

MATERIAUX DIELECTRIQUES

1. 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.

2. CARACTERISTIQUES DIELECTRIQUES DES ISOLANTS

2.1 Permittivité relative :

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

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

où $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m est la permittivité absolue du vide (ou de l'air).

Si le même condensateur est rempli par un isolant, sa capacité devient :

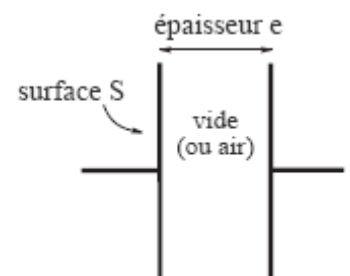
$$C_0 = \epsilon_r C_0 = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{S}{e}$$

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

La **permittivité absolue** est : $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$

Pour l'air, les gaz et le vide, $\epsilon_r = 1$. Donc, $\epsilon = \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m.

Pour tous les autres isolants, $\epsilon_r > 1$.



2.2. 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 l'arc lui-même. Dans ce cas, l'isolant est percé : il y a **rupture diélectrique** ou **claquage** □ 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 :

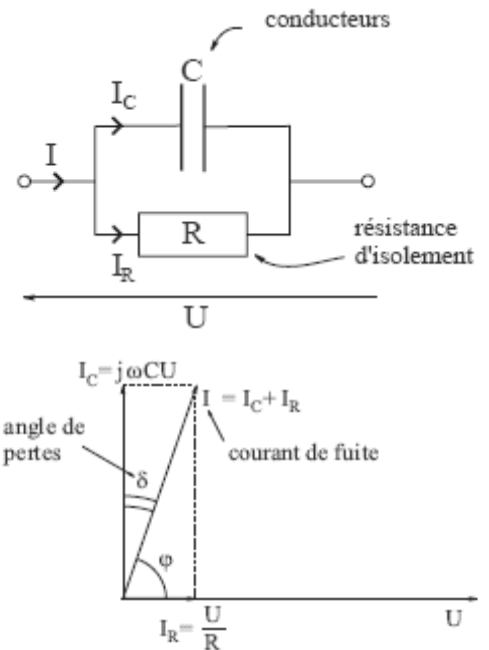
- la fréquence, la forme et la durée d'application de la tension ;

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

3. Circuit équivalent d'une isolation en courant alternatif

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

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



CALCUL DE L'ANGLE DE PERTES DIELECTRIQUES :

L'**angle de pertes** δ 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 :

On a :

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

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

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

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

- bon isolant \rightarrow résistance d'isolement R élevée \square δ faible ;
- mauvais isolant $\rightarrow R$ faible \square δ élevé.

En pratique, le facteur de dissipation $\tan \delta$ varie entre 10^{-2} et 10^{-4} .

4. Influence de la température sur les isolants :

Une élévation de température contribue à diminuer la durée de vie d'un isolant :

- diminution de la résistance d'isolement (les isolants ont généralement un coefficient de température négatif) ;
- diminution de la rigidité diélectrique ;
- oxydation ;
- ramollissement pouvant atteindre la fusion.

LOI EXPERIMENTALE DE VIEILLISSEMENT DES ISOLANTS

Une augmentation de 10°C de la température d'un isolant conduit à doubler sa vitesse de vieillissement. L'élévation de température est provoquée par les pertes diélectriques et l'échauffement des conducteurs. La chaleur est difficilement évacuée par les isolants car ceux-ci ont une conductivité thermique très faible.

CLASSIFICATION THERMIQUE DES ISOLANTS

Les isolants sont classés suivant la température maximale en dessous de laquelle ils ont une durée de vie d'une dizaine d'années.

5. Types d'isolants utilisés dans l'industrie électrique

Isolants naturels :

- minéraux ;
- organiques.

Isolants synthétiques :

- matières plastiques
- élastomères ;
- composites.

Les isolants sont classés en trois types :

classe	température max. ($^\circ \text{C}$)
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
C	>180

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

- **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 : $T_{max} = 200$ à 500 °C ; $G \approx 10$ à 20 kV/mm ; $\tan\delta = 5.10^{-4}$ à $1,2.10^{-2}$; $\epsilon_r = 10$ à 3000 .

- **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 : $T_{max} = 500$ à 1000 °C ; $G \approx 210$ à 240 kV/mm ; $\tan\delta = 3.10^{-4}$ à 26.10^{-4} ; $\epsilon_r = 6$ à 7 .

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 :

$T_{max} = 105$ °C ; $G \approx 50$ à 80 kV/mm (papier sec) ; 100 kV/mm (papier imprégné d'huile)

$\tan\delta = 2.10^{-3}$ à 4.10^{-3} ; $\epsilon_r = 4$ à 6 .

