

ESSAIS D'ISOLEMENT

MESURES DIÉLECTRIQUES, NE VOUS LAISSEZ PAS INFLUENCER

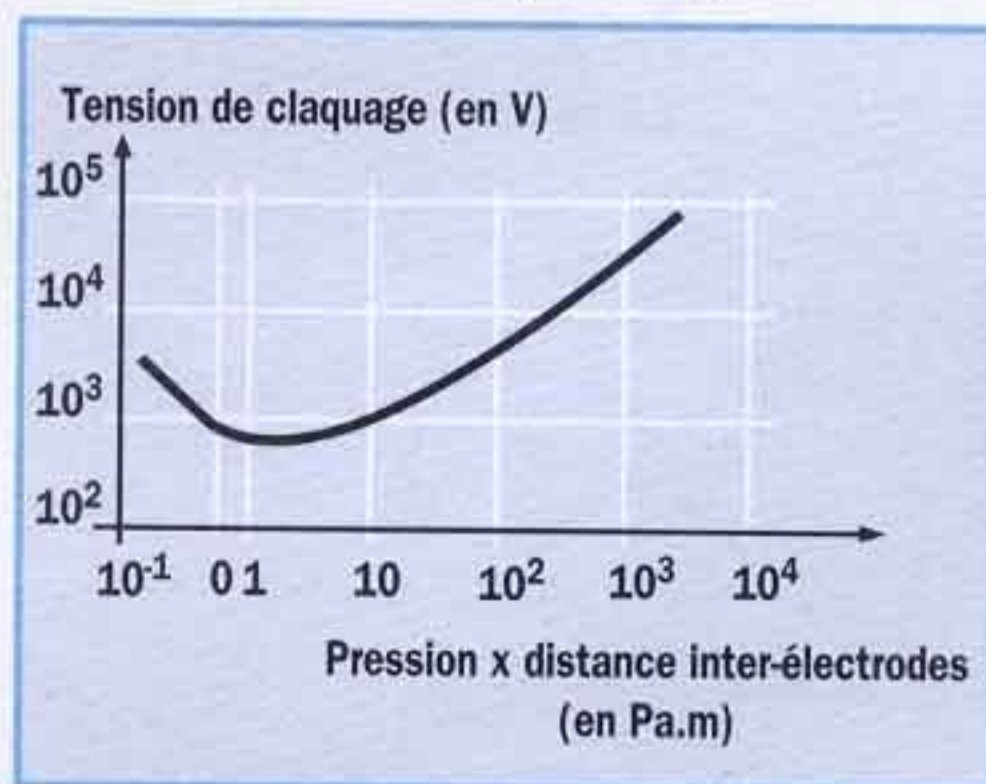
■ En milieu industriel, les mesures de rigidité diélectrique sont liées à l'application de normes de sécurité qui imposent de tester les matériaux isolants. Pour éviter les erreurs d'interprétation, il est bon de connaître l'influence des facteurs d'environnement sur ces mesures. Pression, température et hygrométrie sont à contrôler en priorité. Sefelec, spécialiste des mesures diélectriques, sensibilise ici les utilisateurs à ces problèmes...

Remparts contre les fuites de courant, éléments de sécurité pour les utilisateurs, les isolants diélectriques sont un gage indispensable du bon fonctionnement d'un nombre impressionnant de produits industriels.

Pour contrôler l'efficacité de ces matériaux, on les teste en réalisant des mesures de rigidité diélectrique. Il s'agit d'appliquer une tension croissante (continue ou alternative) entre deux électrodes noyées dans le milieu isolant à tester, et d'attendre qu'un arc électrique apparaisse. La valeur du champ électrique à l'apparition de cet arc correspond à la rigidité diélectrique de l'isolant. Dans la pratique, on distingue deux types d'essais : d'une part les essais réalisés afin de déterminer la tension de rupture (ou de claquage) d'un milieu isolant, et d'autre part des essais normatifs utilisés pour détecter d'éventuels défauts sur un produit. Dans le

cas des normes, les matériaux testés sont soumis à des tensions généralement très en dessous de leurs limites de rupture. Le rapport entre ces tensions et la tension de claquage représente en quelque sorte le coefficient de sécurité demandé pour la conception du matériel.

