

1. Définition

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.

2. POLARISATION DIELECTRIQUE

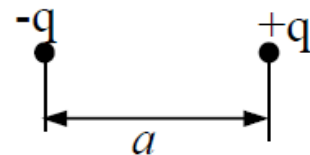
2.1. Moment électrique d'un dipôle :

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

La valeur du moment électrique d'un dipôle est $p_0 = q a$.

Où q est la charge positive (ou la valeur absolue de la charge

négative) et a la longueur du dipôle. Il va de soi que pour les molécules où $a = 0$, le moment dipolaire est nul.



2.2. Description de la polarisation :

La propriété la plus importante d'un diélectrique est la polarisation sous l'action d'un champ électrique externe. À l'échelle atomique : en l'absence d'un champ électrique, le moment électrique est nul car la somme algébrique des charges dans toutes les molécules dans un volume donné est nulle, du fait que les centres de gravité des charges positives et négatives coïncident. Lors de l'application d'un champ électrique, les centres de gravité ne coïncident plus et les particules (atomes et molécules) sont alignées suivant la direction de E et acquièrent un moment p_0 (voir Figure.1).

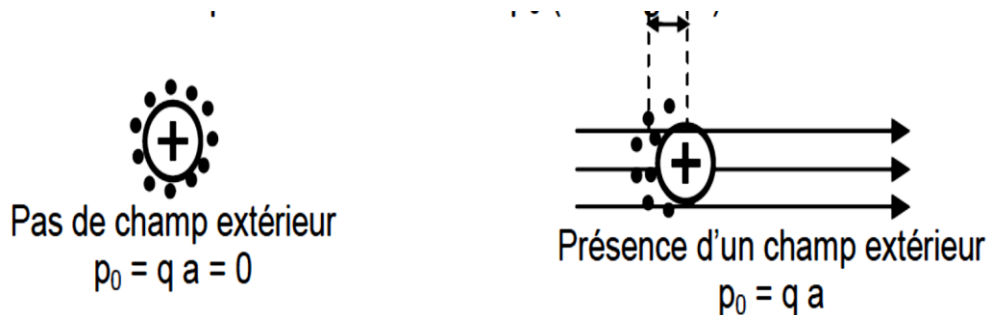


Figure.1 Polarisation électronique

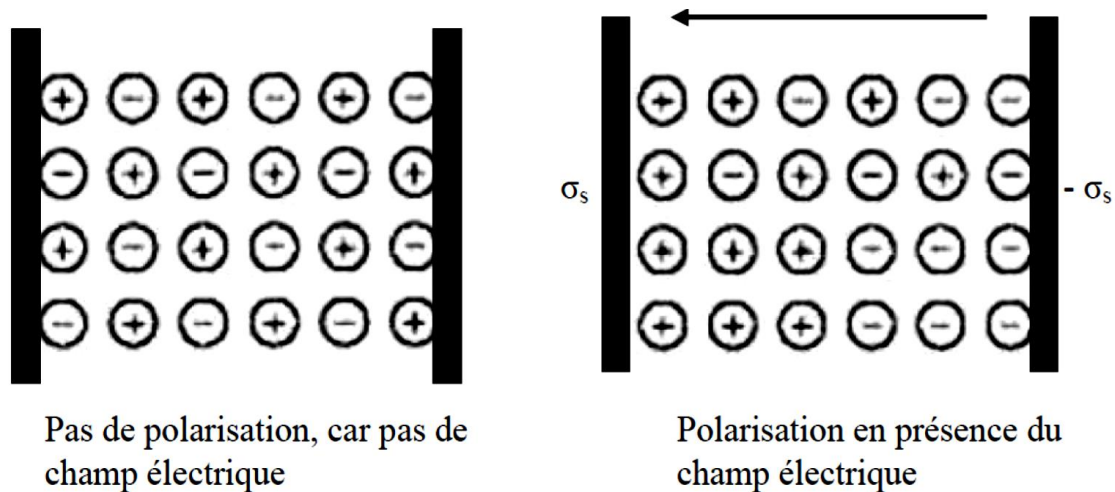


Figure.2 Polarisation macroscopique

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

La polarisation est souvent proportionnelle au champ électrique qui l'a créée (ce cas est dit linéaire) : $\mathbf{P} = \chi \epsilon_0 \mathbf{E}$

χ : susceptibilité diélectriques

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

Comme la charge totale à l'intérieur est compensée et donc nulle, le moment diélectriques total est : $\sigma_s S \cdot a$

En divisant par le volume $V = Sa$, nous obtenons la polarisation P : $\mathbf{P} = \sigma_s$

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

2.3. Diélectriques polaires et non polaires :

Tous les diélectriques peuvent être divisés en deux catégories : Diélectriques polaires et diélectriques non polaires

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

Les centres de gravite peuvent coïncider ou ne pas coïncider :

- Dans le 1er cas : la molécule est non polaire.
- Dans le 2eme cas : la molécule (et donc la matière en question) est dite polaire. Même en l'absence de champ électrique externe, la molécule possède un moment dipolaire. Il est clair que les molécules arrangées de façon symétrique (qui possèdent un centre de symétrie) sont non polaires du moment que les centres de gravite des charges positives et négatives coïncident avec le centre de symétrie. Par contre, les molécules asymétriques sont polaires.