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

Propriétés : $T_{max} = 90$ à 120 °C ; $G \approx 5$ à 10 kV/mm ; $\epsilon_r = 3$.

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

Propriétés : $T_{max} = 60$ °C ; $G \approx 20$ à 30 kV/mm ; $\epsilon_r = 3$.

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 ≥ 10 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

Dérivés 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 .

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.

6. POLARISATION DIELECTRIQUE

6.1. Moment électrique d'un dipôle :

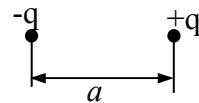
Un dipôle est formé de deux charges égales et de signes opposés.

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 soit que pour les molécules où $a = 0$, le moment dipolaire est nul.

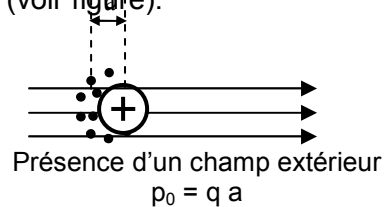
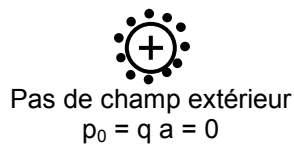
Remarque : jusqu'à présent, les scientifiques ne se sont pas mis d'accord quant au sens à donner au dipôle électrique, de la charge positive vers la charge négative ou vice versa.



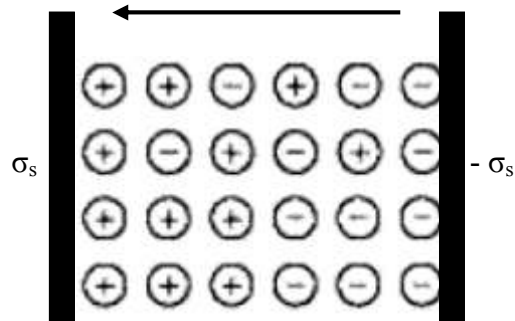
6.2. Description de la polarisation :

La propriété la plus importante d'un diélectrique est la polarisation sous l'action d'un champ électrique externe.

A 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).



POLARISATION ELECTRONIQUE



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 diélectrique

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/m²].

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

En divisant par le volume $V = Sa$, nous obtenons la polarisation P :

$$P = \sigma_s$$

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

6.3. 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 différente d'une matière à une autre.

Les centres de gravité peuvent coïncider ou ne pas coïncider :

- Dans le 1^{er} cas : la molécule est non polaire.
- Dans le 2^{ème} 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 gravité 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 (H₂, N₂, Cl₂, 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 CH₄ et CCl₄ 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.

6.4. Types de polarisation :

6.4.1. 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.



Sans champ électrique

Avec champ électrique

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 $p = e a$.

6.4.2. 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.

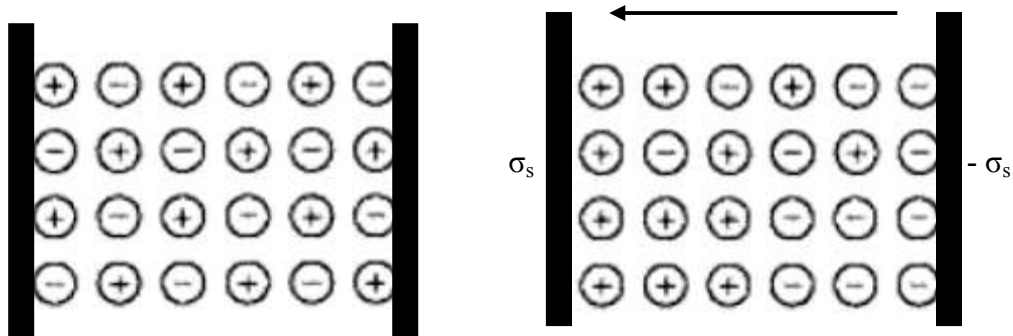
Les polarisations électronique et ionique ont beaucoup en commun. Dans les deux cas, il s'agit de déplacement de charges (et non pas rotation) dans la direction du champ électrique.



Sans champ électrique

Avec champ électrique

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



Pas de polarisation, car pas de champ électrique

Polarisation en présence du champ électrique

6.4.4. 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 une un effet appréciable sur ce type de polarisation.

