

CHAPITRE 2

MATÉRIAUX DIÉLECTRIQUES

2.1 Introduction

Dès les premiers développements des théories modernes des structures de la matière, notamment les molécules et les atomes, le concept de polarisation introduit par Faraday a été justifié. Les besoins industriels actuels suscitent de nombreuses innovations nécessitant l'étude des matériaux isolants, notamment ceux utilisés dans les câbles d'énergie, les transformateurs et les machines électriques.

Dans ce chapitre, on se propose de définir les matériaux isolants, conducteurs et semi-conducteurs et de traiter de la réponse diélectrique et de la rigidité diélectrique de ces matériaux.

2.2 Matériaux isolants, semi-conducteurs et conducteurs

Les solides sont généralement classés en trois catégories suivant leurs résistivités électriques :

- Les conducteurs (métaux) ont une résistivité de l'ordre de $10^{-5} \Omega.cm$ ou inférieure
- Les isolants ou diélectriques ont une résistivité généralement supérieure à $10^{12} \Omega.cm$
- Les semi-conducteurs ont une résistivité qui varie entre $10^{-5} \Omega.cm$ et $10^{12} \Omega.cm$

Les solides cristallins respectent le modèle des bandes d'énergie. La bande de valence est la dernière bande partiellement ou totalement remplie, la bande interdite est au milieu entre la bande de valence et celle de conduction. Elle se caractérise par sa largeur

énergétique E_g qui s'appelle également énergie d'activation intrinsèque. La bande de conduction est la bande permise située au dessus de la bande interdite.

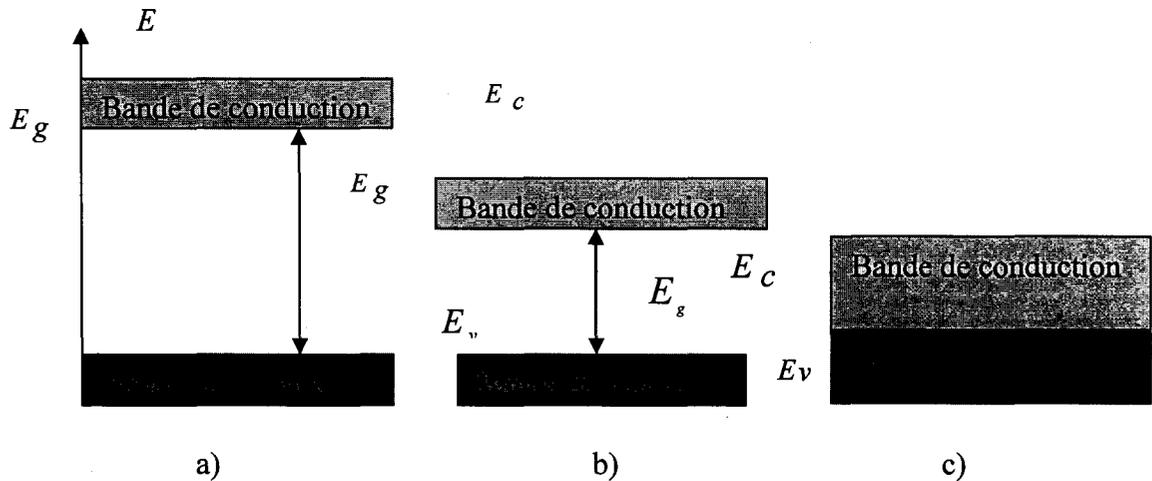


Figure 6 a) isolant, E_g élevée (quelque eV), b) Semi-conducteur, $E_g \approx 1eV$
 c) Conducteur, recouvrement des bandes.

Par définition, un isolant est une substance qui possède une résistance suffisamment élevée pour être utilisée comme séparateur entre des pièces et des organes conducteurs ayant une différence de potentiel électrique. On appelle souvent les isolants matériaux diélectriques, c'est-à-dire, les matériaux ayant des propriétés électriques polarisables dans un champ électrique.

