

I. Introduction :

Un grand écart entre la bande de valence et la bande de conduction C.d.r (une énergie supérieure à 5 eV) la matière devient diélectrique,. L'énergie thermique nécessaire pour exciter les électrons est suffisante pour fondre le solide (valences covalentes et ioniques).

Le résultat expérimental le plus important sur les diélectriques isolants était la découverte faite par Faraday et qui montre que la capacité d'un condensateur croît si l'espace entre les armatures du condensateur est rempli par un matériau diélectrique isolant. Si C est la capacité du condensateur rempli et C_0 la capacité du condensateur vide; le rapport C/C_0 , est supérieure à 1, indépendant des dimensions des armatures métalliques et dépend uniquement des caractéristique du diélectrique utilisé. On pose alors: $C = \epsilon_r C_0$

Où ϵ_r est appelée permittivité relative ou "constante diélectrique". D'autre resultats montre

que quand la température s'élève la probabilité de transition BV à BC augmente, et l'on observe pour la conductivité σ une dépendance du type :

$$\sigma = \sigma_0 \exp (-W/k_B T) \quad (\text{III.1})$$

W est interprété comme une énergie d'activation du processus de conduction. La relation (III.1) est valable dans les diélectriques cristallins et amorphes, ainsi que les diélectriques partiellement cristallins tels que les polymères.

Le terme "**isolant**" est appliqué aux matériaux dont la fonction principale est d'isoler un système électrique de son environnement. L'utilisation des matériaux isolant nécessite la prise en considération non seulement des qualités électriques mais aussi d'autres qualités:

- Propriétés électriques: rigidité, permittivité, résistivités normale et superficielle, coefficient de température, facteur de perte.
- Propriétés mécaniques: résistance à la traction et à la flexion, dureté, élasticité.
- Propriétés chimiques: résistance aux acides, aux solvants, toxicité.

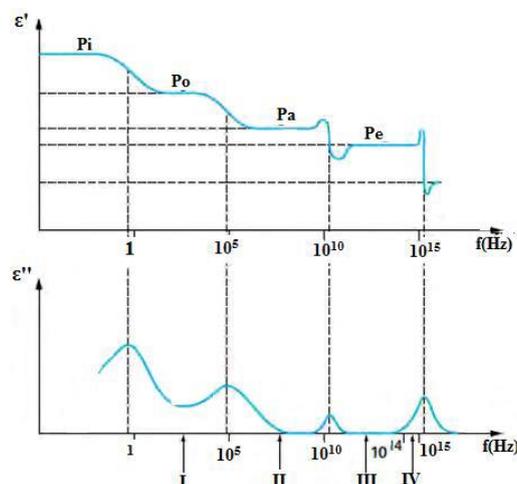
Le terme "**diélectrique**" est appliqué à des matériaux isolants dont les caractéristiques entrent comme paramètres dans la description d'un système électrique c.d.r. « Un diélectrique est un isolant électrique qui réduit la force électrostatique entre deux charges ».

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.

II. La Polarisation :

II.1. Mécanismes de polarisation

Les plus importants mécanismes concourant à l'apparition de p sont représentés schématiquement dans le fig suivante:



F(Hz) : fréquence; Pa : polarisation atomique; Pe : polarisation électronique; Pi : polarisation interfaciale; Po : polarisation d'orientation; ϵ' : permittivité relative ; ϵ'' : Indice de pertes;
 I : domaine des audiofréquences; II : domaine des radiofréquences; III : domaine des fréquences infrarouges; IV : domaine des fréquences optiques.

Figure III.1: Mécanismes de polarisation et évolution de ϵ'' et ϵ' en fonction de la fréquence

- **La polarisation électronique :**
- **La polarisation ionique :** ne se rencontre que dans les cristaux ioniques.
- **polarisation par orientation:** Sous l'effet d'un champ, par contre, les moments ont tendance à s'aligner. Et en l'absence d'un tel champ, ces moments sont orientés de façon aléatoire, de sorte qu'il n'y a pas de polarisation macroscopique observable.
- **polarisation interfaciale :** sous l'effet du champ et les porteurs de charges ont tendance à se concentrer autour de défauts tels que les impuretés, les lacunes, les joints de grains, etc

II.2. Moment dipolaire

Un dipôle électrique (Fig. III .2) est un système formé de deux charges ponctuelles de même valeur mais de signe opposés, séparées par une distance d (fig.III.2).



Fig. III.2 Dipôle électrique (modèle).

L'importance de ce dipôle est mesurée par son *moment dipolaire p* défini par:

$$\mathbf{p} = q \mathbf{d} \quad (\text{III.2}).$$

Les diélectriques recèlent divers types de dipôles décrits au paragraphe précédent. Aucun d'entre eux ne se présente exactement comme celui de la figure III.2, mais ce dernier peut servir de modèle pour chacun des types rencontrés.

II.3. Susceptibilité diélectrique. Définition

Dans les diélectriques (ferroélectriques exceptés), la polarisation est provoquée par le champ électrique et disparaît avec lui.

$$\mathbf{P} = \chi_r \epsilon_0 \mathbf{E} \quad (\text{III.3})$$

On appelle χ_r la *susceptibilité diélectrique relative*. C'est une grandeur sans dimensions. Lorsque χ_r est indépendant de \mathbf{E} , on a à faire à un diélectrique linéaire.

