

# Vieillissement de l'huile de transformateur

1- Claquage des isolants liquides

2- Vieillissement thermique de l'huile de transformateur

Borak22 (utilisée par SONELGAZ)

Pr A.Boubakeur - E N Polytechnique

ARELEC - 23 Novembre 2011



# **1- 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  $\alpha$  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'existence 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 croit 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:

$$e.E_c.\lambda = c.h.v$$

- $E_c$ : intensité de champ
- $\lambda$ : l.p.m d'un électron dans le liquide
- $h.v$ : 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:

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

- h: constante de Planck
- $\nu_{C-H}$ : fréquence de vibration des liaisons C-H
- N: nombre de particules par unité de volume
- $n_i$ : nombre de groupes (CH, CH<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub>) 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:

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

- $\nu_{C-C}$ : 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
- $\rho$ : 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:

$$I = A.V^n$$

$$A = \text{Cste et } 1,5 < n < 2$$

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 (champ E)

- $P_h$ : 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.

### **Écoulements Electrohydrodynamiques EHD:**

L'apparition d'une phase gazeuse pourrait résulter d'une cavitation due à des écoulements EHD induits par l'injection unipolaire de charges dans le liquide. Dans ce cas, la variation de pression serait, en vertu du théorème de Bernoulli, proportionnelle au carré de la vitesse EHD du liquide:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{EHD}^2 \quad (\rho : \text{masse volumique du liquide})$$

### 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  $\epsilon_p$ , la force agissant sur une particule serait:

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

- $\epsilon_p$ : permittivité de la particule
- $\epsilon_L$ : permittivité du liquide
- E: champ électrique
- r: rayon de la particule.

Pour qu'un pont de particules se forment 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:

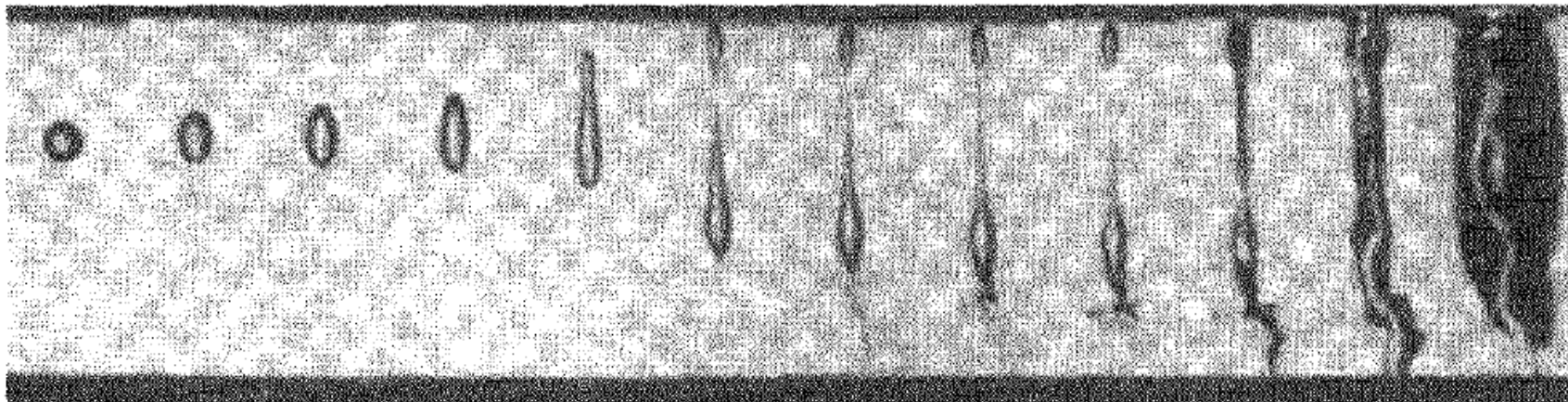
$$E_c = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{k \cdot T}{r^3}}$$

- k: constante de Boltzmann
- T: température du liquide
- r: rayon des particules impures.

### **Influence de l'eau condensée:**

L'eau est l'une des impuretés les plus typiques et les plus dangereuses pour les liquides isolants. Elle peut exister sous trois formes: -eau dissoute -eau en émulsion et eau dite de fond.

Les gouttes d'eau sont initialement sphériques et tendent à se déformer sous l'influence du champ électrique. Elles prennent la forme d'ellipsoïdes qui s'allongent dans la direction du champ, en fonction de l'intensité de ce dernier. Lorsque le volume de la goutte est suffisant, il peut ainsi se former un canal d'eau reliant les électrodes. Ce canal sera le siège d'un fort courant de conduction qui provoquerait la vaporisation de l'eau et par suite la claquage dans le canal "vapeur-eau" en cours de formation. Le claquage peut aussi avoir lieu, lorsque le champ en tête de goutte d'eau déformée devient suffisamment intense.

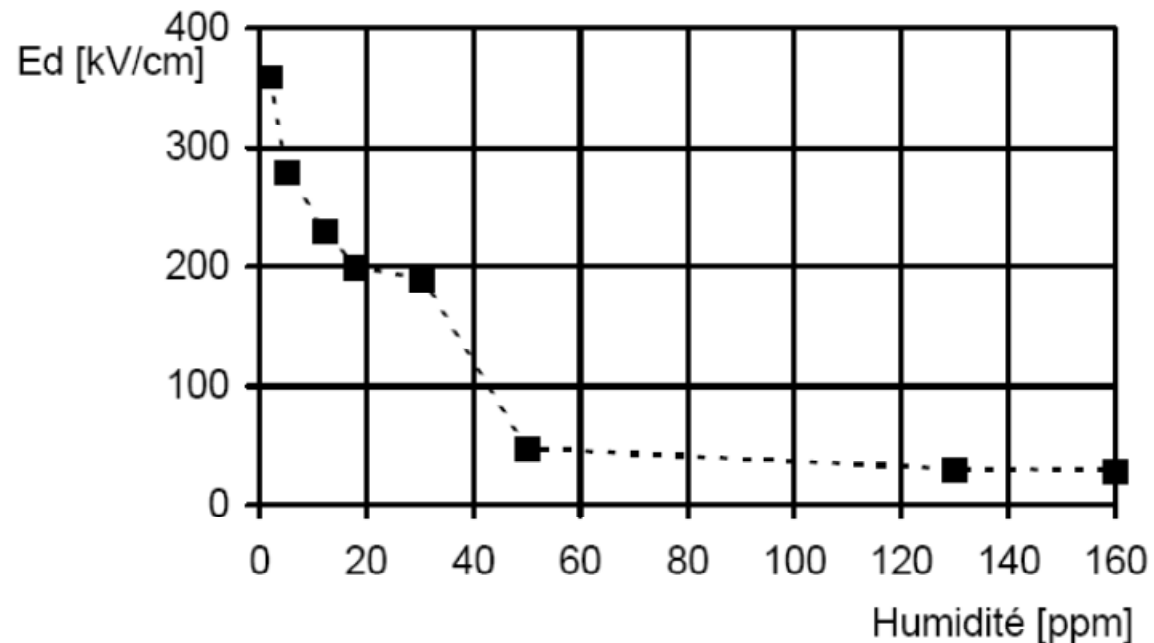


## 1.4 INFLUENCE DE DIFFERENTS PARAMETRES SUR LA RIGIDITE DIELECTRIQUE

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**

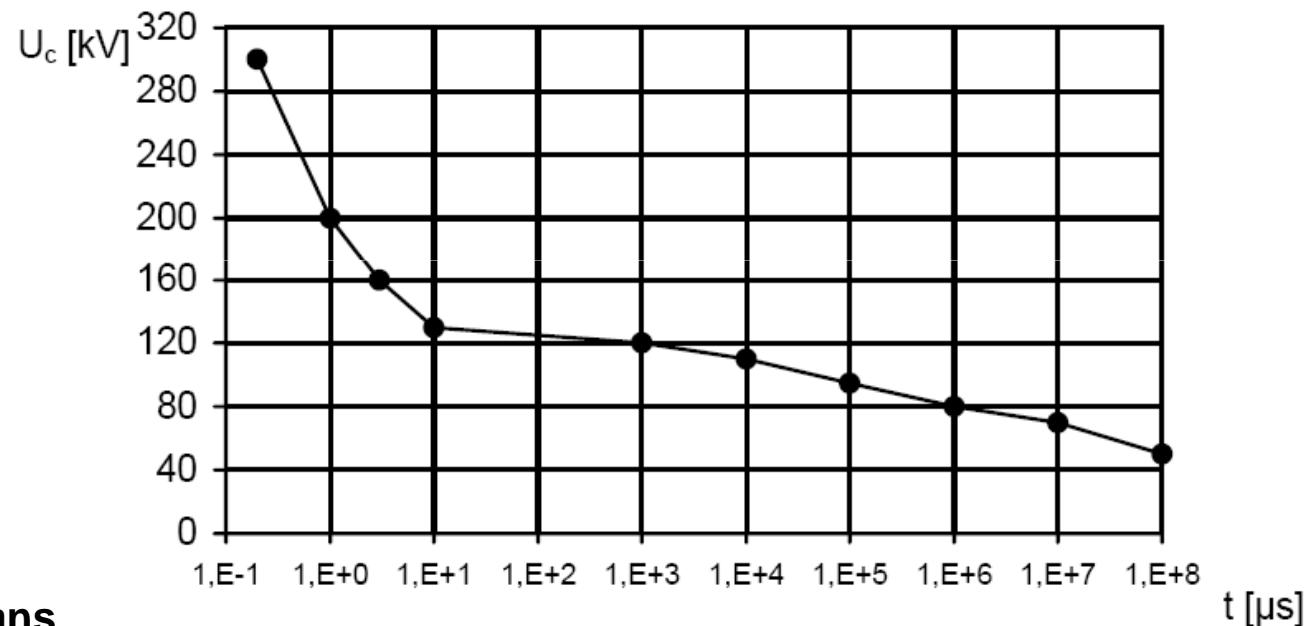
Il a été observé par plusieurs chercheurs, que la tension de claquage de l'huile, dans un système de configuration donnée, augmentait en fonction du nombre d'essais, restait ensuite constante et puis diminuait. Le nombre d'essais variait de 20 à 40.

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.

**2- Vieillissement thermique  
de l'huile de transformateur  
Borak22 (utilisée par SONELGAZ)**



Les techniques actuelles les plus utilisées pour surveiller l'état d'un transformateur en service sont fondées sur les analyses de l'huile : analyse des propriétés de l'huile, des gaz dissous et des produits de dissociations et de rupture de la cellulose.

Les huiles sont utilisées à des fins de refroidissement et d'isolation, elles doivent s'adapter à des contraintes de plus en plus sévères. Tout au long de leur utilisation, les huiles isolantes peuvent être soumises à plusieurs contraintes : électrique, thermique, chimique, etc. Malgré les avantages qu'elles présentent, les huiles isolantes se détériorent progressivement sous l'action combinée ou séparée de ces contraintes.

La dégradation des matériaux au cours du temps est connue sous le nom de vieillissement. L'étude du phénomène de vieillissement thermique d'un isolant à deux buts principaux : le premier est de déterminer l'évolution de sa durée de vie sous l'effet des contraintes thermiques ; le second but est de trouver une éventuelle corrélation entre le phénomène de vieillissement et les contraintes qui le provoquent.

Les huiles minérales ont pendant longtemps été fabriquées à partir de brut naphthéniques, cependant, devant les craintes de raréfaction de ces bruts et devant leurs origines très limitées, on utilise maintenant et concurremment, des bruts paraffiniques.