Les molécules monoatomiques (He, Ne, Ar, Kr, Xe) et les molécules formées de deux atomes identiques (H_2 , N_2 , C_{12} , etc...) sont non polaires. Par contre, les molécules à composition ionique telles que l'iode de potassium KI ont un moment dipolaire élevé.

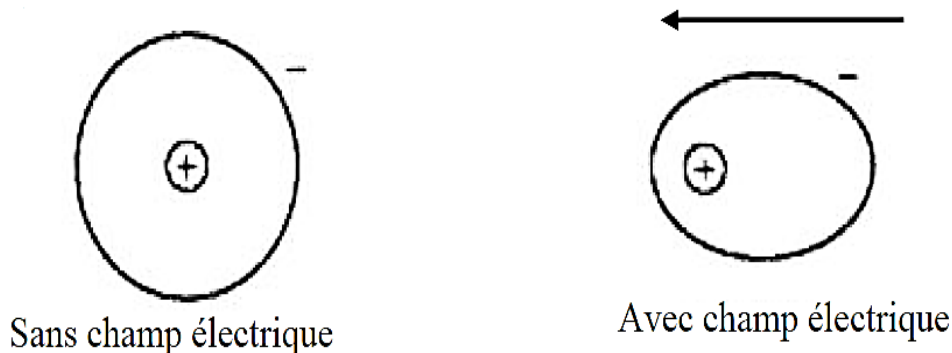
Exemple : Les molécules CH_4 et CCl_4 sont symétriques et donc non polaires. Les autres molécules sont asymétriques et donc polaires.

- Différence entre la polarisation et la conduction :

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

2.4. Types de polarisation :

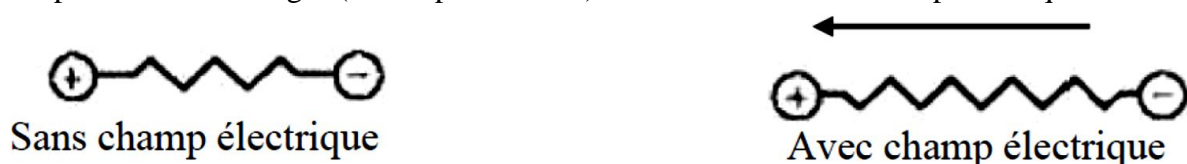
2.4.1. Polarisation électronique : est due au déplacement du nuage d'électrons par rapport au noyau positif, sous l'action d'un champ E. dans ce cas, la polarisation se produit rapidement durant un bref moment (de l'ordre de 10^{-15} s). Elle se produit dans les atomes et les ions.



Le processus de la polarisation électronique peut être compris en considérant l'atome le plus simple, à savoir l'atome d'hydrogène (1 électron en orbite d'un noyau contenant un proton). L'orbite à gauche est celle qui existe avant l'application d'un champ électrique (pas de polarisation), tandis que celle de droite est obtenue après polarisation, et donc un déplacement d'orbite d'une distance a. durant la polarisation, l'atome acquiert un dipôle $\mathbf{p} = e \mathbf{a}$.

2.4.2. Polarisation ionique : est due au déplacement mutuel des ions formant ainsi une molécule asymétrique. Le temps requis pour ce déplacement, afin d'assurer la polarisation est de l'ordre de 10^{-12} à 10^{-13} s.

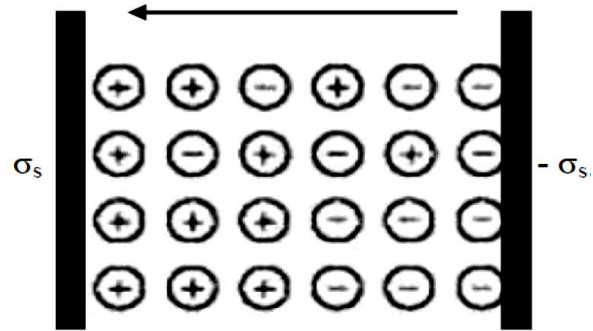
Les polarisations électronique et ionique ont beaucoup en commun. Dans les deux cas, il s'agit de déplacement de charges (et non pas rotation) dans la direction du champ électrique.