En milieu industriel, il est parfois diffi-



Courbe de Paschen pour l'air, à 20 °C. Evolution de la tension de claquage en fonction du produit de la pression par la distance inter-électrodes.

cile d'interpréter les mesures diélectriques car les conditions d'environnement peuvent avoir une influence non négligeable sur les résultats. Température, pression, hygrométrie sont autant de facteurs d'influence qu'il ne faut pas négliger. Mieux, il est nécessaire de connaître leurs effets sur la rigidité diélectrique des matériaux, afin d'éviter de fausses interprétations qui parfois peuvent conduire à refuser un produit alors qu'il est bon. Une chose est sûre, ces facteurs d'influence n'agissent pas de la même manière suivant la nature de l'isolant concerné.

Les isolants gazeux, sensibles aux pressions

Les isolants gazeux sont assez fortement influencés par les facteurs d'environnement. La pression et la température y jouent un rôle de premier plan. En effet, ces deux grandeurs physiques, lorsqu'elles varient, modifient la densité des gaz. Conséquence, le champ électrique de rupture des gaz isolants augmente avec la pression et diminue avec la température.

Sur la base de nombreux résultats expérimentaux, on peut résumer la relation qui unit la température à la tension de claquage d'un gaz par la formule générale :

$$Vc = Ec_0 \cdot d \cdot k$$

où Vc est la tension de claquage (en kV), Ec_0 est le champ de rupture (en kV/cm, $Ec_0 = 31$ kV/cm dans l'air), d est la distance entre les électrodes de mesure (en cm) et enfin k est un facteur de correction dépendant de la densité de l'air.

En prenant comme référence la norme C.E.I. 60-1 (éditée en 1989) sur les "Techniques des essais à haute tension", le facteur de correction k peut être défini par la fonction $k = \rho^m$ ou m est un exposant généralement égal à 1, et ρ la densité relative du gaz par rapport à l'air.

Pour la pression, la tenue en tension dans les gaz varie suivant la loi de Paschen. Si on considère un gaz soumis à un champ électrique entre deux électrodes planes métalliques, on obtient pour la tension de cla-

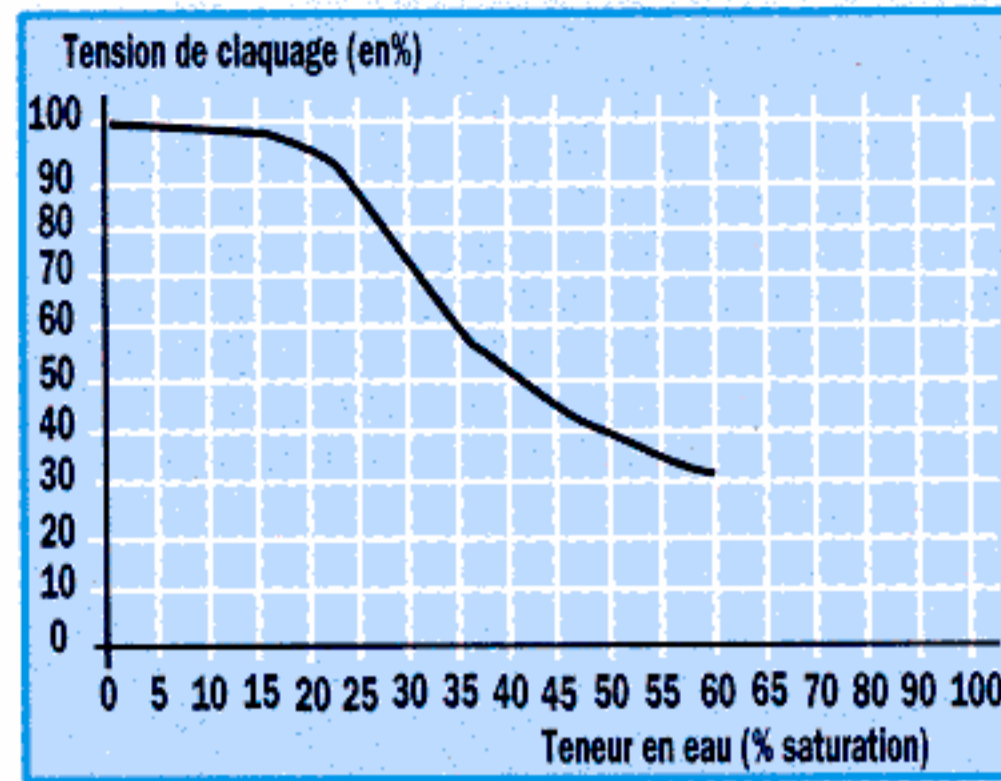
quage V_c une relation de la forme :