Il a été prouvé que ces deux familles d'huiles naphthéniques et paraffiniques ont des propriétés électriques très comparables.

Les propriétés des huiles isolantes sont généralement divisées en propriétés physiques, chimiques et électriques.

Cependant, la division se fait en caractéristiques électriques, caractéristiques d'étude, caractéristiques de service et autres caractéristiques.

## **2.1 Caractéristiques des huiles minérales :**

- **Caractéristiques électriques**

- 1- Permittivité
- 2- Conductivité et facteur de pertes diélectriques
- 3- Rigidité diélectrique

- **Caractéristiques d'étude**

- 1- Masse volumique et coefficient de dilatation volumique
- 2- Capacité thermique massique à pression constante
- 3- Conductivité thermique
- 4- Viscosité
- 5- Point d'écoulement

- **Caractéristiques de service**

- 1- Solubilité des gaz
- 2- Solubilité de l'eau
- 3- Acidité et couleur
- 4- Teneur en soufre et en composés oxygénés
- 5- Stabilité à l'oxydation
- 6- Stabilité thermique
- 7- Stabilité électrique aux décharges partielles

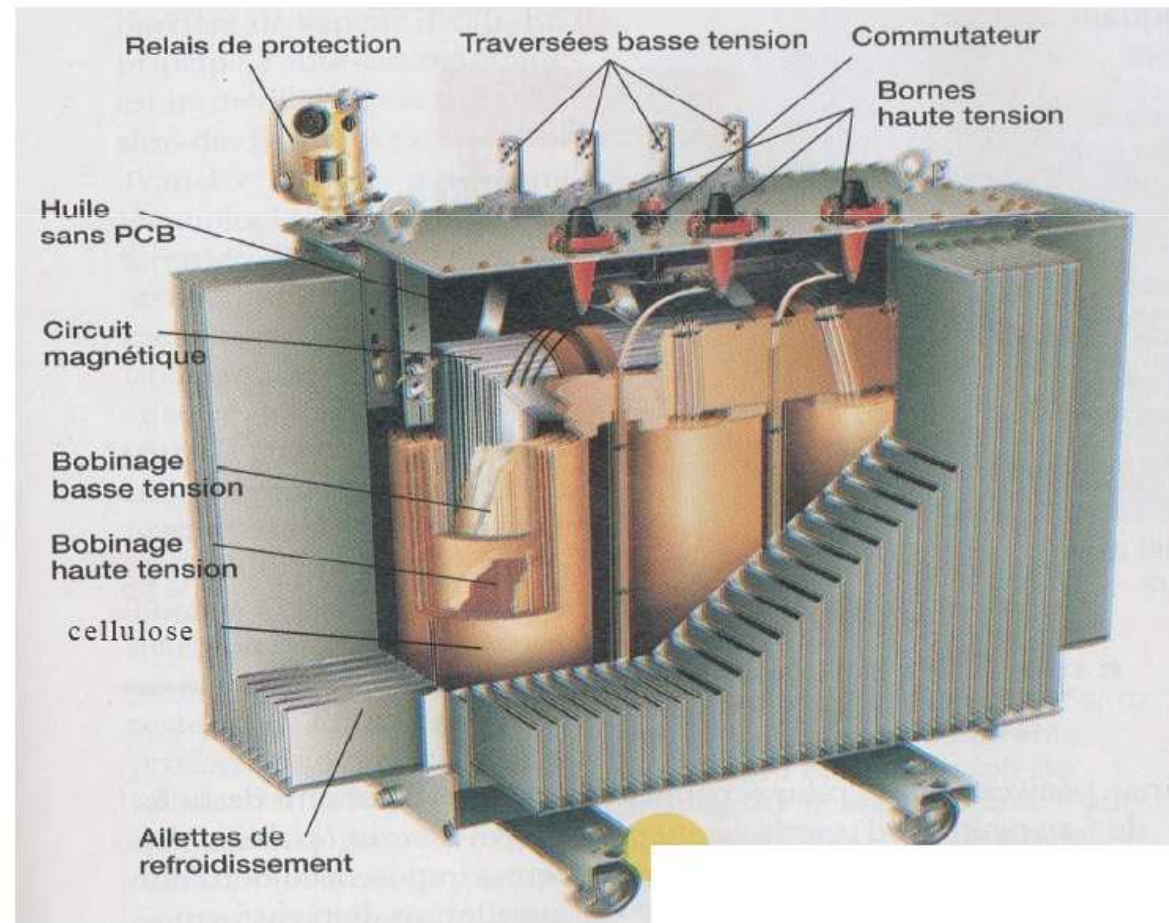
## 2.2 Borak 22

### Essais sur l'huile neuve

- Essais diélectriques
- Essais physico-chimiques

### Essais de vieillissement thermique de l'huile

- températures de vieillissement: 80°C et de 120°C.
- durée de vieillissement: 5000 heures.

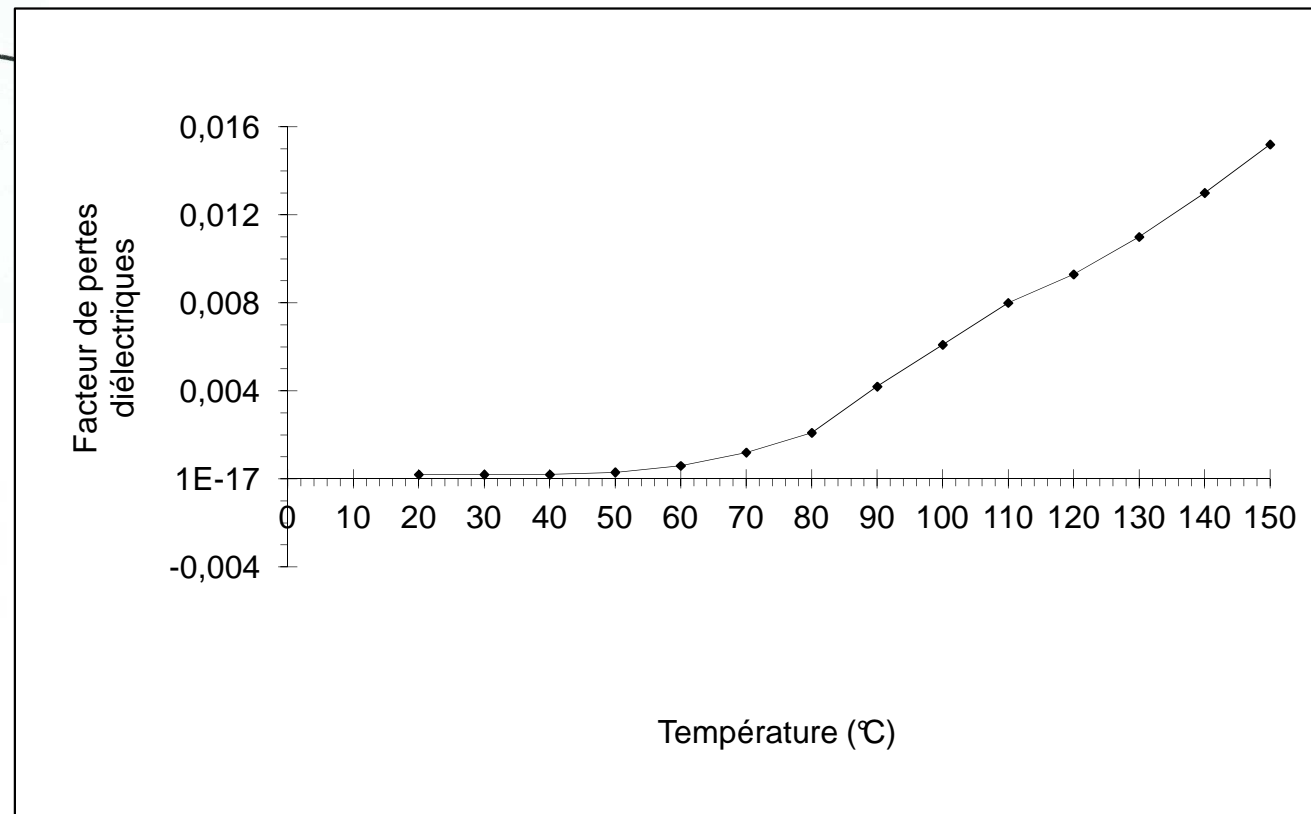
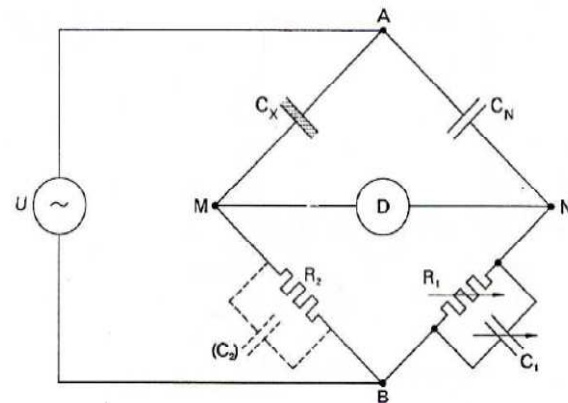
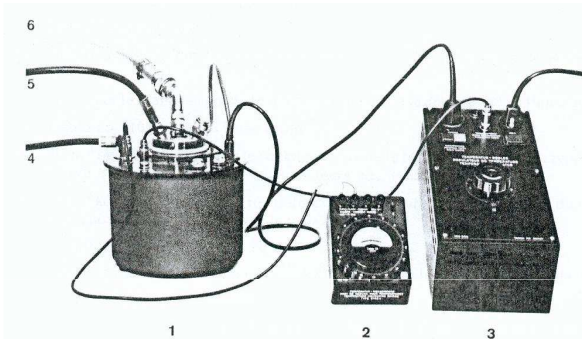


## 2.2 Borak 22 - Caractéristiques

<b>Propriétés électriques</b>	<b>Unité de mesure</b>	<b>Exigence de la norme huile neuve</b>	<b>Norme</b>	<b>Valeur mesurée</b>
Tension de claquage après repos	kV	> 70	CEI 156	38,8 - 72
Facteur de dissipation diélectrique à 90°C tgδ		≤ 5,00 E-03	CEI 247	0,87 E-03
<b>Propriétés physiques</b>				
Aspect		Limpide et exempte de matière solide	CEI 296	Limpide
Viscosité cinématique à 40°C	mm <sup>2</sup> /s	< 11	ISO 3104	6,940
Point d'éclair	°C	> 130	ISO 2719	137
Densité		< 8,95 E-01	ISO 12185	8,57 E-01
<b>Propriétés chimiques</b>				
Indice d'acidité	mg KOH/g	< 3,00 E-2	CEI 296	(2,00 – 5,8) E-02
Teneur en Eau	ppm	< 30	CEI 814	
Indice de couleur	ppm	< 02	ASTM D 1500	< 0,5
Indice de réfraction				1,474