Pour mieux comprendre le phénomène de polarisation des diélectriques, prenons le cas d'un condensateur plan-plan ayant des armatures planes et parallèles, de grandes surfaces, placées dans le vide. En appliquant une tension continue à ses armatures, le condensateur va acquérir une densité de charge, Q_s et $-Q_s$.

Sa capacité C_{i_0} par unité de surface est alors :

$$C_{i_0} = \frac{Q_s}{U} \quad (2.1)$$

où U est la tension appliquée entre les armatures.

Si on place un matériau diélectrique isotropique entre les électrodes, les molécules contenues dans le matériau diélectrique vont se polariser en présence du champ électrique créé par les charges déposées sur les électrodes. Cette polarisation attire des charges négatives à l'électrode chargée positivement et des charges positives à l'électrode chargée négativement. Conséquemment, la polarisation demande un apport de charges supplémentaires de la source afin de maintenir une différence de potentiel U . Ce déplacement de charges génère un courant dit de polarisation qui peut être mesuré par un circuit extérieur.

On appelle P le supplément de densité de charges fixées sur les armatures du condensateur qui est fourni par l'alimentation électrique et qui permettra de maintenir une valeur de tension U constante aux bornes du condensateur. Donc, en présence d'un diélectrique, la capacité de ce dernier par unité de surface devient :

$$C_i = \frac{Q_S + P}{U} \quad (2.2)$$

La permittivité statique relative, ϵ_r , des matériaux diélectriques sera donc plus importante si la polarisabilité des molécules est élevée.

En effet, cette dernière est donnée par :

$$\epsilon_r = 1 + \frac{P}{Q_S} \quad (2.3)$$

Dans les matériaux diélectriques, il existe plusieurs types de polarisation. L'une est de type électronique, une autre est de type atomique, une autre est de type dipolaire et enfin une polarisation est due aux déplacements de charges d'espace. L'application d'un champ électrique impose le déplacement des électrons par rapport au noyau de chaque atome qui constitue la molécule. C'est le phénomène de polarisation électronique. Pour ce qui est de la polarisation atomique, le champ appliqué impose le déplacement des électrons atomiques par rapport aux autres noyaux des autres atomes.

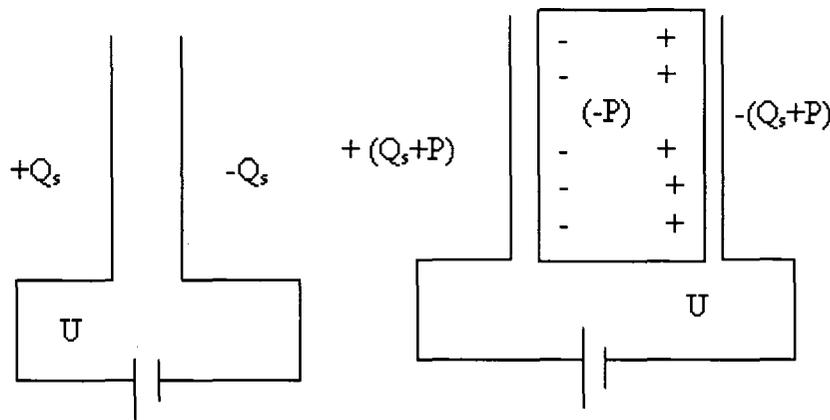


Figure 7 Présence de charge sur la surface du matériau diélectrique

Un matériau diélectrique de type polaire présente un mécanisme de polarisation qui contribue à sa polarisation totale, la polarisation dipolaire. Dans ce cas, le champ électrique permet d'orienter les dipôles permanents (qui sont distribués d'une façon aléatoire) dans sa direction. La température est un paramètre important puisqu'elle conditionne l'agitation thermique des dipôles pour le cas des matériaux polaires.

Une importante relation entre la permittivité statique isotropique ε d'un matériau diélectrique et la polarisation P , produite par un champ électrique E , peut s'écrire comme suit :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{P}{E} \quad (2.4)$$

avec $\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$, la permittivité de vide.