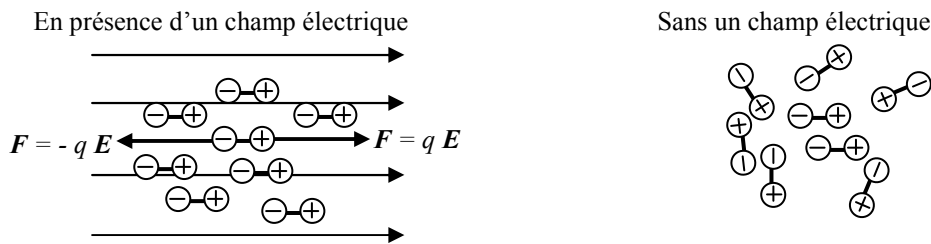
La polarisation d'orientation peut exister seulement dans les gaz, les liquides et les matières amorphes visqueuses. Dans les matières solides, les dipôles sont « figés » et ne peuvent être orientés.



Sans champ électrique

Avec champ électrique

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.

6.5. 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 diélectrique est utilisé dans certaines applications spécifiques.

Il y a plusieurs types de diélectriques non linéaires :

6.5.1. Diélectriques ferroélectriques : est le diélectrique 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 \mathbf{D} et \mathbf{E} identique à l'hystérésis magnétique entre \mathbf{B} et \mathbf{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.

6.5.2. 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.

6.5.3. Electrets : Un électret est un composé diélectrique, 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.

7. CLAQUAGE DES ISOLANTS SOLIDES

Dans les isolants solides : le claquage dans un diélectrique peut provoquer la fusion, brûler ou perforer le diélectrique et les électrodes. Après un claquage, une trace du claquage sous forme de perforation, de fonte ou de brûlure sur le diélectrique peut rester et donner une forme irrégulière à l'isolant. Si une tension est de nouveau appliquée à cet isolant, un claquage survient dans la majorité des cas, suivant le

canal tracé par la décharge précédente et même à une tension inférieure. Donc un arc qui survient dans les isolants solides nécessite leur remplacement.

Dans les isolants liquides et gazeux : Si le claquage survient dans les isolants liquides ou gazeux, la grande mobilité des particules permet à la trace de disparaître et l'isolant est ainsi régénéré (si le claquage n'a pas eu lieu pendant une durée assez grande pour changer les propriétés intrinsèques de l'isolant).

Chaque type de matériau possède une résistance au claquage (rigidité diélectrique) différente des autres. La rigidité diélectrique dépend considérablement de :

- la fréquence du réseau : la rigidité diélectrique diminuant avec l'augmentation de la fréquence ;
- température : la rigidité diélectrique diminuant avec l'augmentation de la température ;
- durée d'application de la tension.

7.1. Différents mécanismes de claquage :

Bien que de nombreux investigateurs ont étudié le claquage des isolants solides pendant presque un siècle maintenant, et qu'un certain nombre de chercheurs ont proposé des théories qui ont visé à expliquer quantitativement les processus de claquage, l'état de la connaissance actuelle dans ce domaine est toujours limité.

En pratique, le mécanisme de claquage et la rigidité diélectrique changent avec la durée d'application de la tension. Il est d'usage de classer les mécanismes de claquage suivant la durée d'application de la tension comme montré à la figure ci-dessous.

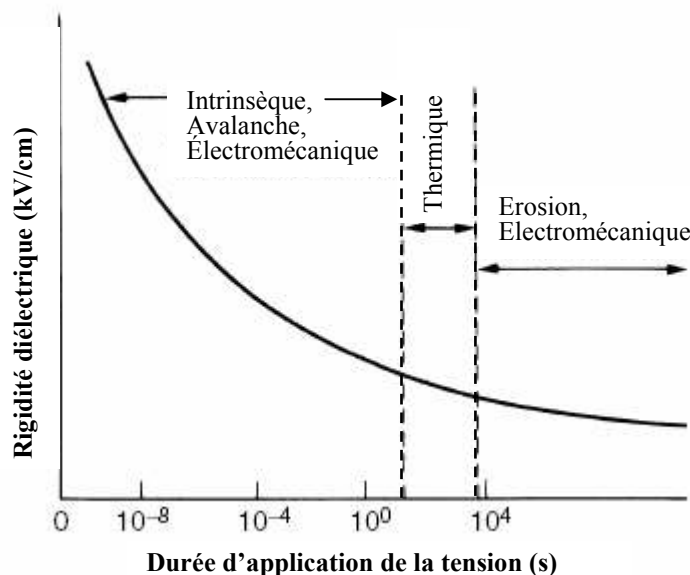


Figure : Différents types de claquage des isolants solides

7.1.1. Claquage intrinsèque

Ce type de claquage, appelé quelquefois « claquage électrique pur » pour le distinguer des autres type de calquage où le champ E intervient, n'est autre que la destruction de l'isolant sous l'action des forces électriques. Les processus secondaires (échauffement, réactions chimiques, etc...) qui peuvent intervenir et facilitent le claquage ne sont pas considérés dans le « claquage électrique pur ». Le « claquage électrique pur » se produit sous l'action des collisions des électrons et ions accélérés par le champ électrique avec les particules de l'isolant.