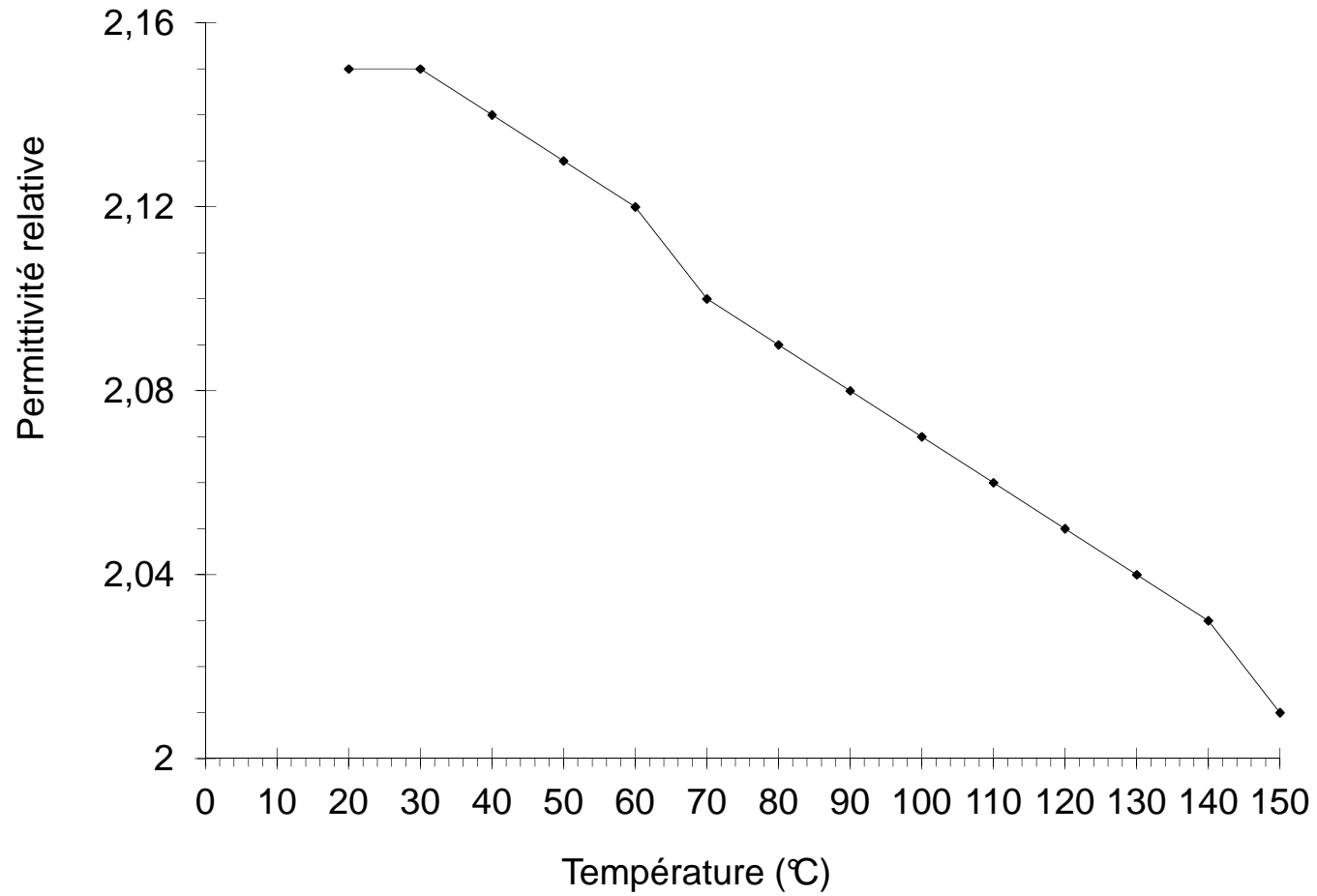
## **1/ PROPRIÉTÉS DE L'HUILE NEUVE**

# Facteur de pertes diélectriques ( $\text{tg } \delta$ )



Variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la température

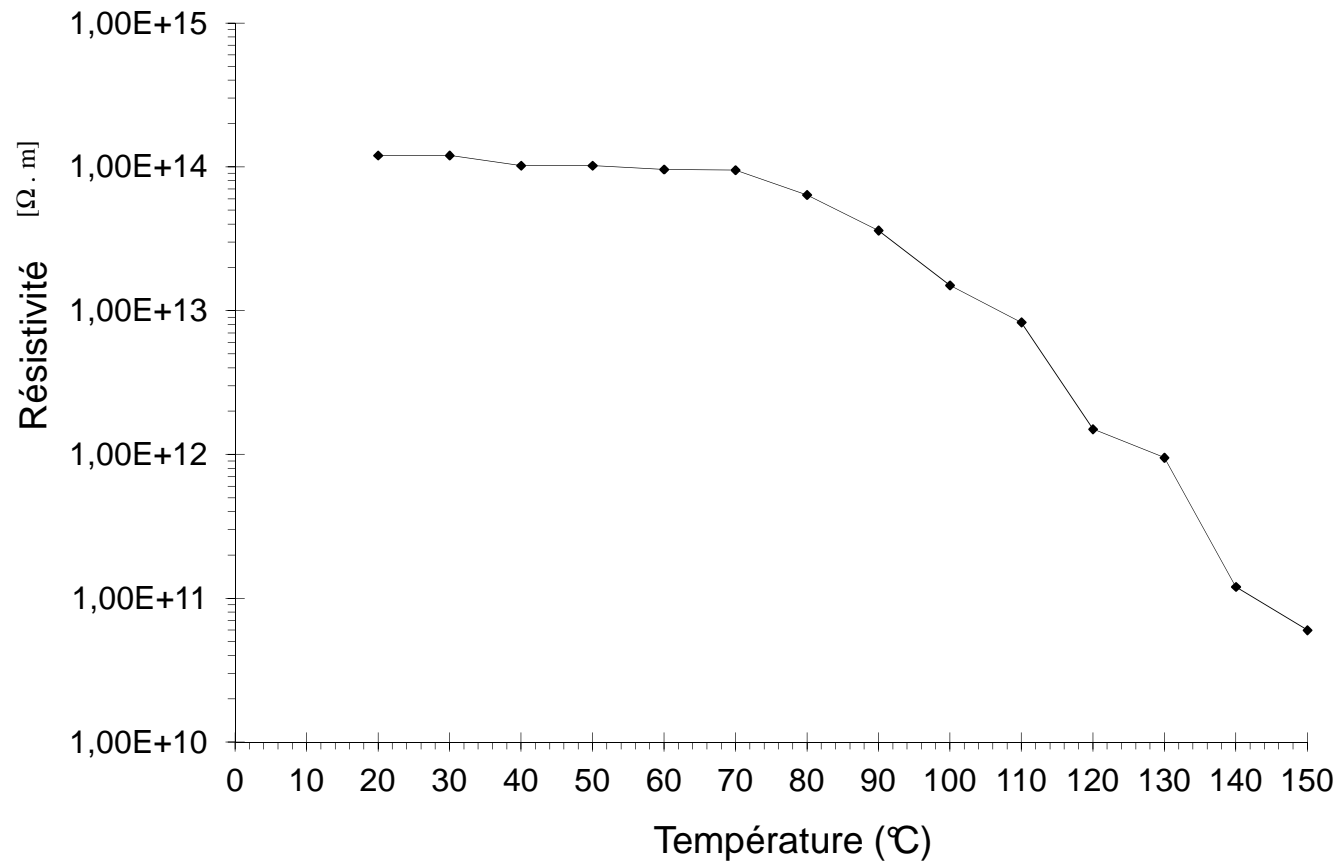
# Permittivité relative $\epsilon_r$



Variation de la permittivité relative en fonction de la température



# Résistivité $\rho$



Variation de la résistivité en fonction de la température

## Rigidité diélectrique



*Vue d'ensemble*

*Spintermètre, OTS 100 AF/2 (SKMK-Blida)*



*cellule*

A l'état neuf, toutes les huiles ont généralement une rigidité diélectrique comprise entre 220 et 380 kV/cm.

**La valeur de la tension de claquage de l'huile BORAK 22 neuve est de 63 kV. Elle correspond à une valeur de la rigidité diélectrique de 282,2 kV/cm.**

Cette valeur correspond au rapport tension – distance interélectrode, multiplié par le coefficient géométrique qui est de l'ordre de 1,12.



## Acidité

L'indice d'acidité de l'huile neuve utilisée est compris entre 0,02 et 0,058 mg KOH/g d'huile.

L'indice de 0,058 est important, et reflète l'existence de composés organiques acides inhérents à la constitution chimique de l'huile, et à un mauvais conditionnement de cette huile.

## Teneur en eau

La mesure de la teneur en eau de l'huile neuve étudiée a donné une quantité d'eau de 30 p.p.m

## Couleur

L'indice de couleur de l'huile neuve est compris entre 0,5 et 1.5

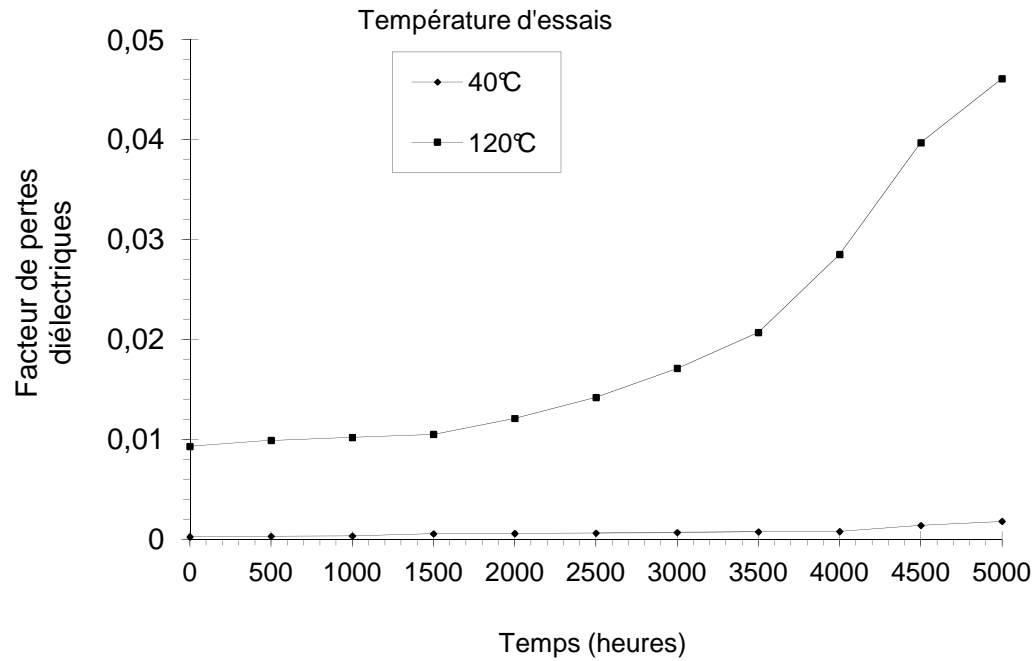


## Viscosité cinématique

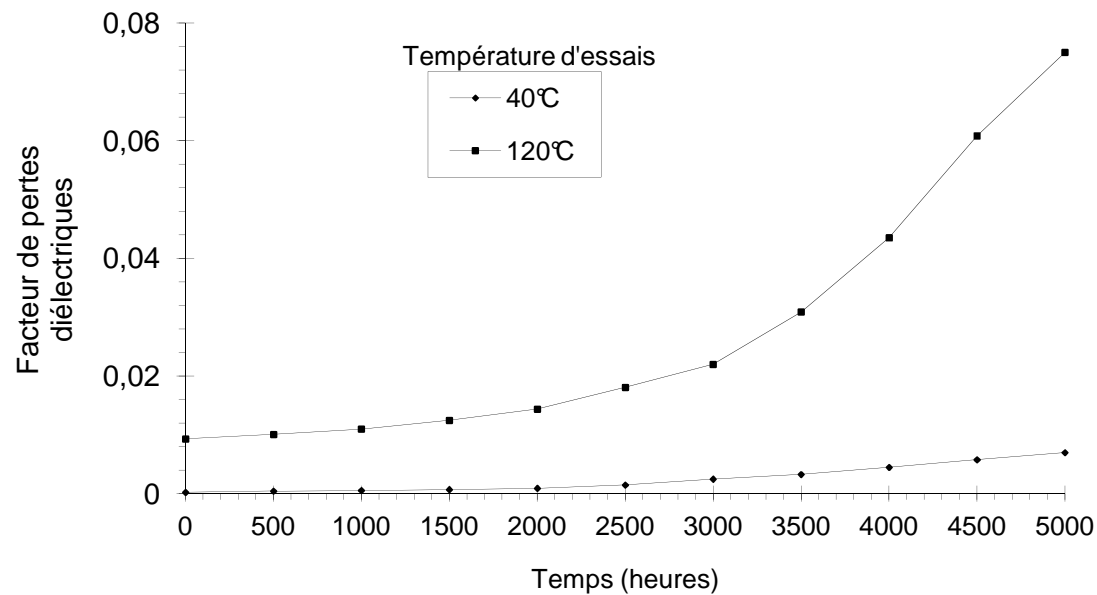
La viscosité cinématique, mesurée à 40°C est comprise entre 6,94 et 12.54 mm<sup>2</sup>/s