$$V_c = \frac{B.p.d}{C + \log(p.d)}$$

où p est la pression du gaz (en Pa),
 d est la distance entre les électrodes (en cm),
 B et C des constantes dépendantes de la nature du gaz et de la matière dont est faite la cathode.

On peut remarquer que la courbe présente un minimum de la tension de claquage pour une valeur particulière du produit $p.d$. Cette tension de claquage minimale est comprise entre 100 et 500 V, pour la plupart des gaz purs. Elle correspond à une valeur du champ électrique pour laquelle la capacité d'ionisation des électrons est maximale.

Attention cependant, cette loi, bien qu'étant un bon indicateur du comportement des gaz, n'est valable que pour une température constante et pour des champs électriques inférieurs à 100 kV/cm. Concernant l'hygrométrie, même si son incidence sur le seuil du claquage et sur la tension d'apparition de la décharge est connue, son influence exacte reste difficile à quantifier. Si dans une atmosphère contrôlée en laboratoire, on peut lier l'humidité absolue de l'air au seuil de la tension de rupture, il est plus difficile de le faire en pratique dans un milieu industriel.



Influence de la teneur relative en eau sur la rigidité diélectrique d'une huile minérale, mesurée en tension alternative entre électrodes planes et parallèles.

Pour l'air, par exemple, et pour des valeurs d'humidité relative inférieures à 80 %, on constate que la rigidité augmente avec l'accroissement de l'humidité. En simplifiant quelque peu, on peut dire que la présence de molécules d'eau, plus denses que le gaz, "freine" le phénomène d'avalanche à l'origine du claquage. Afin d'avoir une bonne estimation de l'influence de l'humidité dans l'air ambiant, on peut néanmoins utiliser la relation suivante :

$$V_c = V_{c_0} \cdot k_h$$

où V_{c_0} est la tension de rupture pour une valeur de l'humidité absolue de 11 g/m³ correspondant à l'atmosphère normale de référence, et k_h , le facteur de correction lié à la racine carrée de l'humidité absolue, défini par des

courbes de correction normalisées, que l'on trouve rassemblées dans la norme CEI 60-1 (NFC 41 101).

Isolants liquides : température et pression à surveiller

L'expérience a montré que la rigidité diélectrique des liquides isolants varie peu en fonction de la température. Ce facteur agit plutôt de manière indirecte. Il modifie la permittivité, la résistivité et le facteur de dissipation diélectrique du liquide entraînant très probablement un phénomène du type claquage thermique. Sur un liquide diélectrique pur, si on utilise une onde de choc de courte durée (entre 1 et 50 μs) pour éviter le claquage thermique, on observe que l'augmentation de la température provoque en général une diminution de la valeur du champ de claquage (avec une chute brutale au voisinage de la température d'ébullition). Ce phénomène s'explique entre autre par la diminution de la densité et de la viscosité du liquide qui augmente la mobilité des ions et des électrons.

