

CHAPITRE I

SOURCES MICROSCOPIQUES DE LA POLARISATION EN REGIME STATIQUE

I- DEFINITION

Les isolants ou diélectriques sont des matériaux ayant une résistivité très élevée : 10^8 à 10^{16} $\Omega.m$, car ils contiennent très peu d'électrons libres. Un isolant est caractérisé par ses propriétés électriques, mécaniques, chimiques et thermiques. Un bon isolant ne devrait pas laisser passer de courant lorsqu'il est soumis à une tension continue. Autrement dit, sa résistance en CC doit être infiniment grande. Cependant, en pratique, un courant de fuite très faible circule dans tous les matériaux isolants utilisés en HT continue. Le courant passant à travers un isolant en HT continue est également constant et est appelé courant résiduel. En HT alternative, n'importe quel matériau isolant laisserait passer un courant capacitif. Les isolants sont utilisés pour :

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

LES CONDUCTEURS ont des charges libres dont les porteurs peuvent se déplacer dans toute la masse du matériau. Exemple: électrons (métaux), ions (électrolytes) ions et électrons(plasmas). Soit un milieu conducteur en équilibre électrostatique. Sous le champ électrique la charge q subit la force:

$$\vec{F} = q\vec{E} = \vec{0} \text{ (équilibre)} \rightarrow \vec{E}_{int} = \vec{0} \text{ et } -\overrightarrow{grad} V_{int} = \vec{0} \Rightarrow V_{int} = cte,$$

$$\text{Or } \text{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} = 0 \Rightarrow \rho_{int} = 0$$

Par conséquent toute la charge est répartie en surface. ρ_{int} est la densité volumique de charge intérieure.

UN MILIEU DIELECTRIQUE est un milieu isolant neutre où il n'y a pas de charges électriques libres et mobiles. Il est formé d'atomes et de molécules. Le champ électrique peut être non nul à l'intérieur du diélectrique.

Selon le modèle des bandes d'énergie la matière devient diélectrique, c'est à dire mauvaise conductrice de l'électricité, quand les bandes de conduction et de valence sont séparées par une énergie supérieure à 5 eV. Alors, un très petit nombre seulement d'électrons reçoivent, à température ordinaire, l'énergie thermique nécessaire pour effectuer une transition dans la bande de conduction. Quand la température s'élève, la probabilité de transition augmente, et l'on observe pour la conductivité σ une dépendance du type :

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-W/k_B T)$$

W est interprété comme une énergie d'activation du processus de conduction. La relation (4.1) est valable dans les diélectriques cristallins et amorphes, ainsi que les diélectriques partiellement cristallins tels que les polymères.

II. SCHEMATISATION D'UN DIELECTRIQUE

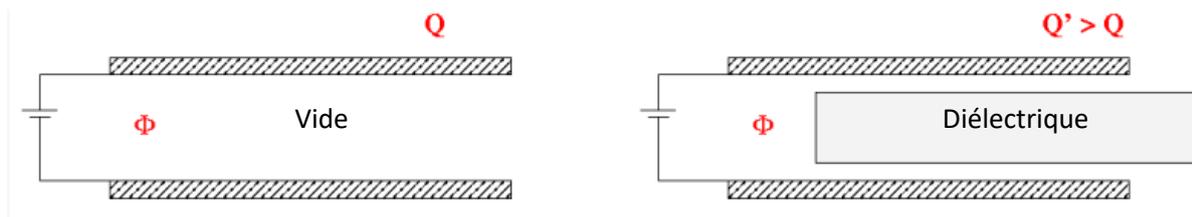
Schématiquement, on peut considérer les diélectriques comme des substances dans lesquelles tous les électrons sont si fortement liés à leur(s) atome(s) qu'ils ne peuvent être responsables d'un courant électrique. Dans ces conditions, un courant d'origine ionique est également exclu.

