste aimanté : induction rémanente B_R).

* Il faut lui appliquer une excitation H_C négative pour annuler à nouveau B : H_C = excitation coercitive

III.1.5. Cycle d'hystérésis -- pertes par hystérésis

Si on applique à un matériau magnétique une excitation H alternative, on obtient dans le plan « B - H » un cycle d'hystérésis.

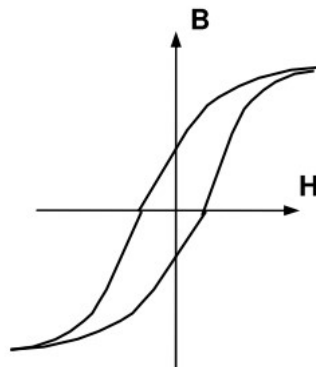


Figure III.5 : Cycle d'hystérésis

La surface du cycle rend compte de la difficulté à ré-aimanter le circuit magnétique. Cela se traduit par des pertes proportionnelles à la fréquence f de l'excitation H :

Pertes par hystérésis --->

$$P_h = k_1 \cdot f \cdot B_{\max}^2 \quad (\text{III.2})$$

Remarque :

* k_1 dépend du matériau et est proportionnel à la surface du cycle : pour diminuer les pertes, il faut diminuer la surface du cycle:

---> Utilisation de matériaux doux

ex : acier au silicium

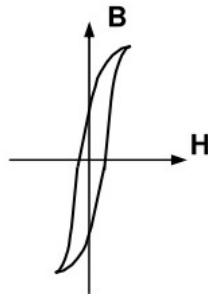


Figure III.6 : Cycle d'hystérésis cas de l'acier au silicium

* Dans les aimants permanents, on recherche des valeurs importantes de B_R et H_C : il faut donc augmenter la surface du cycle :

---> Utilisation de matériaux durs

Remarque :

Les aimants n'étant pas soumis à une excitation H variable, le point de fonctionnement M est fixe (la caractéristique utile est en trait fort).

Le point M ne se déplace pas suivant le cycle d'hystérésis, et bien que la surface de ce dernier soit importante, les pertes par hystérésis sont nulles.

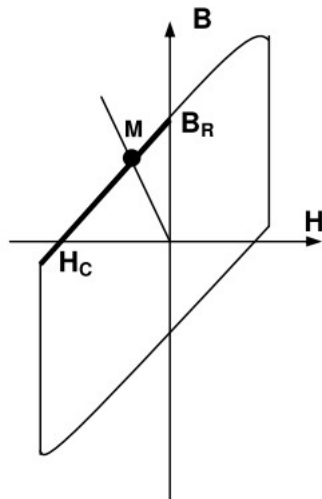


Figure III.7 : la caractéristique utile de cycle d'hystérésis en trait fort

III.1.6. Courants induits -- pertes par courants de Foucault

Le circuit magnétique de la plupart des machines électriques « voit » une induction B variable (alternative). Les matériaux utilisés, très souvent métalliques (essentiellement du fer), sont aussi conducteurs de l'électricité.

Ainsi, d'après la loi de Faraday, des courants induits i_F , appelés courants de Foucault, prennent naissance et génèrent dans le matériau des pertes par effet joule : $r * i_F^2$:

Pertes par courants de Foucault --->

$$P_c = K_2 * \frac{(e.f.B_{MAX})^2}{\rho} \quad (III.3)$$

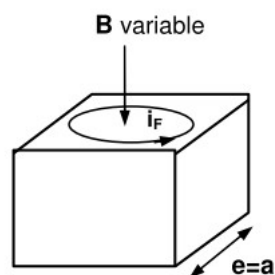


Figure III.8 : schéma de création de pertes par courants de Foucault

Remarque :

* Pour réduire les pertes par courants de Foucault, on peut :

---> diminuer l'épaisseur e en utilisant un assemblage de tôles de faible épaisseur (35/100 ou 50/100) isolées entre elles :

- circuit magnétique feuilleté

---> utiliser des matériaux magnétiques à résistivité plus élevée :

- tôles d'acier au silicium

- ferrites (à fréquence élevée)

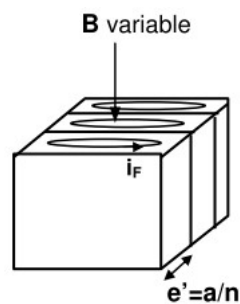


Figure III.9 : schéma de réduction des pertes par courants de Foucault

III.1.7. Pertes magnétiques ou pertes fer

Les pertes par hystérésis et par courants de Foucault prennent naissance à l'intérieur du matériau.

Elles sont très souvent cumulées et prénommées « pertes magnétiques ou pertes fer » :

$$pertes\ fer = C_{FER} * \left(\frac{f}{f_0}\right)^k * \left(\frac{B}{B_0}\right)^2 * M \quad (III.4)$$

C_{FER} : coefficient de pertes fer en W/kg (donnée constructeur)

M: masse du circuit

$f_0 = 50$ Hz

$$B_0 = 1 \text{ T}$$

$$1,5 < k < 2$$

III.2. Matériaux magnétiques doux

Matériaux à cycle d'hystérésis étroit pour minimiser les pertes par hystérésis, ils sont en général feuilletés et à base de fer (le fer pur a une résistivité trop importante). On distingue essentiellement :

- les aciers électriques (au silicium) --> basses fréquences : $f = 50 \text{ Hz}$
- les alliages fer nickel ou cobalt --> moyennes fréquences : $f < 100 \text{ kHz}$
- les ferrites (oxydes de fer) --> hautes fréquences : $f < 1000 \text{ kHz}$

III.2.1. Aciers électriques

Ils sont essentiellement utilisés, dans les machines électriques travaillant aux fréquences industrielles (transformateurs et machines tournantes).

Ils sont constitués de tôles en acier allié à du silicium (1 à 5 %), ce qui a l'avantage d'augmenter la résistivité mais l'inconvénient de rendre les tôles cassantes.

On distingue :

- les tôles classiques à grains non orientés. $C_{\text{FER}} \approx 5 \text{ W / kg}$

Elles sont obtenues par un laminage à chaud suivi d'un décapage chimique, d'un dernier laminage à froid et d'un traitement thermique.

Elles sont essentiellement utilisées dans les machines tournantes et les transformateurs de faible puissance ($< 100 \text{ kW}$).

- les tôles à grains orientés. $C_{\text{FER}} \approx 1 \text{ W / kg}$

Le procédé de fabrication est plus complexe et comporte un laminage à chaud suivi de plusieurs laminages à froid et traitements thermiques intermédiaires.

