

*Département d'Electrotechnique*

*Première Année Second Cycle*

*Cours : Matériaux pour Génie Electrique*

*« MGE »*



*MEMBRES DE L'EQUIPE :*

*Dr. BOUGUETAIA TAHAR*

*Dr. FILALI LARBI*

*Dr. KHATIR RAJAA*

*Dr. CHAHI MOKHTAR*

### **Remerciements :**

*La conception de cette production est issue d'une consultation avec 2 enseignants spécialiste en génie électrique. Au tout début, j'ai eu une avalanche de suggestions de Yacine BENJEDOU et Mustapha TAYEB.*

*Ultérieurement j'ai reçu d'autres suggestions de certains collègues spécialistes en génie électrique Abdelatof SEGHIOUR, Mohamed BENDIB et Youcef BRAHAMI.*

*Même si j'ai exprimé ma gratitude individuellement à chacun de ces enseignants, je leur reformule mes remerciements. Leur collaboration est profondément appréciée.*

*Dr. L. FILALI a contribué à une partie des chapitre de semiconducteurs sur l'étude théorique des composants électroniques de puissance ( Transistors bipolaires, MOSFET et Thyristors GTO (Gate Turn Off)). Je le remercie d'avoir partagé sa vaste expérience de ce domaine.*

*En plus d'avoir fait une multiple de suggestions Dr. R. KHATIR a contrôlé l'intégralité du texte avec compétence. La tâche fut longue et difficile, à cause des innombrables symboles mathématiques et références.*

*Dr. MOKHTAR CHAHI, m'a été très précieux au cours des premiers stades de la préparation de cette production jusqu'à la publication finale.*

*Je serai reconnaissant aux lecteurs qui m'écriront pour faire soit des suggestions soit des corrections.*

### **Introduction :**

*Cette production est destinée à un cours d'un semestre sur les matériaux appliqués de génie électrique. Ici aussi notre but est donner au lecteur une connaissance sur les propriétés des matériaux.*

*La production comporte cinq parties.*

**Chapitre 1 :** *concerne les propriétés électriques et thermiques des matériaux.*

**Chapitre 2 :** *est consacré à l'étude de l'effet de peau qui est d'origine électromagnétique.*

**Chapitre 3 :** *est divisé en deux parties, première partie est consacré à la description des structures cristallines qui sont à la base de la physique des semi-conducteurs.*

*La deuxième partie : est un aperçue sur les semi-conducteurs en générale*

**Chapitre 4 :** *traite les propriétés électriques des matériaux résistants diélectriques et ses applications dans le domaine de génie électrique.*

**Chapitre 5:** *fournit une base théorique sur les propriétés principales des matériaux supraconducteurs.*

## TABLE DE MATIERE

### CHAPITRE I : PROPRIETES PHYSIQUES DES MATERIAUX

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Généralités.....  | 2  |
| 1.1   | Constitution de l'atome.....  | 2  |
| 1.1.1 | Quantification de la charge.....  | 3  |
| 1.1.2 | Conservation de la charge.....  | 3  |
| 1.1.3 | Liaison chimique.....   | 3  |
| 1.2   | Les métaux.....   | 4  |
| 1.3   | Les céramiques et les verres.....   | 4  |
| 1.4   | Les composites.....   | 5  |
| 2     | Structure des matériaux.....  | 5  |
| 3     | L'historique des matériaux en génie électrique.....                               | 6  |
| 4     | Classification.....   | 7  |
| 4.1.1 | Résistivité.....  | 7  |
| 4.1.2 | Structure de bandes.....  | 7  |
| 4.2   | La différence physique entre un isolant, un conducteur et un semi-conducteur..... | 8  |
| 5     | Conducteurs et métaux.....  | 9  |
| 5.1   | Qu'est-ce qu'un conducteur électrique ?.....                                      | 9  |
| 5.2   | Les métaux.....   | 9  |
| 5.3   | Alliages.....   | 10 |
| 5.3.1 | Les alliages de fer.....  | 10 |
| 5.3.2 | Les alliages de cuivre.....   | 10 |
| 6     | La conductivité.....  | 10 |
| 6.1   | La conductivité électrique.....   | 10 |
| 6.2   | La conductivité thermique.....  | 12 |
| 6.2.1 | Loi de Fourier : principe.....  | 12 |
|       | Définition :.....   | 12 |
|       | Équation :.....   | 12 |
| 6.2.2 | Conduction en régime stationnaire   | 13 |

### BIBLIOGRAPHIE

#### CHAPITRE II : EFFET DE PEAU

|   |   |    |
|---|---|----|
| 1 | Introduction.....                           | 17 |
| 2 | L'effet de peau ou effet pelliculaire.....  | 17 |
| 3 | Épaisseur de peau dans un métal.....        | 18 |
| 4 | Conducteur parfait.....                     | 19 |
| 5 | Résistivité et la profondeur de pénétration | 21 |

### BIBLIOGRAPHIE

## CHAPITRE III : SEMICONDUCTEURS

### I CRISTALLOGRAPHIE

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1   | Introduction :                            | 25 |
| 2   | Structure cristalline :                   | 25 |
| 3   | Géométrie du réseau cristallin :          | 25 |
| 3.1 | Rangée, nœud, maille, indices de Miller : | 26 |
| 3.2 | Systèmes cristallins.....                 | 27 |
| 3.3 | Les réseaux de bravais :                  | 28 |
| 3.4 | Densité d'empilement ou Compacité :       | 28 |

### II SEMICONDUCTEURS

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 4     | Définition :  | 31 |
| 5     | Structure de bandes.....  | 31 |
| 5.1   | GAP :   | 31 |
| 5.2   | Le niveau de Fermi $E_F$ :  | 31 |
| 6     | Semiconducteur intrinsèque: .....                                     | 31 |
| 7     | Semiconducteur extrinsèque: .....                                     | 32 |
| 8     | Le dopage : .....   | 32 |
| 8.1   | Semiconducteur extrinsèque de type n - pentavalent -:                 | 32 |
| 8.2   | Semiconducteur extrinsèque de type p -trivalent-:                     | 32 |
| 8.3   | Position du niveau de Fermi dans un matériau semiconducteur .....     | 33 |
| 8.4   | Equation de neutralité .....  | 33 |
| 8.4.1 | Semi-conducteurs de type n : .....                                    | 34 |
| 8.4.2 | Semi-conducteurs de type p : .....                                    | 34 |
| 9     | Phénomènes de transport dans les semiconducteurs.....                 | 34 |
| 9.1   | Mobilité – Conductivité .....   | 34 |
| 10    | Hétérostructures.....   | 35 |
| 10.1  | La jonction PN.....   | 35 |
| 10.2  | Homojonction et l'alignement de diagramme des bandes d'énergie .....  | 35 |
| 10.3  | Hétérojonction et l'alignement de diagramme des bandes d'énergie..... | 36 |
| 11    | Semiconducteurs de puissance .....                                    | 37 |

### BIBLIOGRAPHIE

## CHAPITRE IV : MATERIAUX ISOLANTS ET RESISTANTS

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1   | Définition d'un isolant                     | 40 |
| 2   | Définition d'un diélectrique                | 40 |
| 3   | Caractéristiques diélectriques des isolants | 40 |
| 3.1 | Permittivité relative:                      | 40 |
| 3.2 | Rigidité diélectrique                       | 42 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.3   | <i>Circuit équivalent d'un isolant en courant alternatif</i>   | 42 |
| 3.4   | <i>Calcul de l'angle de perte diélectrique</i>   | 42 |
| 4     | <i>Calcul du champ électrique dans un isolant</i>  | 44 |
| 5     | <i>Bases physiques pour la polarisation diélectrique:</i>  | 44 |
| 5.1   | <i>Un milieu diélectrique:</i>   | 44 |
| 5.2   | <i>Dipôle électrique:</i>  | 44 |
| 5.3   | <i>Expérience de Faraday :</i>   | 45 |
| 5.4   | <i>Mécanisme de polarisation:</i>  | 45 |
| 5.4.1 | <i>Polarisation dipolaire:</i>   | 45 |
| 5.4.2 | <i>Polarisation électronique:</i>  | 45 |
| 6     | <i>Vecteur polarisation:</i>   | 45 |
| 7     | <i>Champs et potentiels de polarisation:</i>   | 46 |
| 8     | <i>Champ électrique <math>\mathbf{E}</math> macroscopique à l'intérieur d'un diélectrique, vecteur <math>\mathbf{D}</math> :</i> | 47 |
| 8.1   | <i>Forme locale du théorème de Gauss:</i>  | 47 |
| 8.2   | <i>Vecteur déplacement diélectrique <math>\mathbf{D}</math> :</i>  | 47 |
| 8.3   | <i>Forme intégrale du théorème de Gauss :</i>  | 48 |
| 9     | <i>Diélectrique linéaire, homogène et isotrope (L.H.I.):</i>   | 48 |
| 10    | <i>Susceptibilité diélectrique d'un diélectrique LHI:</i>  | 48 |
| 10.1  | <i>Propriétés de la susceptibilité diélectrique:</i>   | 49 |
| 10.2  | <i>Exemple de diélectrique LHI polarisé uniformément sans charges libres internes:</i>   | 49 |
| 11    | <i>Différents types de polarisation diélectrique:</i>  | 49 |
| 11.1  | <i>Polarisation électronique:</i>  | 49 |
| 11.2  | <i>Polarisation atomique (ionique):</i>  | 50 |
| 11.3  | <i>Polarisation d'orientation (ou dipolaire ou de Debye):</i>  | 50 |
| 11.4  | <i>Polarisation interfaciale (ou de Maxwell-Wagner-Sillars):</i>   | 50 |
| 12    | <i>Variation de la permittivité diélectrique en fonction de la fréquence:</i>  | 52 |
| 13    | <i>Rôle des diélectriques dans un condensateur:</i>  | 52 |

## **BIBLIOGRAPHIE**



**Table des matières**

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Généralités.....  | 2  |
| 1.1   | Constitution de l'atome.....  | 2  |
| 1.1.1 | Quantification de la charge.....  | 3  |
| 1.1.2 | Conservation de la charge.....  | 3  |
| 1.1.3 | Liaison chimique.....   | 3  |
| 1.2   | Les métaux.....   | 4  |
| 1.3   | Les céramiques et les verres.....   | 4  |
| 1.4   | Les composites.....   | 5  |
| 2     | Structure des matériaux.....  | 5  |
| 3     | L'histoire des matériaux en génie électrique.....                                 | 6  |
| 4     | Classification.....   | 7  |
| 4.1.1 | Résistivité.....  | 7  |
| 4.1.2 | Structure de bandes.....  | 7  |
| 4.2   | La différence physique entre un isolant, un conducteur et un semi-conducteur..... | 8  |
| 5     | Conducteurs et métaux.....  | 9  |
| 5.1   | Qu'est-ce qu'un conducteur électrique ?.....                                      | 9  |
| 5.2   | Les métaux.....   | 9  |
| 5.3   | Alliages.....   | 10 |
| 5.3.1 | Les alliages de fer.....  | 10 |
| 5.3.2 | Les alliages de cuivre.....   | 10 |
| 6     | La conductivité.....  | 10 |
| 6.1   | La conductivité électrique.....   | 10 |
| 6.2   | La conductivité thermique.....  | 12 |
| 6.2.1 | Loi de Fourier : principe.....  | 12 |
|       | Définition :.....   | 12 |
|       | Équation :.....   | 12 |
| 6.2.2 | Conduction en régime stationnaire.....  | 13 |

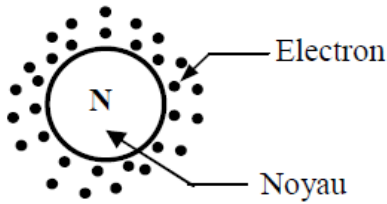
1 GENERALITES

1.1 Constitution de l'atome

Protons-Neutrons-Électrons

Les **atomes** sont les premiers corpuscules différenciés de la matière. Ils sont constitués d'un **noyau** formé de **nucléons (protons et neutrons)**, et d'un cortège électronique formé d'**électrons**. Les principales caractéristiques de ces particules sont données dans le tableau 1.1

Schéma de l'atome dans le model de la physique moderne, dit aussi Bohr-Sommerfield



Le noyau comprend des :

- charges positives appelées protons
- particules neutres appelées neutrons

Les électrons sont des charges négatives qui gravitent autour du noyau.

En valeur absolue, les charges de l'électron et du proton sont égales :  $e = 1,602 \cdot 10^{-19} C$ .

**Tableau 1.1**  
Principales caractéristiques de l'électron, du proton et du neutron.

| Particule et symbole                                    | Auteurs des premières mesures                 | Charge*  | Masses ( $m_e, m_p, m_n$ )*<br>arrondies à 4 chiffres après la virgule |
|---|---|--|--|
| Électron<br>du grec<br><i>êlektron</i> : ambre<br>$e^-$ | J. J. Thomson (1897)<br>R. A. Millikan (1911) | $- e = - 1,602 \cdot 10^{-19} C$<br>(arrondie à $- 1,6 \cdot 10^{-19} C$ ) | $9,1094 \cdot 10^{-31} kg$<br>(arrondie à $9,11 \cdot 10^{-31} kg$ )   |
| Proton<br>du grec<br><i>prôtos</i> : premier<br>$p$     | E. Rutherford (1910)                          | $+ e = + 1,602 \cdot 10^{-19} C$<br>(arrondie à $+ 1,6 \cdot 10^{-19} C$ ) | $1,6726 \cdot 10^{-27} kg$<br>(arrondie à $1,67 \cdot 10^{-27} kg$ )   |
| Neutron<br>$n$  | J. Chadwick (1932)                            | 0  | $1,6749 \cdot 10^{-27} kg$<br>(arrondie à $1,67 \cdot 10^{-27} kg$ )   |

\* La charge élémentaire e, et les masses  $m_e, m_p, m_n$  sont des constantes fondamentales.

**Symbole :**

${}^A_Z X$ , A : nombres des nucléons (nombre de Protons + nombre de Neutrons)

Z : numéro atomique = nombre de protons tel que  $A=Z+N$



$X$  : symbole de l'élément

Exemple :  $Na_{11}^{23}$ ,  $Z = 11$  électrons,  $A = 23 = 11$  protons + 12 neutrons [1]

### 1.1.1 Quantification de la charge

Puisque les objets qui nous entourent sont uniquement composés de ces particules chargées, alors la charge nette d'un objet se doit être un multiple entier de la charge élémentaire  $e$  et la charge est ainsi quantifiée :

$$Q = Ne \text{ où}$$

$Q$  : Charge totale de l'objet en coulomb (C),

$e$  : Charge élémentaire,

### 1.1.2 Conservation de la charge

Durant une expérience, les charges positives et les charges négatives sont toujours conservées. Elles ne peuvent jamais être créées ni détruites. Elles ne font que se déplacer d'un corps à un autre ou former de nouvelles particules qui préservent la charge initiale.

**Molécule** : une molécule est un ensemble d'atomes (au moins deux) identiques ou non, unis les uns aux autres par des liaisons chimiques.

### 1.1.3 Liaison chimique

Une liaison chimique est le *partage* ou le *transfert* d'un ou plusieurs électrons entre deux atomes. Ces liaisons peuvent être ioniques, covalentes ou métalliques.

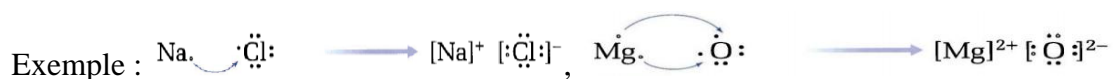
a. *Liaison ionique* : (transfert d'électrons)

Une liaison ionique (ou liaison électrovalente) est un type de liaison chimique qui peut être formé par une paire d'atomes possédant une grande différence d'électronégativité (par convention, supérieure à 1,7) typiquement entre un non-métal et un métal. Le métal donne un ou plusieurs électrons pour former un ion chargé positivement (cation). Le non-métal capte ces électrons pour former un ion chargé négativement (anion).

Généralement les colonnes (1 et 2) du tableau périodique (les éléments qui ont peu d'électrons sur leur couche externe) et les éléments qui ont des couches externes presque saturées (colonnes 16 et 17 du même tableau périodique).

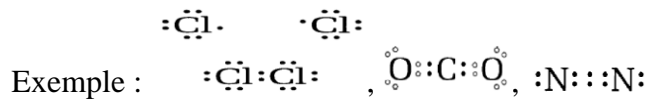
Les matériaux constitués à l'aide des liaisons ioniques sont caractérisés par :

Une mauvaise conductivité thermique, transparent, fragile, haut point de fusion.



b. *Liaison covalente* : (partage des électrons)

Cette liaison se caractérise par la mise en commun d'électrons afin de saturer les couches électroniques externes de chacun des atomes mis en liaison une liaison forte.

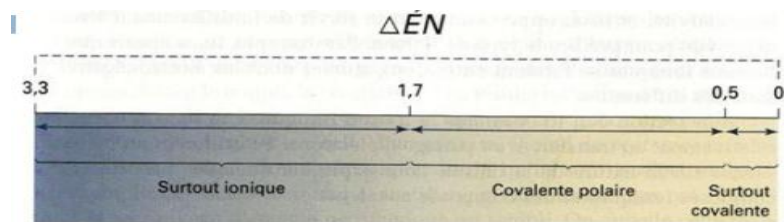


c. *Liaison métallique* : (partage d'électrons)

Cette liaison se caractérise aussi par la mise en commun d'électrons entre plusieurs atomes afin de saturer les couches électronique externes. Elle se produit entre les métaux. Elle est accompagnée par la formation des électrons libres. Elle est forte et non directionnelle.

A la différence de la liaison covalente, la liaison métallique est délocalisée, c'est-à-dire que chaque atome peut être considéré comme un ion baignant dans un gaz d'électron.

Schéma :



## 1.2 Les métaux

Les métaux (liaisons métalliques). On les obtient soit par réduction à haute température de leurs oxydes en présence de carbone (ex. fer) ou par électrolyse à haute température (ex. aluminium). Ce sont les matériaux les plus employés pour les applications structurales et pour l'essentiel des métaux ferreux (90% ferreux, les non-ferreux étant des alliages de Al, Cu, Ni et Ti). Ils sont capables de se déformer de manière permanente (ductiles) ce qui permet de réaliser des opérations de mise en forme par déformation plastique (emboutissage, forge, estampage...) ou d'assemblage par déformation plastique. Par ailleurs les matériaux métalliques sont denses, et bons conducteurs thermiques et électriques.

## 1.3 Les céramiques et les verres

Cette famille de matériau possède également des modules élevés. Mais contrairement aux métaux, les céramiques et les verres sont fragiles et possèdent une faible tolérance aux concentrations des contraintes (comme les trous et les fissures). Leur résistance à la traction signifie la résistance à la rupture. Ce sont des matériaux rigides et durs et résistent à

l'abrasion, elles conservent leurs résistances à haute températures et résistent bien à la corrosion.