Le fait que les charges présentes dans un diélectrique ne soient pas libres ne signifie nullement qu'elles sont liées de façon absolument rigide les unes aux autres. En particulier, un champ électrique appliqué E déplace légèrement les charges positives et négatives les unes par rapport aux autres, provoquant l'apparition de dipôles électriques. Plusieurs mécanismes différents concourent à l'apparition de ces dipôles. Si E varie au cours du temps, sinusodalement par exemple, on observe à partir de certaines fréquences, un déphasage entre ce champ et l'établissement des dipôles. Ce déphasage provoque la dissipation d'énergie responsable des pertes diélectriques. Enfin, si le champ électrique ou la température dépassent certaines valeurs, une conduction électrique peut se développer de façon brutale, détruisant le diélectrique localement ou dans sa totalité. La conductivité σ , la permittivité ϵ , les pertes en régime variable $\tan \delta$, le champ électrique maximum admissible E_c sont les quatre grandeurs au moyen desquelles l'ingénieur électricien caractérise le plus souvent un diélectrique. La permittivité et une partie des pertes diélectriques sont liées directement au processus de polarisation (apparition des dipôles). La conductivité et le champ maximum admissible dépendent fortement de la pureté et de la structure des matériaux. L'étude de ces deux grandeurs est essentiellement expérimentale. Diélectrique et isolant sont en principe synonymes, bien qu'on parle plus volontiers d'isolant quand les valeurs de σ et E_c sont les plus importantes, et de diélectrique quand ce sont celles de ϵ et $\tan \delta$. Par exemple on dit l'isolant d'un câble et le diélectrique d'un condensateur. Certains isolants développés et utilisés dès le siècle dernier ont des propriétés remarquables et sont encore employés actuellement comme le papier, l'huile minérale, le verre, etc. L'industrie des polymères et de récents développements dans le domaine des céramiques marquent aujourd'hui très fortement le marché des isolants.

III. POLARISATION EN REGIME STATIQUE

On considère des isolants, au sein desquels on ne peut trouver de courant (macroscopique) de charges libres. Le champ E peut y être non nul.

- **Expérience de Faraday** : L'introduction d'un isolant entre les armatures d'un condensateur en modifie la capacité en l'augmentant:



Dans ce chapitre, on considèrera des champs éventuellement variables dans le temps.

Une molécule peut être assimilée à grande distance à un dipôle. Un milieu à structure moléculaire sera caractérisé, à grande distance, par sa densité volumique de moments dipolaires (électriques) \vec{P} :

$$\vec{P} = \frac{d\vec{p}}{dV}$$

L'unité de \vec{P} est le coulomb par mètre carré (C. m⁻²), celle de \vec{p} le coulomb(C).

Un milieu diélectrique est une substance qui peut acquérir un moment dipolaire électrique sous l'action d'un champ électrique extérieur.

- LA POLARISATION PEUT ETRE SPONTANEE OU INDUITE.

La polarisation spontanée (très rare) concerne les milieux :

- Pyro-électriques (spontanément polarisés lorsqu'ils sont chauffés) Exemple : la tourmaline.
- Ferro-électriques (une polarisation persiste après qu'ils aient été soumis pendant un temps à un champ électrique extérieur) Exemple : le titanate de baryum (BaTiO₃).

La polarisation induite concerne a priori tous les matériaux

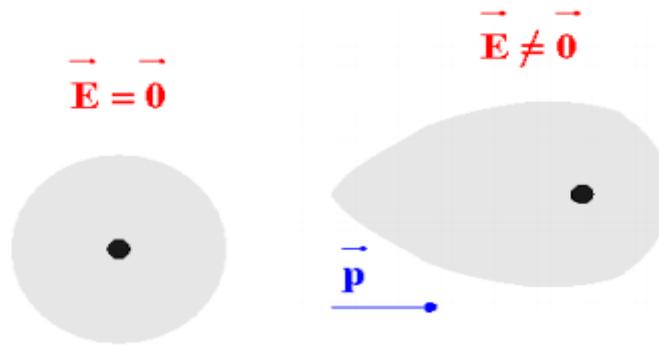
1. MOMENTS DIPOLAIRES DES ATOMES ET DES MOLECULES

a. CAS D'UN ATOME

Un atome isolé dans son état fondamental aura un moment dipolaire nul puisque les barycentres moyens G⁺ et G⁻ des charges positives et négatives respectivement seront superposés (principe de Curie)

Un champ E appliqué va décaler G⁺ et induire un moment dipolaire (électrique).