Des propriétés magnétiques optimales sont obtenues, mais uniquement dans le sens du laminage : forte perméabilité, induction à saturation importante, très faibles pertes fer.

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

III.2.2. Alliages Fe/Ni ou Fe/Co

Le nickel et surtout le cobalt sont des métaux onéreux et sont alliés au fer dans des proportions importantes (30 à 80 %) ce qui rend ces alliages beaucoup plus chers que les aciers électriques.

Ils sont essentiellement utilisés en moyenne fréquence (< 100 kHz) et généralement dans des domaines où la puissance mise en jeu est plutôt faible :

- électrotechnique miniaturisée (appareils de mesure, tachymètres, certains relais...)
- téléphonie
- dispositifs de sécurité (disjoncteurs différentiels, blindage magnétique)

III.2.3. Ferrites douces

Elles sont très utilisées en Electronique de Puissance et plus particulièrement dans les alimentations à découpage où la fréquence de fonctionnement est élevée ($f > 100$ kHz)

Ce sont des céramiques ferromagnétiques à base d'oxydes de fer ($X.Fe_{12}O_{19}$ -- $X = Mn$ ou Ni, Zn)

Elles sont fabriquées sous atmosphère inerte : Après mélange et broyage des composants, les poudres sont assemblées par frittage à haute température (≈ 1200 °C). On obtient ainsi un matériau de grande résistivité, massif, mais malheureusement très cassant.

III.2.4. Guide de choix des matériaux doux (Tableau III.1)

Forme de l'induction	Objectifs de choix	matériau						Données économiques	utilisations
		exemples	B_{max} (T)	Champ coercitif H_c (A/m)	μR pour $B=1$ T	Résistivité ϵ ($\Omega \cdot m \cdot 10^{-8}$)	Pertes (W/kg)	Production t/an Prix en F/kg	
constant e	Rechercher une induction B maximale avec un champ H le plus faible possible, d'où une perméabilité élevée	Fe pur	1,6	4	10 000	10	B=1,5T f=50 Hz ≈ 10	5 000 000 4 à 8	Pôles inducteurs de machines à courant continu. Electroaimant de contacteurs alimentés en courant continu Rotor en acier forgé de turboalternateur de forte puissance
		Acier doux (0,1 % de C)	1,2		1 500	10			
Variable f = 50 ou 60 Hz	Rechercher de faibles pertes par courant de Foucault et hystérésis tout en conservant une très bonne perméabilité, d'où un matériau à cycle étroit	Tôle laminée à grains non orientés acier+1 à 4%Si	1,7	24 à 72	6 000 à 9 000	15 à 60	B=1,5T f=50 Hz ép. $^{35}/_{100}$: 2,3 ép. $^{65}/_{100}$: 9,5	1 000 000 8 à 16	Circuits magnétiques des machines à courant alternatif : transformateurs moteur asynchrone, synchrone Electroaimant de contacteurs alimentés en courant alternatif
		Tôle à grains orientés acier+3,5 %Si	2	5,6	65 000	48	B=1,5T f=50 Hz ép. $^{27}/_{100}$: 0,89 ép. $^{35}/_{100}$: 1,11		
Variable f > 60 Hz	Rechercher une perméabilité importante aux hautes fréquences avec de faibles pertes par courant de Foucault et hystérésis	Ferrites MFe_2O_3	0,4	? à ?	7000	Isolant : 10^{16}	B=0,2T f=100 kHz 100	150 000 30 à 300	M=Zn et/ou Mn (f<1,5MHz) M=Zn et/ou Ni (f<200MHz) Alimentation à découpage, filtre haute fréquence
		Alliage de fer-nickel	0,8 à 1,6	0,4 à 55	6000 à 220000	35 à 60	B=0,2T f=100 kHz 100	10 000 150 à 400	Circuits magnétiques des composants utilisés à moyenne et haute fréquence :
		Alliage de fer-cobalt	0,6 à 1,2	35 à 150	5000 à 12 000	15 à 40	B=0,2T f=100 kHz 40	Faible 800 à 2000	- transformateurs - bobines de couplage - inductances - filtres - blindages

III.3. Matériaux magnétiques durs

Ces matériaux sont utilisés pour la réalisation d'aimants permanents. Ils possèdent une induction rémanente importante et un champ coercitif élevé.

Ils sont en général massifs et à base de fer ou de terres rares (Sm : samarium - Nd : Néodyme).

Ils sont souvent associés à du fer doux qui canalise les lignes d'induction et sont aimantés lors du procédé de fabrication.

On distingue essentiellement, aujourd'hui :

- les ferrites dures --> moins cher et le plus utilisé
- les alliages à base de terres rares --> très performants et en expansion
- les « alnico » (alliages fer + Al Ni Co) --> en perte de vitesse

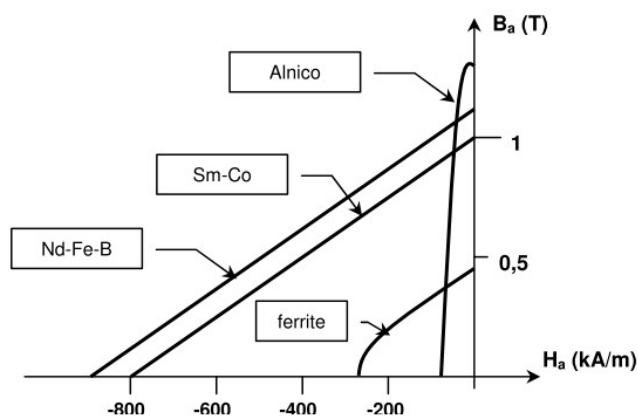


Figure III.10 : les propriétés magnétiques des matériaux utilisés dans la fabrication d'aimants permanents

Courbes de désaimantation pour les grandes familles de matériaux magnétiques durs (aimants permanents)