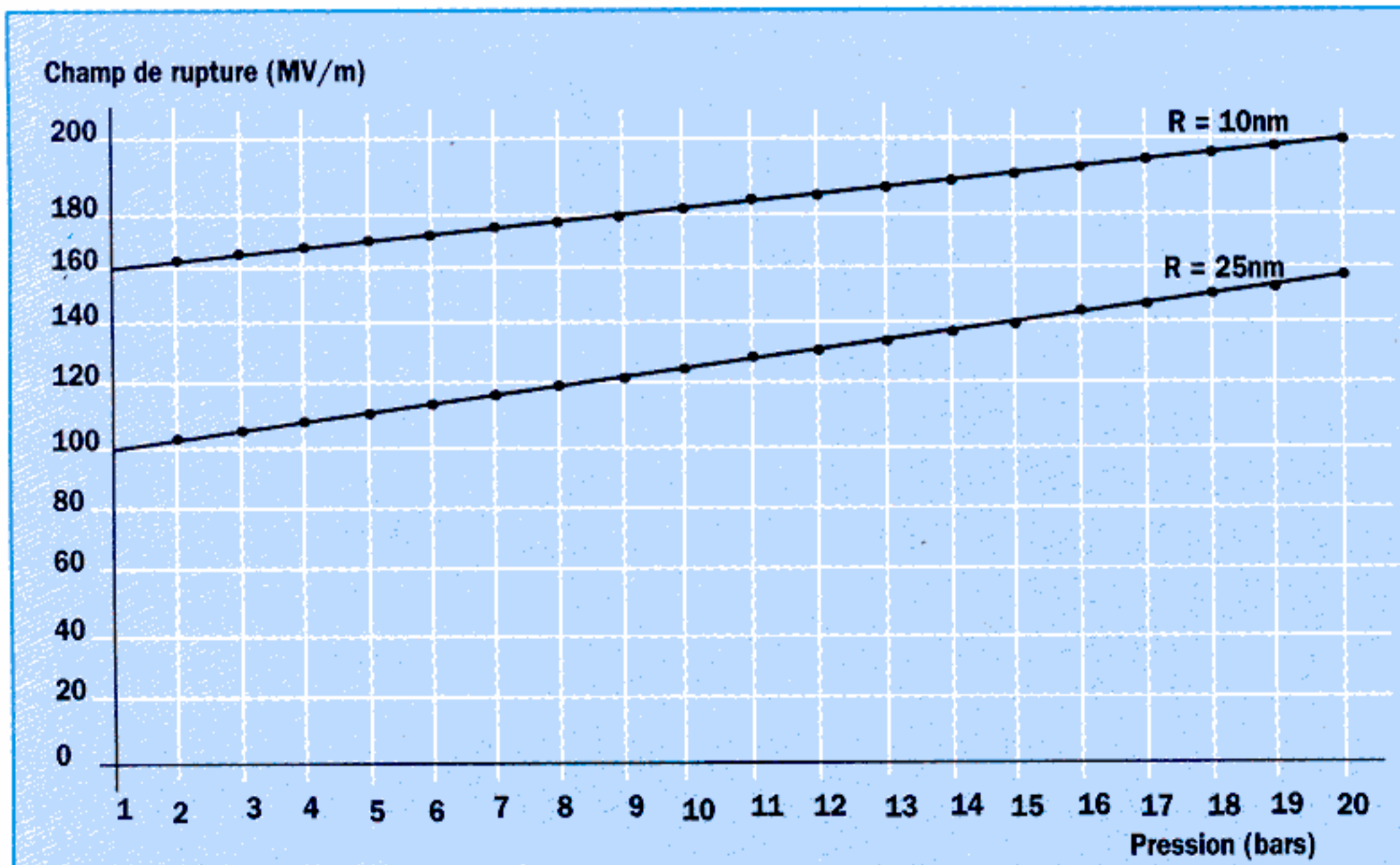
Prenons un exemple, les alcanes. On montre que ces liquides suivent approximativement une loi du type : $\log E \sim T^{-1}$

où E est le champ de rupture (en kV/cm) et T la température (en °C).