Le claquage intrinsèque est accompli en une durée de formation de l'ordre de 10⁻⁸s et a on admet que le claquage est de nature électronique. Les valeurs de champ électrique nécessaires pour provoquer un claquage intrinsèque pur dépassent 10⁶ V/cm. On admet généralement que la valeur critique de claquage est atteinte lorsque les électrons de l'isolant acquièrent une énergie suffisante de la part du champ appliqué pour passer de la bande de valence à la bande de conduction.

Le claquage peut se distinguer par :

- a. un temps de développement du claquage court (de l'ordre de la μ s et moins). Si le diélectrique n'est pas perforé (dans le cas d'un claquage purement électrique) peu après que la tension soit

- appliquée, il n'y a alors aucune raison pour présumer qu'un claquage purement électrique n'aura jamais lieu.
- Une petite dépendance de la tension U_c en fonction de la fréquence.
 - Une petite dépendance de la tension U_c en fonction de la température.

Remarque : Expérimentalement la tension critique de claquage intrinsèque est rarement atteinte, mais de nombreuses tentatives ont été faites de la mesurer pour différents matériaux. Jusqu'à nos jours il n'y a eu aucune preuve expérimentale franche pour affirmer si le claquage observé est intrinsèque ou pas, excepté les matières plastiques comme le polyéthylène. Ce mécanisme est tellement conceptuel, reste un mécanisme idéal identifié comme la valeur la plus élevée qui peut être obtenue si on élimine tous les effets secondaires.

7.1.2. Claquage par avalanche

Dans certaines conditions contrôlées dans les champs uniformes seulement avec les électrodes incorporées dans l'isolant, le claquage peut être accompli après le passage d'une avalanche simple, semblable à l'avalanche dans les gaz.

Quelquefois le libre parcours moyen peut être assez long pour que l'énergie cinétique acquise excède l'énergie d'ionisation qui se termine par la libération d'un électron. Le processus se répète et peut mener à la formation d'une avalanche électronique semblable aux gaz. Le claquage se produit si l'avalanche dépasse une certaine taille critique. Le concept est semblable à la théorie de claquage "streamer" développée par Raether, Meek et Loeb pour les gaz.

AVALANCHE ELECTRONIQUE

On considère deux électrodes planes placées dans un gaz et soumises à une tension élevée.

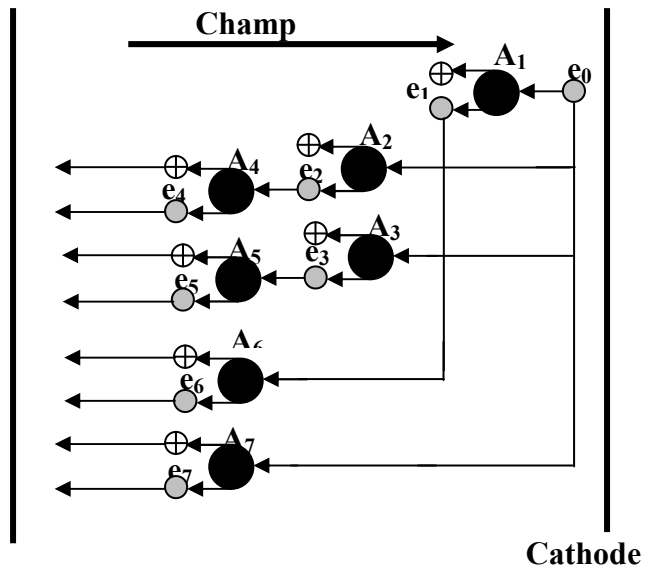
Electron primaire : crée par ionisation grâce à des agents naturels tels que les rayonnements cosmiques et la radioactivité de la terre.

Description de l'avalanche :

L'électron primaire e_0 accéléré par le champ E entre en collision avec un atome A_1 et l'ionise, A_1 libère un électron et devient lui même un ion positif.

Les électrons e_0 et e_1 ionisent par collision deux atomes A_2 et A_3 qui libèrent deux électrons e_2 et e_3 . Ces quatre électrons entrent en collision avec 4 autres atomes qu'ils ionisent \Rightarrow avalanche électronique.

La multiplication des électrons se poursuit suivant ce processus jusqu'à ce que l'avalanche arrive à l'anode.