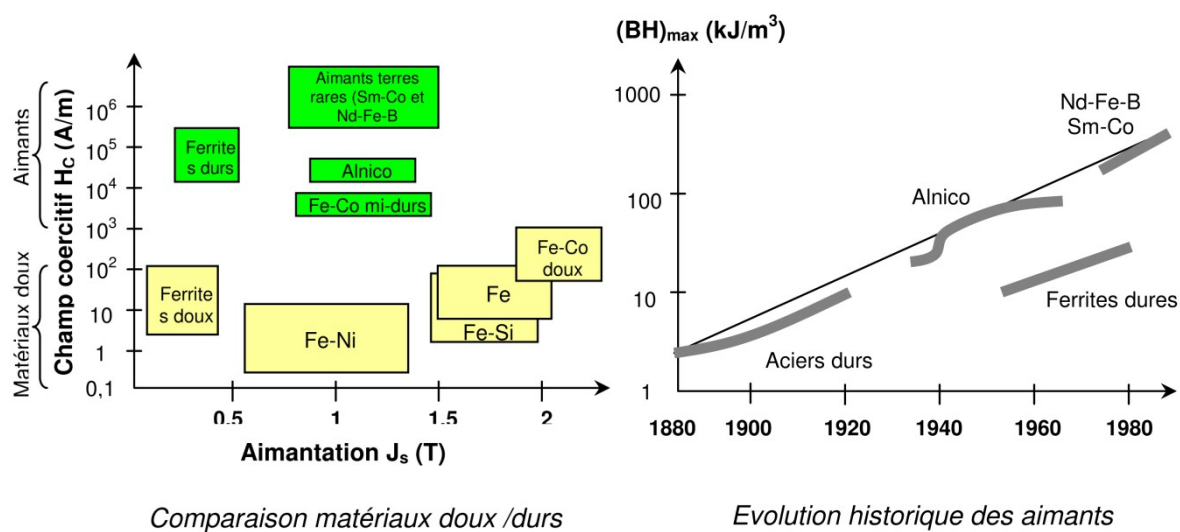
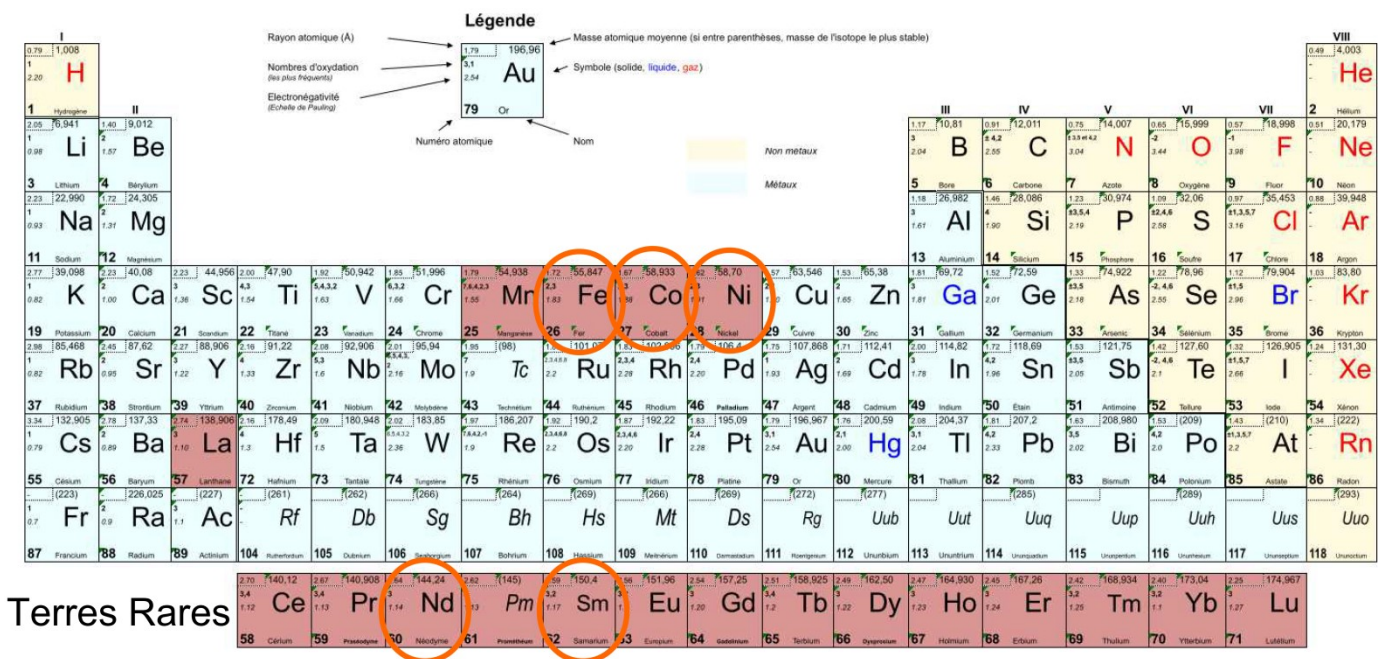


Figure III.11 : Courbes de désaimantation pour les grandes familles de matériaux magnétiques durs (aimants permanents)

III.4. Matériaux aux propriétés magnétiques

III.4.1. Tableau Mendeleïev :

Certains éléments du tableau périodique, tels que le fer, le nickel et le cobalt, se distinguent par leurs propriétés magnétiques exceptionnelles. En explorant les caractéristiques magnétiques de ces matériaux, nous sommes plongés dans un domaine fascinant où la compréhension des interactions atomiques et des structures cristallines joue un rôle clé. Dans cette perspective, le tableau périodique de Mendeleïev offre une perspective organisée, mettant en lumière la contribution unique de chaque élément à ce vaste domaine d'étude.



III.4.1.1. Alnico

Les Alnico ont été les premiers aimants fabriqués artificiellement. Ils sont aujourd'hui en perte de

vitesse derrière les ferrites et les aimants à base de terres rares.

Ce sont des alliages de fer, d'aluminium, de nickel et de cobalt (les meilleures performances sont obtenues pour des alliages riches en cobalt).

Ils sont obtenus par moulage à haute température, suivi de divers traitements thermiques et magnétiques, ou alors par frittage suivi d'une rectification et d'une découpe.

Ils ont une très bonne tenue en température (maintien des performances magnétiques), ainsi qu'une bonne solidité mécanique. Leur induction rémanente est assez élevée (1,2 T), mais leur aimantation chute très rapidement de manière irréversible en présence d'un champ H démagnétisant (augmentation brutale de l'entrefer).

Ils sont surtout utilisés en métrologie ou dans des applications où les aimants sont exposés à des sollicitations mécaniques.

III.4.1.2. Ferrites dures

Ce sont des céramiques à base d'oxydes ferriques (Fe_2O_3) associées à du Baryum (Ba) ou du

Strontium (Sr).

Elles sont obtenues après plusieurs étapes :

Broyage fin des différents constituants puis mélange à $1200^\circ C$ pour former la ferrite.

Broyage de la ferrite en présence d'eau pour obtenir une poudre très fine ($0,5\mu$).

Compression avec un liant dans des moules de forme adaptées, en présence d'un champ magnétique.

Frittage haute température ($1200^\circ C$), suivi d'un refroidissement contrôlé.

Elles présentent le meilleur rapport qualité/prix . Par contre, leur induction rémanente est assez modeste ($< 0,5 T$), et leur aimantation chute aussi rapidement de manière irréversible en présence d'un champ H démagnétisant (idem alnico). De plus, les céramiques obtenues sont très dures et cassantes ce qui interdit l'usinage des produits finis.