#### 1.4 Les composites

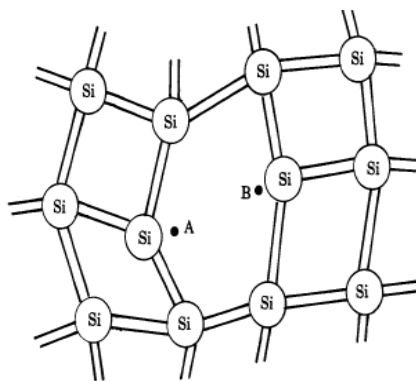
Ces matériaux combinent des propriétés intéressantes des autres familles sans en avoir leurs inconvénients. Ils sont légers, rigides et résistants et peuvent être tenace. La majorité des composites disponibles aujourd'hui sont à matrice polymère (en général époxyde ou polyester) renforcés des fibres de verre, carbone, ou kevlar (Le Kevlar est une fibre synthétique qui possède de très bonnes propriétés mécaniques en traction (résistance à rupture, de 3100 MPa et module entre 70 et 125 GPa) mais ils ne peuvent pas être utilisés au-dessous de 250°C à cause de la matrice en polymère mais leurs performance à température ambiante sont exceptionnelle. Les pièces en composite coutent chères et difficiles à mettre en forme et à assembler c'est pourquoi le concepteur ne les utilisera que lorsque le surcroît de la performance justifie le surcoût.

## 2 STRUCTURE DES MATERIAUX

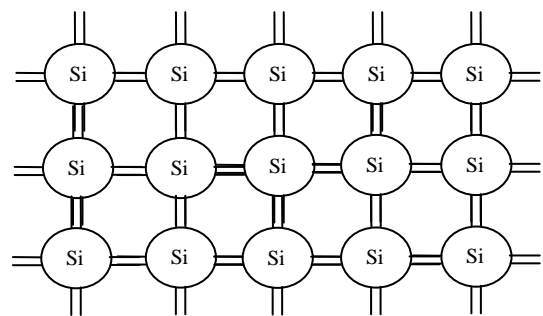
Il existe deux types d'état solide, l'état dans lequel l'arrangement des atomes est aléatoire et celui dans lequel les atomes sont arrangés régulièrement aux nœuds d'un réseau.

Le premier état est dit amorphe, les matériaux qui se solidifient dans un état amorphe sont généralement appelés des verres. Cet état ne diffère de l'état liquide que par le taux de viscosité.

Le deuxième état est l'état cristallisé, caractérisé par le fait que les atomes sont rangés aux nœuds d'un réseau périodique. Le résultat est un ensemble ordonné de noyaux et d'électrons liés entre eux par des forces essentiellement coulombiennes. (Voir exemple de *Silicium*) [2]



*Etat désordonné (amorphe)*



*Etat parfaitement ordonné (cristalline)*

### 3 L'HISTORIQUE DES MATERIAUX EN GENIE ELECTRIQUE

Comment l'ingénieur peut-il Choisir de façon convenable un matériau pour une application donnée ou modifier les propriétés de celui-ci pour améliorer la performance d'une pièce en service ou sa mise en forme ?

Relations existant entre les propriétés des matériaux, leur structure, leur procédé de fabrication et les conditions d'utilisation.

Et cela a comme Objectifs spécifiques :

- Acquérir les notions de base des propriétés mécaniques ;
- Décrire et prédire les mécanismes à l'origine des propriétés spécifiques des matériaux ;
- Acquérir des connaissances nécessaires pour choisir judicieusement un matériau et sa préparation pour des applications industrielles ;
- Choisir un matériau en fonction de ses conditions d'utilisation, de ses propriétés et de sa mise en forme. [3]

:

**1821** : Le premier effet thermoélectrique a été découvert par Thomas Johan Seebeck, qui a mis en évidence le fait qu'un circuit fermé formé de deux matériaux de nature différente faisait dévier l'aiguille d'une boussole quand l'une des jonctions est placée à une température différente.

**1834** : Jean Charles Athanase Peltier a découvert un autre effet thermoélectrique, la Réfrigération de deux matériaux.

**1851** : William Thomson a publié une explication complète des effets Seebeck et Peltier et a décrit leur corrélation.

**1910** : Edmund Altenkirch a suggéré le concept du facteur de mérite. Il a montré que les bons matériaux thermoélectriques devaient posséder un fort coefficient Seebeck, une conductivité électrique élevée et une faible conductivité thermique.

**1949** : Abram Ioffe a proposé que les matériaux semi-conducteurs dopés, sont les meilleurs candidats pour être des matériaux thermoélectriques.

**1954** : Julien Goldsmid a été le premier à identifier le Tellure de Bismuth comme matériau pour la réfrigération thermoélectrique et a montré que des refroidisseurs thermoélectriques pouvaient atteindre zéro degré Celsius.

**1995** : Glenn Slack a introduit de nouveaux critères de sélection d'un bon matériau thermoélectrique et a développé la notion de « Phonon Glass Electron Crystal ». Ce matériau devait posséder les propriétés électriques d'un Crystal et les propriétés thermiques d'un verre.

#### 4 CLASSIFICATION

Ces matériaux peuvent être classés en quatre groupes selon leur fonction :

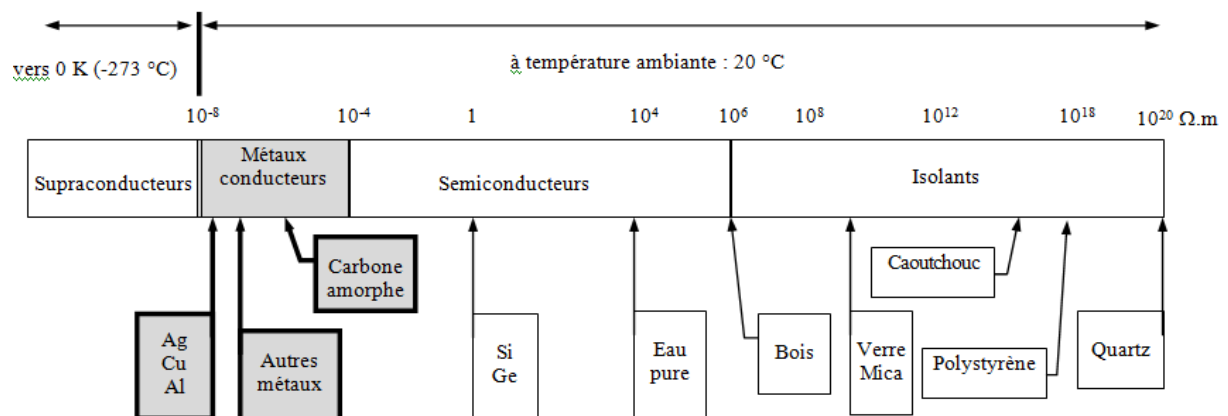
- ✓ Les matériaux conducteurs pour véhiculer le courant électrique.
- ✓ Les matériaux isolants (diélectriques) pour isoler les conducteurs électriques.
- ✓ Les matériaux magnétiques pour créer ou canaliser l'induction magnétique.
- ✓ Les matériaux semi-conducteurs pour la fabrication des interrupteurs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

Le classement 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...).

##### 4.1.1 Résistivité

La résistivité d'un matériau, généralement symbolisée par la lettre grecque rho ( $\rho$ ), représente sa capacité à s'opposer à la circulation du courant électrique. La résistivité est une propriété caractéristique d'une substance. Elle varie suivant la nature de la substance qui constitue le conducteur. Elle varie aussi avec la température.

Le tableau ci-dessous résume le classement suivant leurs résistivités électriques.

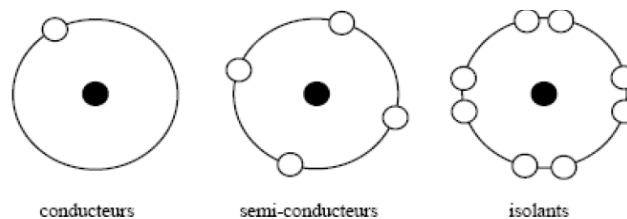


##### 4.1.2 Structure de bandes

**Couches périphériques :** C'est la couche la plus extrême d'un atome. Ses électrons sont appelés *électrons périphériques* ou *électrons de valence*. Cette *couche* ne peut pas posséder plus de huit électrons.

**Important :** Les propriétés électriques des matériaux dépendent des électrons de la couche périphérique.

- ✓ Les *bons conducteurs* dont leur dernière *couche incomplète*. Ils céderont facilement leurs électrons (électrons libres). La couche périphérique est de 1 à 3 électrons de valence.
- ✓ Les *isolants* dont leur dernière *couche saturée ou presque saturée*. Ils ne céderont pas facilement leurs électrons (électrons liés). La couche périphérique est de 5 à 8 électrons de valence.
- ✓ Les *semi-conducteurs* sont des matériaux dont la *dernière couche est formée de 4 électrons de valence*. Le silicium et le germanium sont les semi-conducteurs les plus utilisés. [4]

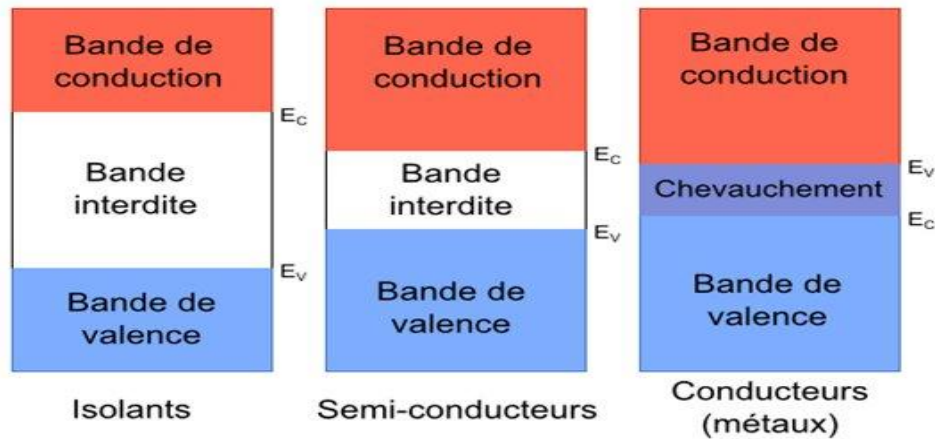


Représentation des couches périphériques.

#### 4.2 La différence physique entre un isolant, un conducteur et un semi-conducteur

Électriquement, un matériau est constitué d'une bande pleine est la bande de valence  $E_V$ , une bande vide est la bande de conduction  $E_C$ . Il existe une bande interdite entre le sommet de la bande de valence et le bas de la bande de conduction, cette bande interdite est appelée le gap du matériau, sa valeur s'écrit  $E_g$ . Avec  $E_g = E_C - E_V$

La différence entre l'isolant et le semiconducteur est moins nette que la différence entre l'isolant et le conducteur. Cette différence est essentiellement liée au rapport qui existe entre le gap du matériau et l'énergie d'agitation thermique des électrons à la température ambiante. Lorsque  $E_g$  est très grand, l'énergie thermique, à la température ambiante, n'est pas suffisante pour exciter un nombre conséquent d'électrons depuis la bande de valence vers la bande de conduction, le matériau est alors isolant ( $E_g > 200 \text{ kT}$ ). Par contre lorsque le gap diminue ( $E_g < 100 \text{ kT}$ ), un certain nombre d'électrons sont excités dans la bande de conduction par agitation thermique et le matériau présente une conductivité qui, sans être comparable à celle d'un métal, peut devenir appréciable. Le matériau est dit semiconducteur. [2]



*Diagramme de bandes d'énergie des isolants, semiconducteurs et conducteurs*

## 5 CONDUCTEURS ET METAUX

### 5.1 Qu'est-ce qu'un conducteur électrique ?

Un conducteur est un corps dans lequel il existe un grand nombre de charges électriques qui sont susceptibles de se déplacer librement. Les conducteurs les plus connus sont les métaux.

Toutefois, la conductivité d'un matériau peut dépendre de plusieurs variables. Le bois, par exemple, est isolant lorsqu'il est sec mais peut devenir conducteur lorsqu'il est mouillé. Et si l'eau elle-même n'est pas conductrice à l'état pur, elle le devient lorsqu'elle est remplie d'impuretés, de minéraux (comme l'eau du robinet, les eaux de sources et les eaux minérales) ou lorsqu'elle est salée.

*Remarque :* Les conducteurs peuvent être des corps solides, des solutions liquides et gaz. [5]

### 5.2 Les métaux

Ils sont obtenus à partir de minerais le plus souvent après modification par l'homme. Il existe 87 métaux différents. L'or, l'argent, le fer, le cuivre, l'aluminium, le zinc, le plomb sont les plus utilisés. Néanmoins ces métaux sont assez rarement utilisés à l'état naturel.

Les métaux sont assez peu résistants à la corrosion (rouille du fer). Par contre, ce sont des matériaux très facilement recyclables (fabrication d'acier à partir de vieilles carcasses de voitures). On préfère utiliser des alliages (mélanges de 2 ou plusieurs métaux) ayant souvent de meilleures qualités exemple l'acier, le laiton, la fonte, le bronze.

**Lexique :**

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

### 5.3 Alliages

Produits métalliques obtenus par incorporation d'un ou plusieurs éléments à un métal.

Les alliages à deux composants sont dits binaires, ceux qui contiennent trois composants sont appelés alliages ternaires. Comme les métaux purs, les alliages ont un éclat métallique et sont des conducteurs de chaleur et d'électricité.

Il existe deux types d'alliages lorsque l'un des éléments est majoritaire:

#### 5.3.1 Les alliages de fer

Les alliages de fer sont constitués de fer, bien entendu, et d'éléments d'alliage.

- ✓ *L'acier* : l'acier est constitué de fer et de carbone, ce dernier dans une proportion massique inférieure à 2,1%, et de certains autres éléments comme le nickel, le chrome ou l'aluminium. Le rôle du carbone dans l'acier est d'augmenter sa dureté.
- ✓ *La fonte* : la fonte est constituée de fer et de carbone, ce dernier dans une proportion massique comprise entre 2,1% et 6,67%. Oui, la fonte est donc bien «un acier auquel on aurait ajouté du carbone».

#### 5.3.2 Les alliages de cuivre

Les alliages de cuivre sont constitués de cuivre, bien entendu, et d'éléments d'alliage.

- ✓ *Le bronze* : le bronze est un alliage constitué de cuivre et d'étain, ce dernier occupant en général entre 3% et 35% de la masse totale de l'alliage.
- ✓ *Le laiton* : le laiton est un alliage constitué de cuivre et de zinc. Le laiton se corrode facilement en formant le vert-de-gris.

## 6 LA CONDUCTIVITE

### 6.1 La conductivité électrique

La conductivité électrique représente la facilité d'un matériau à laisser passer les charges électriques à travers lui. Le principe de conductivité s'oppose à celui de résistivité.

A une température donnée, la résistance d'un conducteur dépend :



1. De sa longueur,
2. De sa section,
3. De la nature de la substance qui le constitue,

Nous avons vu que le passage du courant dans un conducteur est analogue à l'écoulement de l'eau dans un tuyau. On remarque par expérience que plus le tuyau est long, plus sa résistance au passage de l'eau est grande. De même en électricité, plus le conducteur est long, plus sa résistance au passage du courant est grande.

Si l'on remplace le tuyau par un autre ayant une plus grande section, le passage de l'eau se fait plus librement, sa résistance est réduite. Il en est ainsi pour un conducteur électrique : plus sa section est grande, plus son opposition (résistance) au passage du courant est faible.

Le passage du courant électrique dans un conducteur se fait d'autant plus facilement que le nombre d'électrons libres est grand. Or, ce nombre d'électrons libres varie considérablement d'une substance à l'autre. Donc, la résistance au passage du courant dépend de la nature de la substance qui constitue le conducteur ; plus le nombre d'électrons libres est grand, plus la résistance est basse.

La formule qui donne la relation entre la résistance d'un conducteur et les trois facteurs

énumérés plus est la suivante :  $R = \rho \frac{l}{A}$

Où  $R$  : résistance du conducteur, en ohms

$\rho$  : résistivité de la substance, en ohm – mètres

$l$  : longueur du conducteur, en mètres

$A$  : section du conducteur, en mètres carrés

La résistivité correspond à la résistance d'un tronçon de matériau d'un mètre de longueur et d'un mètre carré de section et est exprimée en ohms-mètres. Elle est donnée par la relation :

$$\rho = R \frac{A}{l}$$

La conductivité électrique est inversement proportionnelle à la résistivité :  $\sigma = 1/\rho$

*Remarque* : Voici le classement des métaux les plus conducteurs, par ordre de conductivité :

1. Argent, 2. Cuivre, 3. Or, 4. Aluminium, 5. Zinc, 6. Nickel, 7. Fer, 8. Étain, 9. Platine, 10. Palladium, 11. Plomb

***Variation de la résistance avec la température :***

Lorsque la température d'un conducteur augmente, l'agitation de ses atomes s'accroît.

L'opposition au déplacement des électrons (courant) augmente parce que les collisions entre les électrons et les atomes se multiplient. C'est ce qui explique l'augmentation de la résistivité des métaux conducteurs avec la température. Cette variation obéit à la formule suivante :

$$\rho_t = \rho_0(1 + \alpha\Delta T)$$

Où  $\rho_t$  : résistivité à une température t,

$\rho_0$  : résistivité à 0 °C,  $\alpha$  : coefficient de température 1/°C, t : température en °C.

Puisque la résistivité varie avec la température, il s'en suit que la résistance de tout dispositif électrique (bobine, fil, câble, etc.) varie en proportion. On peut donc exprimer la variation de la résistance par la formule :  $R_t = R_0(1 + \alpha\Delta T) \Omega$  [6]

## 6.2 La conductivité thermique

La plupart des matériaux conducteurs d'électricité sont également d'excellents conducteurs thermiques. La conductivité thermique est la grandeur physique qui caractérise l'aptitude d'un corps à conduire la chaleur. Plus la conductivité thermique d'un matériau est élevée, plus celui-ci conduit la chaleur, et donc moins il est isolant. La conductivité thermique est exprimée en watts par mètre par kelvin ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ).

### 6.2.1 Loi de Fourier : principe

#### 6.2.2 Définition :

*La loi de Fourier (1807) décrit le phénomène de conductivité thermique, c'est-à-dire la description de la diffusion de la chaleur à travers un matériau solide.*

Fourier a découvert que le flux de chaleur qui traverse un matériau d'une face A à une face B est toujours proportionnel à l'écart de température entre les 2 faces :

- Si le matériau a une température homogène (pas d'écart de température), il n'y a pas de flux de chaleur.
- Si en revanche le matériau est soumis à une différence de température, on dit alors que « le système est en état de déséquilibre ». Un flux de chaleur va alors se créer, du plus chaud vers le plus froid, tendant à uniformiser la température. Et ce flux est proportionnel à cette différence de température.