7.1.3. Claquage électrothermique

Le claquage électrothermique se développe comme suit : un diélectrique soumis à une HT libère de la chaleur, la température du diélectrique augmente et les pertes croient encore plus. Le processus s'intensifie jusqu'à ce que l'échauffement est tel que l'isolant est endommagé. (fondu, brûlé, percé avec des fissures...) dépendant de la nature de l'isolant et des conditions environnantes, et le claquage se produit à des valeurs très faibles.

Si le facteur de pertes $\tan \delta$ (en CA) et la conductivité (en DC) sont faibles et leur augmentation en fonction de la température également faible, tandis que la conductivité thermique est élevée (qui aide à dégager la chaleur et à installer un équilibre stable entre l'échauffement et le dégagement de la chaleur), le claquage thermique devient difficile et l'isolant peut fonctionner pendant longtemps.

Remarques :

1) Généralement le claquage thermique se produit dans la région au centre des électrodes là où le refroidissement est difficile, tandis que le claquage électrique se produit dans les parties pointues des électrodes dans les régions à champ E condensé (rebords, défauts de fabrication du diélectrique...). Il

est également possible d'assister à une transition claquage électrique- claquage thermique et vice-versa.

2) En règle générale, l'augmentation de l'épaisseur du diélectrique ne se traduit pas proportionnellement par l'accroissement de la tension U_c . Dans le cas d'un claquage thermique, cela est expliqué par la difficulté d'évacuation de la chaleur pour les grandes épaisseurs.

3) Quand un isolant est chauffé, dans un premier temps la résistance augmente suite à l'élimination de toute trace d'humidité. Après que l'isolant soit tout à fait sec, la résistivité commence alors à chuter.

4) Il n'est pas nécessaire que la totalité du volume soit chauffé, il suffit qu'une petite partie soit altérée où l'échauffement est intense.

7.1.4. Claquage électromécanique

Les substances qui peuvent sensiblement se déformer sans rupture peuvent éclater quand les forces électrostatiques de compression appliquées sur l'isolant en essai excèdent sa résistance mécanique à la pression. Les forces de compression résultent de l'attraction électrostatique entre les charges externes qui apparaissent quand la tension est appliquée.

La pression exercée quand le champ atteint environ 10^6 V/cm peut être plusieurs de kN/m².

Si d_0 est l'épaisseur initiale de l'isolant, de module de Young Y , diminue à une épaisseur d (m) sous une tension appliquée V , la force de compression développée électriquement est en équilibre avec la résistance à la pression mécanique si :

$$\varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{V^2}{2d^2} = Y \operatorname{Ln}\left(\frac{d_0}{d}\right) \quad \text{Ou bien} \quad V^2 = d^2 \frac{2Y}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \operatorname{Ln}\left(\frac{d_0}{d}\right)$$

avec

ε_0 et ε_r sont la constante diélectrique de l'air et la constante diélectrique relative du diélectrique.

En dérivant par rapport à d nous constatons que l'expression possède un maximum quand $d/d_0 = \exp[-1/2] = 0,6$. Par conséquent, aucune valeur réelle de V ne peut produire une valeur stable de d/d_0 en dessous de 0,6. Si le claquage ne se produit pas à cette valeur, un accroissement supplémentaire de V rend l'épaisseur instable et provoque l'éclatement de l'isolant. La plus grande valeur de la rigidité apparente est alors donnée par :

$$E_c = \frac{V}{d_0} = 0,6 \left[\frac{Y}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \right]^{1/2}$$

7.1.5. Claquage en extrémité (point triple)

En pratique, dans les systèmes d'isolation, l'isolant solide est soumis à la conjonction d'un ou plusieurs autres matériaux. Si un des matériaux est, par exemple, un gaz ou un liquide, alors la tension de claquage mesurée sera plus influencée par le milieu à faible rigidité diélectrique que par le solide lui-même.

Une section transversale d'un exemple simple est montrée à la fig. ci-dessous, qui représente l'essai d'une galette diélectrique entre des électrodes sphère-plan. Ignorant la distribution de champ, c.-à-d. assumant un champ électrique homogène, si nous considérons un volume cylindrique élémentaire de secteur dS traversant les électrodes à la distance X comme montré à la figure, une fraction V_1 de la tension apparaît dans l'air, donnée par :

$$V_1 = \frac{V d_1}{d_1 + (\varepsilon_1 / \varepsilon_2) d_2}$$

Où d_1 et d_2 représentent les épaisseurs des milieux 1 et 2 dans la figure et ε_1 et ε_2 sont leurs constantes diélectriques respectives.