L'application de la loi de gauss dans le cas d'un condensateur plan nous donne la

relation (2.3) suivante: $\varepsilon_r = 1 + \frac{P}{Q_S}$

Généralement, la permittivité relative des matériaux diélectriques non polaires correspond au carré de l'indice de réfraction $\varepsilon_r = n^2$.

Le tableau I donne la constante diélectrique de quelques matériaux polaires et non polaires. En fait, $\varepsilon_r \gg n^2$ pour les matériaux polaires à cause de la polarisation dipolaire

Tableau I

Carré de l'indice de réfraction et la constante diélectrique de quelques matériaux

polaire			Non polaire		
	ϵ_r	n^2		ϵ_r	n^2
Chloroforme	4.81	2.090	n- Hexane	1.89	1.89
Méthanol	33.64	1.764	n- Heptane	1.924	1.92
Éthanol	25.07	1.854	Tétrachlorure de carbone	2.234	2.132
Acétone	21.20	1.847	Di sulfure de carbone	2.647	2.650
Chlorobenzène	5.649	2.324	Benzène	2.283	2.253
Nitrobenzène	35.96	2.410	Cyclohexane	2.023	2.033
Toluène	2.379	2.239			
Eau	80.37	1.78			

2.3 Les classes de matériaux isolants

Les matériaux isolants ou diélectriques peuvent être regroupés en deux grandes catégories, soit les isolants organiques et les isolants inorganiques.

Le tableau II fournit une description de ces deux catégories de matériaux isolants

Tableau II

La description des deux grandes catégories d'isolants

catégorie	description
Les isolants inorganiques	Ils peuvent supporter des températures supérieures à 1000°C, soit le mica, la porcelaine, l'air, etc.
Les isolants organiques	Ils sont composées de longues chaînes moléculaires de carbone et d'hydrogène et ne peuvent pas supporter des températures élevées sans se décomposer ou fondre, soit le caoutchouc, le papier, l'huile, le coton, les matériaux thermoplastiques, etc.

L'existence des isolants synthétiques a élargi le nombre d'isolants disponibles sur le marché de sorte qu'il est difficile d'en faire une liste complète. Leurs propriétés et leurs caractéristiques thermiques, électriques et mécaniques sont en général supérieures à celles des isolants naturels. De plus, il est intéressant de combiner plusieurs composantes pour obtenir ainsi un isolant possédant des propriétés performantes. Les matériaux synthétiques sont utilisés pour couvrir les fils conducteurs, les câbles de transport d'énergie, les bobines de moteurs, de transformateurs, etc... Il existe une classification des isolants basée sur les conditions extrêmes auxquelles ceux-ci peuvent être exposés. Cette classification est très importante lors d'un choix de matériaux isolants pour la construction d'un équipement électrique.

La classification présentée ci-dessous (tableau III) de ces isolants est basée sur leur stabilité thermique.

Tableau III

La classification thermique des isolants

Classe	Description
Classe A (maintenant classe 105°C)	Des matériaux tels que le coton, la soie et le papier convenablement imprégné dans un liquide diélectrique comme l'huile. Ils doivent démontrer une durée de vie thermique similaire à 105°C.
Classe B (maintenant classe 130°C)	Des matériaux tels que le mica, la fibre de verre, etc., utilisés avec des substances adhésives convenables. Ils doivent démontrer une durée de vie thermique similaire à 130°C.
Classe F (maintenant classe 155°C)	Des matériaux tels que le mica, la fibre de verre, etc., utilisés avec des substances adhésives convenables. Ils doivent démontrer une durée de vie thermique similaire à 155°C.
Classe H (maintenant classe 180°C)	Des matériaux tels que l'élastomère à la silicone, le mica, la fibre de verre, etc., utilisés avec des substances adhésives convenables, tel que les résines à la silicone. Ils doivent démontrer une durée de vie thermique similaire à 180°C.
Classe N (maintenant classe 200°C)	Ils doivent démontrer une durée de vie thermique similaire à 200°C.
Classe R (maintenant classe 220°C)	Ils doivent démontrer une durée de vie thermique similaire à 220°C.
Classe S (maintenant classe 240°C)	Ils doivent démontrer une durée de vie thermique similaire à 240°C.
Classe C (maintenant classe >240°C)	Des matériaux tels que le mica, la porcelaine, le verre, le quartz ainsi que des matériaux inorganiques semblables. Ils doivent démontrer une durée de vie thermique similaire à 240°C.