## **2/ Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'huile**

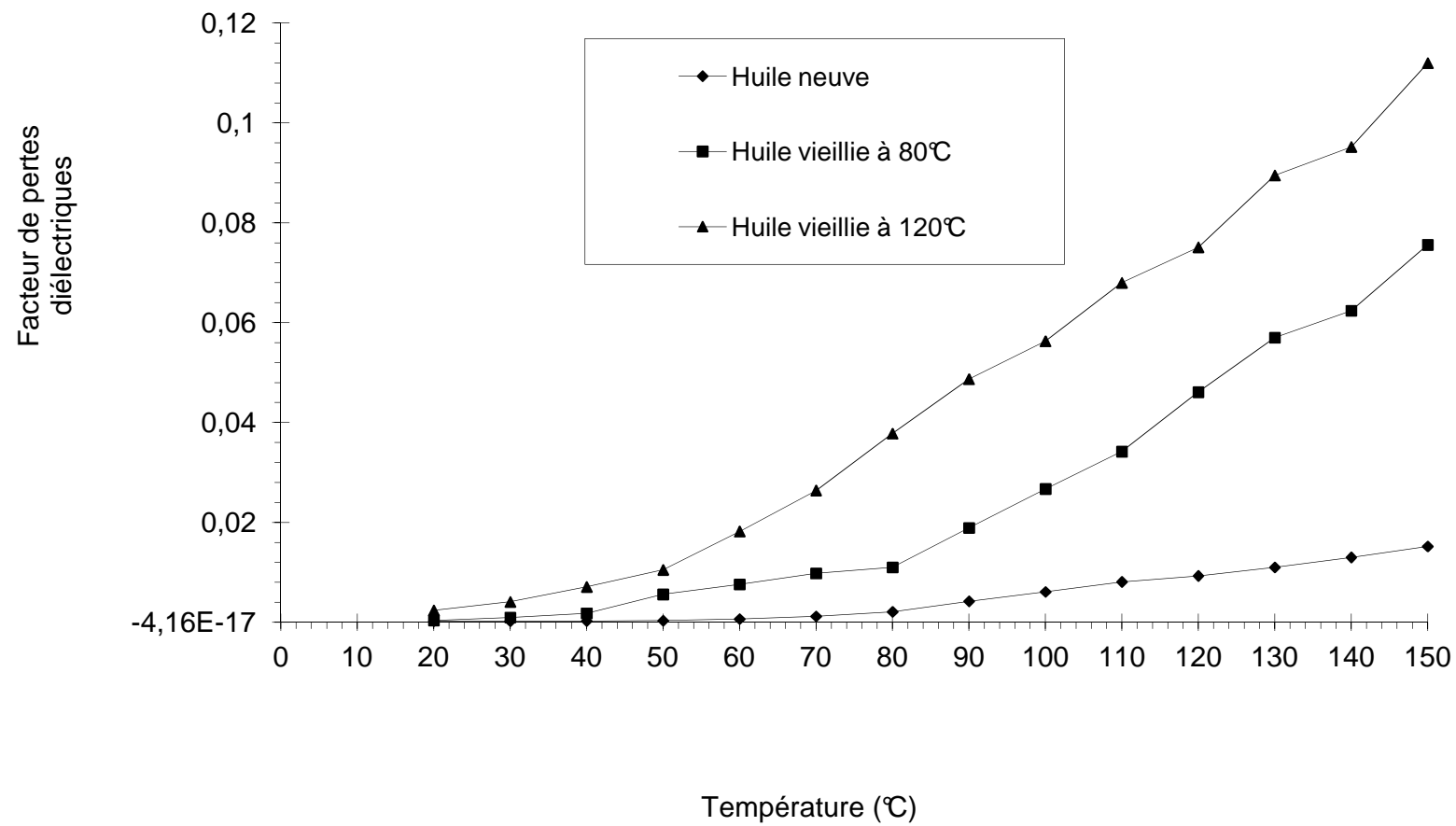
## Facteur de pertes diélectriques



Variation du facteur de pertes diélectriques en fonction du temps de vieillissement à 80°C

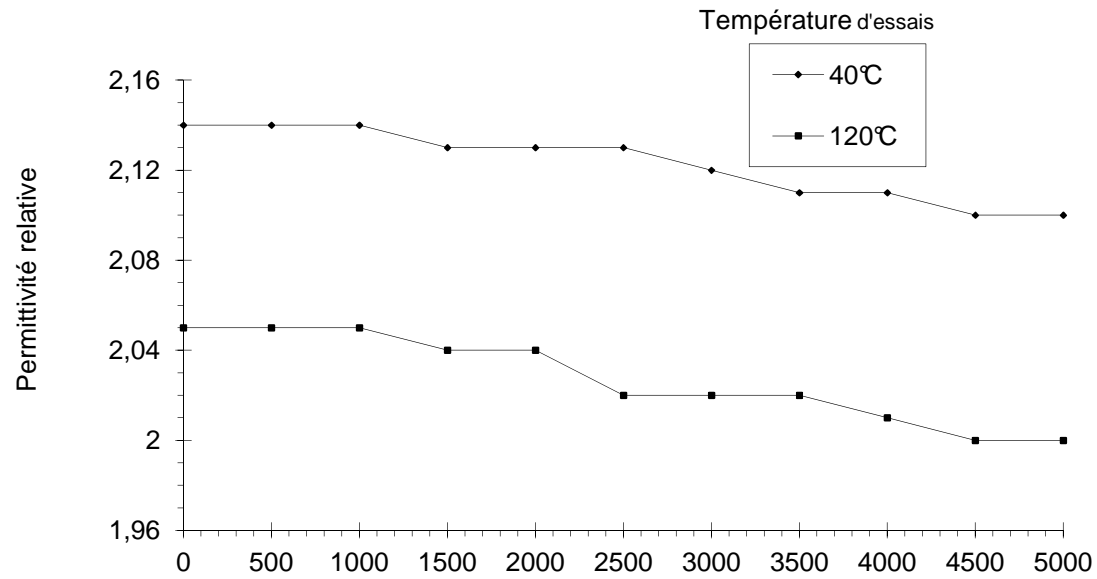


Variation du facteur de pertes diélectriques en fonction du temps de vieillissement à 120°C

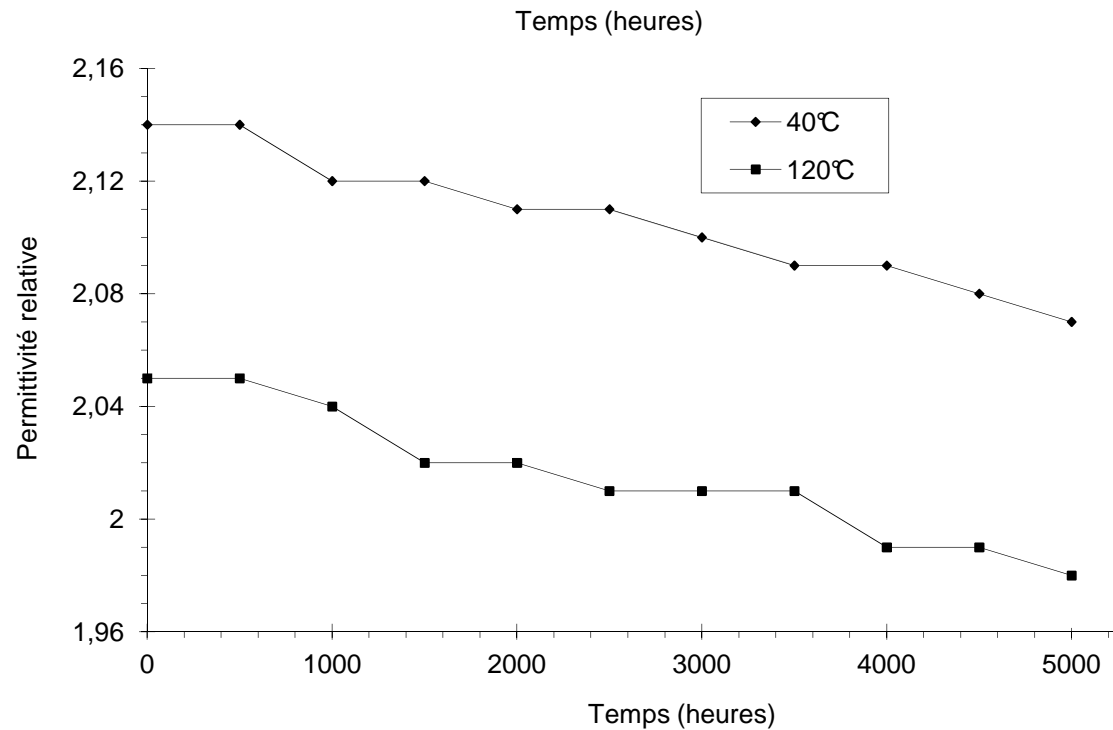


Variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la température avant et après vieillissement thermique de 5000h