Comme le montre la figure, l'intensité du champ dans la partie gazeuse augmente plus lorsque x diminue, et atteint des valeurs très élevées quand d_1 devient très petite (point B). En conséquence le gaz claque à une tension appliquée relativement faible. La concentration de la charge électrique estimée à l'extrémité d'un canal de la décharge locale est suffisante pour obtenir un champ local de l'ordre de 10 MV/cm, qui est plus élevé que la valeur de claquage intrinsèque. Le claquage se développe et le claquage complet est le résultat d'une succession de nombreux petits claquages produits dans l'isolant et en avançant pas à pas à travers toute l'épaisseur de l'isolant.

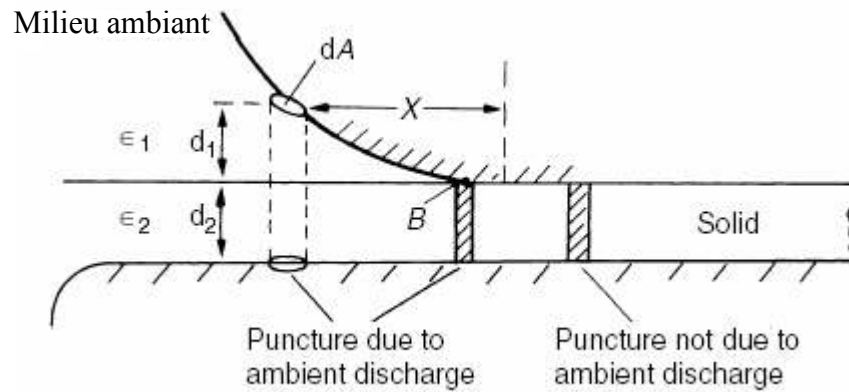


Figure : Représentation schématique d'un claquage au point triple

Décharge arborescente :

En général, le claquage des isolants solides n'est pas accompli par la formation d'un seul canal de décharge, mais prend une forme à arbre comme montré à la figure suivante, ce qui peut être aisément démontré dans un laboratoire en appliquant une tension d'impulsion entre les électrodes pointe-plan avec la pointe introduite dans un isolant transparent, par exemple le plexiglas.

Le temps requis pour ce type de décharge sous une tension alternative varie de quelques secondes à quelques minutes.

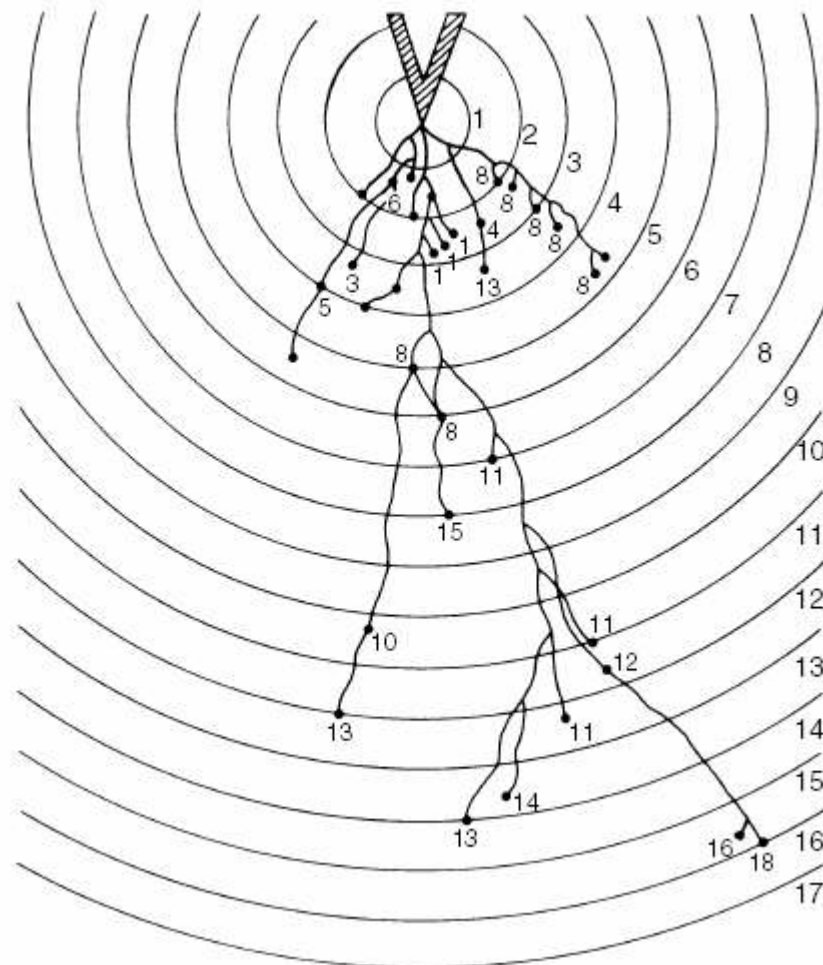


Figure : Claquage d'un isolant du au point triple « claquage dans le plexiglas entre deux électrodes pointe-plan . Le nombre de canaux produits $n=16$.