II.4. Permittivité.

On appelle ϵ_r la *permittivité relative* du diélectrique. Le produit $\epsilon_0 \epsilon_r$, noté souvent simplement ϵ , est appelé *permittivité absolue* du diélectrique.

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) \mathbf{E} \quad (\text{III.4})$$

donc

$$\chi_r = \epsilon_r - 1 \quad (\text{III.5})$$

II.5. Champ local E_L

On établira l'expression de E_L dans le cas d'un champ électrique homogène tel qu'il existe dans un condensateur plan (fig. suivante).

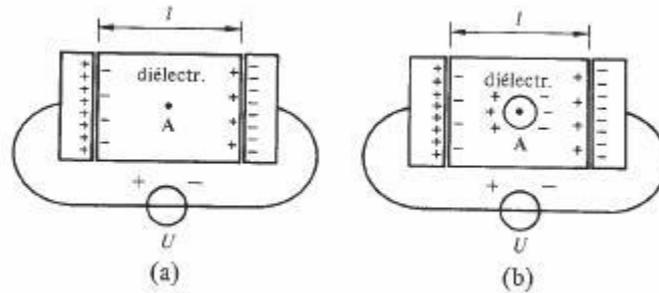


Fig. III.3 L'effet de P est remplacé par les charges représentées schématiquement dans le diélectrique.

Le champ local au point A comprend deux composantes :

$$\mathbf{E}_L = \mathbf{E} + \mathbf{E}_{\text{dip}} \quad (\text{III.6})$$

où \mathbf{E} est le champ imposé par la source de tension U . Ce champ ne dépend pas de la présence du diélectrique entre les armatures du condensateur, il est égal à U/l ; \mathbf{E}_{dip} est le champ résultant de la présence de dipôles dans tout le volume du diélectrique.

II.6. Facteur de polarisation α . Définition

Soit \mathbf{p} le moment dipolaire d'un atome ou d'une molécule, projeté sur le champ local \mathbf{E}_L auquel cet atome est soumis. On appelle facteur de polarisation α le rapport

$$\alpha = \mathbf{p} / \mathbf{E}_L \quad \text{F/m}^2 \quad (\text{III.7})$$

Si N est le nombre volumique des porteurs de \mathbf{p} , la polarisation due à ces derniers vaut

$$\mathbf{P} = N \alpha \mathbf{E}_L \quad (\text{III.8})$$

II.7 POLARISATION EN RÉGIME SINUSOÏDAL

Afin d'en développer l'aspect dynamique et établir les expressions des facteurs de polarisation en régime sinusoïdal, les diélectriques sont soumis à des champs variables.

II.7.1. Polarisation électronique :

En supposant toujours que le champ local déplace, sans les déformer, les orbitales par rapport au noyau, l'équation dynamique de l'oscillateur s'écrit, d'après (III.) :

$$m \frac{d^2 x^2}{dt^2} = - \frac{(Ze)^2}{4\pi\epsilon_0 R^3} x = -k x \quad (\text{III.9})$$

où m est la masse totale des Z électrons entourant le noyau, k la constante de la force de rappel. On reconnaît en (III.9) l'équation d'un oscillateur harmonique, dont la pulsation propre vaut :

$$\omega_o = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (\text{III.10})$$

L'ordre de grandeur de ω_o correspond à des fréquences situées dans le spectre visible ou l'ultraviolet.

II.7.2. Polarisation ionique :

Les moments dipolaires correspondant à la polarisation ionique constituent eux aussi des oscillateurs mécaniques (fig. III.1). Elle sont situées dans l'infrarouge. On pose:

$$\alpha_{io} = \alpha'_{io} - j \alpha''_{io} \quad (\text{III.11})$$

Le comportement en fréquence de α'_{io} et α''_{io} est en tous points semblable à celui décrit à la figure III..1

II.7.3. Polarisation par orientation:

Deux facteurs agissent sur l'orientation des dipôles permanents :

- le champ local E_L ,
- l'agitation thermique, dont l'effet peut être assimilé à l'action de chocs infligés aux dipôles.

III. PERMITTIVITÉ RELATIVE.

III.1. Permittivité complexe et pertes diélectriques :

La permittivité est une grandeur complexe fonction de la pulsation, on pose:

$$\varepsilon_r(\omega) = \varepsilon'_r - j\varepsilon''_r \quad (\text{III.12})$$

Pour interpréter ε'_r et ε''_r considérons le cas d'un condensateur plan de surface S , dont les armatures sont distantes de d . Son admittance $Y(\omega)$ vaut:

$$Y(\omega) = j \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r(\omega) S/d \quad (\text{III.13})$$

Le courant I circulant dans ce condensateur soumis à une tension sinusodale U de pulsation ω est égal à :

$$I = Y(\omega) U = \varepsilon_0 \omega S/d (\varepsilon''_r + j \varepsilon'_r) U \quad (\text{III.15})$$

Il présente donc une composante en phase avec U , traduisant la dissipation d'une puissance dans le diélectrique. Cette puissance, en général non récupérable, constitue ce qu'on appelle les *pertes diélectriques*. Ces pertes peuvent avoir deux origines:

- le travail irréversible nécessaire à l'établissement de la polarisation (les facteurs de polarisation sont complexes),
- la conduction ohmique résiduelle du diélectrique.