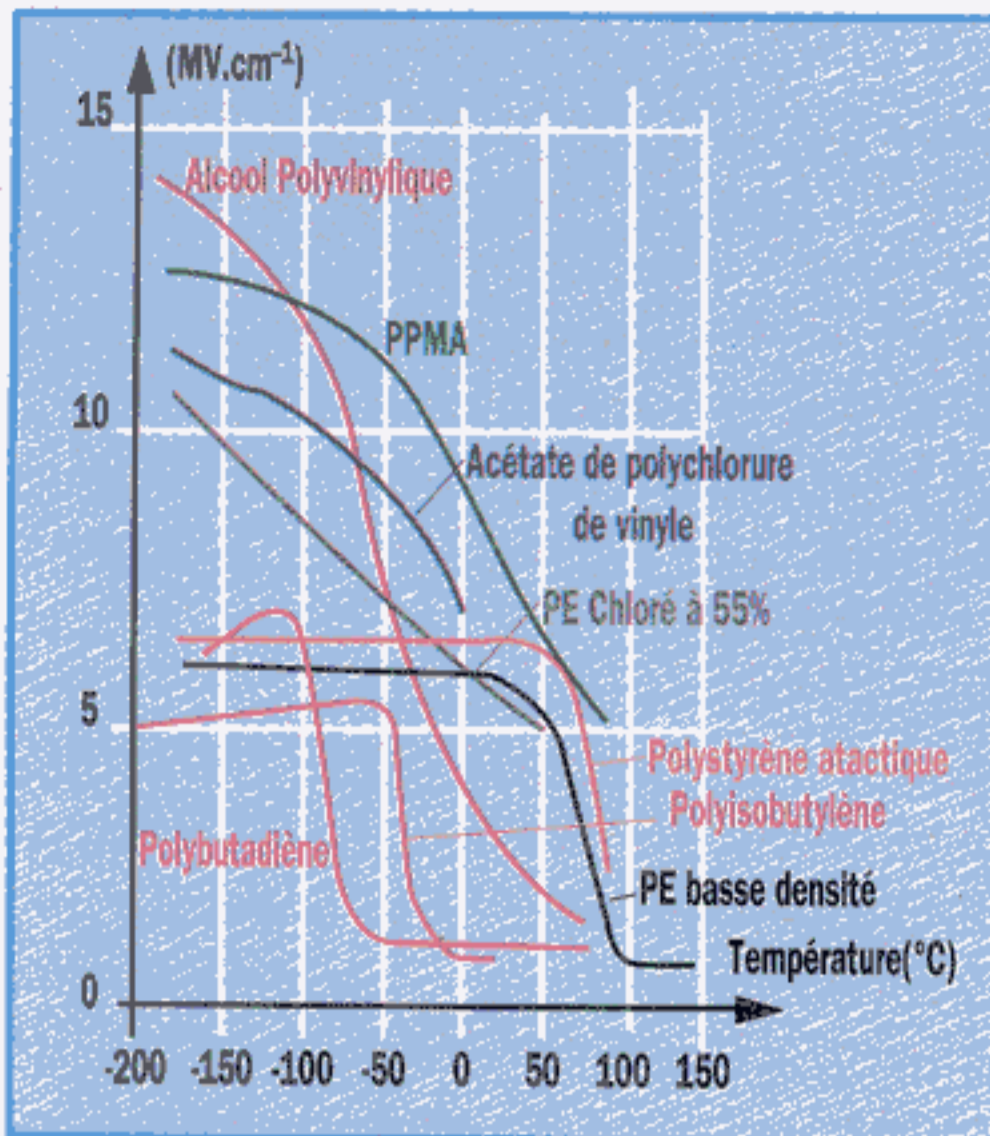
Pour un représentant de cette famille, l'hexane, le champ de claquage est par exemple de 900 kV/cm à 5 °C et de 500 kV/cm à 60 °C.

On peut aussi noter que l'augmentation de la température au sein d'un isolant liquide peut accélérer des réactions chimiques avec le milieu ambiant, notamment l'oxygène de l'air, ou avec des impuretés présentes dans le liquide diminuant de manière significative sa durée de vie (baisse de ses qualités de tenue en tension par exemple).