#### 6.2.3 Équation :

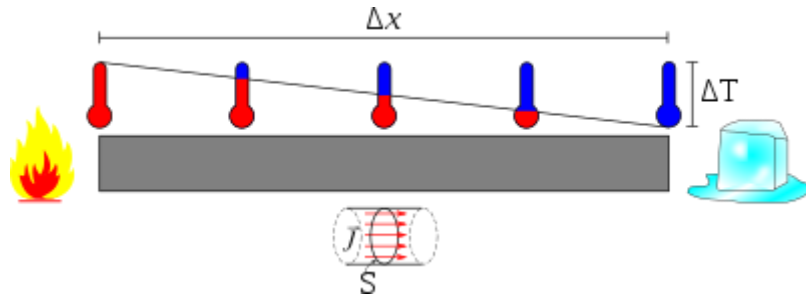
L'équation de la loi de Fourier s'écrit de la manière suivante :

Flux de chaleur (flux) = conductivité thermique ( $\lambda$ ) \* surface de contact ( $m^2$ ) \* gradient de température (°C/m) OU flux =  $\lambda * S * \overrightarrow{\text{grad}} T$

D'une autre manière : le flux de chaleur /la surface = densité de flux de chaleur  $J$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) ;

On aura :  $\vec{J} = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} = -\lambda \cdot \overrightarrow{\text{grad}} T$

- Le flux de chaleur est exprimé en Watts ;
- la surface de contact est exprimée en  $m^2$  ;
- la conductivité thermique (symbolisée  $\lambda$ ) traduit l'aptitude à conduire la chaleur, exprimée en  $Watt/(m.^{\circ}C)$  ;
- le gradient de température (*variation de température par unité de longueur*) est une grandeur vectorielle indiquant la façon dont la température varie dans l'espace, exprimée en  $^{\circ}C/m$ .



*Conduction de la chaleur dans un barreau en régime stationnaire : le flux de chaleur est proportionnel au gradient de température  $\Delta T/\Delta x$*

La conductivité thermique dépend de:

- La nature chimique du matériau
- La nature de la phase considérée (solide, liquide, gazeuse)
- La température
- L'orientation des fibres ou cristaux dans les corps anisotropes (bois, plastiques laminés, etc.)

## 6.2.4 Conduction en régime stationnaire

### a. Surface plane simple

On définit un régime permanent (ou stationnaire) quand les températures ne dépendent pas du temps. La température ne dépend plus que de la disposition du point où l'on effectue la mesure et plus du temps.

La densité de flux thermique surfacique s'écrit :  $J = -\lambda \frac{dT}{dx} = \frac{\lambda}{e} (T_1 - T_2)$

Le flux thermique à travers une surface S vaut :  $\Phi = JS = \frac{\lambda S}{e} (T_1 - T_2)$

Ou  $\Phi = JS = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{e}{\lambda S}}$

**Analogie électrique**

Par analogie avec l'électricité (loi d'Ohm) dans le cas particulier où la surface de contact entre chaque matériau est constante, nous pouvons mettre en

$$\text{parallèle les deux expressions : } \begin{cases} U_1 - U_2 = RI \\ T_1 - T_2 = \frac{e}{\lambda \cdot S} \Phi \end{cases}$$

Nous pouvons mettre en parallèle d'une part la tension et la température, d'autre part l'intensité et le flux

$$\text{thermique : } \begin{cases} U_1 - U_2 \leftrightarrow T_1 - T_2 \\ I \leftrightarrow \Phi \end{cases}$$

On peut définir alors une résistance thermique, jouant dans le transfert de chaleur un rôle comparable à la résistance électrique :

$$R \leftrightarrow R_{thc} = \frac{e}{\lambda S}$$

Où  $e$  est la surface du matériau et son épaisseur. La résistance thermique  $R_{thc}$  est homogène à homogène des  $K \cdot W^{-1}$ .

**b. Surfaces planes en série**

On considère des matériaux A, B et C d'épaisseur  $e_A, e_B$  et  $e_C$  respective, et de conductivité radiative respective  $\lambda_A, \lambda_B$  et  $\lambda_C$ .

Les hypothèses sont identiques à celles d'une surface plane simple. On considère que le contact entre chaque couche est parfait ce qui signifie que la température à l'interface entre 2 matériaux est identique dans chaque matériau (Pas de saut de température au passage d'une interface).

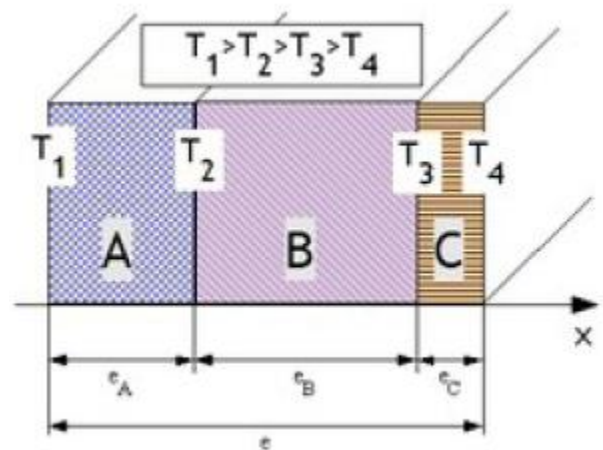
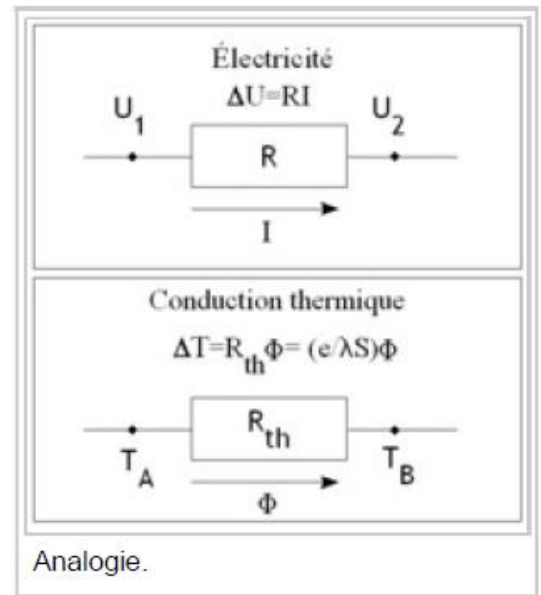
Enfin la surface de contact entre chaque matériau est constante ce qui implique un flux surfacique  $\varphi$  constant.

Les résistances thermiques s'additionnent :

$$T_1 - T_4 = \left( \frac{e_A}{\lambda_A S} + \frac{e_B}{\lambda_B S} + \frac{e_C}{\lambda_C S} \right) \Phi = (R_{thA} + R_{thB} + R_{thC}) \Phi$$

**c. Surfaces planes en parallèle**

On considère des matériaux plans juxtaposés. Chaque matériau est homogène et limité par deux plans parallèles. C'est par exemple le cas d'un mur avec une fenêtre. Les hypothèses sont



identiques à celles d'une surface plane simple.

En supplément, on considère que la température est uniforme en surface de chaque élément ( $T_1$  et  $T_2$ ). Soit  $S_A, S_B$  et  $S_C$  les surfaces respectives des éléments A, B et C.

Par la suite, on fait l'hypothèse que le flux est toujours perpendiculaire à la paroi composée ;

$$\frac{1}{R_{th}} = \frac{1}{\frac{e_A}{\lambda_A S_A}} + \frac{1}{\frac{e_B}{\lambda_B S_B}} + \frac{1}{\frac{e_C}{\lambda_C S_C}}$$

$$= \frac{1}{R_{thA}} + \frac{1}{R_{thB}} + \frac{1}{R_{thC}}$$

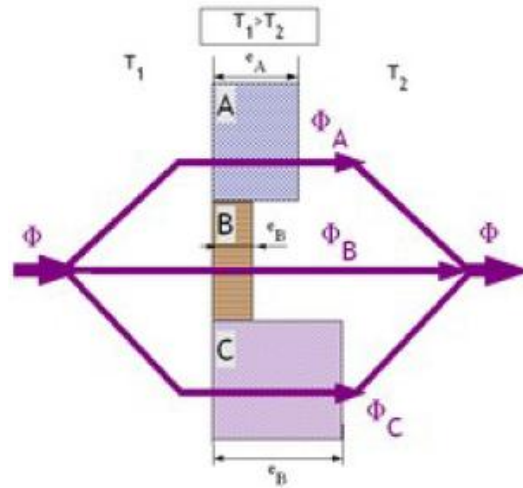


Tableau des équivalences :

| Grandeurs thermiques                                   | Grandeurs électriques                                     |
|--|---|
| Conductivité thermique $\lambda$ ( $W m^{-1} K^{-1}$ ) | Conductivité électrique $\sigma$ ( $\Omega^{-1} m^{-1}$ ) |
| Différence de Température (K)                          | Différence de potentiel (V)                               |
| Densité de flux de chaleur ( $W m^{-2}$ )              | Densité de courant ( $A m^{-2}$ )                         |
| Résistance thermique $R_{th}$ ( $K.W^{-1}$ )           | Résistance électrique $R$ ( $\Omega$ )                    |
| Conductance thermique $G_{th}$ ( $W K^{-1}$ )          | Conductance électrique $G$ ( $\Omega^{-1}$ )              |
| Flux de chaleur $\Phi$ (w)                             | Générateur de courant $I$ (A)                             |
| Capacité thermique $C_{th} = M.C_p$ ( $J K^{-1}$ )     | Capacité électrique $C$ (F)                               |

**BIBLIOGRAPHIE**

- [1] E. Bardez, Chimie générale, Paris: Dunod, 2009.
- [2] M. Henry et F. Hervé, Physique des semiconducteurs et des composants électroniques, 6ème édition, Paris: Dunod, 2009.
- [3] «[https://cours.etsmtl.ca/mec200/documents/Notes\\_de\\_cours/2013/MEC200\\_Nicole/Cours\\_1\\_H2013\\_pourpdf.pdf](https://cours.etsmtl.ca/mec200/documents/Notes_de_cours/2013/MEC200_Nicole/Cours_1_H2013_pourpdf.pdf),» [En ligne].
- [4] A. Tilimatine, Chapitre 1 : Electrostatique, université de Sidi-Bel-Abbès.
- [5] M. SAINT-JEAN, J. BRUNEAUX et J. MATRICON, Électrostatique et magnétostatique, résumé de cours et exercices, Editions Berlin, 2002.
- [6] T. Wildi, Electrotechnique, 3ème édition, 2000.

**Table des matières**

|   |   |    |
|---|---|----|
| 1 | Introduction.....                                 | 17 |
| 2 | L'effet de peau ou effet pelliculaire.....        | 17 |
| 3 | Épaisseur de peau dans un métal.....              | 18 |
| 4 | Conducteur parfait.....                           | 19 |
| 5 | Résistivité et la profondeur de pénétration ..... | 21 |

**1. INTRODUCTION**

Il y a un peu plus d'un siècle (1873) que les électriciens connaissent cette propriété des courants alternatifs de circuler de préférence à la périphérie des conducteurs massifs.

L'augmentation de résistance, de l'ordre de 10 à 20 % pour des conducteurs calibrés pour 2000 A, croit beaucoup plus vite que l'augmentation de section pour le transport d'intensités plus élevées.

Il en résulte deux inconvénients :

- ✓ Un gaspillage d'énergie électrique par les pertes supplémentaires, dont les industriels réalisent depuis peu qu'il représente un luxe dépassant le simple aspect financier.
- ✓ Un gaspillage de matière première, cuivre ou aluminium, par la quantité plus élevée de métal employé et mal utilisé comme conducteur électrique.

**2. L'EFFET DE PEAU OU EFFET PELLICULAIRE**

(ou plus rarement **effet Kelvin**) est un phénomène électromagnétique qui fait que, à fréquence élevée, le courant a tendance à ne circuler qu'en surface des conducteurs (Fig. 01). Ce phénomène d'origine électromagnétique existe pour tous les conducteurs massifs parcourus par des courants alternatifs. Il provoque la décroissance de la densité de courant à mesure que l'on s'éloigne de la périphérie du conducteur. Il en résulte une augmentation de la résistance du conducteur.

L'effet de peau traduit l'aptitude d'un conducteur à s'opposer à la pénétration d'un champ électromagnétique en son sein.

Le champ électromagnétique n'a de valeur significative qu'au voisinage de la surface du conducteur.

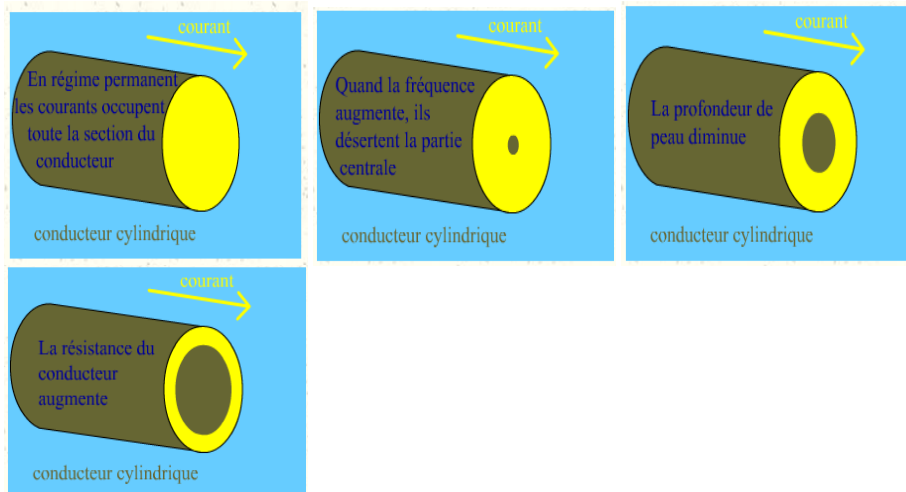


Fig. 01 : variation de l'épaisseur de peau en fonction de courant

### 3. ÉPAISSEUR DE PEAU DANS UN METAL

La résistance électrique dépend de la répartition de la densité de courant dans le conducteur. En effet, la densité de courant n'est uniformément répartie sur la section du conducteur qu'en basse fréquence. Lorsque le courant est à fréquence plus élevée, la densité de courant dans une section droite du conducteur n'est plus uniforme. L'effet de peau apparaît dans le conducteur, ce qui a pour conséquence de concentrer le courant sur sa périphérie. La résistance augmente alors puisque la surface du passage du courant est réduite à celle d'une couronne.

L'épaisseur de peau détermine, en première approximation, la largeur de la zone où se concentre le courant dans un conducteur. Elle permet de calculer la résistance effective à une fréquence donnée. Dans ce calcul, on néglige la partie réelle devant la partie imaginaire : la

$$\text{conductivité des métaux étant très élevée: } \delta(\omega) = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \sigma \omega}} = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu_0 \omega}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \sigma \pi f}}$$

$\delta$ : épaisseur de peau en mètre [m]

$\omega$ : pulsation en radian par seconde [rad/s] ( $\omega=2.\pi.f$ )

$f$ : fréquence du courant en Hertz [Hz]

$\mu$ : perméabilité magnétique en Henry par mètre [H/m]

$\rho$ : résistivité en ohm-mètre [ $\Omega.m$ ] ( $\rho=1/\sigma$ )

$\sigma$ : conductivité électrique en siemens par mètre [S/m]

D'autant plus petite que :

- ✓ la pulsation ( $\omega$ ) est élevée ;
- ✓ la conductivité ( $\gamma$ ) du milieu est élevée (milieu bon conducteur).



Pour un conducteur de section significativement plus grande que  $\delta$ , on peut calculer la résistance effective à une fréquence donnée en considérant que seule la partie extérieure d'épaisseur  $\delta$  contribue à la conduction. Par exemple pour un conducteur cylindrique de rayon  $R$ , on aura une section utile de :  $S_u = S - S_{INT} = \pi[R^2 - (R - \delta)^2]$

#### 4. CONDUCTEUR PARFAIT

Un conducteur est dit parfait dans la limite où la conductivité électrique statique tend vers l'infini  $\gamma_0 \rightarrow \infty$ .

Le modèle du conducteur parfait correspond à une **épaisseur de peau nulle** :

$$(\delta(\omega) = 0, \forall(\omega \ll 10^{14} \text{rad. S}^{-1}).$$

On en déduit dans ce régime de fréquence, que le conducteur parfait s'oppose complètement à la pénétration du champ électromagnétique et d'un courant variable.

$$\text{On a alors dans le conducteur } \vec{j} = \vec{0}; \vec{E} = \vec{0}; \vec{B} = \vec{0}; \rho = 0$$

- ✓ Le courant ne peut donc être que surfacique, de densité de courant  $\vec{j}_S$
- ✓ Un conducteur parfait ne peut être chargé qu'en surface, avec une densité surfacique ( $\sigma$ ).

#### Remarque

- ✓ L'effet de peau justifie l'utilisation de plusieurs fils de moindre épaisseur à la place d'un fil de forte section pour véhiculer l'énergie électrique du réseau.
- ✓ Il rend nécessaire l'utilisation de fils de faible diamètre dans des circuits utilisant des fréquences importantes.
- ✓ Il nécessite la réalisation de guide d'onde, véhiculant l'énergie électromagnétique à très haute fréquence en dehors des conducteurs qui se comportent comme des tuyaux.