Dans le premier cas on parle plus particulièrement de *pertes diélectriques de polarisation*, dans le second, de *pertes diélectriques de conduction*.

Par définition, on appelle *angle de pertes* δ d'un diélectrique, l'angle de phase défini par le courant total et le courant en quadrature avec la tension. Par III. 15), on a :

$$\tan \delta = \varepsilon''_r / \varepsilon'_r \quad (\text{III.16})$$

Les pertes diélectriques de polarisation peuvent également être traduites en terme de conductivité équivalente σ_p . Soit ε''_{rp} la partie imaginaire de ε_r représentant ces pertes. On obtient par (III.15) .

$$\sigma_p = \omega \varepsilon_0 \varepsilon''_{rp} \quad (\text{III.17})$$

III.2. Permittivité et pertes en fonction de la fréquence

Les variations de $\varepsilon_r(\omega)$ ainsi que les pertes diélectriques rencontrées dans la majorité des applications proviennent donc directement de la polarisation par orientation. Dans certains cas, la variation de $\alpha_{io}(\omega)$ peut toucher le domaine des hyperfréquences, alors que celle de $\alpha_{el}(\omega)$ est toujours au-delà des fréquences utilisées en électricité.

Afin de distinguer le rôle de $\alpha_{or}(\omega)$, il est utile d'écrire l'équation de Clausius-Mosotti sous la forme :

$$\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1} = \frac{1}{3\varepsilon_0} \left(\sum_i N_i \alpha_i + \frac{N_{or}}{1 + j\omega\tau} \frac{P_m^2}{3k_B T} \right) \quad (\text{III.18})$$

Posons, afin de discuter la fonction ε_r donnée par (III.18),

$$\epsilon_{r0} = \lim_{\omega \rightarrow 0} \epsilon_r \quad (\text{III.19})$$

et

$$\epsilon_{r\infty} = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \epsilon_r \quad (\text{III.20})$$

Alors, on a :

$$\epsilon_r = \epsilon_{r\infty} + \frac{\epsilon_{r0} - \epsilon_{r\infty}}{1 + j\beta} \quad (\text{III.21})$$

où

$$\beta = \frac{\epsilon_{r0} + 2}{\epsilon_{r\infty} + 2} \omega \tau \quad (\text{III.22})$$

En séparant les parties réelles et imaginaires de (III.21) on obtient

$$\epsilon'_r = \epsilon_{r\infty} + \frac{\epsilon_{r0} - \epsilon_{r\infty}}{1 + \beta^2} \quad (\text{III.23})$$

$$\epsilon''_r = \frac{\epsilon_{r0} - \epsilon_{r\infty}}{1 + \beta^2} \beta \quad (\text{III.24})$$

et

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_{r0} - \epsilon_{r\infty}}{\epsilon_{r0} + \epsilon_{r\infty}} \beta \quad (\text{III.25})$$

La variation de ϵ'_r et $\tan \delta$ en fonction de ω prend l'allure représentée à la figure III.4.

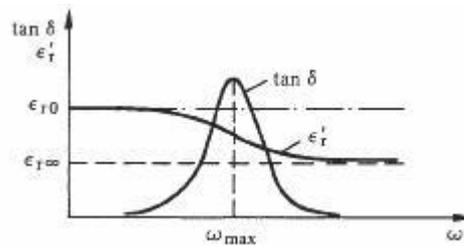


Fig. III. 4

III.4. Diagramme de Cole-Cole

Le Diagramme de Cole-Cole donne une représentation intéressante de la fonction ϵ''_r (ϵ'_r) :

$$\epsilon'_r - \epsilon_{r\infty} - j\epsilon''_r = \frac{\epsilon_{r0} - \epsilon_{r\infty}}{1 + j\beta} \quad (\text{III.26})$$

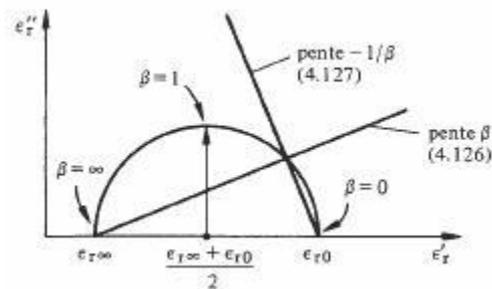


Fig. III.5 Diagramme de Cole-Cole pour un temps de relaxation unique.

III.5. Permittivité et pertes en fonction de la température

Si l'élévation de température est telle que la conduction dans le diélectrique cesse d'être un phénomène négligeable, il faut en tenir compte dans l'évaluation de pertes (fig. III.6), ce qui modifie l'allure de $\tan \delta(T)$.

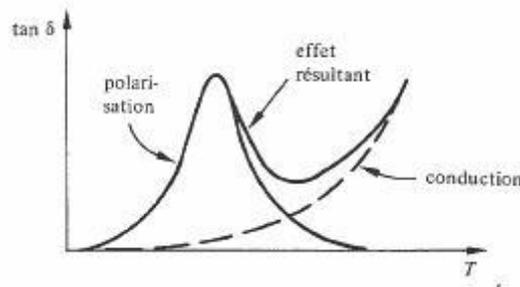


Fig. III.6

Sur un diagramme de Cole-Cole, une élévation de température provoque un déplacement des fréquences dans le sens du point ϵ_{r0} vers le point α_{r0} (fig. III.7).