2.4.3. Polarisation macroscopique : est due a des déplacements de charges dans l'ensemble du matériau.



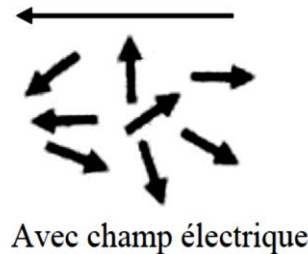
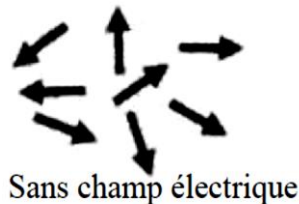
Pas de polarisation, car pas de champ électrique



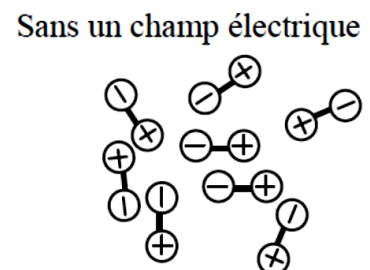
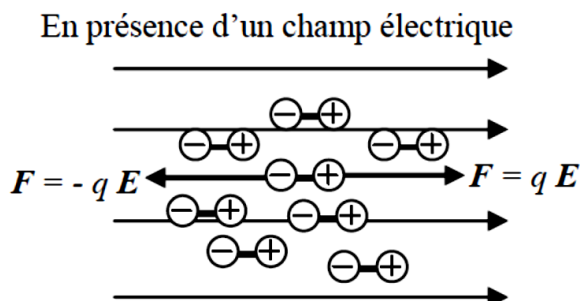
Polarisation en présence du champ électrique

2.4.4. Polarisation dipolaire (d'orientation) :

Elle est spécifique aux diélectriques polaires, les dipôles s'orientent suivant la direction du champ électrique appliqué (voir figure). En l'absence de champ, les dipôles sont orientés de façon désordonnée, de telle façon que la polarisation globale est pratiquement nulle. Pour cette raison, la polarisation d'orientation est influencée et liée avec l'agitation thermique des molécules, la température exerce un effet appréciable sur ce type de polarisation. La polarisation d'orientation peut exister seulement dans les gaz, les liquides et les matières amorphes visqueuses. Dans les matières solides, les dipôles sont « figés » et ne peuvent être orientés.



Un dipôle placé dans un champ électrique est soumis à un couple qui tend à l'aligner suivant la ligne de ce champ.



Remarque :

La polarisation d'orientation met plus de temps à s'établir (ou à disparaître) lors de l'application de la tension (ou la mise hors tension) par rapport aux autres types de polarisation. Il est clair en effet, que plus de temps est requis pour le mouvement des molécules, surtout les

grandes molécules et la viscosité dynamique (coefficient de frottement interne) élevé. Ce temps peut être de l'ordre d'une demi-période de la tension alternative.

Tous les types de polarisation provoquent des pertes diélectriques sous forme de chaleur suite aux frottements. En tension alternative les pertes sont beaucoup plus grandes qu'en tension continue. Par conséquent, la tension thermique de claquage est généralement plus faible pour les champs alternatifs, et elle diminue avec l'augmentation de la fréquence de la tension appliquée.

2.5. Diélectriques non linéaires

Les diélectriques linéaires sont caractérisés par une relation linéaire entre la polarisation et le déplacement avec le champ électrique.

$$\mathbf{P} = \chi \epsilon_0 \mathbf{E}$$

$$\mathbf{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \mathbf{E}$$

Pour certains matériaux « non linéaires » ces relations ne sont plus linéaires, la permittivité dépend alors du champ E. Ce type de diélectriques est utilisé dans certaines applications spécifiques.

Il y a plusieurs types de diélectriques non linéaires :

2.5.1. Diélectriques ferroélectriques : est le diélectriques non linéaire le plus typique, en dehors de la dépendance de la permittivité en fonction du champ, il y a :

- phénomène d'hystérésis sous l'action d'une tension alternative entre D et E identique à l'hystérésis magnétique entre B et H
- de très grandes valeurs de la permittivité ;
- variation, de ses paramètres en fonction de la température ;
- présence d'une polarisation spontanée sans l'application d'un champ externe.

2.5.2. Diélectriques piézo-électriques : La piézo-électricité est découverte en 1800 par les chercheurs français Pierre et Paul-Jean Curie. C'est du à l'apparition de charges électriques sur les surfaces de quelques cristaux quand ils sont soumis à des forces mécaniques de compression ou de tension par exemple.

Il existe l'effet inverse, à savoir la déformation sous l'action d'une tension électrique. Pratiquement, tous les diélectriques ferroélectriques sont piézo-électriques.