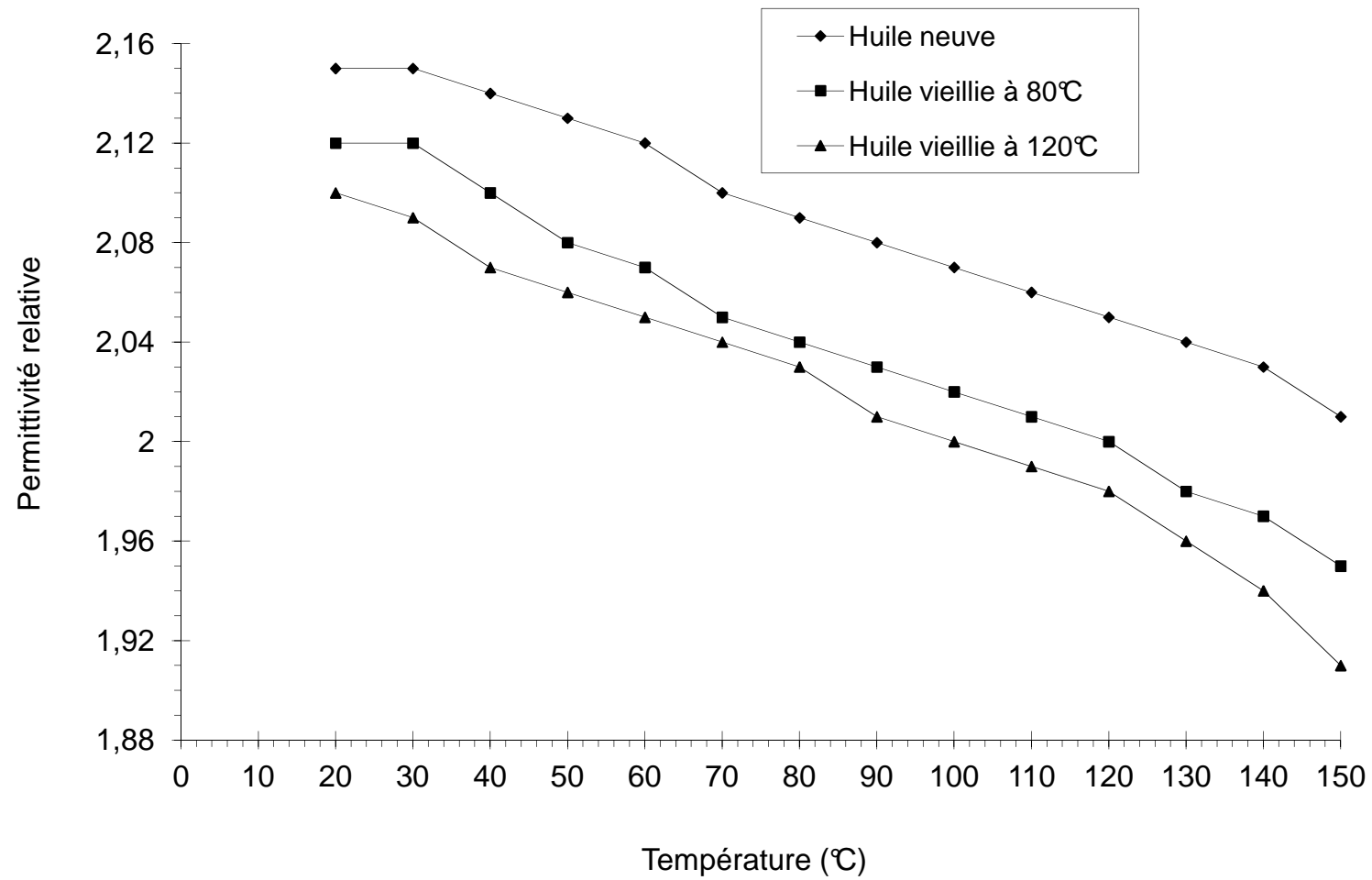
# Permittivité



Variation de la permittivité relative en fonction du temps de vieillissement à 80°C



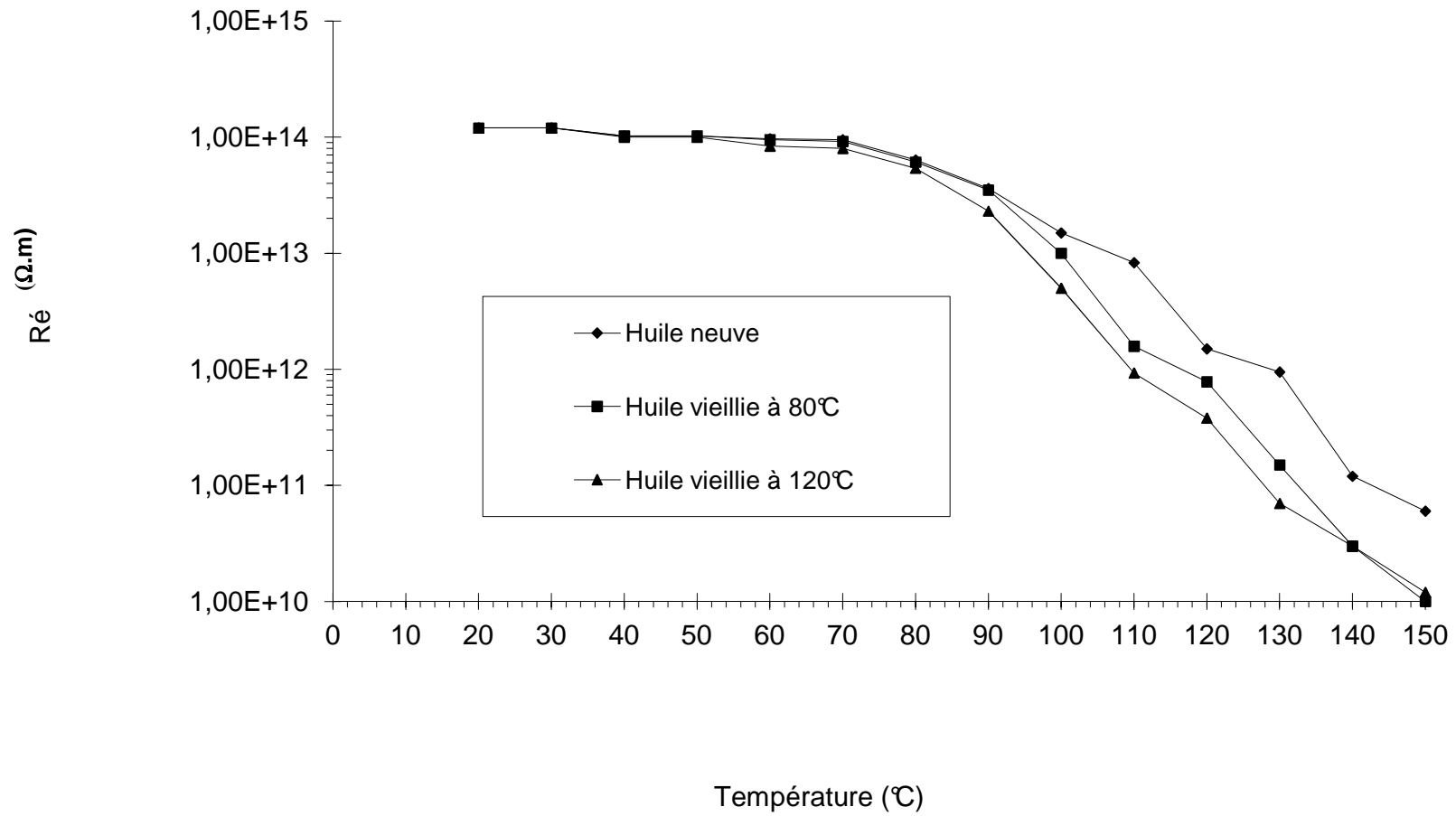
Variation de la permittivité relative en fonction du temps de vieillissement à 120°C



Variation de la permittivité relative en fonction de la température avant et après vieillissement thermique de 5000h



# Résistivité



Variation de la résistivité en fonction de la température avant et après vieillissement thermique de 5000h

Etat de l'huile	Tension de claquage (kV)	Rigidité diélectrique (kV/cm)
Neuve	63	282,2
Vieille à 80°C	62	277,8
Vieille à 120°C	58	260,2

## Tension de claquage

Etat de l'huile	Indice d'acidité (mg KOH/g)
Neuve	0,058
Vieille à 80°C	0,280
Vieille à 120°C	0,56

## Indice d'acidité

Etat de l'huile	Teneur en eau (p.p.m)
Neuve	38
Vieille à 80°C	41
Vieille à 120°C	46

## Teneur en eau

Etat de l'huile	Indice de couleur	Couleur
Neuve	1,5	Blanc crème
Vieille à 80°C	2,5	Citron extra pâle
Vieille à 120°C	3,5	Orange extra pâle

## Indice de couleur

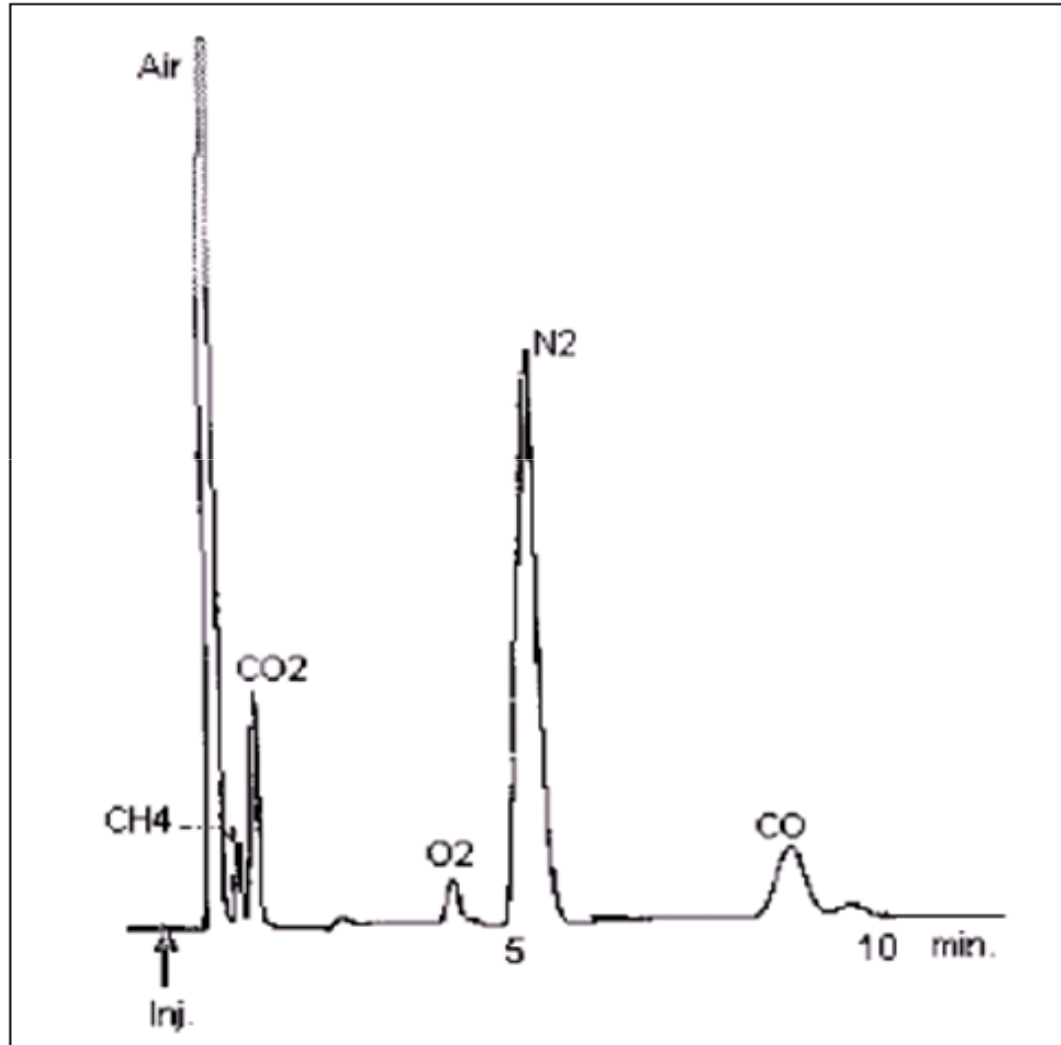
Etat de l'huile	Viscosité cinématique (mm <sup>2</sup> /s )
Neuve	10,95
Vieille à 80°C	10,91
Vieille à 120°C	10,90