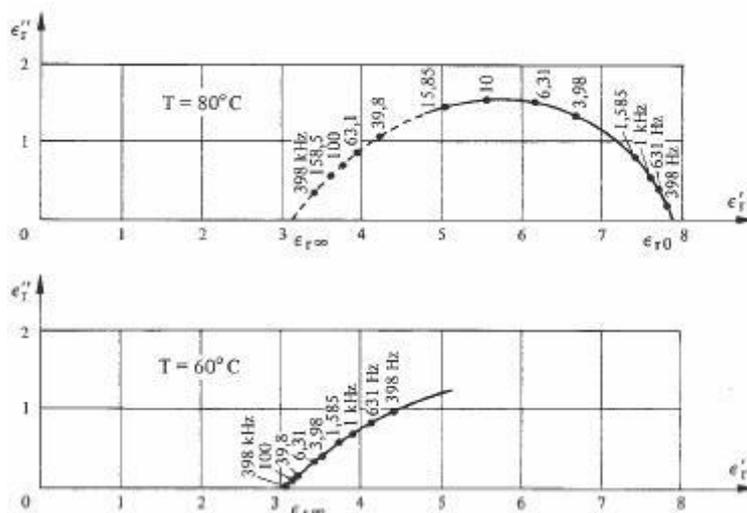


Fig. III.7 Mesures de la permittivité complexe de l'acétate de polyvinyle en fonction de la température.

III.6. Viscosité diélectrique

Après qu'un diélectrique hétérogène ait été soumis à un échelon de tension, le champ électrique dans ses diverses zones peut encore varier pendant un certain temps, atteignant parfois plusieurs minutes et même davantage. Ce phénomène est couramment appelé viscosité diélectrique.

IV. RIGIDITE DIELECTRIQUE ET MECANISMES DE CLAQUAGE

On appelle *claquage* la perte subite de la propriété isolante d'un diélectrique soumis à un champ.

La **rigidité diélectrique d'un matériau** est la valeur maximale du champ électrique que l'on peut lui appliquer sans que se produise une dégradation irréversible nommée claquage ou perforation diélectrique rendant impossible une nouvelle application de la tension. Le claquage est précédé par une augmentation importante du courant circulant dans le matériau avec des conséquences thermiques destructives : fusion, évaporation, décomposition, carbonisation, ...

La rigidité diélectrique d'un matériau peut varier de plusieurs ordres de grandeur selon l'utilisation qui en est faite afin de la déterminer théoriquement. A cet effet, elle est remplacée par des *essais pratiques* se déroulant selon des procédures très précisément définies de façon à garantir une certaine représentativité aux résultats obtenus.

On peut diviser ces essais en deux classes.

- Les *essais sur échantillon* dans lesquels on teste l'isolant pour lui-même. La forme de l'échantillon et des électrodes sont spécifiées, ainsi que l'environnement et la fonction du temps selon laquelle le champ est appliqué : champ continu varié par escalier.
- Les *essais sur installation terminée*. Il s'agit ici simplement de démontrer qu'en aucun point de l'installation, le diélectrique ne présente de défaut ou n'est sollicité de manière telle qu'un claquage puisse se produire en fonctionnement normal. Ces essais se résument à soumettre l'installation, pendant un temps déterminé, à une tension égale à la tension nominale U_0 multipliée par un facteur supérieur à 1.

On désigne par l'expression *décharge électrique* le passage du courant dans un diélectrique selon différents types, lors d'un claquage. Et les mécanismes responsables des claquages permettent de classer ces derniers en deux catégories: les claquages thermiques et les claquages intrinsèques.

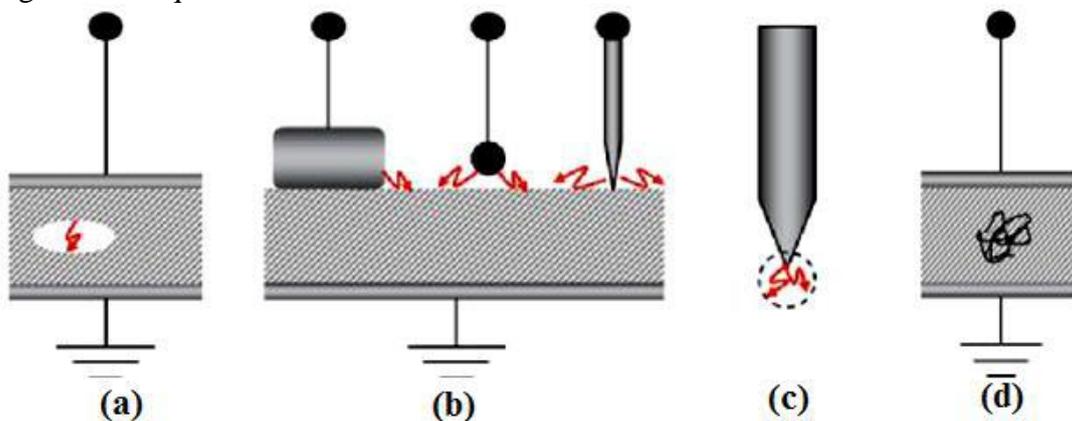


Figure III.8 : Différents types de décharges: interne (a), surface (b), couronne (c) et en arborescence (d).