Ceci reste valable tant que le champ appliqué E est inférieur au seuil d'ionisation (par exemple He, Ne, Ar, Kr (gaz nobles)).



b. CAS D'UNE MOLECULE

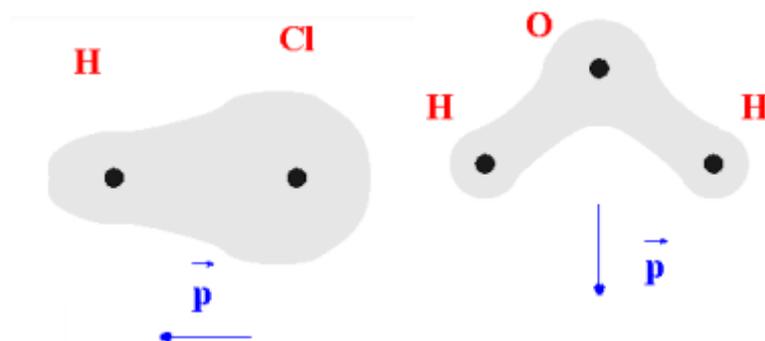
Il existe deux types de molécules, en fonction des positions relatives des barycentres G^+ et G^- :

Les molécules apolaires possèdent un centre de symétrie:

- Mol. diatomiques constituées du même atome (H_2 , N_2 , O_2)
- Mol. linéaires (CO_2)
- Mol. à symétrie tétragonale ou benzénique (CH_4 , C_6H_6)

Les molécules polaires ne possèdent pas de centre de symétrie:

- Molécules diatomiques constituées de 2 atomes différents (HCl) ou molécules non linéaires (H_2O)
- Molécules plus complexes



c. MOMENTS DIPOLES PERMANENTS ET DIPOLES INDUITS

- **Les molécules polaires** possèdent un moment permanent.

- **Les molécules apolaires** sont polarisables par un champ E externe : elles se polarisent mutuellement sous l'action du moment dipolaire électrique instantané de l'autre molécule.

Pour une molécule apolaire, il peut exister les 2 types de moments:

- Entre dipôles permanents : force de Keesom
- Entre dipôles permanents et induits : force de Debye
- Entre dipôles induits : force de London

d. ORDRES DE GRANDEUR

Les distances inter-moléculaires sont l'ordre de 0,1 nm, les moments dipolaires sont en ordre de grandeur:

$$p \approx e d \approx 1,6 \times 10^{-19} \times 10^{-10} \approx 1,6 10^{-29} \text{ Cm}$$

On exprime souvent les moments dipolaires en Debye $1D = 10^{-18}$ unité CGS de moment dipolaire.

$$1 D \approx 0,3336 \times 10^{-29} \text{ Cm} \approx \frac{1}{3} 10^{-29} \text{ Cm}$$

Les moments dipolaires sont alors voisins de l'unité : 1,08 pour HCl ; 1,85 pour H₂O et 1,5 pour NH₃

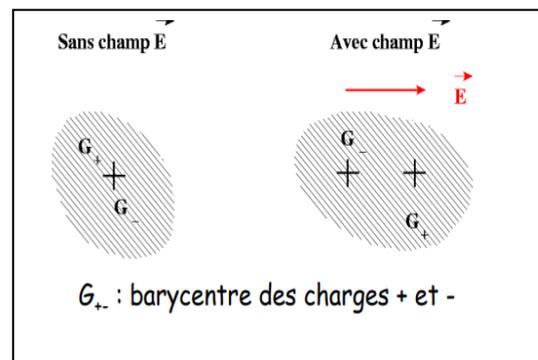
2. POLARISATION ELECTRONIQUE

Elle concerne tous les milieux et résulte du déplacement des nuages électroniques autour des atomes sous l'action d'un champ E . On observe expérimentalement que :

