

Causes de dégradations

Les phénomènes suivants, agissant aux niveaux macroscopique et microscopique, induisent dans la matière des modifications irréversibles qui contribuent rarement à en améliorer les performances électriques :

- Sous l'effet des contraintes électriques, un champ électrique permanent **déforme** les molécules ou les chaînes des polymères, conduisant à la **rupture** d'une certaine partie d'entre elles.
- Les champs électriques transitoires peuvent entrer en **résonance** avec l'un des mécanismes de polarisation, induisant un transfert d'énergie important entre le champ et le matériau qui **détruit** des liaisons chimiques.
- Les courants transitoires survenant lors de courts-circuits engendrent des **contraintes mécaniques** violentes par le jeu des forces de Laplace.
- À cela s'ajoute des **contraintes climatiques** (variations et non-uniformité de la température, induisant des contraintes mécaniques, humidité, brouillard salin, érosion par le vent et les poussières qu'il transporte) et aussi **biologiques** (développement de moisissures ou de champignons).

Conséquence des dégradations : vieillissement

Différents paramètres caractéristiques du comportement électrique d'un isolant trahissent un vieillissement du matériau :

- La **résistance d'isolement** diminue (pollution de surface, pénétration d'eau dans les solides, augmentation de la concentration d'humidité dans les huiles).
- La **capacité** diminue et le **facteur de pertes** augmente (dans les isolations en couches: certaines couches ne sont plus isolantes).
- L'**indice de polarisation** diminue (le courant de conduction devient prépondérant par rapport au courant d'absorption).
- La **rigidité diélectrique** diminue (apparition de pointes par corrosion, décollement entre l'isolant et les électrodes, bulles, etc.)
- Le **taux de décharges partielles** augmente (la taille des cavités augmente).

D'une manière générale, le contrôle de l'état de l'isolation peut se faire de deux manières:

- par **diagnostic** : l'équipement est mis hors tension et soumis à des tests *in situ* ou/et en laboratoire.
- par **surveillance continue (monitoring)** : les caractéristiques de l'isolation sont mesurées en permanence durant le fonctionnement de l'équipement.

Vieillessement des huiles

Les paramètres suivants peuvent être mesurés :

- **Densité volumique de charges**. La circulation de l'huile utilisée également pour le refroidissement peut engendrer une électrisation par frottement contre les parois. À partir d'une certaine concentration, les charges électriques peuvent provoquer des décharges dans l'huile. Dans les huiles neuves, la concentration de charges ne dépasse pas 150 pC/cm^3 . Sur une huile usagée, la concentration peut dépasser 800 pC/cm^3 .

- Une variation de la **densité**, de l'**acidité** ou de la **tension superficielle** trahissent une contamination de l'huile par des produits d'origine externe ou provenant de réactions chimiques internes.
- L'apparition de **bulles** peut indiquer une dégradation de l'huile avec formation de sous-produits gazeux, une dégradation des matériaux solides (isolants combinés à l'huile ou enceinte de confinement) ou une pénétration de gaz venant de l'extérieur.

Vieillessement de la cellulose (papier)

Différents mécanismes de dégradation interviennent dans la cellulose :

- La **pyrolyse** est un mécanisme de décomposition de la cellulose (rupture de liaisons chimiques) sous l'effet de la chaleur, avec production de CO , CO_2 , H_2O et H_2 . Dans le cas de la cellulose, certains mécanismes de pyrolyse sont exothermiques : ils produisent de la chaleur et entretiennent ainsi la pyrolyse elle-même. Par ailleurs, la pyrolyse peut s'accompagner d'une dilatation ou, au contraire, d'une contraction volumique locale. Ces phénomènes entraînent des contraintes mécaniques qui déforment l'isolation et contribuent à en dégrader les caractéristiques électriques.
- L'**oxydation** s'attaque spécialement aux ponts d'oxygène, ce qui dépolymérise la cellulose en produisant divers sous-produits, y compris les mêmes que la pyrolyse.
- L'**hydrolyse** détruit également les ponts d'oxygène qui se combinent avec des molécules d'eau, mais sans formation de sous-produits gazeux.

L'état de vieillissement de la cellulose est essentiellement caractérisé par son *degré de polymérisation*.

Définition : le **degré de polymérisation** est le nombre de constituants monomères dans une chaîne polymères.

Dans un papier neuf, le degré de polymérisation est $D_0 = 900 \sim 1000$. Pour un papier pour lequel l'état est jugé critique, le degré de polymérisation tombe à environ 250.