IV.1. Claquage thermique

Les pertes diélectriques de polarisation et de conduction provoquent un dégagement de chaleur dans les isolants. Tant que la quantité de chaleur ainsi produite est supérieure à celle que peut évacuer l'isolant, la température augmente. Avec elle, la conductivité augmente entraînant un accroissement de la chaleur produite par effet Joule.

La chaleur dégagée par les pertes diélectriques de polarisation augmente également, ou au contraire diminue selon que l'on se trouve à gauche ou à droite du pic de $\tan \delta (T)$. un claquage se produit que l'on appelle *claquage thermique* qu'est décrit par l'équation suivante

$$\sigma * E^2 = C_v * \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div}(k * \text{grad}T) \quad (\text{III.26})$$

C_v : chaleur spécifique
 K : conductivité thermique
 E : champ électrique appliqué.
 T : temperature.

IV.2. Claquage intrinsèque

Le *claquage intrinsèque* est défini comme un claquage dans le déclenchement duquel l'effet Joule, lié à un courant précédant la décharge proprement dite, ne joue aucun rôle. En termes très généraux, on peut dire qu'un mécanisme d'avalanche est à l'origine de ce claquage. Les électrons de conduction et les électrons provenant de niveaux isolés proches de la bande de conduction participent au processus.

V. FERROÉLECTRICITÉ, Piézoélectricité, électrostriction, pyroélectricité :

- **FERROÉLECTRICITÉ** : On appelle *matériau ferroélectrique*, un matériau diélectrique dans lequel les moments dipolaires sont couplés. Ce phénomène de couplage constitue la *ferroélectricité*. Les matériaux ferroélectriques sont caractérisés par une permittivité relative extrêmement élevée. La ferroélectricité disparaît au-delà d'une température appelée *température de Curie ferroélectrique*.

La signature d'un matériau ferroélectrique est le cycle d'hystérésis de la polarisation en fonction du champ électrique appliqué.

Domaines ferroélectriques et cycle d'hystérésis

L'application d'un champ électrique augmente l'énergie des domaines, d'autant plus que la direction de leur polarisation spontanée s'écarte davantage de celle de ce champ. Au fur et à mesure que le champ croît, la fraction en volume des domaines alignés parallèlement à E augmente donc, jusqu'à ce que l'échantillon complet ne devienne lui-même qu'un seul domaine, pour $E > E_s$ (fig. III.9).

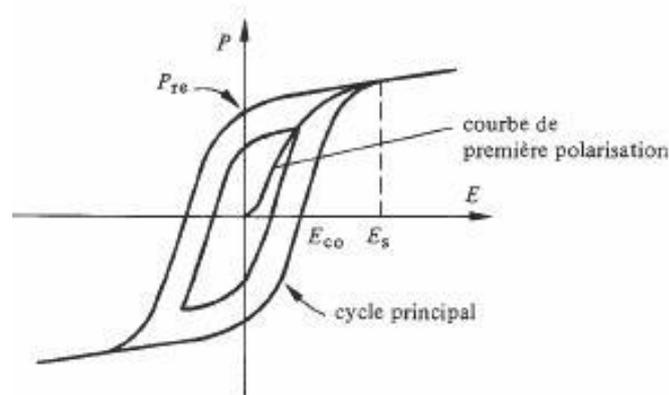


Fig. III.9 Cycle d'hystérésis ferroélectrique.

Différentes grandeurs caractéristiques sont définies sur ce cycle, comme sur le diagramme B - H des matériaux ferromagnétiques. Ce sont en particulier :

- la *permittivité initiale*, définie sur la *courbe de première polarisation*, par la relation :

$$\epsilon_{ri} = \frac{1}{\epsilon_0} \lim_{E \rightarrow 0} \frac{P}{E} \quad (\text{III.27})$$

- le *cycle d'hystérésis principal*, qui est le cycle obtenu dans un champ alternatif d'une amplitude au moins égale à E_s ;
- la *polarisation rémanente* P_{re} et le *champ coercitif* E_{co} définis par les intersections du cycle principal avec les axes.

- **Piézoélectricité:** Certains diélectriques cristallins se polarisent sous une contrainte mécanique; en l'absence de contrainte mécanique, leurs dimensions se modifient lorsqu'ils sont polarisés par l'action d'un champ électrique extérieur. Ces propriétés constituent la *piézoélectricité* et les matériaux dans lesquels elles se manifestent sont dits piézoélectriques. Le quartz SiO_2 , le phosphate d'aluminium AlPO_4 sont des matériaux piézoélectriques utilisés très couramment.

La piézoélectricité est une propriété exploitée dans de nombreux dispositifs utilisant la conversion d'une énergie électrique en énergie mécanique.

