

Claquage des isolants liquides

En 1937, Von Hippel proposait d'adopter les résultats acquis dans le domaine de la disruption des gaz, pour la compréhension du claquage électrique dans la phase condensée.

C'est ainsi que 20 ans plus tard, Lewis et Adamczewski proposaient l'existence d'un processus d'ionisation du type a semblable à celui des gaz: théorie de claquage électronique basée sur les vibrations moléculaires et les électrons libres.

Par la suite, Swan postulait qu'une émission électronique et une multiplication de charges jouaient un rôle essentiel dans le processus de claquage des liquides. Ce modèle présente un certain nombre d'insuffisances, en particulier son incapacité d'expliquer le fait que la tension de claquage dépend de la pression comme l'ont rapporté Kock, Kao et Higham. Cette dépendance de la pression, suggère l d'un changement de phase durant le claquage.

- Pour Watson et Sharbaugh, le processus de claquage est dû à la formation d'une cavité (bulle) gazeuse par ébullition locale du liquide, au niveau d'aspérités sur la surface de la cathode. Des mécanismes de bulle ont été aussi proposés par Kao, Krasucki, Thomas,... Plusieurs observations expérimentales sont en faveur de cette hypothèse.
- Ainsi, deux principaux mécanismes peuvent être présentés en ce qui concerne le claquage des diélectriques liquides:
 - 1- mécanisme électronique,
 - 2- mécanisme avec phase gazeuse.

En plus de ces mécanismes, le claquage peut être dû à la présence d'impuretés de diverses natures, en suspension dans le diélectrique liquide. On parle dans ce cas de

3- mécanisme de claquage par pont.

Ce dernier mécanisme est le plus proche de celui concernant les huiles de transformateur. Ces dernières sont soumises à différentes contraintes en exploitation, plus particulièrement au vieillissement électrique et au vieillissement thermique en présence d'impuretés de différentes natures.

1.1 MECANISME ELECTRONIQUE:

Il a été constaté dans le Xénon et l'Argon liquides, que le courant croît de manière exponentielle lorsque la tension appliquée augmente. Cela a été interprété comme le résultat d'un processus d'avalanche.

D'après Von Hippel:

La condition limite d'apparition d'une ionisation électronique des particules du liquide est donnée par:

$$e \cdot E_c \cdot \lambda = c \cdot h \cdot \nu$$

- E_c : intensité de champ
- λ : l.p.m d'un électron dans le liquide
- $h \cdot \nu$: quantum d'énergie perdu par un électron dans les processus non ionisants
- c : constante liée aux conditions expérimentales.

D'après Lewis:

Dans les hydrocarbures liquides, l'électron fournit son énergie principalement dans les processus d'excitation, lors des vibrations des liaisons chimiques C-H. La rigidité diélectrique E_c , peut être formulée par:

$$E_c = \frac{c \cdot h \cdot \nu_{C-H}}{e} \cdot N \cdot \sum (n_i \cdot Q_i)$$

- h: constante de Planck
- ν_{C-H} : fréquence de vibration des liaisons C-H
- N: nombre de particules par unité de volume
- n_i : nombre de groupes (CH, CH₂, CH₃) de section efficace Q_i .

D'après Adamczewski

Les pertes d'énergie des électrons sont essentiellement liées aux processus d'excitation lors des vibrations des liaisons C-C.

La rigidité diélectrique est donnée par:

$$E_c = \frac{h \cdot \nu_{C-C}}{e} \cdot d \cdot l \cdot (n - 1) \cdot N \cdot \frac{\rho}{M} \cdot A$$

- ν_{C-C} : fréquence de vibration des liaisons chimiques C-C
- d: distance moyenne entre les axes des molécules
- l: longueur de la projection des liaisons C-C sur l'axe des molécules
- n: nombre d'atomes de carbone dans la molécule
- ρ : densité du liquide
- M: masse moléculaire du liquide - A: nombre d'Avogadro.