III.4.1.3. Aimants à base de terres rares

Assez récemment, des alliages à base de terres rares sont apparus. Ils possèdent d'excellentes propriétés magnétiques :

Densité d'énergie spécifique de $350 kJ/m^3$ ($50 kJ/m^3$ pour les alnico), ce qui permet une diminution importante du poids et du volume à induction et entrefer donnés.

Champ coercitif très élevé avec une aimantation quasi constante ce qui rend très difficile une désaimantation de l'aimant.

On trouve 2 alliages : Samarium-cobalt ou Néodyme-fer-bore. Comme pour les ferrites, ils sont obtenus par frittage de poudres.

Ces produits sont relativement chers et n'ont pas une bonne tenue en température. Ils sont réservés à des applications spécifiques où l'encombrement est le paramètre majeur.

III.4.1.4. Domaines d'applications des aimants permanents

- inducteur de machines tournantes de faible puissance (< 10 kW) (machine à courant continu, synchrone, à aimants permanents).

- haut-parleur et microphone
- détecteur magnétique
- compteur EDF -- freins magnétiques – tachymètre
- appareil de mesure

III.4.1.5. Guide de choix des matériaux durs : propriétés

Le guide de choix des matériaux durs repose sur une analyse approfondie des propriétés clés des matériaux. Ces propriétés incluent la dureté, la résistance à l'usure, la résistance à la corrosion, la conductivité thermique et électrique, la densité, la ténacité, la stabilité thermique, la résistance aux chocs et la facilité de fabrication. Selon les exigences spécifiques de chaque application, des matériaux comme le carbure de tungstène ou le diamant peuvent être préférés pour leur dureté, tandis que le cuivre ou l'aluminium sont choisis pour leur conductivité thermique ou électrique. Le guide de choix vise à optimiser la performance et la durabilité des composants et des systèmes en sélectionnant le matériau le mieux adapté à chaque besoin.

Tableau III.2 : Les propriétés des matériaux durs

		caractéristiques					Données économiques en 1995 (sous toutes réserves)	utilisations
matériau		B_r (T)	Champ coercitif H_c (kA/m)	$(BH)_{max}$ kJ/m ³	Température de Curie T_c (°C)	Température d'utilisation max (°C)	<i>Production t/an</i> Prix en F/kg	
AlNiCo		0,7 à 1,4	50 à 60	13 à 60	860	450	<i>12 000</i> 250	Appareils de mesures Capteurs Pièces exposées aux chocs
Ferrites		0,4	250	27	460	400	<i>320 000</i> 35	Moteurs, accouplements Répulsion, aimants minces
Terres rares	SmCo ₅	1	750	190	730	200	<i>1 300</i> 2 500	Matériel embarqué Microélectronique Moteur synchrone Répulsion, aimants minces Accouplements
	Nd-Fe-B	1,3	950	360	310	150	<i>1 900</i> 1 500	

III.5. Critères de choix

Chaque famille d'aimants présente un défaut :

- AlNiCo : faible champ coercitif (attention à la désaimantation)
- Ferrites : faible induction rémanente
- Sm-Co : technologie onéreuse
- Nd-Fe-B : faible température d'utilisation due à l'instabilité thermique des propriétés thermiques

On choisira telle ou telle famille selon les impératifs suivants :

- Ferrites : faible coût de revient
- Terres rares : volume et poids réduits
- AlNiCo : solidité mécanique et bonne tenue en température

Applications Fe

- * FeSi pour usages électriques
 - Grains orientés (anisotropie) : Transformateurs (25%)
 - Isotrope : Machines tournantes (75%)
- * FeNi
 - Disjoncteurs, transformateurs impulsionnels
- * FeCo
 - Electroaimants, circuits massifs



Ferrites doux

- * Ferrites
 - Poudres frittées ou liées
 - Oxyde de Fe + ...
 - Frittage 1200-1400°C Atm
- * Propriétés
 - Fragiles, B Faible
 - Rélect très élevé
- * Applications
 - Hautes fréquences à partir de



1kHz ... plusieurs MHz

Amorphes et Nanocristaux

* Amorphes : « verre métallique » :

rubans

– Fe, B, Si

– Riche en Fe

• B élevé (Transformateurs)

– Riche en Ni Co

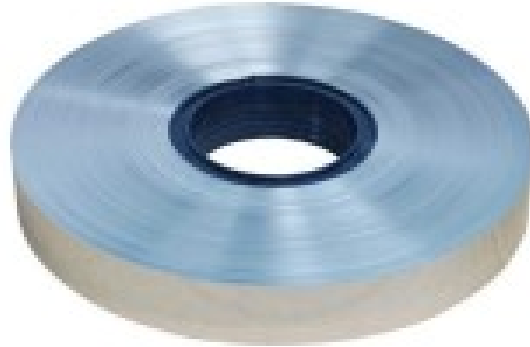
• B faible mais Rélect élevée
(Capteurs, Blindage)

* Nanocristaux : finement

– Matrice amorphe FeBNb + nano
particules FeSi :

Rubans

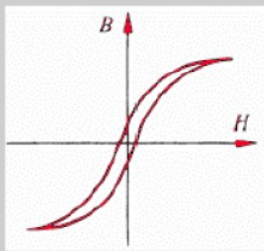
– B=1,5T, Hc faible, pertes faibles,
T° élève mais fragile



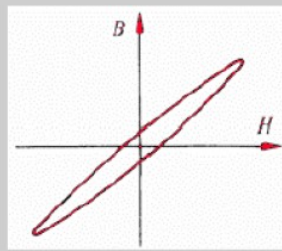
III.6. Cycle d'hystérésis de différents matériaux

Le cycle d'hystérésis, caractéristique fondamentale de divers matériaux, décrit la relation entre le champ magnétique appliqué et l'aimantation. Ce phénomène se manifeste différemment selon la nature du matériau, qu'il s'agisse de ferromagnétiques, antiferromagnétiques ou ferroélectriques. L'étude du cycle d'hystérésis offre des perspectives cruciales pour comprendre le comportement magnétique et électrique, essentiel dans le développement de technologies variées, de l'électronique à la conception de matériaux magnétiques innovants.