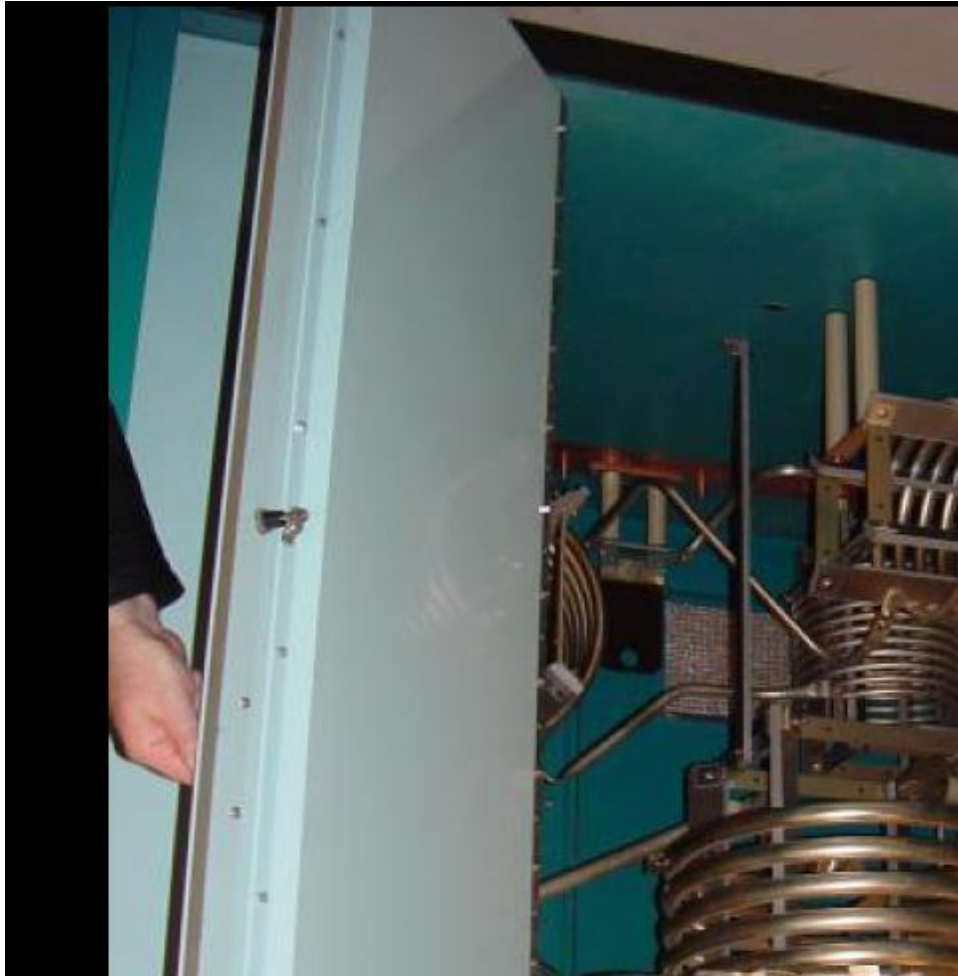


Fig. 02 : exemple des conducteurs tubulaires

## 5. RESISTIVITE ET LA PROFONDEUR DE PENETRATION

| Material          | Chemical Formula | Bulk Resistivity @20C<br>$\mu\Omega \times \text{cm}$<br>( $\times 10^{-9} \text{m}$ ) | Relative Permeability<br>$\mu/\mu_0$ | Skin Depth ( $\mu\text{m}@f$ ) |        |         |       |        |         |
|-------------------|------------------|--|--------------------------------------|--------------------------------|--------|---------|-------|--------|---------|
|                   |                  |  |                                      | 1 MHz                          | 10 MHz | 100 MHz | 1 GHz | 10 GHz | 100 GHz |
| Aluminum          | Al               | 2.65   | 1                                    | 81.9                           | 25.9   | 8.19    | 2.59  | 0.819  | 0.259   |
| Beryllium         | Be               | 3.3  | 1                                    | 91.4                           | 28.9   | 9.14    | 2.89  | 0.914  | 0.289   |
| Brass             | Cu70/Zn30        | 7  | 1                                    | 133                            | 42.1   | 13.3    | 4.21  | 1.33   | 0.421   |
| Bronze            | Cu89/Sn11        | 15   | 1                                    | 195                            | 61.6   | 19.5    | 6.16  | 1.95   | 0.616   |
| Carbon            | C (graphite)     | 1375   |                                      | 1866                           | 590    | 187     | 59.0  | 18.7   | 5.90    |
| Cadmium           | Cd               | 7.3  |                                      | 136                            | 43.0   | 13.6    | 4.30  | 1.36   | 0.430   |
| Chromium          | Cr               | 13.2   | 1                                    | 183                            | 57.8   | 18.3    | 5.78  | 1.83   | 0.578   |
| Cobalt            | Co               | 6.34   | 600                                  | 5.8                            | 1.6    | 0.52    | 0.16  | 0.052  | 0.016   |
| Constantan        | Cu60Ni40         | 49   |                                      | 352                            | 111    | 35.2    | 11.1  | 3.52   | 1.11    |
| Copper            | Cu               | 1.69   | 1                                    | 65.4                           | 20.7   | 6.54    | 2.07  | 0.654  | 0.207   |
| Dural             | Al95/Cu 4/Mg 1   | 5  |                                      | 112.54                         | 35.6   | 11.3    | 3.56  | 1.13   | 0.356   |
| Gallium           | Ga               | 15.5   |                                      | 198                            | 62.7   | 19.8    | 6.27  | 1.98   | 0.627   |
| Gold              | Au               | 2.2  | 1                                    | 74.7                           | 23.6   | 7.47    | 2.36  | 0.747  | 0.236   |
| Graphite          | C                | 783.7  |                                      | 1409                           | 446    | 141     | 44.6  | 14.1   | 4.46    |
| Inconel alloy 600 | Ni72/Cr16/Fe 8   | 103  | 1                                    | 511                            | 162    | 51.1    | 16.2  | 5.11   | 1.62    |
| Indium            | In               | 8.8  |                                      | 149                            | 47.2   | 14.9    | 4.72  | 1.49   | 0.472   |
| Iridium           | Ir               | 5.1  |                                      | 114                            | 35.9   | 11.4    | 3.59  | 1.14   | 0.359   |
| Iron              | Fe               | 10.1   | 500                                  | 7.2                            | 2.3    | 0.72    | 0.23  | 0.072  | 0.023   |
| Lead              | Pb               | 20.6   | 1                                    | 228                            | 72.2   | 22.8    | 7.22  | 2.28   | 0.722   |
| Lithium           | Li               | 9.29   |                                      | 153                            | 48.5   | 15.3    | 4.85  | 1.53   | 0.485   |
| Magnesium         | Mg               | 4.2  | 1                                    | 103                            | 32.6   | 10.3    | 3.26  | 1.03   | 0.326   |
| Mercury           | Hg               | 95.9   | 1                                    | 493                            | 156    | 49.3    | 15.6  | 4.93   | 1.56    |
| Molybdenum        | Mo               | 5.7  | 1                                    | 120                            | 38.0   | 12.0    | 3.80  | 1.20   | 0.380   |
| Monel alloy 400   | Ni65/Cu33/Fe 2   | 49   |                                      | 352                            | 111    | 35.2    | 11.1  | 3.52   | 1.11    |
| mu-Metal          |                  | 47   | 30,000                               | 2.0                            | 0.64   | 0.20    | 0.064 | 0.020  | 0.0064  |
| Nickel            | Ni               | 6.9  | 200                                  | 9.3                            | 3.0    | 0.93    | 0.30  | 0.093  | 0.030   |
| Nichrome          | Ni80/Cr20        | 108  |                                      | 523                            | 165    | 52.3    | 16.5  | 5.23   | 1.65    |
| Palladium         | Pd               | 10.8   | 1                                    | 165                            | 52.3   | 16.5    | 5.23  | 1.65   | 0.523   |
| Platinum          | Pt               | 10.58  | 1                                    | 164                            | 51.8   | 16.4    | 5.18  | 1.64   | 0.518   |
| Potassium         | K                | 6.8  |                                      | 131                            | 41.5   | 13.1    | 4.15  | 1.31   | 0.415   |
| Rhodium           | Rh               | 4.7  | 1                                    | 109                            | 34.5   | 10.9    | 3.45  | 1.09   | 0.345   |
| Silver            | Ag               | 1.63   | 1                                    | 64.3                           | 20.3   | 6.43    | 2.03  | 0.643  | 0.203   |
| Sodium            | Na               | 4.9  |                                      | 111                            | 35.2   | 11.1    | 3.52  | 1.11   | 0.352   |
| Steel             |                  |  | 100                                  |                                |        |         |       |        |         |
| Tantalum          | Ta               | 13.5   |                                      | 185                            | 58.5   | 18.5    | 5.85  | 1.85   | 0.585   |
| Tantalum Nitride  | TaN              | 252  |                                      | 799                            | 253    | 79.9    | 25.3  | 7.99   | 2.53    |
| Tin (pure)        | Sn               | 12.6   | 1                                    | 179                            | 56.5   | 17.9    | 5.65  | 1.79   | 0.565   |
| Titanium          | Ti               | 54   | 1                                    | 370                            | 117    | 37.0    | 11.7  | 3.70   | 1.17    |

|           |    |      |   |     |      |      |      |      |       |
|-----------|----|------|---|-----|------|------|------|------|-------|
| Tungsten  | W  | 5.4  | 1 | 117 | 37.0 | 11.7 | 3.70 | 1.17 | 0.370 |
| Urnaïum   | U  | 27   |   | 262 | 82.7 | 26.2 | 8.27 | 2.62 | 0.827 |
| Yttrium   | Y  | 53   |   | 366 | 116  | 36.6 | 11.6 | 3.66 | 1.16  |
| Zinc      | Zn | 5.96 |   | 123 | 38.9 | 12.3 | 3.89 | 1.23 | 0.389 |
| Zirconium | Zr | 44   |   | 334 | 106  | 33.4 | 10.6 | 3.34 | 1.06  |

**BIBLIOGRAPHIE**

- [1] André DUCLUZAUX, Pertes supplémentaires dans les conducteurs pour forte intensité par effet de peau et de proximité, Schneider Electric N° 83
- [2] Mohand Laïd Idoughi, Extraction de modèles thermiques simplifiés des machines électriques à partir d'un calcul du champ de températures, thèse de doctorat, Université Paris – Sud 2011.
- [3] <http://www.schema-electrique.be/francais/effet.html>
- [4] Eric Bellanger, Raphaël Girardi, Sébastien Paulin, Baptiste Portelli, Eddie Saudrais. Physique PSI-PSI\*: cours complet avec tests, exercices et problèmes corrigés. Pearson Education France 2010.

*Table des matières*

|                           |  |
|---------------------------|--|
| <b>I CRISTALLOGRAPHIE</b> |  |
| 1                         | <i>Introduction : ..... 25</i>   |
| 2                         | <i>Structure cristalline : ..... 25</i>  |
| 3                         | <i>Géométrie du réseau cristallin : ..... 25</i>                                 |
| 3.1                       | <i>Rangée, nœud, maille, indices de Miller : ..... 26</i>                        |
| 3.2                       | <i>Systèmes cristallins..... 27</i>  |
| 3.3                       | <i>Les réseaux de bravais : ..... 28</i>   |
| 3.4                       | <i>Densité d'empilement ou Compacité : ..... 28</i>                              |
| <b>II SEMICONDUCTEURS</b> |  |
| 4                         | <i>Définition : ..... 31</i>   |
| 5                         | <i>Structure de bandes..... 31</i>   |
| 5.1                       | <i>GAP : ..... 31</i>  |
| 5.2                       | <i>Le niveau de Fermi <math>E_F</math> : ..... 31</i>                            |
| 6                         | <i>Semiconducteur intrinsèque: ..... 31</i>                                      |
| 7                         | <i>Semiconducteur extrinsèque: ..... 32</i>                                      |
| 8                         | <i>Le dopage : ..... 32</i>  |
| 8.1                       | <i>Semiconducteur extrinsèque de type n - pentavalent -: ..... 32</i>            |
| 8.2                       | <i>Semiconducteur extrinsèque de type p -trivalent-: ..... 32</i>                |
| 8.3                       | <i>Position du niveau de Fermi dans un matériau semiconducteur ..... 33</i>      |
| 8.4                       | <i>Equation de neutralité ..... 33</i>   |
| 8.4.1                     | <i>Semi-conducteurs de type n : ..... 34</i>                                     |
| 8.4.2                     | <i>Semi-conducteurs de type p : ..... 34</i>                                     |
| 9                         | <i>Phénomènes de transport dans les semiconducteurs..... 34</i>                  |
| 9.1                       | <i>Mobilité – Conductivité ..... 34</i>  |
| 10                        | <i>Hétérostructures..... 35</i>  |
| 10.1                      | <i>La jonction PN..... 35</i>  |
| 10.2                      | <i>Homojonction et l'alignement de diagramme des bandes d'énergie ..... 35</i>   |
| 10.3                      | <i>Hétérojonction et l'alignement de diagramme des bandes d'énergie ..... 36</i> |
| 11                        | <i>Semiconducteurs de puissance ..... 37</i>                                     |

## I. CRISTALLOGRAPHIE

### 1. INTRODUCTION :

Les composants électroniques mettent à profit les propriétés des électrons dans les semiconducteurs. Il est par conséquent nécessaire, avant d'aborder l'étude des composants proprement dits, de préciser ces propriétés et de définir les grandeurs physiques dont les évolutions conditionnent les caractéristiques électriques ou optiques des composants.

### 2. STRUCTURE CRISTALLINE :

Il existe deux types d'état solide, l'état dans lequel l'arrangement des atomes est aléatoire et celui dans lequel les atomes sont arrangés régulièrement aux nœuds d'un réseau. Le premier état est dit amorphe, les matériaux qui se solidifient dans un état amorphe sont généralement appelés des verres. Cet état ne diffère de l'état liquide que par le taux de viscosité. Tout liquide dont la viscosité de cisaillement est supérieure à  $10^{13}$  poises est appelé verre. Le deuxième état, qui nous intéresse plus particulièrement ici, est l'état cristallisé, caractérisé par le fait que les atomes sont rangés aux nœuds d'un réseau périodique.

### 3. GEOMETRIE DU RESEAU CRISTALLIN :

Un cristal est construit à partir d'un groupe de  $n$  particules qui constituent la cellule de base. Ce groupe est répété périodiquement, en un réseau défini par trois vecteurs de translation fondamentaux,  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$ ,  $\vec{c}$ , appelés *vecteurs primitifs*.

Le parallélépipède construit sur les trois vecteurs primitifs constitue la maille primitive ou maille élémentaire. On remplit tout l'espace en appliquant à la maille élémentaire les opérations de translation définies par les vecteurs  $\vec{t} = n_1\vec{a} + n_2\vec{b} + n_3\vec{c}$ ,

L'ensemble des points définis par les vecteurs  $\vec{t}$  pour toutes les valeurs de  $n_1$ ,  $n_2$  et  $n_3$  constitue le réseau. Un *réseau* est un arrangement périodique régulier de points dans l'espace (Le réseau est engendré par la translation de la maille par les vecteurs de base ; tous les nœuds du réseau sont définis par cette translation). Où  $n_1$ ,  $n_2$  et  $n_3$  sont des nombres entiers, se note  $[n_1n_2n_3]$ , (Indices entre des crochets, sans virgules de séparation). Ces indices sont pour les directions.

#### Remarque

Une maille primitive ne contient qu'un seul nœud.

Le volume de la maille élémentaire est défini par le produit mixte. Le symbole  $(\times)$  désigne le produit vectoriel et le symbole  $(*)$  désigne le produit scalaire. Une maille primitive est une maille de volume minimal :

$$v = |\vec{a} \times \vec{b} * \vec{c}|$$

Réseau + base = structure cristalline.

**3.1 Rangée, nœud, maille, indices de Miller :**

Nœud : extrémité du vecteur **t**,

Motif (base) : est défini comme la position occupée par un atome (ion ou molécule).

Rangée : toute droite passant par deux nœuds,

Maille : tout parallélépipède construit sur 3 vecteurs non colinéaires,

Plan réticulaire : tout plan passant par trois nœuds portés par trois vecteurs non colinéaires.

L'équation d'un plan réticulaire peut s'écrire sous la forme :

$r = hx + ky + lz$ , avec h, k, l et t entiers relatifs. Ces nombres entiers relatifs sont appelés indice de Miller, se note (hkl). (Indices entre des crochets, sans virgules de séparation). Ce sont pour les plans sont les indices de Miller.

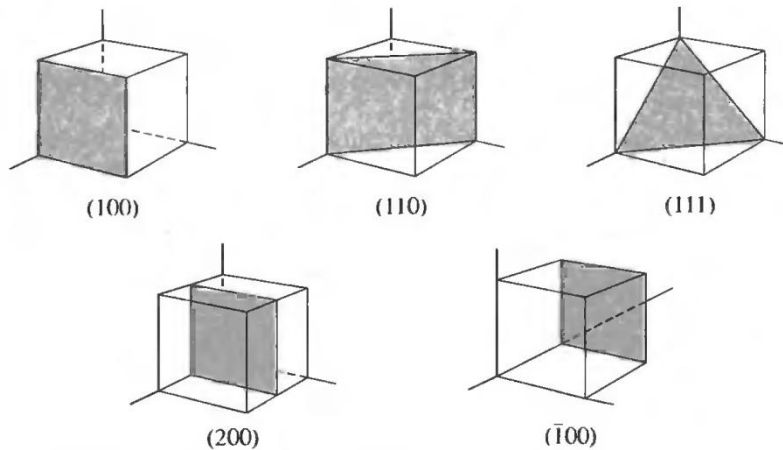
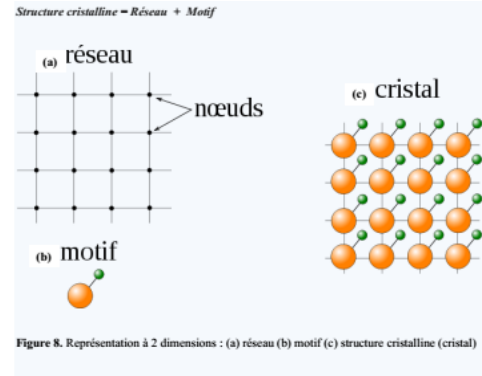


Figure 16 Indices de quelques plans importants d'un cristal cubique. Le plan (200) est parallèle à (100) et à (100).

**REMARQUE :**

**Remarque 1 :**

Pour  $n_1, n_2$  et  $n_3$  sont tout simplement les coordonnées d'un vecteur reliant l'origine O (0, 0,0) du repère Oxyz avec un autre point qui se trouve sur la surface de la maille (le cube pour le système cubique).

Pour h, k et l sont les inverses des longueurs découpées sur les axes ox, oy et oz respectivement par le plan noté (hkl).



**Remarque 2:**

Dans le cas général, pour trouver rapidement les indices d'une famille de plans réticulaires à partir d'un plan, il faut considérer :

- qu'une famille de plans est définie par 3 entiers (h k l) appelés indices de **Miller**.
- que ces indices h, k et l sont proportionnels aux inverses des longueurs interceptées sur chaque axe par ce plan.

La maille est définie par les vecteurs fondamentaux **a**, **b** et **c**.

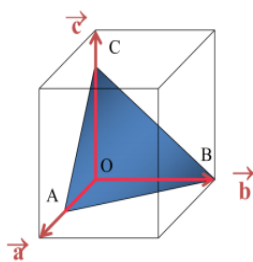
On peut écrire :  $X=A.a$ ,  $Y=B.b$  et  $Z=C.c$  avec A, B et C sont réels.

Et  $\| a \| = a$ ,  $\| b \| = b$  et  $\| c \| = c$

Un plan réticulaire coupant les 3 axes en (X, 0,0), (0, Y, 0), (0, 0, Z)

Si **a**, **b** et **c** sont perpendiculaires alors :  $x/X + y/Y + z/Z = x/Aa + y/Bb + z/Cc = 1$

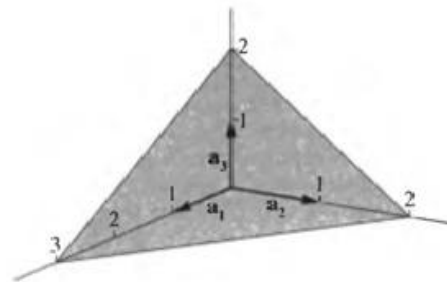
Les indices de Miller: h, k et l s'obtiennent en prenant les inverses de A, B et C et en multipliant par un entier n de manière à ce que h, k et l soient entiers et les plus petits possibles



$$\left. \begin{array}{l} OA = 1/2 a \\ OB = 1 b \\ OC = 3/4 c \end{array} \right\} \begin{array}{l} h \propto 2 \\ \Rightarrow k \propto 1 \\ l \propto 4/3 \end{array}$$

Il faut h, k et l entiers : multiplier par 3

$$\Rightarrow (h k l) = (6 3 4)$$



**Figure 15** Ce plan coupe les axes  $a_1, a_2, a_3$  en  $3a_1, 2a_2, 2a_3$ . Les inverses de ces nombres sont  $\frac{1}{3}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}$ . Les trois plus petits entiers de même rapport sont 2, 3, 3, donc les indices du plan sont (233).