Les théories de Lewis et d'Adamczewski peuvent expliquer la variation expérimentale de la rigidité diélectrique impulsionnelle des hydrocarbures liquides très purs, en fonction de leurs propriétés physiques et chimiques.

Il existe aussi d'autres théories électroniques de claquage des liquides et dont la formulation générale est très proche de la théorie de Townsend pour la disruption des gaz. Ces théories restent encore peu développées.

<i>Liquide</i>	<i>Rigidité Diélectrique (MV/cm)</i>
Hexane	1.1–1.3
Benzène	1.1
Huile (bonne)	~1.0–4.0
Silicone	1.0–1.2
Oxygène	2.4
Azote	1.6–1.88

1.2 MECANISME DE CLAQUAGE AVEC PHASE GAZEUSE

Dans les liquides ultra-purs, et en géométrie pointe-plan, sous tension continue, il a été observé, qu'à partir d'un certain seuil de tension, des bulles gazeuses se forment au voisinage de la pointe, puis sont violemment chassées vers le plan. Cette phase gazeuse résulterait soit de la vaporisation et de la nucléation des bulles, soit de la cavitation.

Mécanisme Thermique

D'après Watson et Sharbaugh, une bulle de vapeur est générée dans le liquide par une injection de courant, à partir d'aspérités sur la cathode. Ce courant serait limité par la charge d'espace et a la forme suivante:

$$I = A.V^n$$

A = Cste et $1,5 < n < 2$

Pour une tension V de durée t, l'énergie nécessaire à l'ébullition locale serait:

$$H = A.E^n . t$$

E supposé proportionnel à la tension U)

En considérant l'énergie nécessaire à l'ébullition d'un volume de liquide donné:

$$H = C_p . (T_b - T_a) + L_v$$

- C_p : chaleur spécifique moyenne,
- T_b : température d'ébullition,
- T_a : température ambiante, et
- L_v :chaleur latente de vaporisation,

Watson et Sharbaugh ont établi un critère de claquage vérifié dans les n-alcanes, en identifiant les deux énergies citées.

Le modèle de ces deux auteurs utilise une équation relative à l'état stationnaire, alors qu'il s'agit d'un régime transitoire d'échauffement.

Un modèle plus élaboré et tenant compte du régime transitoire a été proposé par Kao. D'après cet auteur, si la densité de courant est suffisante pour ramener la température du liquide à son point d'ébullition, il y a claquage.

Mécanisme de cavitation

Si un liquide est chauffé à pression constante (ébullition), ou s'il est soumis à une dépression à température constante (cavitation), il apparaît des bulles ou cavités de vapeur ou de mélange de vapeur et de gaz. La cavitation désigne toute la séquence de formation, d'expansion et de disparition de la cavité. Elle peut se produire dans le liquide ou sur les parois

D'après Krasucki:

Les bulles se forment en des points où le champ est élevé (particules solides de très petites dimensions dans le liquide ou attachées aux électrodes). Pour qu'il y ait formation d'une cavité, le critère de pression nulle est:

$$P_{em} = P_h + P_s$$

P_{em} : pression électromécanique

P_h : pression hydrostatique

P_s : pression due à la tension superficielle du liquide

Un critère analogue a été proposé par Thomas, en supposant que la pression d'électrostriction s'oppose au décollement du liquide .

Partant de ces hypothèses, Krasucki et Thomas, ont établi des critères de claquage.

1.3 MECANISME DE CLAQUAGE PAR PONT

Dans les isolants liquides utilisés en technique, peuvent apparaître, en suspension, des impuretés de différentes natures (bulles de gaz, gouttelettes d'eau, particules solides isolantes ou conductrices). La présence d'impuretés conduit au renforcement local du champ électrique. La déformation du champ dépend de plusieurs paramètres comme:

-forme et dimensions des impuretés - intervalle et forme des électrodes - permittivité et conductivité des impuretés - concentration des impuretés entre les électrodes - valeur des charges libres existant à la surface des particules.