2.5.3. Electrets : Un électret est un composé diélectriques, qui préserve sa polarisation pendant longtemps après que le champ électrique externe qui a produit cette polarisation est enlevé, et qui a installé un champ électrostatique dans l'espace environnant.

L'électret crée un champ électrique de la même manière qu'un barreau aimanté crée un champ magnétique.

3. RIGIDITE DIELECTRIQUE :

La rigidité diélectrique E_c est la valeur maximum de l'intensité du champ électrique auquel peut être soumis un isolant, sans apparition d'un claquage.

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 l'arc lui-même. Dans ce cas, l'isolant est percé : il y a rupture diélectrique ou claquage à destruction de l'isolant, irréversible pour les isolants solides (carbonisation), réversible pour les isolants gazeux et liquides (recombinaison des ions avec des électrons).

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, ...).

4. PERTES DIELECTRIQUES

L'utilisation d'un isolant en électrotechnique implique le placement de l'isolant entre deux conducteurs, ce qui correspond à la réalisation d'un condensateur. Il serait idéal que l'isolant assure l'isolation électrique parfaite des deux conducteurs l'un de l'autre, ce qui correspondrait à la réalisation d'un condensateur idéal dans lequel la puissance dissipée soit nulle.

A l'application d'une tension sinusoïdale au condensateur idéal, le déphasage courant - tension serait $\phi = \pi/2$ (Figure). En réalité, le courant qui circule dans le condensateur présente une composante I_a en phase avec la tension U (figure 1.b.), ce qui correspond à une dissipation de puissance dans l'isolant. Cette puissance, en général non récupérable, constitue ce qu'on appelle les *pertes diélectriques*.

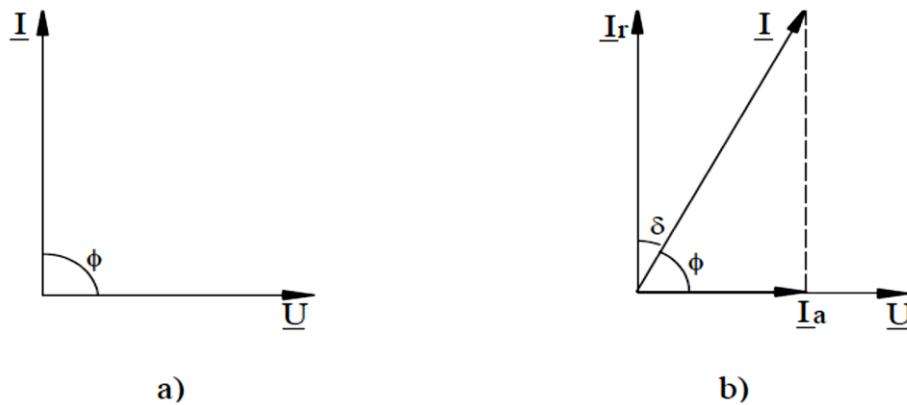


Figure. Déphasage courant - tension : a) condensateur idéal ; b) condensateur réel.

Les pertes diélectriques sont dues aux phénomènes de conduction électrique (effet Joule) et de polarisation électrique. Donc, pour un condensateur réel, le déphasage entre le courant I et la tension U est $\phi < \pi/2$. Le complément de ϕ , noté par δ ($\delta = \pi/2 - \phi$), s'appelle angle de pertes diélectriques. La grandeur $\text{tg} \delta$ s'appelle *facteur de pertes diélectriques* et caractérise les pertes diélectriques dans un matériau isolant.

5. TYPES D'ISOLANTS UTILISES DANS L'INDUSTRIE ELECTRIQUE

- Isolants naturels :

- minéraux ;
- organiques.

- Isolants synthétiques :

- matières plastiques
- élastomères ;
- composites.

- Les isolants sont classés en trois types :

- solides ;
- liquides ;
- gazeux.

5.1. Isolants solides :

5.1.1. Isolants naturels :

a) Minéraux :

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

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

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

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

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

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

b) Organiques :

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

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

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

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

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

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

5.1.2. Isolants synthétiques : matières plastiques

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

- une résine de base ou polymère, obtenue à partir de réactions chimiques complexes de Polymérisation effectuées sur des matières de base :
- dérivés du pétrole ou du charbon ;
- calcaires, sable, fluorures, sels marins ;
- bois.

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

a) Caractéristiques des matières plastiques :

- très bonne rigidité diélectrique : toujours $\geq 10 \text{ kV/mm}$;
- résistivité élevée : $10^8 \leq \rho \leq 10^{17} \Omega.m$;

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

b) Matières plastiques utilisées en électrotechnique Bakélite, Epoxydes, PVC, Polyéthylène, Téflon.

5.2. Isolants liquides

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

5.2.1. Huiles minérales

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

Propriétés :

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

5.2.2. Huiles synthétiques

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

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

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

5.2.3. Vernis

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