**Figure 12.** Cas général des indices de Miller pour plan (dont les inverses ne sont pas des entiers).

**3.2 Systèmes cristallins**

Tous les cristaux qui ont une maille primitive de même symétrie appartiennent au même système cristallin. La maille élémentaire est définie par les trois vecteurs primitifs **a**, **b**, **c**, c'est-à-dire par les longueurs a, b, c de ces vecteurs et les angles  $\alpha, \beta, \gamma$  qu'ils font entre eux (Fig. 1-1). Suivant les valeurs relatives de ces six grandeurs, on définit sept systèmes cristallins.

|                       |   |                   |
|-----------------------|---|-------------------|
| Système cubique       | $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$            | $a = b = c$       |
| Système tétragonal    | $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$            | $a = b \neq c$    |
| Système orthorombique | $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$            | $a \neq b \neq c$ |
| Système trigonal      | $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$         | $a = b = c$       |
| Système hexagonal     | $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$ | $a = b \neq c$    |
| Système monoclinique  | $\alpha = \beta = 90^\circ \neq \gamma$         | $a \neq b \neq c$ |
| Système triclinique   | $\alpha \neq \beta \neq \gamma$                 | $a \neq b \neq c$ |

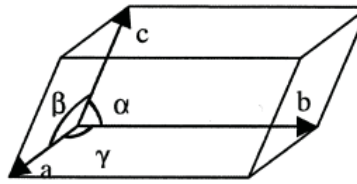


Figure 1-1 : La maille élémentaire

### 3.3 Les réseaux de Bravais :

On arrive à 14 réseaux de Bravais.

Ces systèmes sont caractérisés par les paramètres du parallélépipède. Suivant les considérations de translation (suivant la première diagonale par exemple), nous sommes amenés à singulariser 14 types d'arrangement du point de vue des symétries qui constituent les 14 réseaux de Bravais.

Les 14 réseaux de Bravais sont :

- ✓ cubique simple, cubique centré et cubique faces centrées,
- ✓ tétragonal simple, tétragonal centré,
- ✓ orthorhombique simple, orthorhombique centré, orthorhombique faces centrées, orthorhombique à deux faces centrées,
- ✓ trigonal et trigonal hexagonal,
- ✓ monoclinique, monoclinique à deux faces centrées,
- ✓ triclinique.

### 3.4 Densité d'empilement ou Compacité :

C'est un nombre sans dimension qui mesure le taux d'occupation réel de l'espace par les atomes ou les ions assimilés à des sphères dures. La compacité est donc toujours comprise entre 0 et 1. Très souvent on l'exprime en pourcentage (entre 0% et 100 %).

$$\zeta = \frac{\text{volume occupé}}{\text{volume disponible}} = \frac{\text{volume des } K \text{ atomes d'une maille}}{\text{volume de cette maille}} = \frac{\sum_{i=1}^k \frac{4}{3}\pi R_i^3}{(\vec{a}\Lambda\vec{b}) * \vec{c}}$$

**Exemple 1 :** On calcul la densité d'empilement de la structure cubique à faces centrées (cfc). L'empilement cubique à faces centrées (cfc) est caractérisé par les nœuds de son réseau qui sont situés :

- Aux 8 sommets d'un cube ;
- Au centre des faces de ce cube. La maille possède 14 nœuds, mais certains de ces nœuds sont partagés avec les mailles voisines : les huit sommets sont partagés chacun avec huit mailles, les 6 nœuds au centre des faces sont partagés entre deux mailles. Le nombre de nœuds **propres à la maille** est donc :

$n = 8 \times (1/8) + 6 \times (1/2) = 1 + 3 = 4$  Plus concrètement, cela veut dire que 4 atomes (du point de vue volumique) appartiennent en propre à la maille (si on ne considère que ce qu'il y a à l'intérieur du cube formé par la maille, nous avons 4 atomes). Notons  $r$  le rayon des atomes constituant le cristal étudié. On peut alors chercher le paramètre de maille  $a$ , c'est-à-dire le côté du cube en fonction de  $r$ , pour ce là nous traçons le plan (111) (le plan le plus dense) (Figure 14). En effet, puisque les sphères ne s'interpénètrent pas, sur une face, trois atomes sont mitoyens : sur une diagonale, on a :

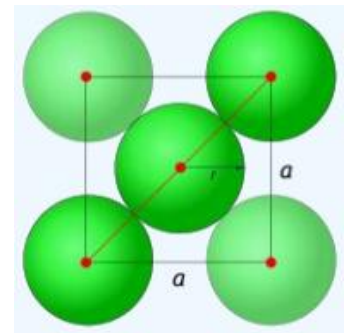
- La moitié de l'atome du sommet ;
- L'atome au centre ;
- La moitié de l'atome à l'autre sommet.

Ainsi, la diagonale de la face est de longueur :  $r + 2r + r = 4r$ . D'un autre côté, elle est de longueur  $a\sqrt{2}$  comme diagonale d'un carré de côté  $a$ . Par conséquent:

$a\sqrt{2} = 4r$  Calculons maintenant la compacité de ce cristal :

- Volume de la maille :  $V_{\text{maille}} = a^3 = r^3 16\sqrt{2}$  ;
  - Volume occupé par les atomes :  $V_{\text{atomes}} = 4 \cdot (4/3) \cdot \pi \cdot r^3$
- 4 étant le nombre d'atomes appartenant en propre à la maille et  $(4/3) \cdot \pi \cdot r^3$  étant le volume de la sphère de rayon  $r$ , autrement dit le volume d'un atome. La compacité (densité d'empilement) est :

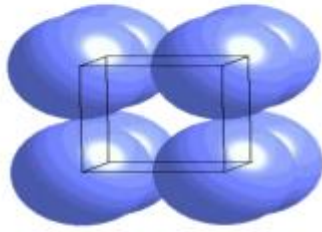
$\tau = (V_{\text{atomes}}/V_{\text{maille}}) = 0,74$  c'est-à-dire la maille est remplie à 74%.



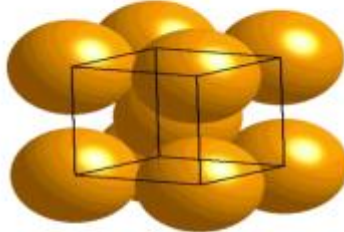
La figure 17 représente la configuration réelle des atomes et la compacité des trois structures cubiques.

- **Compacité :**

$$\frac{\text{Volume occupé par les atomes}}{\text{Volume de la maille}}$$



Cubique P :  
52 %



Cubique I :  
68 %



Cubique F :  
74 %

**Figure 17.** Illustration de la compacité (densité d'empilement  $\tau$ ) pour les trois structures du système cubique.

## II. SEMICONDUCTEURS

### 4. DEFINITION :

**Semi-conducteur** est donc un corps cristallin dont les propriétés de conductibilité électrique sont intermédiaires entre celle des métaux et celle des isolants. Le semiconducteur sera un matériau **isolant à 0K** mais qui pourra conduire à des températures voisines de la température ambiante.

### 5. STRUCTURE DE BANDES

Un semiconducteur est un solide cristallin dont les propriétés de conduction électrique sont déterminées par deux bandes d'énergie particulières : d'une part, la *bande de valence*, qui correspond aux électrons impliqués dans les liaisons covalentes; d'autre part, la *bande de conduction*, comprenant les électrons dans un état excité, qui peuvent se déplacer dans le cristal. Ces deux bandes sont séparées par un *gap*, une *bande interdite* que les électrons ne peuvent franchir que grâce à une excitation extérieure (par exemple, l'absorption d'un photon). La bande interdite correspond à une barrière d'énergie, dont l'ordre de grandeur est l'électron Volt.

#### 5.1 GAP :

Le gap est par définition la largeur de la bande interdite, c'est-à-dire la différence d'énergie entre le minimum absolu de la bande de conduction et le maximum absolu de la bande de valence.

#### 5.2 Le niveau de Fermi $E_F$ :

C'est le niveau particulier appelé niveau de Fermi.  $E_F$  correspond au niveau statistique moyen occupé à l'équilibre thermodynamique par l'ensemble des porteurs. Il se trouve à peu près au milieu de la bande interdite du matériau  $E_F = \frac{E_C + E_V}{2}$

### 6. SEMICONDUCTEUR INTRINSEQUE:

Semiconducteur pur, sans impuretés (non-dopé). Les porteurs de charge sont obtenus exclusivement suite aux transitions des électrons de la bande de valence (BV) dans la bande de conduction (BC) (fig. 1a) grâce à l'énergie d'agitation thermique. Chaque électron qui effectue une transition de BV dans BC laisse un niveau vacant (non-occupé) dans BV. A ce niveau vacant on attribue une particule fictive de charge positive  $q_0$ , appelée trou. Donc les électrons de BC et les trous de BV sont les porteurs de charge dans un semiconducteur intrinsèque.

### 7. SEMICONDUCTEUR EXTRINSEQUE:

Il s'obtient par dopage, c'est-à-dire adjonction d'un très petit nombre d'atomes de dopage dans un semiconducteur intrinsèque.

### 8. LE DOPAGE :

Le dopage consiste à l'introduction d'impuretés dans un matériau (exemple de silicium).

Les impuretés introduites dans le silicium sont de deux types :

#### 8.1 Semiconducteur extrinsèque de type n - pentavalent -:

Les atomes de dopage ont un nombre d'électrons de valence supérieur à celui de base ( $> 4$  pour Si et Ge qui ont 4 électrons de valence). Les atomes de phosphore **P**, d'arsenic **As** ou d'antimoine **Sb**, possédant cinq électrons de valence, sont couramment utilisés comme dopants dans les semiconducteurs de type N. On appelle ces atomes donneurs car ils fournissent des électrons à la bande de conduction. Ces électrons représentent les porteurs de charge majoritaires.

L'énergie de liaison du 5ème électron est donnée par la relation suivante :  $E_{ID} = E_C - E_D$

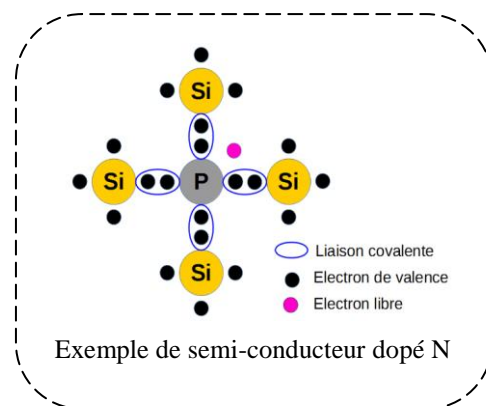
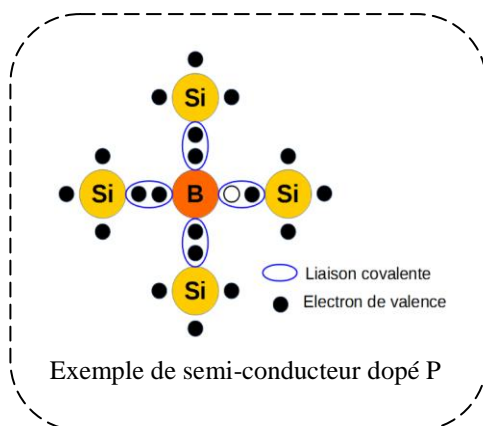
$E_D$  : est l'énergie du niveau donneur de l'impureté.

#### 8.2 Semiconducteur extrinsèque de type p - trivalent -:

Les atomes de dopage ont un nombre d'électrons de valence inférieur à celui de base ( $< 4$  pour Si et Ge). Les atomes de bore **B**, d'aluminium **Al**, d'indium **In** ou de gallium **Ga**, possédant trois électrons de valence, sont couramment utilisés comme dopants dans les semiconducteurs de type P. Ces atomes de dopage portent ici le nom d'accepteurs, car ils acceptent des électrons de la bande de valence, créant des niveaux vacants (trous) dans cette dernière. Les trous représentent les porteurs de charge majoritaires.

L'énergie de liaison du trou est donnée par la relation suivante :  $E_{IA} = E_A - E_V$

$E_A$  : est l'énergie du niveau accepteur de l'impureté.



### 8.3 Position du niveau de Fermi dans un matériau semiconducteur

- ✓ Le niveau de Fermi intrinsèque (correspondant au matériau intrinsèque), se trouve à peu près au milieu de la bande interdite du matériau, théoriquement au milieu à  $T = 0K$ .
- ✓ Le niveau de Fermi se décale donc progressivement du milieu de la bande interdite vers la bande de conduction lorsque le dopage de type n augmente comme représenté figure.
- ✓ Dans le cas d'un semiconducteur dopé de type p, le niveau de Fermi se trouvera d'autant plus près du sommet de la bande de valence, que le matériau sera plus dopé.

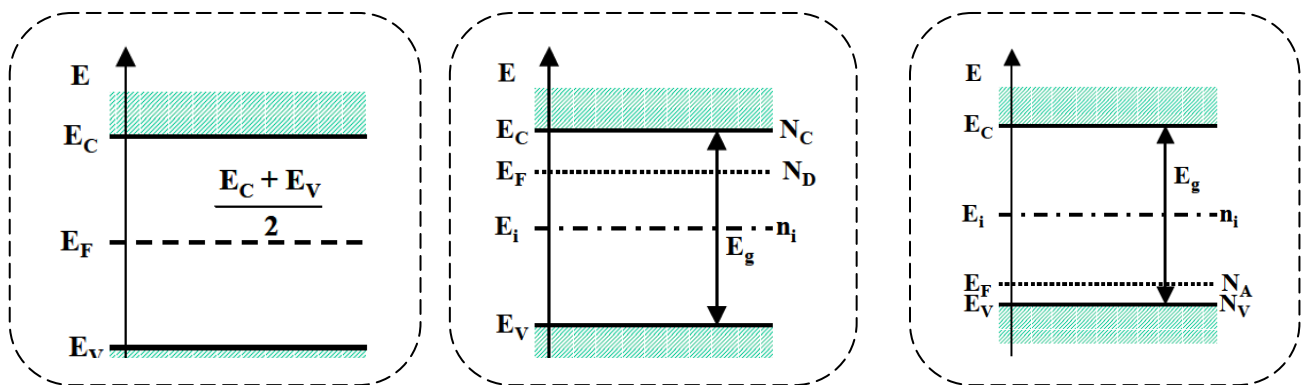


Figure : Position du niveau de Fermi et valeur correspondante de la concentration des dopants dans un semiconducteur, à température ambiante.

### 8.4 Equation de neutralité

Considérons un semi-conducteur contenant une densité de donneurs  $N_D$  et une densité d'accepteurs  $N_A$ , alors :

$N_D^+$  : est le nombre de donneurs ionisés

$N_A^-$  : est le nombre d'accepteurs ionisés

La charge totale du matériau est nulle (principe de conservation de charges).

$$n + N_A^- = p + N_D^+$$

$n$  et  $p$  sont respectivement les densités d'électron et de trous.

A température ambiante, l'énergie thermique  $k_B T$  est de même ordre de grandeur que les énergies de liaison de l'électron du donneur et de trous de l'accepteur. Ceci veut dire que tous les donneurs et accepteurs sont ionisés.

L'équation de neutralité précédente s'écrit donc :  $n + N_A = p + N_D$

$N_A$  et  $N_D$  sont les densités d'accepteurs et de donneurs.

#### 8.4.1 Semi-conducteurs de type n :

Dans un semi-conducteur de type n, la densité en donneur ( $N_D$ ) est supérieure à la densité d'accepteurs ( $N_A$ ). D'après l'équation de neutralité la densité d'électrons ( $n$ ) est supérieure à la densité de trous ( $p$ ).

$$N_D > N_A \text{ et } n > p$$

Les électrons dans ce cas sont appelés les porteurs majoritaires et les trous sont des porteurs minoritaires.  $n + N_A = p + N_D$

$$\text{Avec : } n \cdot p = n_i^2,$$

$$(N_D - N_A)n = n^2 - pn$$

$$\text{D'où : } n^2 - (N_D - N_A)n - n_i^2 = 0$$

Les solutions de cette équation sont :

$$n = \frac{1}{2}[(N_D - N_A) + ((N_D - N_A)^2 + 4n_i^2)^{1/2}]$$

$$p = -\frac{1}{2}[(N_D - N_A) - ((N_D - N_A)^2 + 4n_i^2)^{1/2}]$$

La valeur absolue donne la densité de trous.

En pratique  $N_D$ ,  $N_A$  et  $(N_D - N_A)$  sont des densités très élevées, elles sont supérieures à  $n_i$ . Ceci

permet d'écrire :  $n \approx (N_D - N_A)$  et  $p \approx \frac{n_i^2}{(N_D - N_A)}$

#### 8.4.2 Semi-conducteurs de type p :

Dans ce type de semi-conducteur la densité en accepteurs ( $N_A$ ) est supérieure à la densité de donneurs ( $N_D$ ). Dans ce cas, les porteurs majoritaires sont les trous. Les densités de porteurs sont :  $N_A > N_D$  et  $p > n$

$$p \approx (N_A - N_D) \text{ et } n \approx \frac{n_i^2}{(N_A - N_D)}$$

### 9. PHENOMENES DE TRANSPORT DANS LES SEMICONDUCTEURS

#### 9.1 Mobilité – Conductivité

De façon générale, lorsque l'on applique un champ électrique, on a tendance à déplacer les porteurs de charge, électrons et trous. En réalité, le mécanisme physique d'entraînement par un champ électrique se produit sur des porteurs qui se déplacent de façon aléatoire, dans toutes les directions de l'espace, dans le matériau, en raison de l'agitation thermique (aux températures normales de fonctionnement) et qui effectuent un libre parcours moyen sans choc.



La densité de courant d'électrons s'exprime de façon la plus simple par :  $\vec{j}_n = (-q)n \langle \vec{v}_n \rangle$

$\vec{j}_n$  : Densité de courant exprimée en général en Ampères par  $\text{cm}^2$ ,

$n$  : Concentration des électrons,

$\vec{v}_n$  : vitesse moyenne des électrons,

$$\langle \vec{v}_n \rangle = -\mu_n \vec{E}$$

$\mu_n$  : La mobilité des électrons ( $\text{cm}^2/\text{V.s}$ )

Ainsi,  $\vec{j}_n = (-q)n(-)\mu_n \vec{E}$

$$\vec{j}_n = qn\mu_n \vec{E}$$

L'expression de la densité de courant de trous est alors la suivante en se rappelant que les trous se déplacent dans le même sens que le champ électrique :

$$\vec{j}_p = qp\mu_p \vec{E}$$

Ces deux densités de courant sont en fait des courants de dérive dans le champ électrique.

Dans certains ouvrages, ces densités de courant sont appelées courant de conduction,

Nous verrons dans ce chapitre que d'autres phénomènes permettent la conduction.

Il peut être noté que nous retrouvons la loi d'Ohm,  $\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}$  pour chacun des deux types de porteur.  $\sigma$  est la conductivité.