Le champ local est généralement déterminé en attribuant aux impuretés des géométries simples (sphères, ellipsoïde).

L'élévation du champ peut conduire à des claquages partiels dans le liquide, dans le cas des impuretés solides conductrices. Dans le cas des impuretés solides isolantes, celles-ci se polarisent dans le champ électrique et tendent à se déplacer vers les zones où le champ est le plus intense ($\epsilon_{\text{impuretés solides}} > \epsilon_{\text{liquide}}$).

Si on considère des particules sphériques polarisées, de permittivité ϵ_p , la force agissant sur une particule serait:

$$F = \frac{1}{2} \cdot r^3 \cdot \frac{\epsilon_p - \epsilon_L}{\epsilon_p + 2 \cdot \epsilon_L} \cdot \Delta E^2 \approx \frac{1}{2} \cdot r^3 \cdot \Delta E^2$$

- ϵ_p : permittivité de la particule
- ϵ_L : permittivité du liquide
- E : champ électrique
- r : rayon de la particule.

Pour qu'un pont de particules se forme entre les électrodes, il faut que le temps d'application de la tension soit relativement long. Ce pont nécessite en effet une grande concentration d'impuretés au voisinage des électrodes. Quand ce pont relie les électrodes, il s'établit un fort courant circulant à travers ce pont, qui est plus conducteur que le liquide. On aura ainsi, un échauffement local important, pouvant engendrer le claquage. Le claquage peut aussi avoir lieu durant la formation du pont (champ élevé en tête de pont).

Parmi les théories de claquage par pont, la plus connue est celle de Kok. Le critère établi par Kok, définit une valeur moyenne du champ électrique, au-dessus de laquelle la vitesse des particules se dirigeant vers le domaine de champ maximum devient supérieure à celle des particules repoussées vers l'extérieur (ce qui augmente la concentration des particules). Cette valeur limite du champ définit selon Kok, la rigidité diélectrique du liquide pendant le claquage par pont:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{k \cdot T}{r^3}}$$

k: constante de Boltzmann

-T: température du liquide

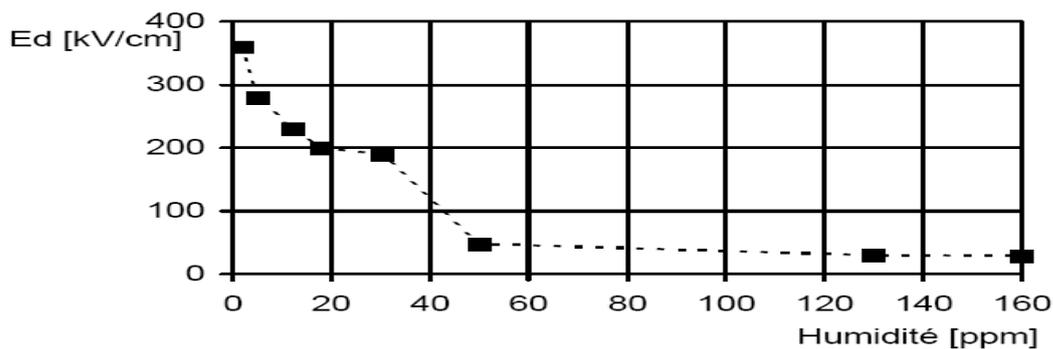
-r: rayon des particules impures.

1.4 INFLUENCE DE DIFFERENTS PARAMETRES SUR LA RIGIDITE DIELECTRIQUE

Il existe plusieurs facteurs qui ont une influence sur la valeur du champ disruptif. Parmi ces facteurs, les plus importants sont les impuretés et les gaz dissous dans le liquide, la pression hydrostatique, la configuration des électrodes, la température, et la durée d'application de la tension.