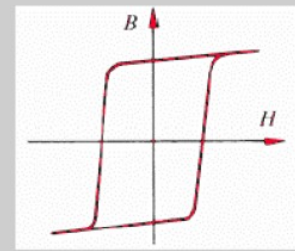
Différents matériaux



Permalloy (Fe-Ni)

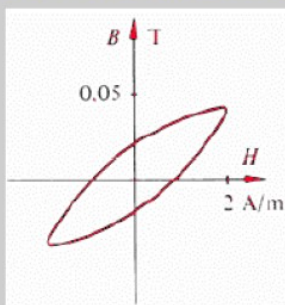


Isoperm (Fe-Ni)

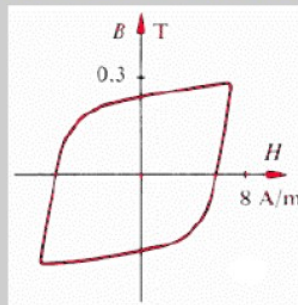


Alnico (Fe - Ni - Cu - Co)

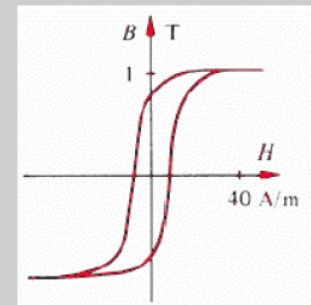
Différentes amplitudes de l'excitation appliquées au même matériau



Amplitude très faible



Amplitude moyenne

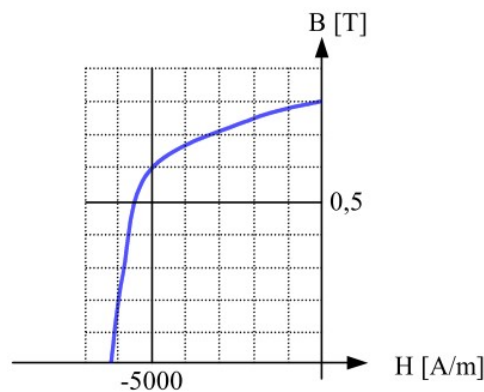


la saturation est atteinte.

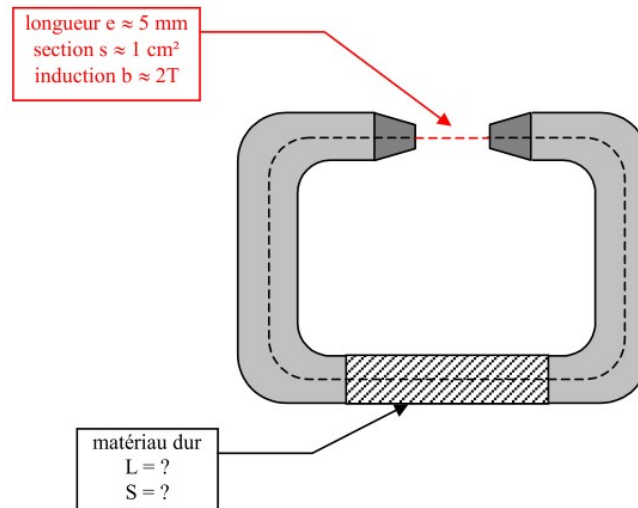
Figure III.13 : Comportement cyclique d'une variété de matériaux en termes de boucle d'hystérésis.

III.6.1. Exercice :

O possède un matériau dont la caractéristique utile $B(H)$ est donnée ci-dessous :



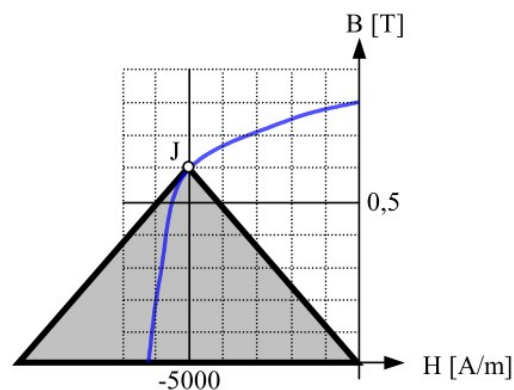
Le fabricant n'a pas donné la position du point d'Evershed. L'aimant est soumis aux contraintes suivantes :



- 1- Déterminez graphiquement B et H de manière à avoir le produit B*H maximal ;
- 2- Donnez la section S du matériau pour avoir le champ magnétique b voulu dans l'entrefer.
- 3- Déduisez-en la longueur L nécessaire à la production de b.
- 4- Que conclure de cette étude ?

III.6.2. Réponse :

1* on trace le triangle isocèle de manière à avoir le point d'Evershed : ce point nous donne B et H qui donnent le produit B*H maximal pour ce matériau :



On lit donc les coordonnées du point J : $B=0.6 T$ et $H=5000 A/m$

2* On assimile le circuit magnétique à un tube de champ, on néglige les fuites de flux dans l'entrefer, on a donc $B*S=b*c$ et donc :

$$S=(b/B)*s=(2/0.6)*1.10^{-4}=333.10^{-6} m^3, \text{ soit } 3.3\text{cm}^3 \text{ environs.}$$

3* La droite de charge doit passer par le point J, elle a donc pour pente (au signe près) $a=B/H=0.6/(5000)=120.10^{-6}$ T.m/A. Or on sait (ou on le retrouve à l'aide du théorème d'Ampère) que la pente a pour $a=\mu_0.(s.L/S.e)$.

On en déduit que :

$$L = \frac{a.S}{\mu_0 S} e = \frac{120.10^{-6} 333.10^{-6}}{4\pi.10^{-7}.1.10^{-4}} 5. 10^{-3} = 1.6 \text{ mètre}$$

4* La grande valeur de L trouvé précédemment nous conduit à admettre que : pour une valeur $b=2$ tesla est déjà énorme et ne s'acquiert qu'au prix fort (volume de matériau important).

On peut à présent vérifier que notre hypothèse « fuite de flux négligeable » est bonne car on a bien $e \ll L$.

CHAPITRE IV : LES SEMI-CONDUCTEURS

IV .1. Introduction

Le tournant vers l'électronique moderne a pris son essor au début des années 50 avec l'avènement du transistor, suivi par les premiers circuits intégrés qui regroupaient plusieurs transistors sous des boîtiers miniaturisés. Cette évolution marquante a signifié l'adieu aux volumineuses lampes et triodes, propulsant ainsi une révolution technologique attribuable aux avancées des semi-conducteurs.



Figure IV.1 : exemple de semi conducteur

Les semi-conducteurs sont des matériaux solides utilisés pour la fabrication des composants électroniques. Le matériau semi-conducteur le plus utilisé est le silicium (Si). Autres matériaux semi-conducteurs : germanium(Ge), arséniure de gallium (AsGa), phos-phure d'indium (InP)...

Ils sont caractérisés par leur résistivité qui peut varier de $10^{-4} \Omega \cdot m$ à $10^2 \Omega \cdot m$ en fonction de la température (ρ diminue lorsque T augmente) : ils se situent donc entre les conducteurs et les isolants.