On peut donc définir une conductivité pour les électrons ( $\sigma_n$ ), et une conductivité pour les trous, ( $\sigma_p$ ) comme suit :  $\sigma_n = qn\mu_n$  et  $\sigma_p = qp\mu_p$

$$\vec{j}_{Tot} = \vec{j}_n + \vec{j}_p = (qn\mu_n + qp\mu_p)\vec{E} = \sigma \cdot \vec{E}$$

Puisque ( $\rho = \frac{1}{\sigma}$ ), la résistivité du matériau s'exprime par :  $\rho = \frac{1}{qn\mu_n + qp\mu_p}$

## 10. HETEROSTRUCTURES

### 10.1 La jonction PN

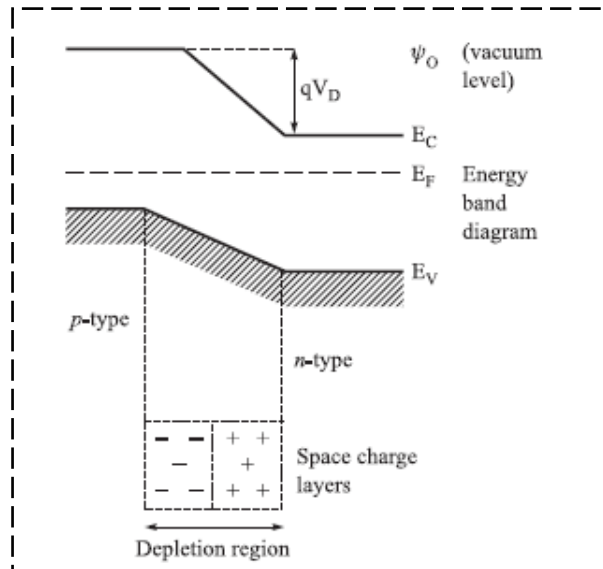
La jonction PN est une structure de base dans les composants électroniques. Les composants étant formés de semiconducteurs dopés de manière différente, les jonctions PN ou NP sont présentes aux interfaces. Il est donc indispensable de bien comprendre les phénomènes physiques qui s'y manifestent. La jonction PN est également un composant en soit. La fonction de ce composant est de laisser passer le courant dans un seul sens.

### 10.2 Homojonction et l'alignement de diagramme des bandes d'énergie

Elle résulte de la juxtaposition dans un même matériau semiconducteur de deux zones : une de type P et l'autre de type N. Les diagrammes des bandes d'énergie de la jonction P – N étaient bien compris à travers des travaux de Shockley et d'autres pendant les premiers jours

de l'électronique de l'état solide. La jonction P – N peut être représentée par un bas de bande de conduction et un haut de bande de valence comme le montre la figure 1.

Le niveau de Fermi est proche au seuil de la bande de conduction et de la bande de valence dans la région dopée N et dopée P respectivement.



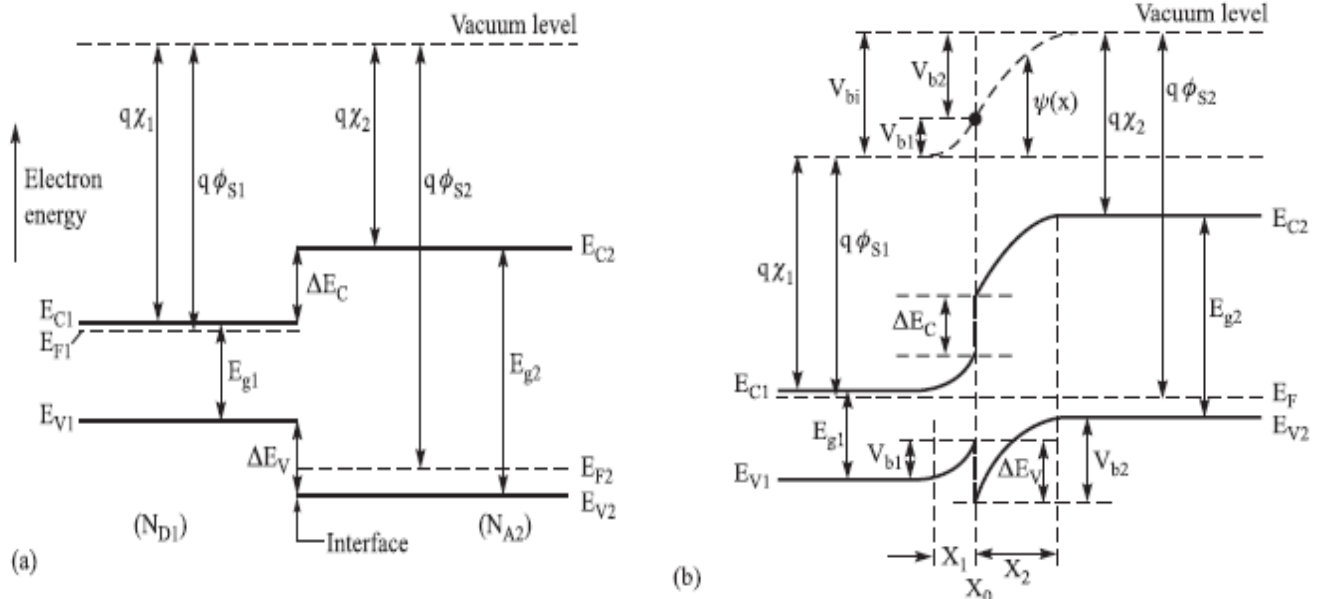
**Figure 1 :** Diagramme énergétique d'une homojonction.

$V_D$  : la hauteur de la barrière.  $E_C$  : le bas de la bande de conduction.

$E_V$  : le haut de la bande de valence.  $E_f$  : Niveau de Fermi

### 10.3 Hétérojonction et l'alignement de diagramme des bandes d'énergie

Elle est due de l'interface entre deux matériaux semiconducteurs différents et elle est plus compliquée analogue de la jonction P – N entre deux régions dopées différemment dans un même matériau (homojonction). Les hétérojonctions résultent à partir de la croissance d'un semiconducteur à un autre. Pour construire un diagramme des bandes d'énergie d'une hétérojonction, il doit prendre en considération que le gap change d'un matériau ( $E_{g1}$ ) à un autre matériau ( $E_{g2}$ ). Ainsi, les discontinuités (Offset)  $\Delta E_V$  et  $\Delta E_C$  viennent de l'hétérojonction et leurs magnitudes doivent être trouvées pour chaque combinaison particulière des matériaux, voir la Fig.2.



**Figure 2 :** a- Diagrammes des bandes des semiconducteurs  $S_1$  et  $S_2$  avant le contact,  $S_1$  est un S/C de gap  $E_{g1}$  et de type donneur ainsi son niveau de Fermi  $E_{F1}$  est proche de  $E_{C1}$  alors que  $S_2$  est un S/C de gap  $E_{g2}$  et de type accepteur ainsi son niveau  $E_{F2}$  est proche de  $E_{V2}$ , b- diagrammes des bandes des semiconducteurs  $S_1$  et  $S_2$  après le contact.

## 11. SEMICONDUCTEURS DE PUISSANCE

Trois types de semiconducteurs de puissance sont utilisés :

- semiconducteurs non-contrôlés :

→ **Diodes de puissance;**

- semiconducteurs contrôlés sans commande de blocage :

→ **Thyristors;**

→ **Triacs;**

- semiconducteurs contrôlés avec commande de blocage :

→ **Transistors bipolaires de puissance;**

→ **Transistors MOSFET de puissance;**

→ **Thyristors GTO (Gate Turn Off);**

→ **IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor).**

**BIBLIOGRAPHIE**

- [1] Henry Mathieu, Hervé Fanet, Physique des semiconducteurs et des composants électroniques, Cours et exercices corrigés 6<sup>ème</sup> édition, DUNOD Paris 2009
- [2] C. Kittel-Physique de l'Etat Solide [Solid State Physics - IN FRENCH]-Dunod (1996).
- [3] O. Bonnaud, Physique des solides, juin 2003
- [4] M.CHAHI, Thèse de magister 2009
- [5] S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, by John Wiley & Sons, 2007

*Table des matières*

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | <i>Définition d'un isolant</i>   | 40 |
| 2     | <i>Définition d'un diélectrique</i>  | 40 |
| 3     | <i>Caractéristiques diélectriques des isolants</i>   | 40 |
| 3.1   | <i>Permittivité relative:</i>  | 40 |
| 3.2   | <i>Rigidité diélectrique</i>   | 42 |
| 3.3   | <i>Circuit équivalent d'un isolant en courant alternatif</i>   | 42 |
| 3.4   | <i>Calcul de l'angle de perte diélectrique</i>   | 42 |
| 4     | <i>Calcul du champ électrique dans un isolant</i>  | 44 |
| 5     | <i>Bases physiques pour la polarisation diélectrique:</i>  | 44 |
| 5.1   | <i>Un milieu diélectrique:</i>   | 44 |
| 5.2   | <i>Dipôle électrique:</i>  | 44 |
| 5.3   | <i>Expérience de Faraday :</i>   | 45 |
| 5.4   | <i>Mécanisme de polarisation:</i>  | 45 |
| 5.4.1 | <i>Polarisation dipolaire:</i>   | 45 |
| 5.4.2 | <i>Polarisation électronique:</i>  | 45 |
| 6     | <i>Vecteur polarisation:</i>   | 45 |
| 7     | <i>Champs et potentiels de polarisation:</i>   | 46 |
| 8     | <i>Champ électrique <math>E</math> macroscopique à l'intérieur d'un diélectrique, vecteur <math>D</math> :</i> | 47 |
| 8.1   | <i>Forme locale du théorème de Gauss:</i>  | 47 |
| 8.2   | <i>Vecteur déplacement diélectrique <math>D</math> :</i>   | 47 |
| 8.3   | <i>Forme intégrale du théorème de Gauss :</i>  | 48 |
| 9     | <i>Diélectrique linéaire, homogène et isotrope (L.H.I):</i>  | 48 |
| 10    | <i>Susceptibilité diélectrique d'un diélectrique LHI:</i>  | 48 |
| 10.1  | <i>Propriétés de la susceptibilité diélectrique:</i>   | 49 |
| 10.2  | <i>Exemple de diélectrique LHI polarisé uniformément sans charges libres internes:</i>                         | 49 |
| 11    | <i>Différents types de polarisation diélectrique:</i>  | 49 |
| 11.1  | <i>Polarisation électronique:</i>  | 49 |
| 11.2  | <i>Polarisation atomique (ionique):</i>  | 50 |
| 11.3  | <i>Polarisation d'orientation (ou dipolaire ou de Debye):</i>  | 50 |
| 11.4  | <i>Polarisation interfaciale (ou de Maxwell-Wagner-Sillars):</i>   | 50 |
| 12    | <i>Variation de la permittivité diélectrique en fonction de la fréquence:</i>                                  | 52 |
| 13    | <i>Rôle des diélectriques dans un condensateur:</i>  | 52 |

### 1. DEFINITION D'UN ISOLANT

Un *isolant* est un matériau destiné à empêcher la conduction électrique entre des éléments conducteurs. Un *isolant* est un matériau de conductivité électrique faible - pratiquement négligeable -, utilisé pour séparer des pièces conductrices portées à des potentiels différents.

Un *isolant* est une substance dans laquelle la bande de valence est une bande pleine séparée de la première bande d'excitation par une bande interdite d'une largeur telle que, pour faire passer dans la bande de conduction des électrons de la bande de valence, il faut une énergie assez grande pour entraîner une décharge disruptive.

### 2. DEFINITION D'UN DIELECTRIQUE

Un diélectrique est un ensemble d'atomes ou de molécules constitués d'électrons (négatifs) et de noyaux (positifs), l'ensemble est électriquement neutre. C'est un milieu qui ne peut pas conduire le courant électrique. A ce titre, on l'appelle parfois isolant électrique. On compte parmi ces milieux le verre et de nombreux plastiques.

Malgré l'impossibilité des milieux diélectriques à conduire le courant, ils présentent de nombreuses caractéristiques électriques. En effet, et sous l'effet d'un champ électrique extérieur, il se produit un très faible déplacement des charges négatives et positives. Les électrons présents dans un milieu diélectriques ne peuvent pas, par définition, se déplacer sur des grandes distances.

### 3. CARACTERISTIQUES DIELECTRIQUES DES ISOLANTS :

#### 3.1 Permittivité relative:

La permittivité, plus précisément permittivité diélectrique, est une propriété physique qui décrit la réponse d'un milieu donné à un champ électrique appliqué. C'est une propriété macroscopique, essentielle de l'électrostatique, ainsi que de l'électrodynamique des milieux continus.

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

Sa capacité est :  $C_0 = \epsilon_0 \frac{S}{e}$

Où  $\epsilon_0$  (F/m) est la permittivité absolue du vide (de l'air). Si le même condensateur est rempli par un isolant, sa capacité devient :  $C = \epsilon_r \cdot C_0 = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{S}{e}$

La permittivité relative est définie par le rapport :  $\epsilon_r = \frac{C}{C_0}$

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

| Matériau                                    | Permittivité relative $\varepsilon_r$ (à $10^6$ Hz) | Facteur de perte                         | Tension de claquage ( $10^6$ V/m) |
|---|---|--|-----------------------------------|
| <b>Milieus de référence</b>                 |   |  |                                   |
| Vide élevé                                  | 1   | 0  | 100                               |
| Air sec ( $p_{atm}$ )                       | 1   | $< 10^{-5}$                              | 2                                 |
| Hexafluorure de soufre $SF_6$ ( $p_{atm}$ ) | 1,1   | $< 10^{-5}$                              | 7                                 |
| Eau   | 80  | $\approx 0,1$                            |                                   |
| Hydrocarbures chlorés                       | 4 à 6   | $1 \text{ à } 4 \cdot 10^{-5}$           | 50 à 100                          |
| <b>Céramiques et minéraux</b>               |   |  |                                   |
| Alumine $Al_2O_3$                           | 4,5 à 9   | $2 \cdot 10^{-3}$                        | 6                                 |
| Mica  | 7   | $10^{-3}$                                | 40                                |
| Porcelaine                                  | 6 à 8   | $3 \cdot 10^{-3}$<br>à $2 \cdot 10^{-2}$ | 3 à 50                            |
| Titanates                                   | 15 à 12 000   | $2 \cdot 10^{-3}$                        | 2 à 12                            |
| Verre sodo-calcique                         | 7   | $10^{-2}$                                | 300 à 500                         |
| Zircone $ZrO_2$                             | 7 à 10  | $3 \cdot 10^{-3}$<br>à $2 \cdot 10^{-2}$ | 3 à 50                            |
| <b>Polymères et élastomères</b>             |   |  |                                   |
| Caoutchouc naturel                          | 3 à 4   | $10^{-2}$ à $10^{-3}$                    | 12 à 24                           |
| Nylon (Polyamide 6-6)                       | 3 à 4   | $10^{-2}$ à $10^{-3}$                    | 10 à 20                           |
| Polychlorure de Vinyle (PVC)                | 3 à 9   | $10^{-1}$ à $10^{-2}$                    | 5 à 40                            |
| Polyéthylène (PE)                           | 2,3   | $10^{-4}$                                | 16 à 40                           |
| Polytétrafluoréthylène (PTFE)               | 2 à 3   | $10^{-4}$                                | 16                                |
| Résine époxyde (EP)                         | 3,6   | $2 \cdot 10^{-2}$                        | 18                                |

### 3.2 Rigidité diélectrique

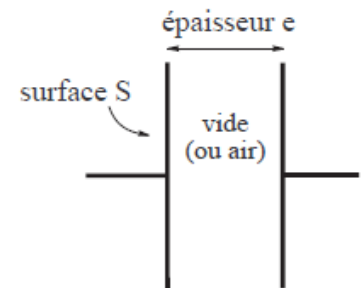
Si on augmente la tension à laquelle est soumis un isolant au delà d'une certaine valeur appelée tension de claquage, il apparaît un arc électrique dans l'isolant : courant intense traversant l'isolant en suivant un chemin formé par des molécules ionisées. Dans ce cas, l'isolant est percé : il y a rupture diélectrique ou claquage  $\Rightarrow$  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 produit le claquage et la distance entre les deux points d'application de la tension (exprimée généralement en kV/mm). :  $G = \frac{U}{L}$

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 :

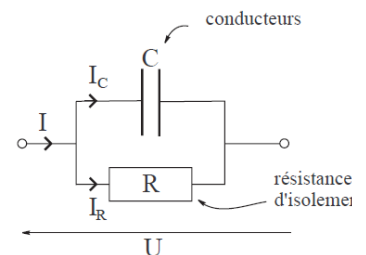
- la fréquence, la forme et la durée d'application de la tension ;
- la température, la pression et l'humidité de l'atmosphère ;
- la présence d'impuretés dans l'isolant (bulles d'air, humidité, ...).



### 3.3 Circuit équivalent d'un isolant en courant alternatif

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

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



### 3.4 Calcul de l'angle de perte diélectrique

La notion de pertes diélectriques peut être introduite en utilisant le diagramme de Fresnel.

Lorsqu'on applique une tension alternative  $U = U_0 e^{i\omega t}$  aux bornes d'un condensateur parfait, le courant est en quadrature avance sur la tension et s'écrit sous la forme suivante :

$$I = \omega \varepsilon_r^* C_0 U_0 e^{i(\omega t + \frac{\pi}{2})} = i \omega \varepsilon_r^* C_0 U$$

Tenant compte du phénomène des pertes diélectriques qui réduisent le pouvoir du condensateur à emmagasiner les charges électriques et en intégrant l'équation  $\varepsilon_r^* = \varepsilon_r' - i \varepsilon_r''$  (la permittivité relative complexe), on obtient :



$$I = i\omega(\varepsilon_r' - i\varepsilon_r'')C_0U = \omega\varepsilon_r''C_0U + i\omega\varepsilon_r'C_0U$$

Selon cette expression, le circuit est traversé par un courant qui possède deux composantes :

- Une composante ( $I_p$ ) appelée courant de perte [A]:  $I_p = \omega\varepsilon_r''C_0U$
- Une composante ( $I_c$ ) appelée courant de charge [A]:  $I_c = \omega\varepsilon_r'C_0U$

Ce diagramme met en évidence le déphasage existant entre ces deux grandeurs.

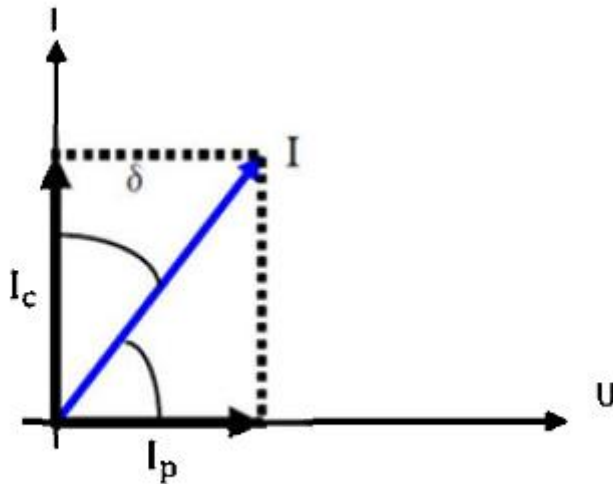


Figure 1.20 : Diagramme de Fresnel

L'angle  $\delta$ , appelé angle de perte diélectrique, constitue l'écart angulaire entre les courants pour un diélectrique parfait et pour un diélectrique réel (Grossin 2006, Sahraoui 2008). La tangente de l'angle de perte est appelée le facteur de dissipation diélectrique. Elle est donnée par la relation suivante (1.8) :

$$\tan \delta = \frac{|I_p|}{|I_c|} = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'}$$

Ce terme définit le degré d'absorption de l'énergie électrique convertie en chaleur d'un matériau diélectrique à une fréquence donnée. Il représente le ratio de l'énergie dissipée dans le diélectrique sur l'énergie accumulée.