Les quatre premières classes sont les plus fréquemment utilisées dans les domaines du système d'isolation en électrotechnique tel qu'indiqué dans la norme IEEE Std 43-2000.

2.4 Dispersion diélectrique

Les développements industriels et ses diverses applications imposent non seulement l'étude du comportement d'un matériau diélectrique sous l'action d'un champ électrique permanent, mais aussi l'analyse des propriétés diélectriques de ces matériaux dans un très large spectre de fréquence, qui varie entre la fréquence industrielle (60 Hz) et parfois inférieure dans certaines applications jusqu'à quelques centaines de gigahertz (GHz).

Pour bien analyser ces propriétés, il faut prendre en considération les différents types de charges et d'associations de charges. En général, la matière se compose de plusieurs éléments naturels ou corps simples qui peuvent être représentés par des symboles (Si, Ge, H,..., U). Ces éléments composés sont constitués de combinaisons d'atomes (molécules), dont la dimension est à l'échelle nanométrique.

Tableau IV

Masse et charge des électrons, protons et neutrons respectivement

	Électron	Proton	Neutron
Masse	$m = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$	$m = 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ $= 1838 \cdot m_e$	$m = 1,674 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ $= 1840 \cdot m_e$
Charge	$-e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	$-e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	0

Les électrons externes ou de valence. Ils permettent la polarisabilité atomique ou moléculaire asymétrique lors de l'application d'un champ électrique. Ces électrons sont aussi responsables des liaisons chimiques entre les atomes.

Ils gravitent autour de l'atome suivant des orbites compris dans la bande de valence de cet atome (figure 6).

Les électrons internes. Ils gravitent autour de l'atome suivant des orbites dont le niveau d'énergie est inférieur à celles faisant partie de la bande de valence. Les électrons internes sont liés au noyau. Ces électrons résonnent dans le domaine des rayons X , là où la longueur d'onde du champ électromagnétique est inférieure à $10^{-10} m$, ce qui correspond à une énergie assez élevée de l'ordre de $10^4 eV$.

Les électrons de conduction. On les appelle aussi électrons libres. Ils sont soumis à deux contraintes physiques, le mécanisme de diffusion représenté par le gradient de concentration ∇N et le mécanisme de conduction représenté par le gradient de potentiel électrique ∇U . Ils gravitent autour de l'atome suivant des orbites faisant partie de la bande de conduction de cet atome (figure 6).

Les ions libres. Ces ions se mettent en mouvement à faible vitesse par rapport aux électrons libres, suite à l'application d'un champ électrique. Leur influence est importante dans le cas des liquides diélectriques comme l'huile utilisé dans les transformateurs.

Les ions liés. Ils sont généralement liés à d'autres ions de signe opposé afin de former des dipôles moléculaires (par exemple le cas du Na^+Cl^-). Sous l'effet du champ électrique ils sont soumis à un couple qui les oriente suivant sa direction.

Les multipôles. Les dipôles qui sont antiparallèles forment ainsi les quadripôles qui seront soumis à un couple faible lors de l'application d'un champ électrique divergent.

Tel qu'illustré à la figure 8 [42, 75], chaque catégorie de porteurs de charge possède une fréquence qui lui est propre, sa fréquence de résonance.