- Comme la piézoélectricité, *Y électrostriction* est une variation des dimensions d'un diélectrique sous l'action d'un champ E . *mais elle* se distingue de la piézoélectricité en ce que la déformation est proportionnelle non au champ E appliqué, mais au carré de celui-ci. Elle ne possède pas d'effet réciproque, c'est-à-dire qu'une contrainte mécanique ne provoque pas de polarisation par électrostriction inverse.
- **La pyroélectricité**, propriété de certains cristaux de modifier leur polarisation lors d'un changement de température ΔT . C'est un phénomène linéaire, décrit par des équations du type :

$$\Delta \Pi_i = \pi_i \Delta T \quad i = x, y, z \quad (\text{III.28})$$

où les π_i sont les coefficients pyroélectriques. La variation de température étant le plus souvent relativement lente, la polarisation par pyroélectricité est presque toujours masquée par un apport de charges à la surface du cristal, dû à un isolement imparfait.

VI. DIÉLECTRIQUE LIQUIDES & GAZ

VI.1 COMPORTEMENT DIÉLECTRIQUE DES GAZ

On emploie fréquemment un gaz comme diélectrique, dans le domaine de la haute tension en particulier. Les lignes aériennes et les disjoncteurs en sont les exemples les plus représentatifs. L'isolant gazeux présente deux avantages principaux.

- C'est un milieu homogène, enrobant parfaitement les conducteurs, quelle que soit la complexité de leurs formes, qu'ils soient statiques ou mobiles comme dans le cas des disjoncteurs.
- Après passage puis rupture d'un arc, le gaz est le diélectrique qui recouvre le plus rapidement ses propriétés isolantes.

Si la conduction dans le gaz n'est généralement pas souhaitée en haute tension, elle est par contre exploitée dans d'autres secteurs tels que l'éclairage par tubes fluorescents....

Propriétés électriques des gaz : La faible densité des gaz explique leurs propriétés électriques particulières, énumérées ci-dessous.

- Permittivité relative très voisine de l'unité.
- Pertes diélectriques de polarisation négligeables.
- Caractéristique courant-tension extrêmement non linéaire (fig).
- Rigidité diélectrique et résistivité variables avec la pression.

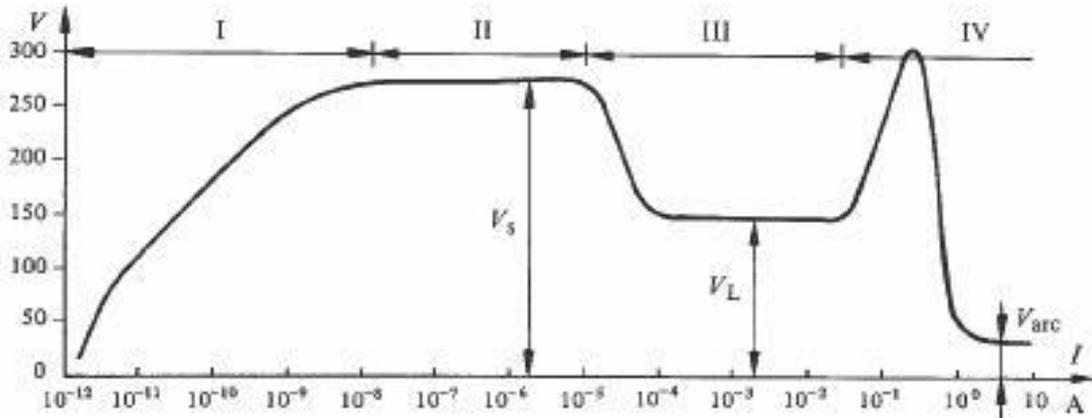


Fig. III.10 Caractéristique courant-tension de l'hélium. .

- ✓ Si la tension appliquée reste inférieure à V_s (stade I), c'est un courant variant de façon aléatoire. Il dépend directement des événements ionisants.
- ✓ Au stade II, le courant se maintient par l'ionisation (la décharge sombre) qu'il crée lui-même. La tension V_s reste constante, elle porte le nom de *potentiel d'ionisation statique*.
- ✓ Au delà d'un certain courant la décharge sombre se transforme en *décharge lumineuse*. Le passage d'un type de décharge à l'autre s'accompagne d'une variation importante du courant et de la tension.
- ✓ Que le courant augmente encore, et l'on assiste à un accroissement rapide de la tension, immédiatement suivi d'un effondrement de cette dernière jusqu'à quelques dizaines de volts. Ce phénomène correspond à l'établissement d'un *arc très lumineux*, dans lequel le gaz ionisé atteint des températures de 10^3 à 10^5 K.

Pour une configuration d'électrodes et un gaz donnés, la loi empirique de Paschen selon laquelle V_s est une fonction ne dépendant que du produit de la pression p par la distance d séparant les électrodes reflète assez bien la réalité (fig. III.11).

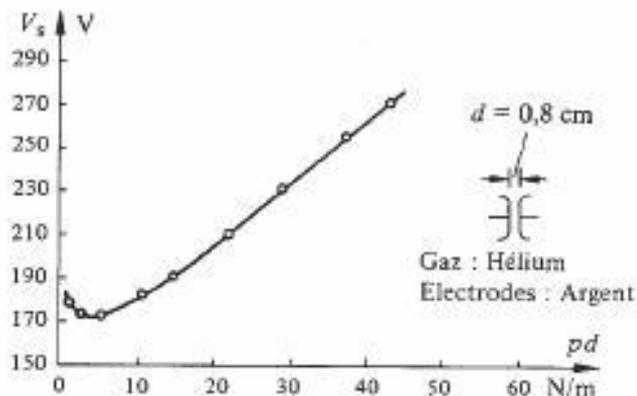


Fig. III.11 Loi de Paschen pour l'hélium, d'après [60].