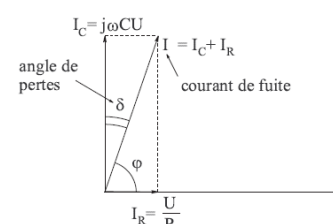
L'**angle de pertes**  $\delta$  est défini comme étant l'angle complémentaire du déphasage entre la tension  $U$  entre les conducteurs et le **courant de fuite**  $I$  traversant l'isolant :

$$\tan \varphi = \frac{CU\omega}{\frac{U}{R}} = RC\omega \Rightarrow \tan \delta = \frac{1}{\tan \varphi} = \frac{1}{RC\omega}$$

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

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

✓ bon isolant  $\rightarrow$  résistance d'isolement  $R$  élevée  $\Rightarrow \delta$  faible ;

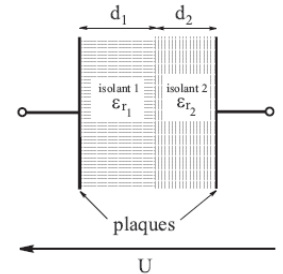


✓ mauvais isolant → R faible ⇒ δ élevé.

En pratique, le facteur de dissipation tan δ varie entre 10<sup>-2</sup> et 10<sup>-4</sup>. Il dépend de la fréquence de la tension appliquée selon une loi plus complexe que celle déterminée précédemment à partir du modèle simplifié : tan δ présente des maxima pour certaines fréquences.

**4 CALCUL DU CHAMP ELECTRIQUE DANS UN ISOLANT**

On veut calculer les champs E<sub>1</sub> et E<sub>2</sub> respectivement dans l'isolant 1 et dans l'isolant 2 figure ci-dessous.



$$\text{On a : } \begin{cases} E_1 d_1 + E_2 d_2 = U \\ \epsilon_{r1} E_1 = \epsilon_{r2} E_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} E_1 = \frac{U}{d_1 + \frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}} d_2} \\ E_2 = \frac{U}{d_2 + \frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}} d_1} \end{cases}$$

**5 BASES PHYSIQUES POUR LA POLARISATION DIELECTRIQUE:**

**5.1 Un milieu diélectrique:**

est un milieu isolant neutre où il n'y a pas des charges électriques libres et mobiles. Il est formé d'atomes et de molécules.

Par contre les conducteurs ont des charges libres dont les porteurs peuvent se déplacer dans toute la masse du matériau.

Soit un conducteur en équilibre thermodynamique :

$$\vec{F} = q\vec{E}, \vec{E} = \vec{0}, -\overrightarrow{grad} = \vec{0}, V_{int} = C^{st}$$

Or  $div\vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} = 0 \Rightarrow \rho_{int} = 0$ , toutes les charges sont réparties sur la surface de conducteur.

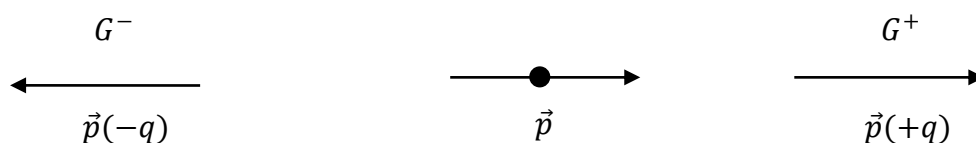
**5.2 Dipôle électrique:**

Soit  $\vec{E}_0$  le champ électrique extérieur appliqué :

Si  $\vec{E}_0 = \vec{0}$ , les électrons sont liés au noyau (Barycentres G<sup>-</sup> et G<sup>+</sup>) sont confendus.

Si  $\vec{E}_0 \neq \vec{0}$ , les charges sont soumises à la force électrique  $\vec{F} = q\vec{E}_0$ .

Chaque atome (molécule) de charge se comporte comme un dipôle électrique et acquiert un moment dipolaire :  $\vec{p} = q\overrightarrow{G^-G^+}$



### 5.3 Expérience de Faraday :

L'introduction d'un diélectrique entre les armatures d'un condensateur augmente sa capacité.

En présence du diélectrique, pour maintenir  $V_0 = c^{st}$  le générateur  $Q_0 = C_0 V_0$  doit fournir une quantité d'électricité  $Q$  plus importante que  $Q_0$  de sorte que  $Q > Q_0$ .



L'introduction d'une plaque diélectrique entraîne un apport de charges.  $\vec{E}_0$  pénètre dans le diélectrique et agit sur les porteurs de charges. Or ces électrons et ions ne peuvent se déplacer sous  $\vec{E}_0$ . Ils restent attachés à des groupements atomiques, moléculaires ou cristallins d'où leur nom «charges liées». En volume les porteurs de charges se neutralisent. On a apparition de charges induites, de signe opposé à ceux d'armatures, sur les faces du diélectrique appelées « charges de polarisation ».

### 5.4 Mécanisme de polarisation:

Un diélectrique sous  $\vec{E}_0$  se comporte comme un ensemble de dipôles orientés dans le sens de  $\vec{E}_0$  (- vers +). On dit que le diélectrique est polarisé par le champ, on distingue 2 mécanismes de polarisation.

#### 5.4.1 Polarisation dipolaire:

Le diélectrique est formé de dipôles permanents (Ex : H<sub>2</sub>O). Le champ  $\vec{E}_0$  les fait orienter.

#### 5.4.2 Polarisation électronique:

Le diélectrique n'a pas de dipôles permanents (Ex : CO<sub>2</sub>). Le champ  $\vec{E}_0$  les crée puis les orientés dans son direction.

## 6 VECTEUR POLARISATION:

On suppose que cette distinction entre charges libres et liées peut être effectuée et que les diélectriques sont de très bon isolants ne possédant aucun ion mobile (on parle alors de diélectriques parfaits).

Les propriétés électriques des conducteurs peuvent être décrites à l'aide des densités volumiques de charges libres  $\rho_{lib}$  et de leur densité de courant  $\vec{J}_{lib}$  qui sont les moyennes spatiales correspondantes.

Pour les diélectriques et leurs charges liées, nous allons introduire une grandeur mieux adaptée, le vecteur polarisation. Les propriétés des diélectriques peuvent s'interpréter à l'échelle macroscopique par l'apparition dans tout le volume (initialement neutre) d'un moment dipolaire électrique, c'est le phénomène de polarisation.

On caractérise alors l'état électrique du milieu par son moment dipolaire par unité de volume ou, plus précisément, en tout point par la densité de moment dipolaire ou vecteur polarisation  $\vec{P}$  :  $d\vec{p} = \vec{P} \cdot d\tau$

Notons que la polarisation s'exprime en (C/m<sup>2</sup>).

Il faut bien retenir que, sous l'action d'un champ extérieur appliquée  $\vec{E}_0$ , il se crée au sein d'un diélectrique un champ de polarisation  $\vec{P}$  qui est lui-même à l'origine d'un nouveau champ électrique  $\vec{E}_p$  qui modifie le champ appliqué  $\vec{E}_0$  (qui a conduit au phénomène de polarisation). Le champ total :  $\vec{E}_{tot} = \vec{E}_0 + \vec{E}_p$

## 7 CHAMPS ET POTENTIELS DE POLARISATION:

Le vecteur de polarisation qui décrit macroscopiquement l'état électrique d'un isolant est relié directement à la densité macroscopique de charges liées. Nous allons établir ce lien en utilisant nos connaissances sur le dipôle électrique (Première année).

Le potentiel créé par un dipôle électrique de moment  $\vec{p}$  en un point  $M$  repéré par ces coordonnées externes au diélectrique (x, y, z) s'écrit :

$$V_M = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{p} \cdot \vec{U}}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{p} \cdot \vec{r}}{r^3}$$

Considérant un volume infinitésimal  $d\tau$  décrit par un système de coordonnées internes au diélectrique noté ( $\alpha, \beta, \gamma$ ).

En introduisant le fait que :  $\overrightarrow{grad}_x \left( \frac{1}{r} \right) = -\frac{\vec{U}}{r^2} = -\overrightarrow{grad}_\alpha \left( \frac{1}{r} \right)$

$$dV_M = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \overrightarrow{grad}_\alpha \left( \frac{1}{r} \right) \cdot d\vec{p}$$

Par intégration sur le volume de diélectrique :  $div(f \cdot \vec{a}) = f \cdot div(\vec{a}) + \vec{a} \cdot \overrightarrow{grad}f$

$$V_M = \int \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \overrightarrow{grad}_\alpha \left( \frac{1}{r} \right) \cdot \vec{P} \cdot d\tau$$

Sachant que :  $div_\alpha \left( \frac{\vec{P}}{r} \right) = \frac{1}{r} div_\alpha(\vec{P}) + \overrightarrow{grad}_\alpha \left( \frac{1}{r} \right) \cdot \vec{P}$

$$\text{Il vient : } V_M = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int [div_\alpha \left(\frac{\vec{P}}{r}\right) - \frac{1}{r} div_\alpha(\vec{P})] d\tau$$

$$\text{Soit : } V_M = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{1}{r} div_\alpha(-\vec{P}) d\tau + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int div_\alpha \left(\frac{\vec{P}}{r}\right) d\tau$$

$$\text{D'après le théorème d'Ostrogradski : } \iiint div \vec{V} d\tau = \iint \vec{V} d\vec{s}$$

$$\text{On aura : } V_M = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{1}{r} div_\alpha(-\vec{P}) d\tau + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \left(\frac{\vec{P} \cdot \vec{n}}{r}\right) ds$$

Par analogie avec le potentiel créé par des distributions de charges libres en électromagnétisme du vide, l'étude électromagnétisme du diélectrique polarisé peut donc se ramener à un problème d'électromagnétisme dans le vide où les champs ont pour sources les distributions de charges de polarisation de :

$$\text{Densité volumique : } \rho_p = div_\alpha(-\vec{P})$$

$$\text{Densité surfacique : } \sigma_p = \vec{P} \cdot \vec{n}$$

On peut définir une équation de conservation pour les charges de polarisation conduisant à l'introduction d'un courant  $\vec{J}_p$ , puisqu'en dérivant  $\rho_p = div_\alpha(-\vec{P})$  par rapport au temps, on obtient :  $\frac{\partial \rho_p}{\partial t} = div \left(\frac{-\partial \vec{P}}{\partial t}\right)$ , c'est-à-dire une équation de type :  $\frac{\partial \rho_p}{\partial t} + div \vec{J}_p = 0$  avec  $\vec{J}_p = -\frac{\partial \vec{P}}{\partial t}$

## 8 CHAMP ELECTRIQUE $\vec{E}$ MACROSCOPIQUE A L'INTERIEUR D'UN DIELECTRIQUE, VECTEUR $\vec{D}$ :

### 8.1 Forme locale du théorème de Gauss:

$$\oiint \vec{E} d\vec{s} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0}, \text{ d'après le théorème de Gauss - Ostrogradski :}$$

$$\iiint div \vec{E} dv = \frac{1}{\epsilon_0} \iiint \rho_{int} dv \text{ d'où : } div \vec{E} = \frac{\rho_{int}}{\epsilon_0}, (\rho_{int} \in Sur_{Gauss})$$

### 8.2 Vecteur déplacement diélectrique $\vec{D}$ :

Soit un diélectrique polarisé ( $\rho_{pol} \neq 0$ ) et contenant des charges libres ( $\rho_{lib} \neq 0$ ) en  $M \in D$  :

$$div \frac{\rho_{lib} + \rho_{pol}}{\epsilon_0} = \frac{1}{\epsilon_0} (\rho_{lib} - div \vec{P})$$

$$div(\epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}) = \rho_{lib} \text{ et } div(\vec{D}) = \rho_{lib}$$

Avec  $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$  : vecteur déplacement (excitation) électrique C/m<sup>2</sup>, [D]= [P].

#### Remarque

Dans le vide  $M \notin D$  :

$$\checkmark \vec{P} = \vec{0} \Rightarrow div(\vec{D}) = div(\epsilon_0 \vec{E}) = \rho_{lib} \Rightarrow div \vec{E} = \frac{\rho_{lib}}{\epsilon_0}$$

✓ Dans un conducteur en équilibre électrostatique :  $\vec{E}_{int} = \vec{0}, \vec{P} = \vec{0}, \vec{D} = \vec{0}$

✓ Si D est polarisé et non chargé :  $\rho_{lib} = \sigma_{lib} = 0$

$div(\vec{D}) = 0$ , on en déduit que  $\vec{D}$  est à flux conservatif.

$div(\vec{D}) = 0 = div(\epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}) \Rightarrow div(\epsilon_0 \vec{E}) = -div \vec{P} = \rho_{pol} \neq 0$  en général.

$$\vec{\nabla} \times \vec{D} = \vec{\nabla} \times (\epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}) = \epsilon_0 \vec{\nabla} \times \vec{E} + \vec{\nabla} \times \vec{P} \Rightarrow \vec{\nabla} \times \vec{D} = \vec{\nabla} \times \vec{P}$$

D'où  $-\epsilon_0 \vec{E} \neq \vec{P}$ ,  $\vec{E}$  n'est pas toujours à flux conservatif ( $div(\vec{E}) \neq 0$ )

Si  $\vec{P} = \vec{Cst} \Rightarrow div \vec{E} = 0$  et  $\vec{E}$  est à flux conservatif.

### 8.3 Forme intégrale du théorème de Gauss :

Forme locale en point  $M \in D$  :  $div(\vec{D}) = \rho_{lib}$  donc

$$\iiint div \vec{D} d\tau = \iint \vec{D} d\vec{s} = \iiint \rho_{lib} d\tau \Rightarrow \iint \vec{D} d\vec{s} = Q_{lib}$$

$Q_{lib}$  : charge libre contenue dans  $\tau$  englobée par la surface S.

### 9 DIELECTRIQUE LINEAIRE, HOMOGENE ET ISOTROPE (L.H.I):

Définition : un diélectrique est LHI si  $\forall M \in D$ , les permittivités principales  $\epsilon_1 \epsilon_2 \epsilon_3$  prennent la même valeur  $\epsilon$ .

### 10 SUSCEPTIBILITE DIELECTRIQUE D'UN DIELECTRIQUE LHI:

Si  $\epsilon$  est la permittivité d'un tel milieu on a :  $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$  ( $\vec{D}$  et  $\vec{E}$ ) sont colinéaires pour tout

$M \in D$ . On pose  $\chi_e = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} - 1 = \epsilon_r - 1$  or :

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \Rightarrow \vec{P} = \epsilon \vec{E} - \epsilon_0 \vec{E} = \epsilon_0 \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} - 1 \right) \vec{E} = \epsilon_0 \chi_e \vec{E}$$

$\chi_e$  : coefficient sans dimension appelé « susceptibilité diélectrique ».

La relation  $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$  devient  $\vec{D} = \epsilon_0 (1 + \chi_e) \vec{E}$  avec  $\epsilon = \epsilon_0 (1 + \chi_e)$ .

Dans le vide  $\epsilon = \epsilon_0$  d'où le nom « permittivité relative » ou constante diélectrique donnée :

$$\epsilon_r = (1 + \chi_e) = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} > 1.$$

$\epsilon_r$  et  $\chi_e$  sont des nombres sans dimension.  $[\epsilon] = [\epsilon] = F/m$

### Conclusion :

Dans un milieu diélectrique LHI, on a  $\vec{P} = \epsilon_0 \chi_e \vec{E}$  et  $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$  avec  $\epsilon_r = (1 + \chi_e) = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$

exprimant la réponse linéaire de la matière au champ qu'elle subit.

En fait la démarche est inverse, l'expérience montre que pour les champs électriques pas trop intenses utilisés couramment, la polarisation  $\vec{P}$  est proportionnelle au champ total macroscopique  $\vec{E}$ .

En point  $M \in D$  donné, on a

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \chi_e \vec{E} \text{ avec } \vec{E}_{\text{tot}} = \vec{E}_0 + \vec{E}_p$$

$$\text{D'où : } \vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \varepsilon \vec{E} \text{ avec } \varepsilon = \varepsilon_0(1 + \chi_e).$$

Dans un diélectrique LHI  $\text{div}(\vec{D}) = \rho_{\text{lib}} \Rightarrow \text{div}(\vec{E}) = \frac{\rho_{\text{lib}}}{\varepsilon}$ , les équations de D(LHI) se déduisent donc de celle de l'électrostatique du vide en remplaçant  $\varepsilon_0$  par  $\varepsilon$ .

### 10.1 Propriétés de la susceptibilité diélectrique:

- ✓  $\chi_e = \varepsilon_r - 1 > 0$
- ✓ Elle dépend du matériau et de son état physique.
- ✓  $\chi_e$  : constante pour tout point d'un diélectrique homogène.

### 10.2 Exemple de diélectrique LHI polarisé uniformément sans charges libres internes:

$$\begin{cases} \sigma_{\text{tot}} = \sigma_{\text{lib}} + \sigma_{\text{pol}} = \vec{P} \cdot \vec{n} \\ \rho_{\text{tot}} = \rho_{\text{lib}} + \rho_{\text{pol}} = 0 + 0 = 0 \end{cases}$$

$$\text{D(LHI)} : \begin{cases} \vec{P} = \varepsilon_0 \chi_e \vec{E} \\ \vec{D} = \varepsilon \vec{E} \end{cases}$$

## 11 DIFFERENTS TYPES DE POLARISATION DIELECTRIQUE:

Dans les isolants, plusieurs types de polarisation diélectrique peuvent être identifiés suivant la polarisabilité ( $\alpha_g$ ) de chaque élément polaire. On distingue en général quatre grands types de polarisation diélectrique: électronique, atomique, d'orientation et interfaciale.

### 11.1 Polarisation électronique:

Sous l'action d'un champ électrique, le nuage électronique de chaque atome est déplacé légèrement par rapport au noyau créant ainsi un dipôle. Le temps d'établissement de cette polarisation est très court. Elle est observée autour des fréquences optiques ( $10^{15}$  Hz) et s'accompagne d'une émission de lumière.

**11.2 Polarisation atomique (ionique):**

Elle correspond au déplacement d'atomes ou de groupes d'atomes dans la molécule sous l'influence d'un champ électrique externe qui laisse apparaître un moment dipolaire atomique conduisant à la polarisation atomique. Ce phénomène atteint également rapidement l'équilibre et intervient dans la gamme des fréquences infrarouges ( $10^{12}$  à  $10^{13}$  Hz).