Composants à semi-conducteurs : diodes à jonction, transistors bipolaires, transistors à e et de champ (JFET et MOSFET), composants de puissance (thyristors, triacs, IGBT...), circuits intégrés.

Les semi-conducteurs, silicium et germanium pour l'essentiel, sont des corps qui, après un traitement appelé "dopage", possèdent la propriété très remarquable de se comporter comme des conducteurs électriques, mais dans un seul sens.

Au contraire d'un fil de cuivre, qui laisse indifféremment passer un courant dans un sens ou dans l'autre, les semi-conducteurs sont polarisés: le courant ne peut les traverser que dans un sens prédéfini, selon leur dopage. Il devient donc possible de contrôler très finement les flux d'électrons.

A titre documentaire, disons que silicium et germanium sont des corps qui, au niveau atomique, possèdent 4 électrons de valence, électrons susceptibles de former des liaisons avec d'autres atomes. (Rappel: l'électron est une charge négative élémentaire.) L'atome de silicium, par exemple, met ses 4 électrons de valence en commun avec ceux de 4 autres atomes de silicium, de manière à former un cristal, structure très stable. Toutefois, l'énergie nécessaire pour libérer quelques atomes n'est pas considérable, ce qui signifie qu'en élevant sa température on peut rendre le silicium conducteur, ou du moins augmenter sa conductibilité. A noter que le silicium est beaucoup plus répandu, car beaucoup plus facile à produire, que le germanium.

C'est en réalité le dopage, ou l'adjonction de ce qu'on appelle des "impuretés", en fait des atomes d'antimoine, de phosphore, d'arsenic, ou encore de bore, de gallium ou d'indium, dont la valence n'est pas la même (elle de 5 ou de 3), qui détermine le type de semi-conducteur, type N (négatif) dans un cas, type P (positif) dans l'autre, et qui dispense de créer une agitation thermique pour produire la conduction.

En effet, on obtient alors, pour le type N, des électrons libres excédentaires ou, pour le type P, des "trous" (déficit d'électrons, qu'on peut assimiler à des charges positives), et on réalise par là même la condition essentielle au passage d'un courant, qui est un déplacement d'électrons.

En résumé, c'est en incorporant au cristal de silicium tels ou tels atomes que l'on détermine le sens de conduction.

IV.2. Avantages des composants à semi-conducteurs

Les semi-conducteurs (pour simplifier: le silicium) ont permis la conception et la fabrication en très grandes séries de composants que l'on appelle couramment "électroniques": diodes, transistors, circuits intégrés... Nous les étudierons plus loin. Par rapport aux composants qui étaient autrefois utilisés, ils présentent au moins trois avantages décisifs:

- un contrôle très fin et très sophistiqué de la conduction électrique, c'est-à-dire des flux d'électrons
- des valeurs de tension et d'intensité beaucoup plus faibles
- un encombrement très réduit (miniaturisation poussée)

IV.3. Un problème épineux: les dipôles non-linéaires

Nous avons considéré, jusqu'ici, des circuits électriques très simples, composés de générateurs et de résistances, qui sont des dipôles linéaires. La loi d'Ohm permet de calculer aisément les valeurs de U (tension), I (courant) et R (résistance).

Le problème se corse dès qu'on a affaire à des dipôles à semi-conducteurs, dont les caractéristiques ne sont pas linéaires. Les calculs, en ce cas, deviennent vite d'une complexité effrayante...

Pour s'en sortir, on a recours à une "astuce": on n'utilise les composants non-linéaires que sur une courte portion de leur caractéristique et on simplifie grandement les calculs en assimilant cette portion de courbe à une droite. On définit de la sorte ce qu'on appelle des paramètres dynamiques (ou différentiels) du composant non-linéaire, étant entendu que ces paramètres ne sont valables que sur la portion de caractéristique concernée. A partir de là, on n'a plus qu'à recourir à la bonne vieille loi d'Ohm...

IV.4. Composants

IV.4.1. Le transistor

L'ancêtre de l'électronique telle que nous la connaissons aujourd'hui, c'est lui... Le transistor, né il y a plus d'un demi-siècle, demeure le composant le plus "élémentaire" des circuits électroniques, qui en intègrent parfois des milliers sur une minuscule puce de silicium (c'est pourquoi on les appelle circuits intégrés).

Le transistor assure à lui seul deux fonctions indispensables: l'amplification (grâce à l'effet transistor) et la commutation (switching, en anglais; comme, en quelque sorte, un interrupteur marche/arrêt).

Contrairement aux apparences, le transistor n'est pas un vulgaire "petit composant tout bête" et facile à maîtriser... Pour bien comprendre son fonctionnement, il faut faire appel à des notions de physique assez pointues et sa mise en oeuvre requiert de nombreux calculs. Aussi, nous nous en tiendrons très modestement à une simple présentation générale.

Comme sa "cousine" la diode, le transistor bipolaire est un composant à semi-conducteur, constitué de deux jonctions P-N, très proches l'une de l'autre. Une diode ordinaire étant elle-même constituée d'une unique jonction P-N, on pourrait dire qu'un transistor contient deux diodes, d'où deux jonctions, donc deux barrières de potentiel. On trouve des transistors N-P-N (le modèle le plus répandu) ou P-N-P.

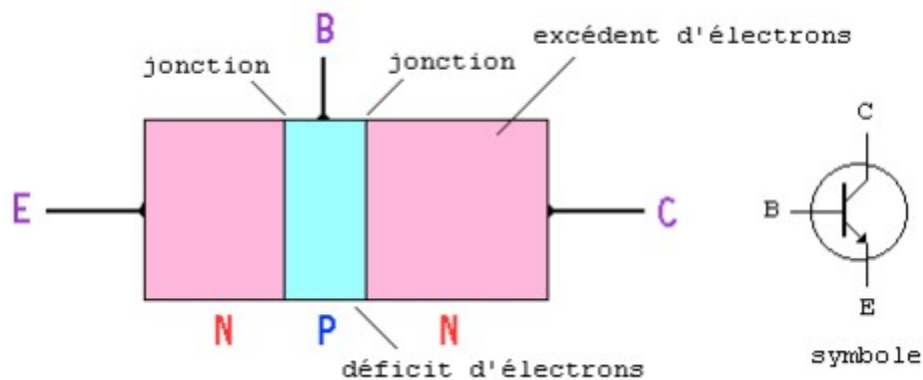


Figure IV.2 : modèle N-P-N.

Chaque "zone", ou "couche", du transistor est reliée à une électrode: base (B), émetteur (E), collecteur (C). La base, on le constate, est très mince: son épaisseur est de l'ordre de quelques microns seulement.