Les principaux isolants liquides utilisés dans l'industrie sont des huiles minérales, mélanges d'hydrocarbures paraffiniques, naphthéniques et aromatiques. Ces huiles ne sont jamais pures et contiennent souvent une certaine quantité de gaz dissous (hydrogène, méthane, éthane, éthylène, acétylène,...). Celle-ci augmente avec la température, provoquant alors des décharges par-



Evolution du champ de rupture électrique d'un liquide en fonction de la pression pour deux valeurs de rayons de particules.



Variation de la rigidité diélectrique de polymères polaires et non polaires en fonction de la température.

tielles et des réactions chimiques avec le milieu. C'est essentiellement par le biais de cette présence de gaz dissous que la pression est un facteur d'influence à ne pas négliger pour les liquides.

La rigidité diélectrique de certains liquides tel que l'hexane, l'heptane ou le benzène, dépend aussi de la simple pression hydrostatique. On constate, par exemple, que leur rigidité diélectrique peut augmenter de 30 % entre 0 et 25 bars au cours d'essais en tension de choc ayant une largeur d'impulsion de 4,5 μ s environ. Pour les huiles minérales, elle peut être multipliée par 4 pour une variation de 40 bars et une tension alternative à 50 Hz.

Concernant l'hygrométrie, on constate que pour les huiles minérales, au-delà de 3 % d'eau, la dégradation de la tenue diélectrique est accélérée par l'action combinée de la température (lorsque celle-ci dépasse 55 °C) et du champ électrique. Un phénomène d'électrolyse de l'eau se produit, avec formation de gaz produisant des décharges partielles conduisant au claquage. Les variations de la tenue diélectrique sont d'autant plus sensibles que le liquide est pur et qu'il a une valeur élevée pour son champ de rupture. On peut citer par exemple les expériences sur de l'huile dégazée très pure à laquelle on ajoute 200 ppm d'eau. Son champ de rupture peut passer, du fait de cette présence d'eau, de 700 à 100 kV/cm.

La rupture diélectrique

■ Le phénomène de claquage dans un matériau isolant, est dû à une accumulation d'énergie, d'origine thermique, cinétique ou élastique, que le matériau n'est pas capable de compenser.

Dans le phénomène de claquage, on distingue généralement le *claquage électronique* et le *claquage thermique*. Notons que cette distinction est un peu académique car un claquage électronique conduit toujours à une destruction locale du matériau par fusion thermique. De même, un claquage thermique est principalement la conséquence d'un phénomène d'injection et/ou de conduction de nature électronique.

La condition nécessaire mais non suffisante pour qu'un claquage électronique se produise est la présence dans la matière isolante d'électrons de conduction pouvant être accélérés pour atteindre l'énergie d'ionisation des atomes (soit de 5 à 10 eV). Pour

que le phénomène d'avalanche (qui va être à l'origine de l'arc électrique) se produise, il suffit alors qu'un nombre suffisant d'électrons soit produit, pour créer un "pont" conducteur dans le matériau isolant.

A l'origine du phénomène de claquage thermique, on trouve le fait que chaque matériau isolant présente souvent une légère conduction (sa résistance interne n'est pas infinie). Le courant engendré par l'application d'une tension d'essai à l'intérieur du matériau entraîne donc un échauffement par effet Joule. La conductivité augmente avec la température et le phénomène d'échauffement tend vers un emballement thermique. Si l'évacuation de la chaleur n'est pas suffisante, on atteint alors la destruction du matériau par "claquage thermique".

En champ alternatif uniforme, on constate aussi qu'un liquide fortement hydraté peut voir sa rigidité diélectrique divisée par un facteur supérieur à 3. Dans ce cas, le paramètre important n'est plus la teneur absolue en eau, mais sa valeur relative par rapport à la saturation.

Isolants solides, attention à l'hygrométrie

Un isolant solide peut être influencé par les températures qui s'écartent sensiblement de l'ambiante, assez peu par la pression (sauf pour les hautes pressions) et de façon très variable par l'hygrométrie suivant la nature de l'isolant et la durée d'application de ce facteur.