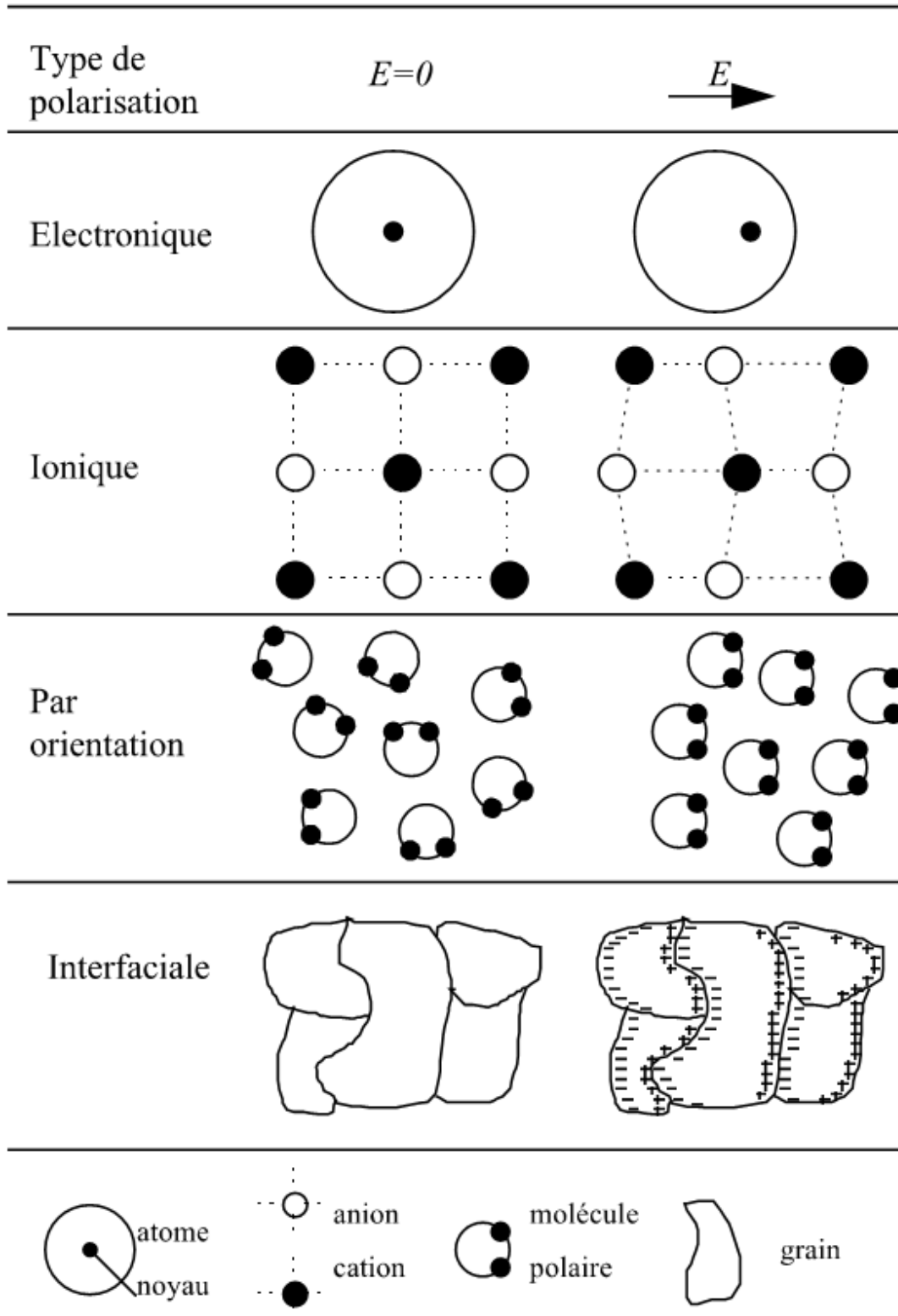
**11.3 Polarisation d'orientation (ou dipolaire ou de Debye):**

Cette polarisation (fortement dépendante de la température) décrit l'orientation des éléments qui possèdent un moment dipolaire permanent. Les dipôles ont tendance à s'orienter suivant le sens du champ appliqué. Le temps d'établissement est beaucoup plus important que dans le cas des deux polarisations précédentes. Il correspond à des fréquences comprises entre  $10^2$  à  $10^5$  Hz selon le type de dipôles.

**11.4 Polarisation interfaciale (ou de Maxwell-Wagner-Sillars):**

Elle apparaît dans les matériaux hétérogènes. Elle provient de l'accumulation de charges aux interfaces entre les différentes phases constituant le matériau lorsque ces différentes phases ont des permittivités et des conductivités différentes. Les temps de relaxation correspondants sont plus longs que dans le cas de la polarisation d'orientation. On la retrouvera à des fréquences très inférieures au domaine des audiofréquences ( $\sim 10^{-1}$  à  $10^2$  Hz) suivant la conductivité des charges. Elle est fortement dépendante de la température.

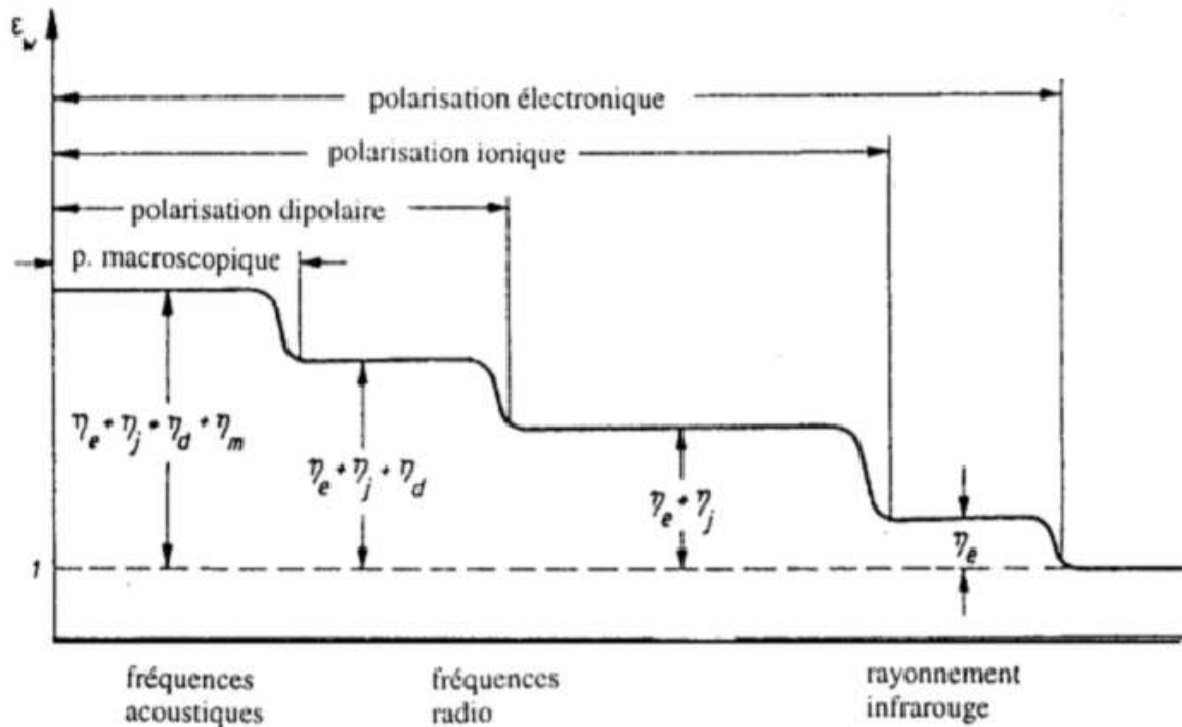




Les déplacements des charges sont très fortement exagérés

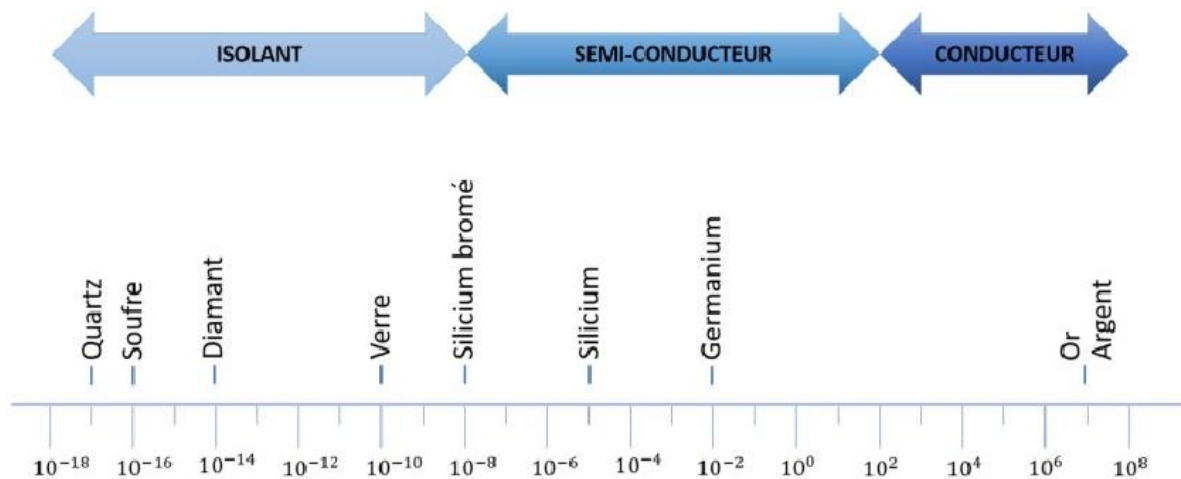
**Remarque :** Quand on applique un champ électrique au matériau, ces différentes polarisations apparaissent successivement selon le temps d'établissement. Les polarisations électronique et atomique ne sont pratiquement pas affectées par la température tandis que la polarisation d'orientation et la polarisation interfaciale dépendent de la température.

## 12 VARIATION DE LA PERMITTIVITE DIELECTRIQUE EN FONCTION DE LA FREQUENCE:



## 13 ROLE DES DIELECTRIQUES DANS UN CONDENSATEUR:

La plupart des condensateurs renferment une feuille de matériau isolant, appelé diélectrique, qui sépare leurs armatures, et cela pour différentes raisons. D'abord les diélectriques empêchent plus efficacement que l'air ou le vide, les charges de passer d'une armature à l'autre, ce qui aurait pour effet de décharger le condensateur. La présence d'un diélectrique permet d'appliquer de plus hautes tensions avant de provoquer la décharge du condensateur. Elle permet aussi de rapprocher les armatures sans risquer qu'elles se touchent, ce qui accroît la capacité.



Conductivité électrique de différents matériaux

### 1. Matériaux isolants

Les isolants sont classés en trois types : **liquides** ; **solides**; **gazeux**.

*Types d'isolants utilisés dans l'industrie électrique :*

Isolants naturels :

- minéraux ;
- organiques.

Isolants synthétiques :

- matières plastiques
- élastomères ;
- composites.

**Matériaux isolants pour transformateurs de puissance**

#### 1. 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.

#### Huiles minérales

Dérivés du pétrole, utilisées dans les transformateurs, les disjoncteurs, les condensateurs et les câbles. Risque d'oxydation à chaud en présence d'oxygène.

Propriétés : rigidité diélectrique :  $G \approx 9$  à  $10$  kV/mm

Facteur de dissipation :  $\tan \delta = 4.10^{-4}$

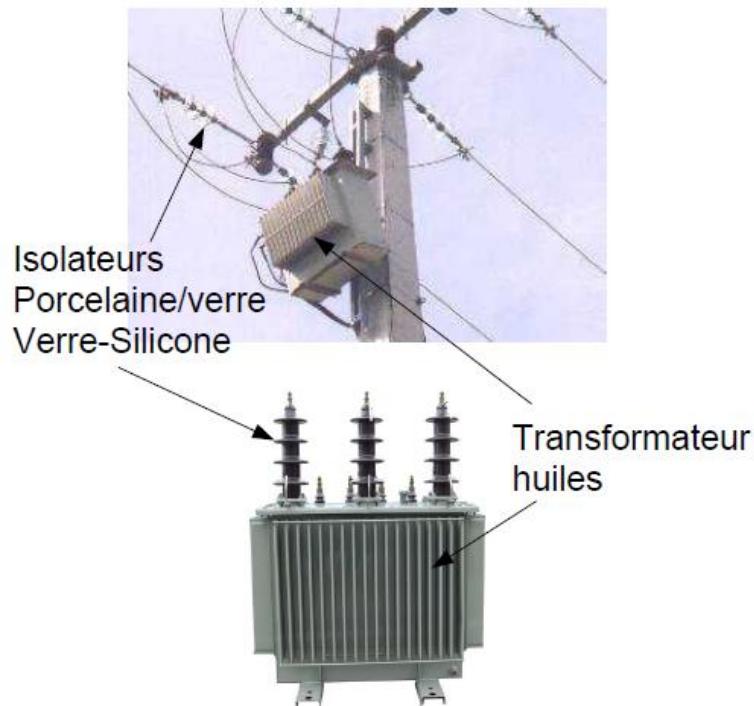
Permittivité relative :  $\epsilon_r = 4$  à  $6$

### 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.



## 2. Isolants solides

Les isolants solides trouvent leurs applications dans un grand nombre de dispositifs de production, de transport, de distribution et d'utilisation de l'énergie électrique. Dans les transformateurs et plus particulièrement dans les transformateurs de puissance, les solides isolants assurent plusieurs fonctions. Ils sont utilisés pour maintenir mécaniquement les bobinages et pour matérialiser les canaux de circulation du liquide de refroidissement. Selon leur nature, les isolants solides sont regroupés en deux catégories : organique ou inorganique.

Les principaux isolants inorganiques regroupent :

- ✓ **Les verres** : essentiellement utilisés pour l'isolement des lignes électriques aériennes et sous forme de fibres dans les isolations composites où ils améliorent les propriétés mécaniques de pièces isolantes plastiques ;
- ✓ **Les céramiques et oxydes** : largement répandus dans l'isolation haute ou basse tension, haute fréquence, sous vide et dans les condensateurs ;

- ✓ *Les micas et produits micacés* : particulièrement importants dans le secteur de l'isolation à la masse des bobinages des stators de machines tournantes de tension nominale comprise entre 1 et 30 kV.
- ✓ Les isolants organiques : largement utilisés dans le domaine de la câblerie, des condensateurs, des alternateurs, des transformateurs et des moteurs et aussi dans les dispositifs électroniques et composants de puissance. Ils se subdivisent entre matériaux naturels (caoutchoucs, paraffine et papier) et synthétiques (élastomères, polymères et composites).

### 3. Isolants gazeux

Dans les conditions normales, un des meilleurs isolants connus est l'air qui nous entoure. Ses caractéristiques thermiques sont supérieures à celles des porcelaines ; il peut aussi agir comme agent de refroidissement et ne coûte absolument rien .Cependant, à des températures élevées, l'air devient bon conducteur par suite du phénomène d'ionisation.

Ces isolants gazeux ayant des propriétés particulières :

- ✓ Rigidité diélectrique variable suivant la nature de gaz;
- ✓ Permittivité faible, les gaz sont auto-générateurs;
- ✓ Phénomène d'ionisation des gaz;
- ✓ Légers et inflammables.

Les principaux isolants gazeux sont : l'air atmosphérique, l'azote, gaz rares de l'air, l'hydrogène et l'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>) qui est le gaz le plus utilisé dans la pratique

Un isolateur est un composant électrotechnique conçu pour fixer, maintenir ou soutenir les conducteurs électriques nus. On trouve des isolateurs surtout sur les lignes à haute tension, mais également sur les lignes télégraphiques ou dans les postes électriques. Ils assurent l'isolation entre les conducteurs et les pylônes.

Il ne faut pas confondre isolant et isolateur : le premier sert à désigner la propriété d'un matériau qui consiste à ne pas conduire l'électricité ; le second caractérise ce même matériau en désignant le composant fait de matériau isolant.

Historiquement les isolateurs étaient réalisés en verre, ou céramique, on en trouve désormais en matériau synthétique.

Les isolateurs verre ou céramique des lignes à haute tension ont généralement la forme d'une assiette. On les associe entre eux pour former des chaînes d'isolateurs. On trouve aussi des isolateurs sous forme de colonne (voir photo ci contre), avec toujours un profil en ailettes

pour allonger la *ligne de fuite*, c'est-à-dire la distance aux limites de l'isolateur, mesurée en suivant le profil de l'isolateur.

Depuis la fin du XX<sup>e</sup> siècle, les matériaux composites sont de plus en plus utilisés pour fabriquer des isolateurs: en réalisant un axe central en fibre de verre et en surmoulant par dessus une matière silicone ou EPDM. Les isolateurs composites sont plus légers, généralement moins cher et, présentent une excellente hydrophobicité. Ils sont surtout prisés pour les zones fortement polluées et dans les zones urbaines où ils résistent mieux au vandalisme.

### Applications:

L'isolateur est formé par un isolant auquel sont fixés deux pièces métalliques  $M_1$  et  $M_2$ .

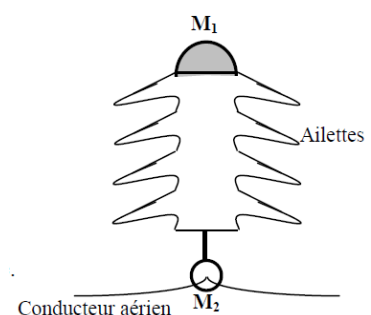
Isolant : Verre, céramique, matériaux synthétiques.

$M_1$  se fixe au pylône ;  $M_2$  porte le conducteur.

Rôle : l'isolateur possède un double rôle

- Rôle mécanique : porte le conducteur
- Rôle électrique : isole le conducteur par rapport au pylône.

L'isolation entre les conducteurs et les pylônes est assurée par des isolateurs. Ceux-ci sont réalisés en verre, en céramique, ou en matériau synthétique. Les isolateurs en verre ou céramique ont en général la forme d'une assiette. On les associe entre eux pour former des chaînes d'isolateurs. Plus la tension de la ligne est élevée, plus le nombre d'isolateurs dans la chaîne est important. Sur une ligne 400 kV (400 000V), les chaînes d'isolateurs comportent 19 assiettes. On peut alors deviner la tension des lignes en multipliant le nombre d'isolateurs par 20 kV environ.



*isolateur de tramway*

Isolateur 225 kV

Isolateur 63 kV

*Transformateur 225/63 kV immergé dans l'huile**Sectionneur 63 kV*Isolateurs  
Bras de sectionneur*Disjoncteur 63 kV au SF6*

Les isolateurs sont des composants indispensables au transport et à la distribution de l'énergie électrique. Leur fonction est de réaliser une liaison entre des conducteurs HT et la terre.

- Ils maintiennent les conducteurs dans la position spécifiée (isolateurs d'alignement et d'ancrage) ;
- Ils assurent la transition entre l'isolation interne (huile, SF6) et l'isolation externe (air atmosphérique), ils permettent de raccorder les matériels électriques au réseau (traversées de transformateur, extrémités de câbles) et ils constituent, également, l'enveloppe de certains appareils (disjoncteurs, parafoudres, réducteurs de mesure).

*Quelques formes d'isolateurs :*





**BIBLIOGRAPHIE**

- [1] J.Y. Haggège, cours de technologie générale, Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Radès, 2003.
- [2] Bechara Mireille, Thèse de l'Université de Toulouse 2011.
- [3] Viet Hung DANG, Thèse de doctorat, L'école centrale de Lyon, 2011.
- [4] Djilali Ben youcef, Techniques de la Haute Tension, Université Hassiba Benbouali de Chlef.
- [5] Abdelhakim Nafidi, Support de cours, Université Ibn Zohr, Maroc 2012
- [6] M. Fogiel, The electromagnetics problem solver, Research and Education Association, Piscatway, New Jersey 1995.
- [7] J. L. Queyrel et J. Mesplède, Précis de physique « Cours et exercices résolus » Bréal 1995.