7.1.6. Claquage par décharge partielle

Les isolants habituellement utilisés en haute tension ne sont jamais parfaitement homogènes. Il existe dans le matériau des cavités de formes et dimensions diverses. **Elles sont la cause principale de vieillissement et de destruction des isolations solides à moyen et à long terme.** La mesure des décharges partielles est considérée comme un outil très important pour perfectionner la fiabilité des systèmes d'isolation à HT. L'interprétation et l'analyse des grandeurs mesurées constituent la clé pour estimer le risque de défaillance de cette isolation.

Quel que soit le mécanisme de détérioration, il en résulte une érosion lente de l'isolant et une réduction considérable de la tension critique de claquage.

On considère un isolant solide dans lequel existe une inclusion gazeuse. Cela peut être modélisé par le circuit de la figure.

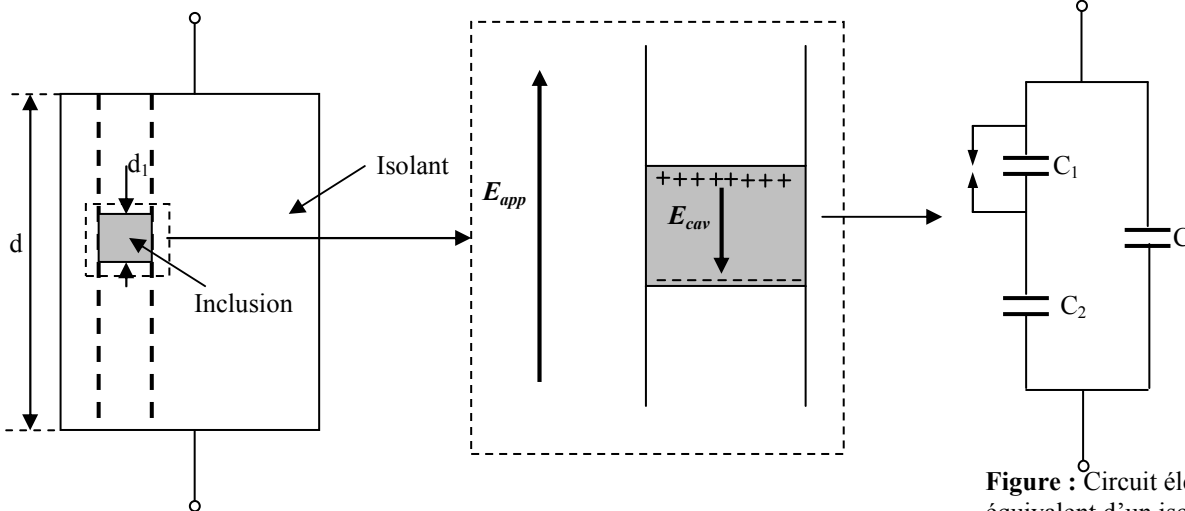


Figure : Schéma équivalent d'un isolant solide contenant une cavité gazeuse

Figure : Circuit électrique équivalent d'un isolant solide contenant une cavité gazeuse

- C_1 : capacité de l'inclusion, source de DP ;
- C_2 : capacité de l'isolant en série avec C ;
- C : capacité du reste de l'isolant hors décharge.

Considérons une plaque diélectrique d'épaisseur d , à l'intérieur de laquelle se trouve une cavité en forme de disque plat de hauteur d_1 et de surface S .

La capacité de la cavité est :

$$C_1 = \epsilon_0 \epsilon_{r1} \frac{S}{d_1}$$

Avec $\epsilon_{r1} = 1$, permittivité relative de la cavité gazeuse.

La capacité du diélectrique voisin (supposé sans pertes), de surface S et de hauteur $d - d_1$ est :

$$C_2 = \varepsilon_0 \varepsilon_{r2} \frac{S}{d - d_1}$$

Avec ε_{r2} permittivité relative du diélectrique

La tension U_{c1} aux bornes de la cavité vaut donc :

$$U_{c1} = \frac{C_2}{C_1 + C_2} U$$

Avec U : tension totale appliquée.