La grande diversité des matériaux utilisés comme isolants solides ne permet pas de dégager une loi générale sur leurs comportements en température. Pour les polymères, les rigidités diélectriques en courant continu sont de l'ordre de 1 à 9 MV/cm à 20 °C. C'est aux basses températures que l'on trouve les valeurs maximales, de l'ordre de 10 MV/cm pour les composés polaires. Aux températures élevées,

ces valeurs décroissent rapidement. La température agit également sur les conditions d'apparition du claquage thermique. Dans ce cas, on peut prendre la relation suivante pour une bonne approximation du phénomène :

$$V_{oc} = \sqrt{A \cdot T e^{\left(\frac{B}{T}\right)}}$$

où V_{oc} est la tension critique en MV, T est la température en °C, et A et B sont des constantes.

La rigidité diélectrique dans les milieux cristallins est spécifique. Généralement, elle augmente en fonction de la température depuis les basses températures jusqu'à l'ambiante et redescend rapidement pour les températures élevées. Un isolant soumis à des températures supérieures à la température ambiante pendant un temps relativement long subit un vieillissement thermique non négligeable. Les isolants solides sont en théorie peu influencés par la pression dans la mesure où celle-ci ne modifie pas sensiblement leurs épaisseurs ou leurs formes et leurs compositions internes. On peut noter toutefois que certains matériaux tels que les polymères sont légèrement

Des isolants dans toutes les matières

■ Les isolants diélectriques se présentent sous des formes très diverses, dans les trois états de la matière. A l'état gazeux, l'isolant le plus courant et le plus naturel est l'air ambiant. Cependant, certains équipements spéciaux comme les disjoncteurs de puissance utilisent l'air comprimé, l'hexafluorure de soufre (SF_6) ou d'autres gaz aux propriétés diélectriques intéressantes. Dans les transformateurs et les équipements hautes tensions de puissance (condensateurs, câbles imprégnés, etc.) on retrouve plutôt des isolants sous forme liquide, comme les huiles minérales. Ces dernières sont aujourd'hui de plus en plus remplacées par de

déformables (en épaisseur) si on applique une pression entre leurs faces opposées. Sur des films minces, si l'on applique une pression importante pendant un temps suffisamment long, il est

nouveaux produits, plus performants, comme le néocaprâte de benzyle (BNC) ou le PhénylXylyléthane (PXE). Quant aux isolants à l'état solide, ils représentent la catégorie la plus répandue et la plus diversifiée. A titre d'exemple, on peut citer les polymères thermoplastiques (polyéthylène, polypropylène, polyamide, etc.) pour les câbles de transport d'énergie, les câbles HF, les conducteurs isolés ; les polymères thermodurcissables (polyester, époxydes,...) pour des pièces moulées, la connectique ; les élastomères (polyéthylène réticulé, néoprène, silicones, etc.) ; et enfin le verre ou le mica pour la réalisation d'isolateurs et de condensateurs.

possible que la rigidité diélectrique du matériau varie de manière significative. Toutefois, pour la plupart des matériaux isolants solides, le module de Young est compris entre 150 et 30 000 N/cm² ce

qui rend négligeable l'influence de la pression sur la tension de rupture diélectrique, de l'ordre de 0,02 % à 0,6 % pour une variation de 1 bar.

A noter enfin, que sous l'effet combiné d'un fort taux d'humidité (supérieur à 95 %) et d'une température élevée (supérieure à 100 °C), la plupart des polymères se dégradent. La solubilité de l'eau augmente avec la température, ce qui occasionne au sein d'isolants à structure hétérogène des phénomènes de gonflement qui créent ou aggravent l'état de fissures, favorisant ainsi le cheminement d'un arc électrique. L'humidité accélère donc le développement d'arborescences électrochimiques. La vitesse de développement de ces "chemins préférentiels" est proportionnelle à la capacité d'absorption du polymère. Elle est, par exemple, de l'ordre de 200 µm par 1 000 ppm d'eau à 90 °C, après 500 heures, pour les polymères réticulés.

Michel Chateau
Directeur Technique
Sefelec