- Pour une molécule apolaire

$$\vec{p} = \alpha \epsilon_0 \vec{E}_\ell$$

α : polarisabilité de la molécule



- Pour une molécule polaire

$$\delta\vec{p} = \alpha \epsilon_0 \vec{E}_\ell$$

- Sous l'action d'un champ E, un milieu va acquérir une polarisation supplémentaire P donnée par :

$$\vec{P} = n \vec{p} = n \alpha \epsilon_0 \vec{E}_\ell$$

2. POLARISATION IONIQUE

Si une distribution de charges (globalement neutre) est soumise à un champ E, les charges + et - se séparent légèrement d'où apparition d'un moment dipolaire :

- Au niveau moléculaire (déformation du nuage électronique) : Polarisation électronique
- Au niveau du réseau cristallin (déformation des mailles): Polarisation ionique

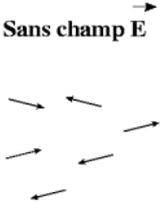
La polarisation ionique s'ajoute à la polarisation électronique qui apparaît pour un champ plus faible. On appelle parfois polarisation par déformation les polarisations électronique et ionique.

3. POLARISATION DIPOLAIRE

Cette polarisation appelée aussi polarisation par orientation concerne les molécules qui possèdent un moment dipolaire électrique permanent (H₂O, HCl).

Les dipôles se répartissent avec une orientation aléatoire

Sans champ E

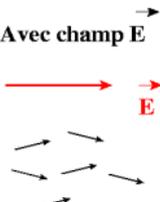


⇒ moyenne nulle car n très élevé

$$\vec{P} = \frac{1}{V} \sum \vec{p} = \vec{0}$$

Les dipôles tendent à minimiser leur énergie potentielle

Avec champ E



⇒ orientation préférentielle dans le sens du champ

$$E_p = - \vec{p} \cdot \vec{E}$$

$$\vec{0} \leq \vec{P} \leq n \vec{p}$$

n est la densité moléculaire volumique.

On retiendra que la polarisation dipolaire varie fortement avec la température :

■ Langevin a montré par la physique statistique que

$$P(x) = n p L(x) \quad \text{avec} \quad L(x) = \coth(x) - \frac{1}{x} \quad \text{et} \quad x = \frac{p E}{k_B T}$$

$L(x)$: fonction de Langevin

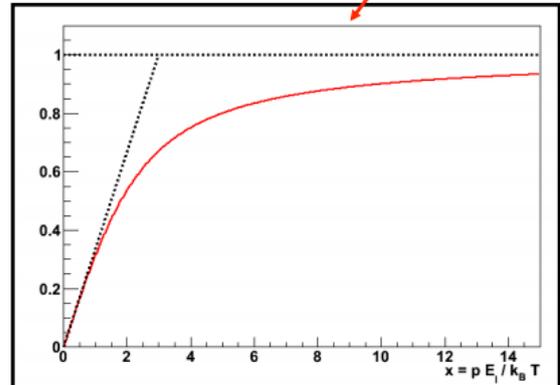
□ Si $x \ll 1$ ($T \approx 300$ K) : $P // E$

$$\vec{P} = n \alpha \varepsilon_0 \vec{E} \Rightarrow \alpha = \frac{p^2}{3 \varepsilon_0 k_B T}$$

▲ Forte variation avec T

□ Si $x \gg 1$: $P \approx n p$

▲ Les dipôles sont tous alignés sur le champ : saturation de la polarisation



$$\alpha_{or} = \frac{p^2}{3 \varepsilon_0 k_B T}$$

α_{or} est la polarisabilité d'orientation ou dipolaire

Ce n'est pas le cas de la polarisation par déformation : La polarisation électronique ne dépend que de la nature de la molécule et la polarisation ionique ne dépend que de la structure du cristal.