## Viscosité

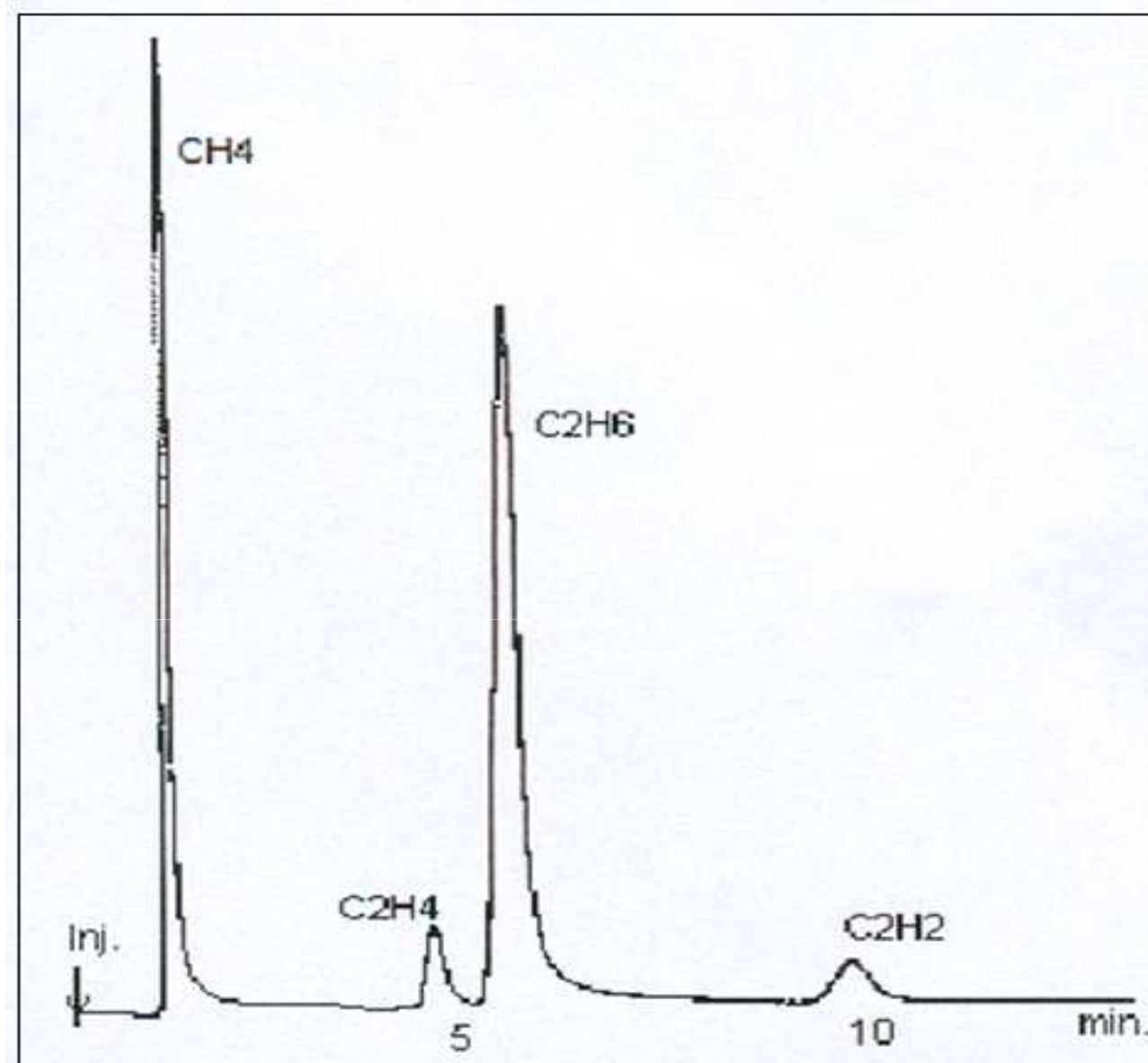
## Analyse des gaz dissous

Défauts	Gaz détectés	Gaz clé
Arcs électriques	Formation de grandes quantités d'hydrogène et d'acétylène, avec de petites quantités de méthane et d'éthylène. Il peut y avoir également formation de CO et CO <sub>2</sub> s'il y a de la cellulose à l'endroit du défaut.	Acétylène
Décharges partielles (Corona)	Les décharges de faible énergie produisent de l'hydrogène et du méthane, avec de petites quantités d'éthane et d'éthylène. Des quantités comparables de CO et CO <sub>2</sub> peuvent provenir de décharges dans la cellulose	Hydrogène
Surchauffe de l'huile	Les produits de décomposition sont l'éthylène et le méthane, avec de petites quantités d'hydrogène et d'éthane. Des traces d'acétylène peuvent être produites si la surchauffe est sévère ou si un contact électrique intervient dans le défaut.	Ethylène
Surchauffe de la cellulose	Formation de grandes quantités de CO et CO <sub>2</sub> . Si le défaut a lieu dans une structure imprégnée, du méthane et de l'éthylène sont également formés.	Monoxyde de carbone

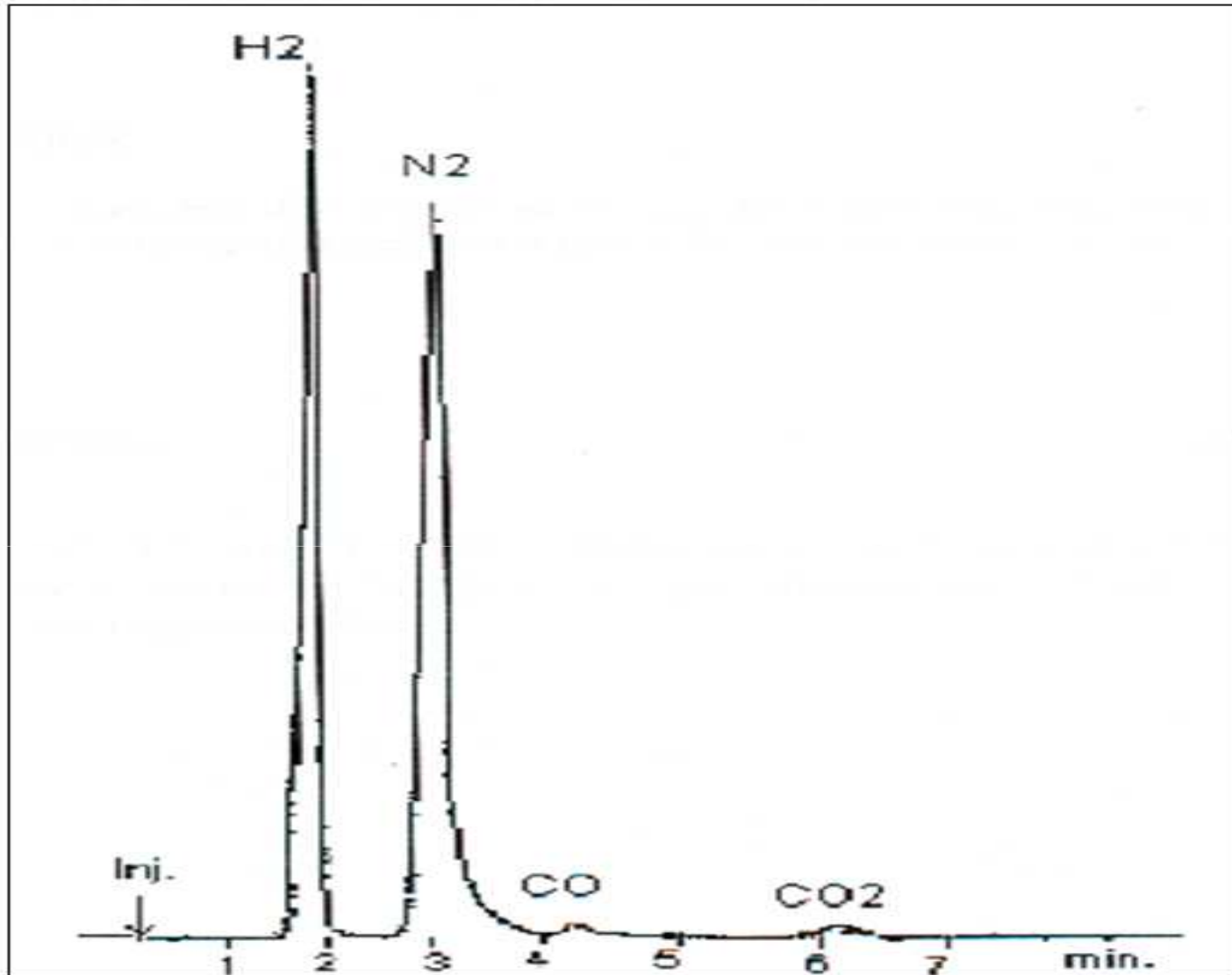
# Analyse de gaz dissous dans la Borak22 après 2000h de vieillissement à 120°C



Separation de: N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> and CO

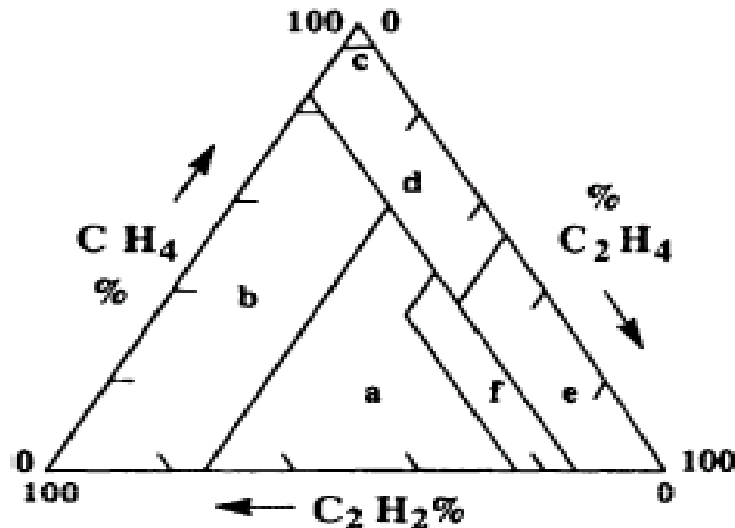


Séparation de: CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> and C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>



Séparation de: H<sub>2</sub>

## Gaz dissous dans la Borak 22 après vieillissement à 120°C de 5000h diagnostic selon le triangle de Duval



- a. High-energy arcing ( $I > 20 I_n$ )
- b. Low-energy arcing, tracking
- c. Corona discharges
- d. Hot spots,  $T < 200^\circ\text{C}$
- e. Hot spots,  $200 < T < 400^\circ\text{C}$
- f. Hot spots,  $T > 400^\circ\text{C}$

Gaz	Quantité	zone dans le triangle de Duval	Diagnostic
CH4	grande	c	décharges couronne
C2H4	faible	d	Point chaud, $T < 120^\circ\text{C}$
C2H2	-	-	

Autres méthodes: Rogers et CEI 60-599

# Dégradation sous l'effet du nombre de claquages

## Tension de claquage

Nombre de claquages	0	30	60	120	240	400	700	1 000	1 500	2 000	2 500	3 000	4 000	5 000	6 000
U[kV]	38,8	37,2	38,1	43,4	47,7	63,7	52,8	50,0	55,4	69,9	69,3	68,4	71,2	72,1	72,5