Humidité

La présence d'un peu d'humidité dans le liquide diminue considérablement la rigidité diélectrique de ce dernier. La figure ci-dessous illustre bien cet effet sur la rigidité diélectrique à 50Hz de l'huile de transformateur.



Influence de l'humidité sur la rigidité diélectrique de l'huile de transformateur

Pression hydrostatique

L'augmentation de la pression hydrostatique améliore la rigidité diélectrique du liquide.

Distance entre les électrodes

En augmentant la distance entre les électrodes, la tension de claquage augmente mais la rigidité diélectrique du liquide diminue. Dans le cas de champ électrique non uniforme, lorsque la tension appliquée dépasse un certain seuil, l'effet de couronne apparaît (formation de streamers).

Température

L'influence de la température est double. En augmentant la température, la concentration de gaz et de l'humidité diminue dans le liquide. Cependant, les conditions pour avoir un claquage thermoélectrique s'améliorent. Cette influence de double effet, fait apparaître un maximum local dans la caractéristique représentant la variation de la tension de claquage en fonction de la température.

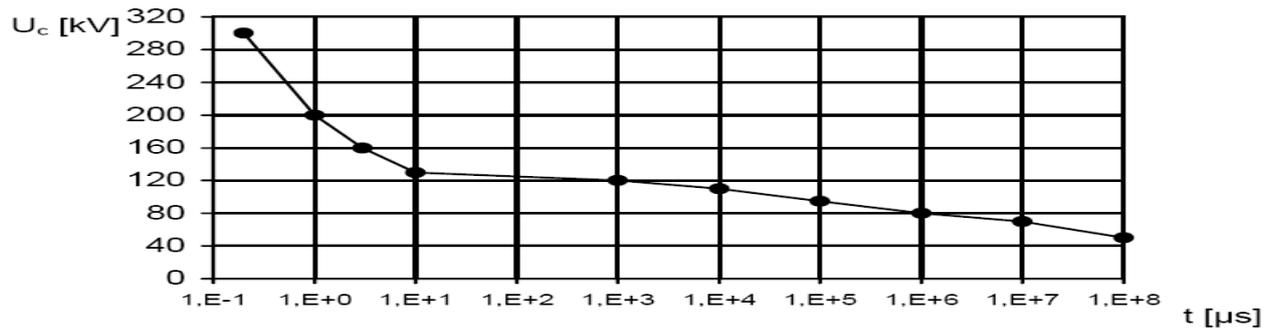
Nombre de claquages

Il a été observé par plusieurs chercheurs, que la tension de claquage de l'huile, dans un système de configuration donnée, augmentait en fonction du nombre d'essais, restait ensuite constante et puis diminuait. Le nombre d'essais variait de 20 à 40.

Ceci peut être expliqué par l'élimination des bulles de gaz par les premiers claquages, cependant des claquages répétés et nombreux détériorent le liquide.

Durée d'application de la tension

Si la durée d'application de tension diminue, la tension de claquage augmente. La figure ci-dessous présente la caractéristique $U_c(t)$, tension de claquage en fonction du temps, de l'huile de transformateur.



Plus la durée d'application augmente, plus l'effet des différentes impuretés se fait ressentir et la tension de claquage diminue. Pour les temps inférieurs à $10\mu\text{s}$, le claquage a un caractère électrique et pour les longues durées, il a un caractère thermoélectrique.

Influence des écrans

Pour améliorer la rigidité diélectrique d'un système d'isolation, soit qu'on recouvre les électrodes avec une couche mince isolante, soit qu'on introduit une barrière isolante entre les électrodes. Il existe une position optimale de la barrière dans l'intervalle, pour laquelle la rigidité du système est la plus élevée. Dans le cas du système pointe-plan, l'augmentation est observée dans les cas de la pointe sous haute tension de polarité positive ou alternative 50Hz, lorsque la barrière est située à proximité de la pointe.