VI.2. COMPORTEMENT DIÉLECTRIQUE DES 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

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

Propriétés :

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

- Huiles synthétiques

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

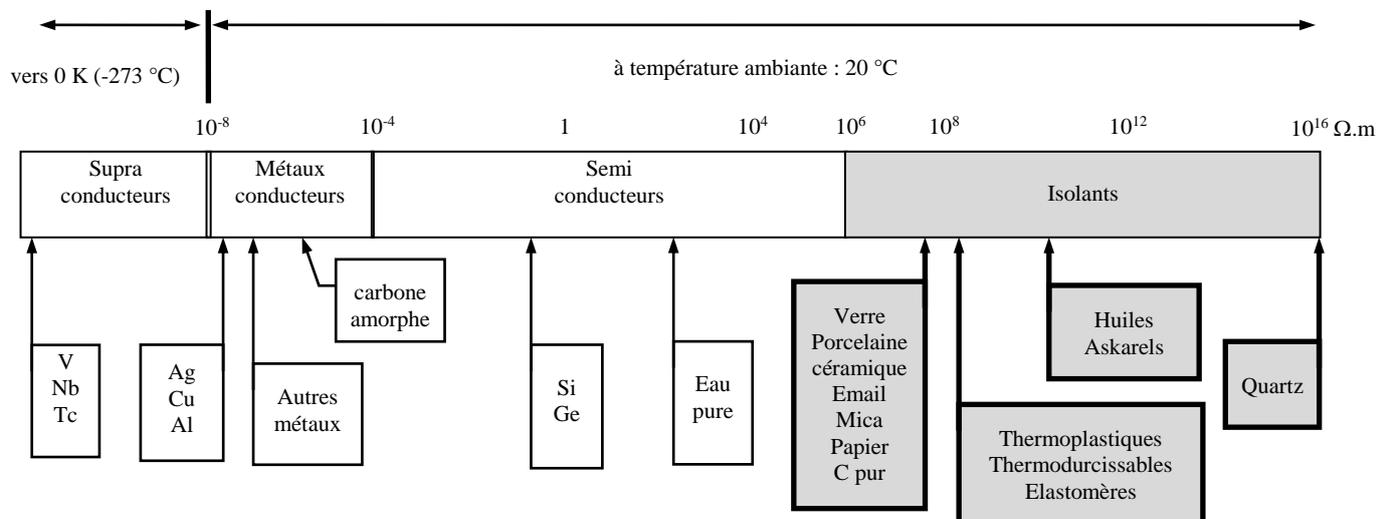
Huiles silicones : résistent a des températures élevées, prix élevés.

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

- Vernis

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

VII. Lexique et Echelle des résistivités



Diamant : cristal de carbone pur

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

Quartz : cristal de Silice pure SiO_2

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

Mica : Silicate aluminopotassique

Micanite : Aggloméré de mica et de gomme-laque

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

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

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

Huile minérale : par opposition à huile végétale ; en fait, il vaudrait mieux dire huile organique. produit visqueux organique, extrait du pétrole ou synthétisée. Certaines ont des qualités isolantes.

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

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

Elastomères : haut polymère possédant de bonnes qualités élastiques.

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

VIII. Propriétés physiques et Classification

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

- **mauvaise tenue en température** $< 200^\circ\text{C}$ en général (sauf pour l'amiante, le verre et le mica)
- **rigidité électrique élevée** : ≈ 10 kV/mm

- très forte résistivité électrique : $> 10^6 \Omega m$
- constante diélectrique relative $\epsilon_R > 1$ (≈ 2 à 8)
- mauvaise conductivité thermique : isolant thermique
- Solide, liquide ou gaz
- densité voisine de 1

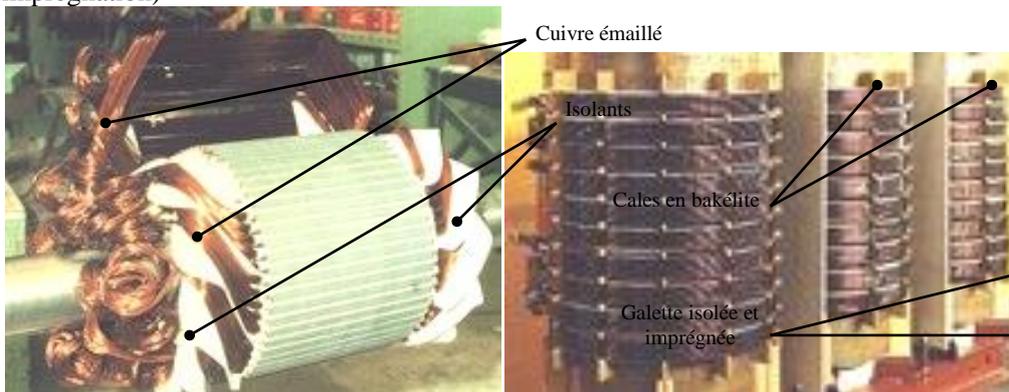
Plusieurs méthodes peuvent être adoptées pour classer les isolants :