En remplaçant les capacités par leurs expressions, on trouve :

$$U_{c1} = \frac{U}{1 + \frac{1}{\varepsilon_{r2}} \left(\frac{d}{d_1} - 1 \right)}$$

Exemple :

Application numérique

$d = 10 \text{ mm}$

$\varepsilon_{r2} = 4$

$d_1 = 0,1 \text{ mm}$

$U = 20 \text{ kV}, 50 \text{ Hz}$

Par conséquent:

$$U_{c1} = \frac{20}{1 + \frac{1}{4} \left(\frac{10}{0,1} - 1 \right)} = \frac{20}{25,8} = 0,78 \text{ kV}$$

Le champ électrique moyen à l'intérieur de la cavité vaut :

$$E_c = U_c / d_1 = 0,78 / 0,01 \approx 78 \text{ kV/cm.}$$

Or nous savons que, dans l'air à la pression atmosphérique, le champ critique de claquage est de l'ordre de 21 kV/cm en valeur efficace et 30 kV/cm en valeur crête. Nous aurons donc un claquage ou DP dans la cavité.

RESUME :

Les causes du claquage des solides sont diverses :

- Causes d'origine électrique : des charges électriques sont injectées par les électrodes ou proviennent par dissociation de particules dans le volume du matériau.
- Claquage d'origine thermique : à l'origine il existe un phénomène électrique conduisant à un échauffement du matériau.
- Claquage dû à des effets parasites : des défauts dans le matériau sous forme d'inclusions solides ou gazeuses, qui provoquent une distorsion du champ électrique.
- Claquage électromécanique : sous l'action d'un champ électrique E , un matériau de permittivité ε est soumis à une pression qui a tendance à rapprocher les électrodes et donc d'exercer une contrainte de compression, sur le matériau.

8. CONTOURNEMENT

Ci-dessous, des valeurs de la rigidité diélectrique de certains diélectriques, en tension alternative à 50 Hz :

Diélectrique	Rigidité diélectrique (kV/cm)
Mica	1000-3000
Caoutchouc	300-500
Huile de transformateur	150-250
Air	20-50

Il est évident que la rigidité diélectrique des isolants solides est beaucoup plus grande que celle des isolants liquides et gazeux. Par conséquent, il peut se produire une décharge glissante plutôt qu'un claquage.

Le contournement est la formation d'un chemin de conduite (fuite) permanent sur la surface d'un isolant qui dans la plupart des cas provoquent la dégradation de l'isolation. Lorsque l'isolant se trouve à l'extérieur, il subit les conditions ambiantes de l'environnement et devient couvert de pollution qui peut être d'origine industrielle ou côtière. En présence de l'humidité la couche de contamination provoque un courant de fuite qui chauffe évapore par échauffement l'humidité à la surface et provoque une interruption dans le film d'humidité; de petites étincelles apparaissent alors aux bornes des bandes sèches.

Humidité : la présence de l'humidité fait diminuer la résistivité de l'isolant. Cela peut être expliqué par le fait que les impuretés présentes dans l'eau dissocient les molécules en ions et que l'eau elle-même peut aider à la dissociation des molécules de la matière elle-même. L'humidité peut également former à la surface un film conducteur d'une électrode à l'autre.

Afin de protéger les isolants contre l'effet de l'humidité, ils sont imprégnés et couverts avec une couche de produit non hygroscopique qui retarde sensiblement l'humidification de la surface isolante.

Conséquence du contournement :

La chaleur résultant des petites étincelles cause la carbonisation et la volatilisation de l'isolation et mène à la formation d'une « voie carbonique » permanente sur la surface. Le phénomène du cheminement limite sévèrement l'utilisation de l'isolation organique dans l'environnement extérieur. Le taux et la sévérité du cheminement dépendent de la structure des polymères et peuvent être considérablement atténués en y ajoutant des produits chimiques appropriés au polymère qui empêchent la carbonisation.

- *Résistance superficielle R_s* : due à l'humidité et des contaminants qui se forment à la surface de l'isolant (cas de la pollution qui se dépose sur la surface des isolateurs).
- *Résistance volumique R_v* : résistance de la matière isolante.
En général : $R_v \gg R_s$.
- *Résistance équivalente R* : R_v et R_s en parallèle.
Bien entendu, nous avons : $I_s = U / R_s \gg I_v = U / R_v$.

Remarque : Les diélectriques poreux contenant de nombreuses vacuoles d'air ont une rigidité plus faible que le diélectrique lui-même. Quand ces diélectriques poreux sont associés avec des isolants liquides ou des isolants solidifiants, leur rigidité augmente largement.

Exemple : papier $E_c = 3-5$ MV/m (comme l'air)

Papier imprégné d'huile $E_c = 40 - 80$ MV/m qui est utilisé pour l'isolation des câbles de puissance.