Soit D le degré de polymérisation à un moment donné au cours de la vie de l'isolation. Le facteur de dégradation, DF , de l'isolation est défini par :

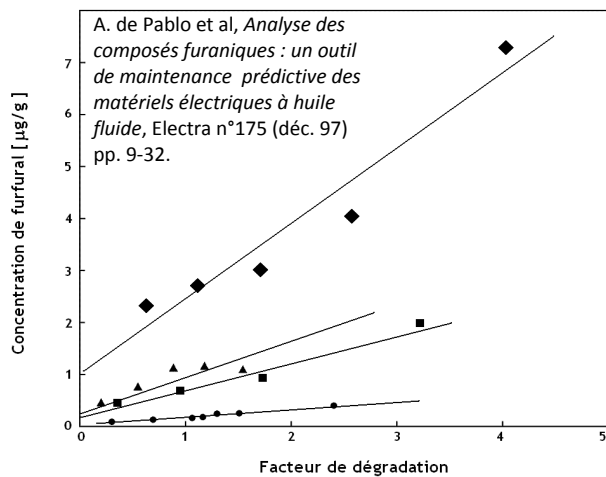
$$DF = 1000 \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{D_0} \right)$$

Vieillessement des isolations papier – huile

Dans les isolations papier – huile, le vieillissement du papier et celui de l'huile s'aggravent mutuellement. Ainsi, la vitesse de vieillissement du papier dans l'huile est 10 fois plus rapide que dans un liquide diélectrique chloré qui n'est pas sujet à l'oxydation.

Or, le degré de polymérisation, et donc le facteur de dégradation, ne peuvent pas être mesurés directement dans une isolation. En revanche, il a été montré que, dans une isolation papier – huile, le facteur de dégradation de la cellulose est corrélé à la concentration de furfural ($\text{C}_4\text{H}_4\text{O}$).

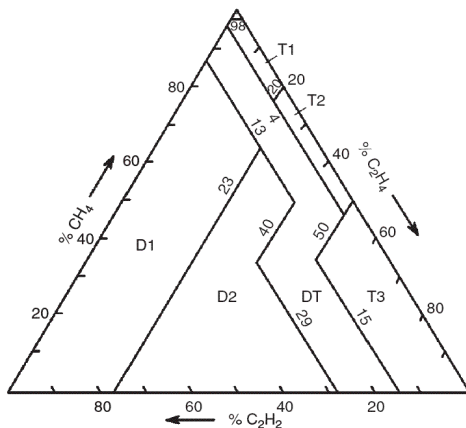
La concentration de furfural passe de 0,1 ppm à 100 ppm en une quinzaine d'années, à 70 °C. Ce processus est fortement dépendant de la température : à 105 °C, la même concentration de furfural est obtenue au bout de 3 ans déjà.



Les séries de points correspondent à différents procédés de séchage et d'extraction de l'air résiduel

Un autre indicateur de l'état du papier est la teneur de l'huile en particules solides, provenant de l'érosion de la cellulose. Une concentration de plus de 10'000 particules par cm³ avec des diamètres compris entre 2 et 5 µm, indique une dégradation préoccupante de l'isolation.

Enfin, l'analyse de certains gaz dissous dans l'huile permet de poser un diagnostic sur le type de défauts qui se produisent dans le système, selon le modèle de la figure ci-après. Le triangle délimite des zones critiques, selon trois coordonnées, soit les teneurs en CH₄ (méthane), C₂H₂ (acétylène) et C₂H₄ (éthylène).



Les zones ont les significations suivantes :

- | | |
|----------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| T1 Défaut thermique T < 300°C | D1 Décharges partielles faibles |
| T2 Défaut thermique 300°C < T < 700 °C | D2 Décharges partielles élevées |
| T3 Défaut thermique T > 700 °C | DT Décharges partielles combinées avec un défaut thermique |

Michel Duval, *A Review of Faults Detectable by Gas-in-Oil Analysis in Transformers*, IEEE Electrical Insulation Magazine (mai/juin 2002) vol. 18, n°3, pp. 8-17.

Tests de vieillissement accéléré

Afin de prévoir la durée de vie d'un composant en service normal, on procède à des essais de vieillissement accéléré. Dans un tel test, l'isolant est soumis à une contrainte de différents niveaux tous supérieurs à celui qui correspond au service normal, et cela jusqu'à une dégradation jugée limite qui définit du même coup sa durée de vie pour la contrainte en question. Cette procédure permet d'établir une relation empirique entre le niveau de contrainte et la durée de vie. Grâce à cette relation, il sera possible d'évaluer la durée de vie pour la contrainte correspondant au service normal.

En pratique, les expériences doivent être réalisées pour des combinaisons de contraintes : température et variation de température, humidité, nombre de phénomènes transitoires (foudre, manœuvre), etc. Le modèle de vieillissement devient alors d'autant plus complexe et sujet à caution, particulièrement lorsque les résultats présentent une forte dispersion statistique. Par ailleurs, l'augmentation de la contrainte peut conduire à des effets de seuil n'ayant rien à voir avec une accélération du vieillissement.