IV.4.2. Diodes ordinaires ("standard")

Une diode est un dipôle à semi-conducteur (silicium) qui laisse passer le courant dans un sens (sens dit "passant") et pas dans l'autre (sens dit "bloqué"). Pratiquement, le courant circule de l'anode à la cathode: dans le sens de la flèche du symbole.

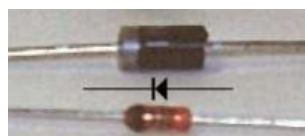


Figure IV.3 : Diodes ordinaires

Diode de redressement (en haut) et diode "petits signaux", avec leur symbole.

La diode est donc toute désignée pour le redressement d'une tension alternative, ou pour servir de protection vis-à-vis d'une éventuelle tension inverse (fonction anti-retour). Certaines diodes spéciales, que nous verrons plus loin, sont en outre utilisées pour remplir des fonctions très spécifiques.

Ajoutons que la diode, qui est le plus "basique" des composants à semi-conducteur, se distingue par son coût dérisoire, sa très grande fiabilité, même à température élevée, un encombrement minimal et sa mise en oeuvre on ne peut plus simple (à condition de bien repérer anode et cathode!).

IV.4.3. Le thyristor

Le thyristor est un élément semi-conducteur assez similaire à la diode à jonction, utilisée pour le redressement du courant alternatif. Comme la diode, il laisse passer le courant électrique dans un seul sens, de l'anode (A) à la cathode (K). Cependant, le thyristor possède une troisième électrode: la gâchette (G, en anglais gate). Le thyristor ne conduira que si un courant minimum et positif est fourni à la gâchette.

On pourrait résumer en disant que le thyristor est une diode commandée et plus précisément une diode de redressement commandée. En anglais, il est désigné par l'acronyme SCR, pour Silicon Controlled Rectifier (redresseur commandé au silicium).

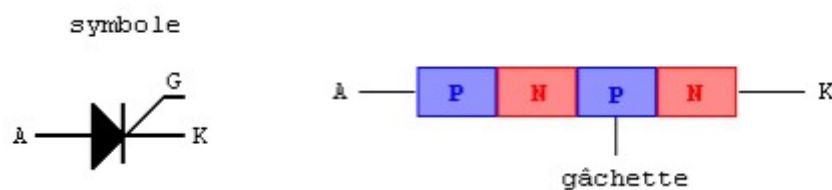


Figure IV.4 : Le thyristor

IV.4.3.1 Constitution et fonctionnement du thyristor

Le thyristor est un semi-conducteur constitué d'un sandwich de quatre couches de silicium, alternativement P et N. Il existe en modèles de faible, moyenne ou forte puissance.

IV.4.4. Le triac

Le triac (TRIode Alternating Current, en anglais) est un dispositif semi-conducteur à trois électrodes qui autorise la mise en conduction et le blocage des deux alternances d'une tension alternative, en général celle du secteur 230 V. Le triac peut passer d'un état bloqué à un régime conducteur dans les deux sens de polarisation, et repasser à l'état bloqué par inversion de tension (passage par le "zéro secteur", zero crossing en anglais) ou par diminution de la valeur du courant de maintien.

Par analogie (et d'ailleurs le symbole le suggère), on pourrait dire qu'un triac est constitué de deux thyristors montés "tête-bêche", en anti-parallèle.

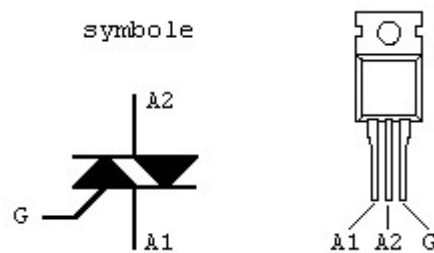


Figure IV.5 : Le triac

Les trois électrodes du triac sont dénommées gâchette (électrode de commande, appelée gate en anglais), et A1 et A2 (pour Anodes 1 et 2) ou, en anglais, MT1 et MT2 (Main Terminals). Ces deux dernières électrodes assurent la conduction principale.

- Utilité du régulateur de tension
- Utilité des transistors
- Constitution et principe de fonctionnement d'un transistor à jonction
- ect.

Pour les semi-conducteurs, le taux de remplissage de la dernière bande occupée est soit très faible soit très important. La hauteur de la bande interdite est faible (≈ 1 eV). La conduction est faible et varie beaucoup avec la température. Pour le silicium et le germanium, on mesure à 300 K : $\rho_{Si} = 2400 \Omega.m$; $\rho_{Ge} = 0,5 \Omega.m$

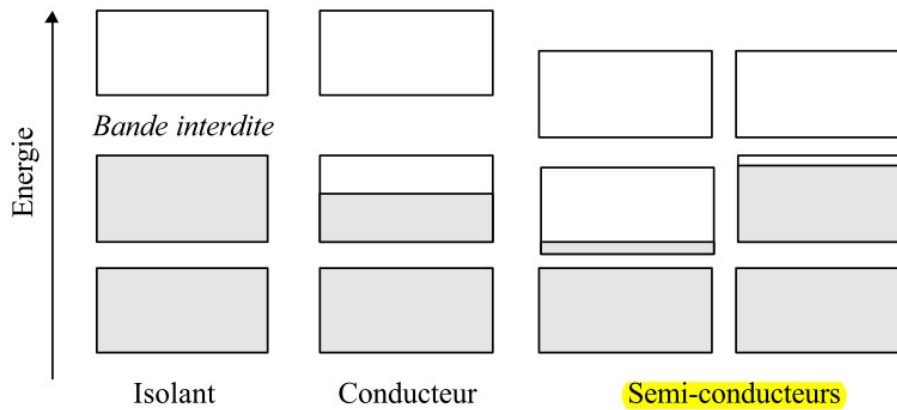


Figure IV.6 : le taux de remplissage d'énergie

IV.5. Semi-conducteur dopé : exemples

Les semi-conducteurs dopés représentent une avancée clé dans l'ingénierie des matériaux, modifiant délibérément leurs propriétés électriques. Par l'introduction de petites quantités d'impuretés, ou dopants, dans des matériaux semi-conducteurs tels que le silicium, on peut significativement influencer leur conductivité. Par exemple, l'ajout de phosphore ou de bore au silicium permet de créer respectivement des semi-conducteurs de type N ou P, élargissant ainsi les applications dans l'électronique moderne, des transistors aux diodes. Cette capacité de manipulation des propriétés électriques fait des semi-conducteurs dopés un pilier essentiel de la technologie contemporaine.