- **classification en fonction de la tenue en température** (voir tableau page13) :
La norme **NFC 51-111** définit des classes d'isolant selon leur tenue en température, qui dépend de la matière isolante, mais aussi des matières d'agglomération et d'imprégnation.
- **classification en fonction de l'état physique** (voir tableau page14 et 15) :
 - solide : mica, bois, céramiques, plastiques ...
 - liquide : huiles, pyralène, vernis...
 - gaz : air sec, azote, SF6...
- **classification en fonction de l'origine** (voir tableau page14 et 15) :
 - minérale : mica, porcelaine, verre, amiante,...
 - organique : bois, papier, coton, soie, caoutchouc (latex),...
 - synthétique : plastiques (thermoplastiques ou thermodurcissables), silicones :
 - . Silicones : molécules dont les atomes de carbone ont été remplacés par du silicium.
 - . Thermoplastiques: plastiques ramollis à chaud (il peut alors être moulé, formé ou extrudé), et durci à froid. Le processus est réversible.
 - . Thermodurcissables: plastiques durcis par un procédé thermique. Le processus est irréversible.

IX. Application

Bobinages de machines

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



--- Rotor bobiné de moteur asynchrone ---

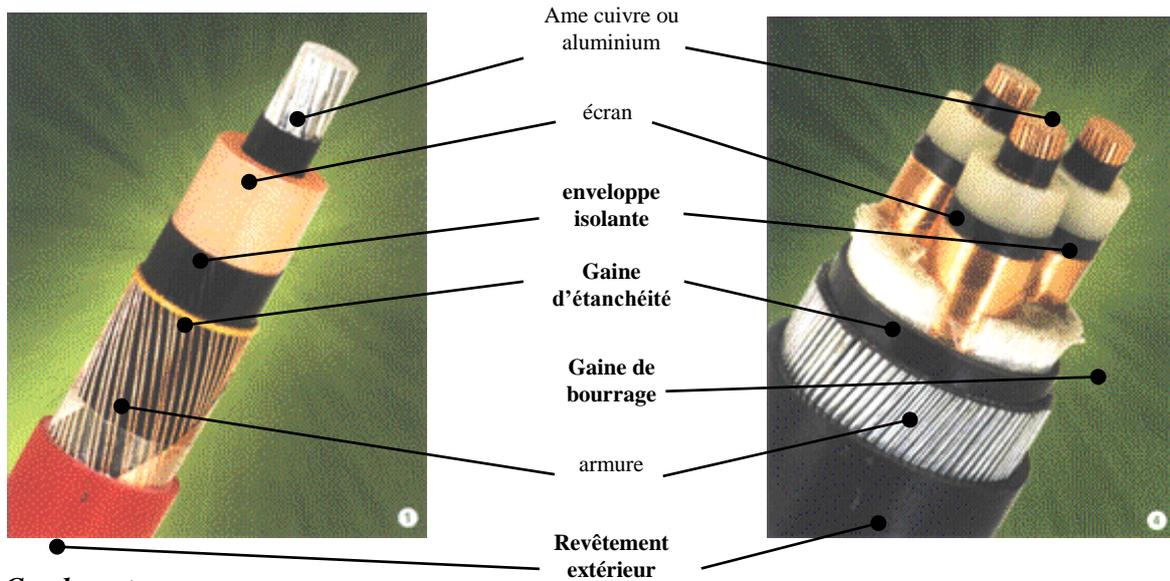
--- Transformateur triphasé ---

Câbles électriques

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

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

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



● Condensateurs

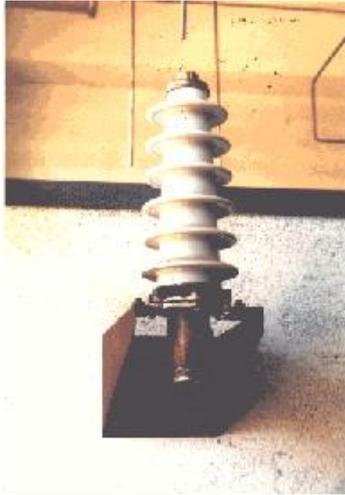
Schématiquement, un condensateur est formé d'un diélectrique ($\epsilon_R > 1$) serré entre deux électrodes. Les diélectriques isolants utilisés sont suivant les technologies en céramique, papier, verre, mica ou plastique.

	<p>Valeur de la capacité d'un composant capacitif plan</p> $C = 9 \cdot 10^{-12} \cdot \epsilon_r \frac{S}{e}$ <p>S = surface d'une armature (en m²) e = distance séparant les armatures (en m) ϵ_r = permittivité relative</p>
<p><i>Condensateurs plastiques ---</i></p>	<p><i>Condensateurs céramiques</i></p>

● Isolateurs

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

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



---- isolateur de tramway ---



Isolateur 225 kV

Isolateur 63 kV

--- Transformateur 225/63 kV immergé dans l'huile ---

● Appareillages haute tension

L'isolement interne est renforcé par un isolant supplémentaire :

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



---- Sectionneur 63 kV ---



isolateurs

Bras de sectionneur

---- disjoncteur 63 kV au SF6 ---

LASSIFICATION EN FONCTION DE LA TEMPERATURE :

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

CLASSIFICATION EN FONCTION DE L'ETAT PHYSIQUE

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

CLASSIFICATION EN FONCTION DE L'ETAT PHYSIQUE (SUITE)

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