## Facteur de pertes diélectriques

	nombre de claquages							
	neuve	500	1000	2000	3000	4000	5000	6000
30°C	22,9x10 <sup>-4</sup>	4,90 x10 <sup>-4</sup>	4,50 x10 <sup>-4</sup>	3,00 x10 <sup>-4</sup>	2,80 x10 <sup>-4</sup>	7,00 x10 <sup>-4</sup>	3,50 x10 <sup>-4</sup>	6,00 x10 <sup>-4</sup>
50°C	3,40 x10 <sup>-4</sup>	2,80 x10 <sup>-4</sup>	4,10 x10 <sup>-4</sup>	6,90 x10 <sup>-4</sup>	3,40 x10 <sup>-4</sup>	4,60 x10 <sup>-4</sup>	3,70 x10 <sup>-4</sup>	7,00 x10 <sup>-4</sup>
70°C	5,20 x10 <sup>-4</sup>	5,40 x10 <sup>-4</sup>	8,50 x10 <sup>-4</sup>	15,9 x10 <sup>-4</sup>	10,0 x10 <sup>-4</sup>	8,60 x10 <sup>-4</sup>	9,00 x10 <sup>-4</sup>	30,5 x10 <sup>-4</sup>
80°C	8,20 x10 <sup>-4</sup>	9,80 x10 <sup>-4</sup>	8,70 x10 <sup>-4</sup>	23,9 x10 <sup>-4</sup>	12,3 x10 <sup>-4</sup>	23,1 x10 <sup>-4</sup>	13,1 x10 <sup>-4</sup>	81,5 x10 <sup>-4</sup>
90°C	8,70 x10 <sup>-4</sup>	9,80 x10 <sup>-4</sup>	12,2 x10 <sup>-4</sup>	36,2 x10 <sup>-4</sup>	18,7 x10 <sup>-4</sup>	25,0 x10 <sup>-4</sup>	14,0 x10 <sup>-4</sup>	127 x10 <sup>-4</sup>
100°C	13,3 x10 <sup>-4</sup>	12,5 x10 <sup>-4</sup>	17,2 x10 <sup>-4</sup>	52,4 x10 <sup>-4</sup>	76,3 x10 <sup>-4</sup>	34,6 x10 <sup>-4</sup>	13,3 x10 <sup>-4</sup>	23,7 x10 <sup>-4</sup>
110°C	14,6 x10 <sup>-4</sup>	15,4 x10 <sup>-4</sup>	21,7 x10 <sup>-4</sup>	90,5 x10 <sup>-4</sup>	195 x10 <sup>-4</sup>	70,0 x10 <sup>-4</sup>	21,9 x10 <sup>-4</sup>	318 x10 <sup>-4</sup>
120°C	15,6 x10 <sup>-4</sup>	17,3 x10 <sup>-4</sup>	30,2 x10 <sup>-4</sup>	195 x10 <sup>-4</sup>	251 x10 <sup>-4</sup>	142 x10 <sup>-4</sup>	27,5 x10 <sup>-4</sup>	304 x10 <sup>-4</sup>
130°C	16,5 x10 <sup>-4</sup>	20,7 x10 <sup>-4</sup>	41,7 x10 <sup>-4</sup>	323 x10 <sup>-4</sup>	295 x10 <sup>-4</sup>	174 x10 <sup>-4</sup>	41,5 x10 <sup>-4</sup>	214 x10 <sup>-4</sup>
140°C	21,0 x10 <sup>-4</sup>	29,2 x10 <sup>-4</sup>	53,9 x10 <sup>-4</sup>	663 x10 <sup>-4</sup>	386 x10 <sup>-4</sup>	248 x10 <sup>-4</sup>	74,0 x10 <sup>-4</sup>	223 x10 <sup>-4</sup>
150°C	28,7 x10 <sup>-4</sup>	47,6 x10 <sup>-4</sup>	56,1 x10 <sup>-4</sup>	200 x10 <sup>-4</sup>	722 x10 <sup>-4</sup>	395 x10 <sup>-4</sup>	226 x10 <sup>-4</sup>	342 x10 <sup>-4</sup>



L'augmentation du nombre de claquages électriques, jusqu'au 6000 claquages, sur un échantillon d'huile minérale neuve à la température ambiante ne dégrade pas l'état de l'huile. Tous les paramètres physiques, chimiques et électriques gardent des valeurs admissibles selon les recommandations de la norme qui régit une huile neuve (CEI 296).

La combinaison entre le nombre de claquages électriques et l'augmentation de la température de fonctionnement dégrade considérablement les caractéristiques de l'huile. Au-delà d'une certaine valeur, la température est un facteur plus critique que le nombre de claquage dans la dégradation de l'huile isolante.

Toutefois, aux premiers claquages, ces deux facteurs améliorent la rigidité de l'huile grâce à l'élimination de l'humidité contenue dans cette dernière.

Le vieillissement thermique affecte considérablement les propriétés de l'huile de transformateur, ce qui risque d'engendrer la dégradation des matériaux solides imprégnés, de favoriser les phénomènes de conduction et conduire à des claquages pouvant mettre hors usage l'équipement de haute tension.

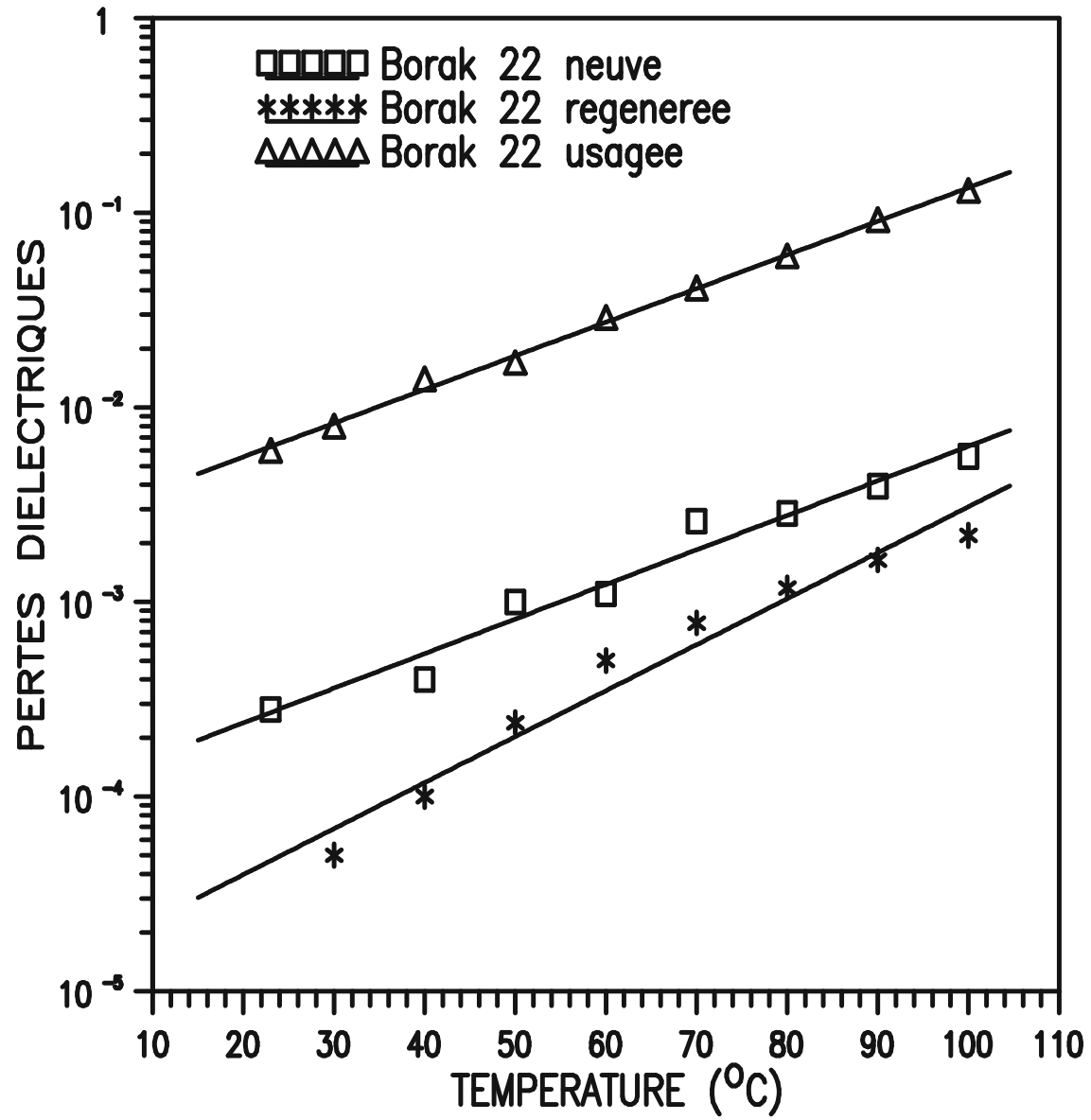
# Régénération de la Borak22

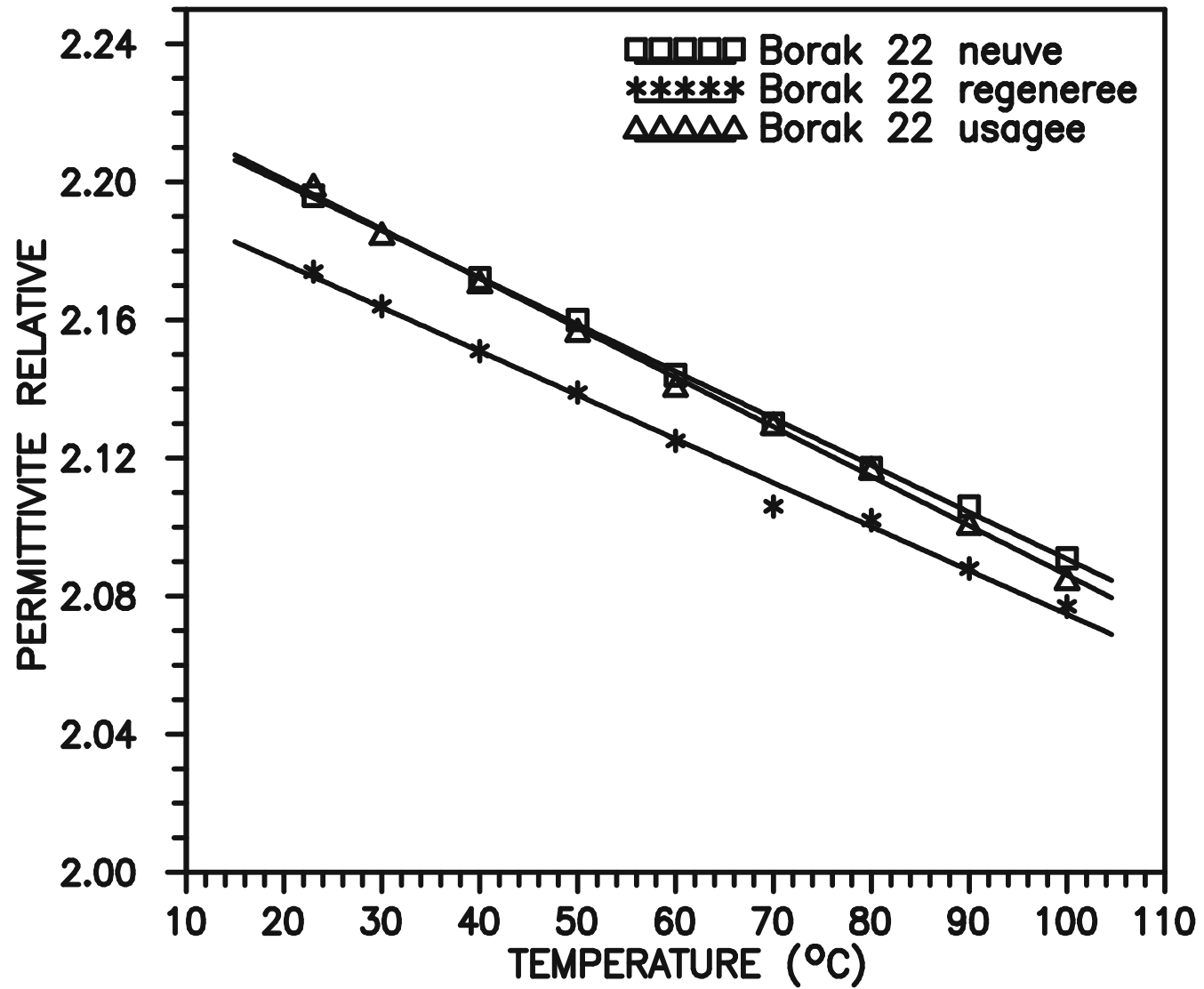
Essais faits dans les cas de l'huile neuve, usagée et régénérée, dans les laboratoires de la SONELGAZ/Hamma et de l'ENICAB/Gué de Constantine (1997).