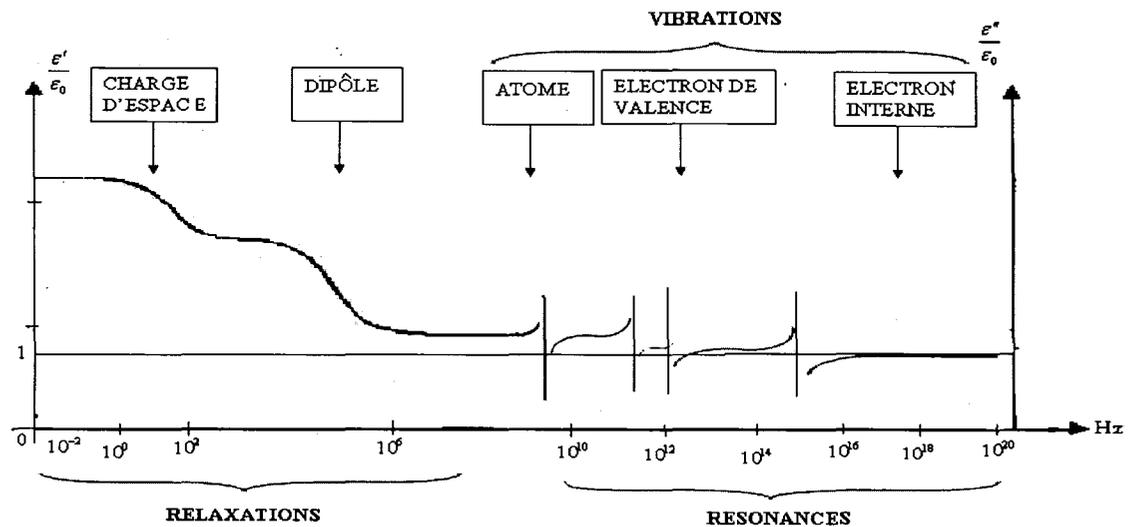


Figure 8 la permittivité complexe d'un matériau polaire contenant des charges d'espace

La polarisabilité des matériaux (valeur relative) dépend de la fréquence du champ électrique. En effet, selon la fréquence choisie, on peut mettre en évidence plusieurs phénomènes tel que la polarisation ionique, la polarisation électronique, la polarisation par changement d'orientation des dipôles, et pour certaines fréquences, on obtient parfois des résonances.

En effet à certaines fréquences précises, les électrons internes commencent à vibrer sous l'action du champ appliqué et créent ainsi la polarisation électronique du matériau, ce qui entraîne l'augmentation de sa permittivité ϵ . Ces fréquences s'appellent souvent la fréquence de résonance.

La permittivité ne cesse de croître lorsque la fréquence décroît à partir du domaine optique jusqu'aux basses fréquences.

2.5 Rigidité diélectrique

Le tableau suivant donne la rigidité diélectrique de certains matériaux isolants ainsi que leur permittivité relative ϵ_r .

Tableau V
Rigidité et constant diélectrique de quelques matériaux isolants [42]

Isolant	Propriétés électriques	
	Rigidité diélectrique	Constante diélectrique
	MV/m ou kV/mm	ϵ_r
Air sec	3	1
Azote (N ₂)	3,5	1
Hexafluorure de Soufre (SF ₆)	30 (à 400 kPa)	1
Hydrogène	2,7	1
Oxygène	3	1
Caoutchouc	12 à 20	4
Époxy	20	3,3
Huile minérale	10	2,2
Mica	40 à 240	7
Nylon	16	4,1
Oxyde de	3	4
Papier imprégné	14	4 à 7
Polyamide	40	3,7
Polycarbonate	25	3,0
Polyéthylène	40	2,3
Chlorure de polyvinyle (PVC)	50	3,7
Polyimide	200	3,8
Polyuréthane	35	3,6
Porcelaine	4	6
Silicone	10	-
Téflon	20	2
Verre	100	5 à 7

2.6 Conclusion

Cette étude a permis d'introduire le concept de matériaux diélectriques. Ces matériaux se caractérisent par l'absence des charges autres que les noyaux atomiques, les électrons des couches internes, les électrons des couches de valence et les charges immobiles dans le champ. Cependant, est-ce que dans la réalité existent des isolants parfaits? Sinon comment peut-on caractériser les bons isolants?

Dans le chapitre suivant on se propose de caractériser l'état des matériaux diélectriques à travers des mesures diélectriques.