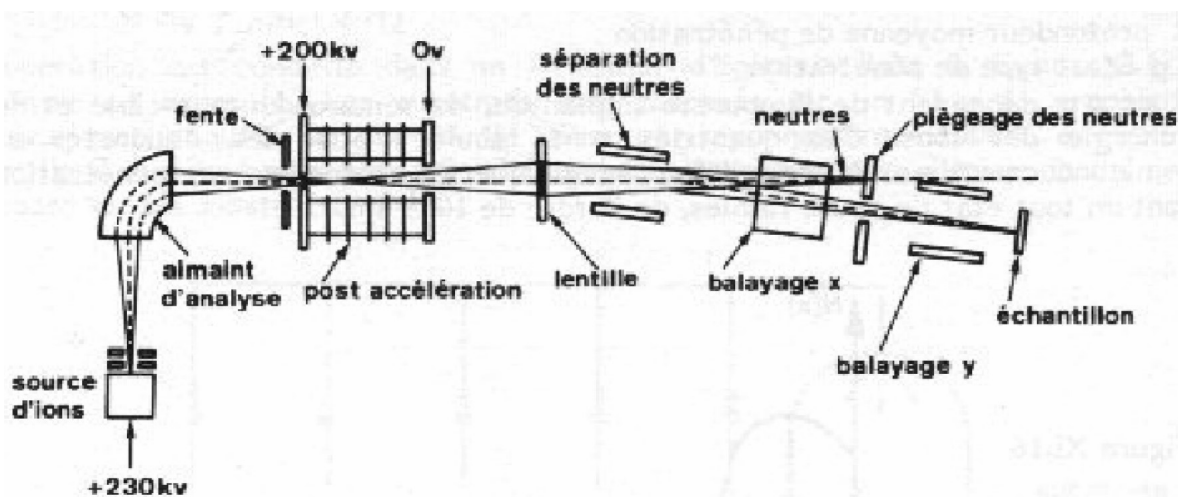


Figure IV.7: Schéma d'un implantateur

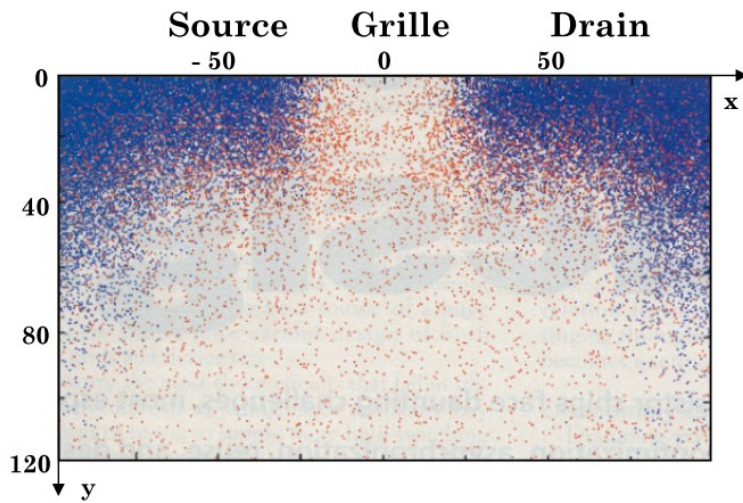
Un implanteur de semi-conducteurs est un équipement essentiel dans le processus de dopage des semi-conducteurs. Voici une description schématique simplifiée du fonctionnement d'un implanteur :

1. **Source d'ions:** L'implanteur utilise une source d'ions, généralement dopants comme le phosphore ou le bore, qui sont ionisés dans la chambre à vide de l'implanteur.
2. **Accélération des ions:** Les ions dopants sont accélérés à des énergies élevées par des champs électriques à l'intérieur de l'implanteur. Cela permet de conférer aux ions la vitesse nécessaire pour pénétrer la surface du semi-conducteur.
3. **Collimateur:** Un collimateur est utilisé pour diriger les ions de manière précise vers la surface du semi-conducteur, garantissant une implantation précise et contrôlée.
4. **Pénétration dans le semi-conducteur:** Les ions dopants pénètrent la surface du semi-conducteur, modifiant ainsi la concentration de porteurs de charge et ajustant ses propriétés électriques.
5. **Contrôle du dosage:** Le processus d'implantation est minutieusement contrôlé en ajustant des paramètres tels que l'énergie des ions et la dose, assurant une distribution précise des dopants dans le semi-conducteur.

L'utilisation de cette technologie d'implanteur permet de personnaliser les propriétés électriques des semi-conducteurs selon les exigences spécifiques de conception dans la fabrication des dispositifs électroniques.

IV.6. Dopage d'un transistor MOS :

Le dopage d'un transistor MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) joue un rôle crucial dans la modulation de sa conductivité. En introduisant des impuretés spécifiques dans la région du semi-conducteur, on peut influencer la densité de porteurs de charge et, par conséquent, contrôler le fonctionnement du transistor. Cette technique de dopage permet d'ajuster les performances du transistor MOS, facilitant ainsi son utilisation dans une variété d'applications, de l'électronique grand public aux systèmes informatiques avancés.



Dopage d'un transistor MOS

- $L = 50 \text{ nm}, W = 0.1 \mu\text{m}$
- Atomes donneurs : ●
- Atomes accepteurs : ●

Figure IV.8: Dopage d'un transistor MOS

BIBLIOGRAPHIE

- [1] André, J.-C. (2018). Fabrication additive : procédés et matériaux. Techniques de l'Ingénieur. Référence : BM7130.
- [2] LEPRINCE-RINGUET, F. (1996). Aimants permanents: Matériaux et applications. Techniques de l'ingénieur. Génie électrique, 2(D2100), 2100-1.
- [3] Techniques de l'ingénieur. * Alliages fer-silicium (D 2110 – D2111 – D2112). * Aimants permanents - matériaux et applications (D2100 – D2101). - Revue 3E.I
- [4] Microsoft Corporation. (2005). Dans Microsoft Encarta Encyclopedia (Édition 2005). Microsoft Corporation.
- [5] Ashby, M. F., & Jones, D. R. H. (2012). Engineering materials 1: An introduction to properties, applications and design (4th ed.). Elsevier.
- [6] IUFM AIX-MARSEILLE, Michel STOLIDI, CAPET et PLP2 Electrotechnique.
- [7] Pirelli, secteur câbles - <http://www.pirelli.com/>.
- [8] IDE : Isolants de l'Est - <http://www.isolants.com/>.
- [9] Mauclerc-Aubert-Domenach : Guide du technicien en Electrotechnique (Hachette).
- [10] Henry Ney : Electrotechnique et normalisation (NATHAN).
- [11] Revue 3E.I du 15 décembre 1998 : Aimants et électroaimant.