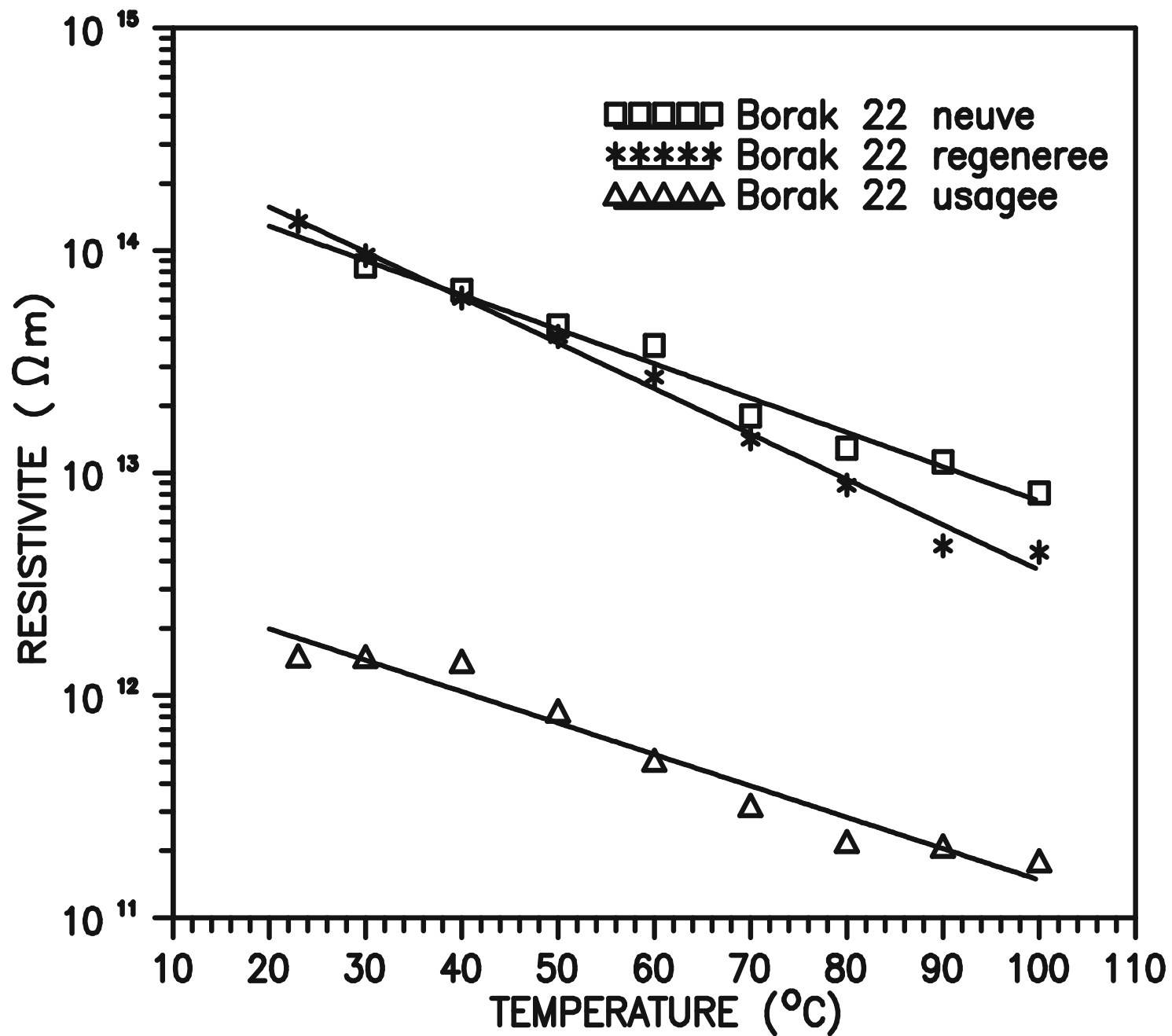
L'huile usagée a été prélevée de transformateurs de plus de 3kV après une durée d'exploitation d'au moins 5 années. Cette huile est filtrée puis dégazée avant les mesures.

L'huile régénérée a été obtenue selon le procédé de régénération acide-terre, composé des sept étapes suivantes:

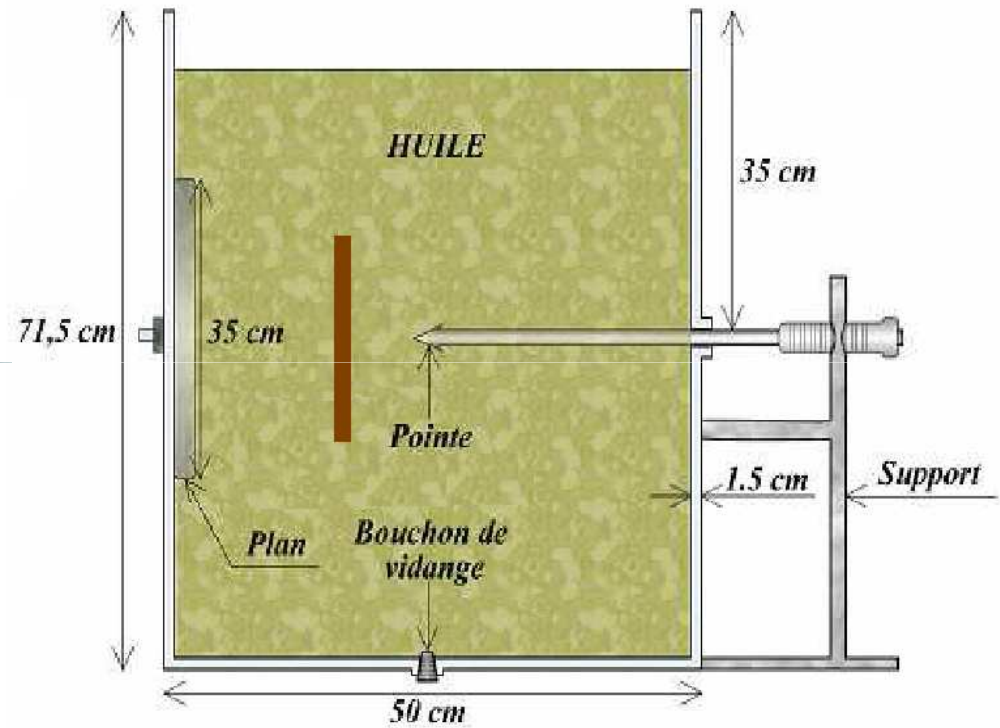
- L'huile est filtrée puis dégazée afin d'éliminer les impuretés mécaniques;
- L'huile, ainsi prétraitée, est attaquée à l'acide sulfurique 95% à raison de 5% en volume, puis agitée pendant 20 minutes;
- A l'issue d'une décantation de 24 heures, on obtient un dépôt de boues acides et une huile acidifiée;
- L'huile acidifiée est neutralisée avec de la potasse (KOH);
- L'huile obtenue est attaquée à la bentonite déshydratée à raison de 30% en masse;
- On laisse décanter une seconde fois;
- Enfin, on effectue un filtrage qui sépare les boues huileuses de l'huile régénérée.

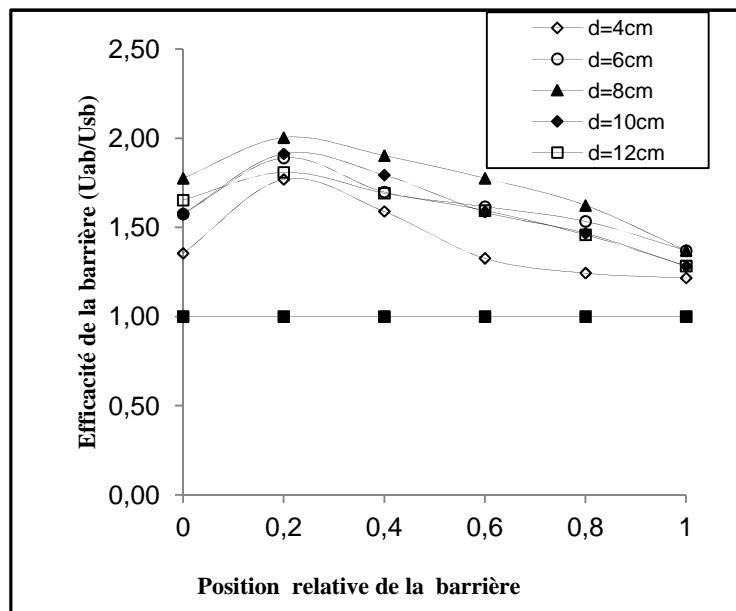




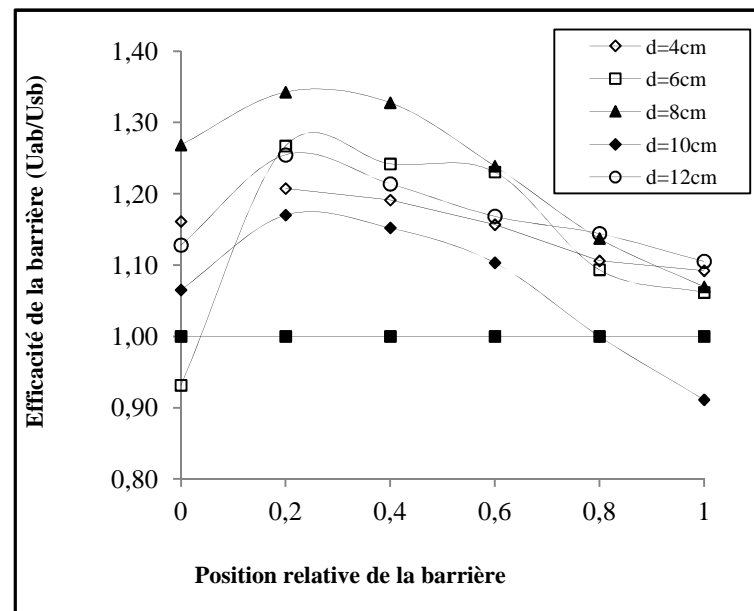


# Amélioration de la rigidité diélectrique par utilisation de barrières isolantes (écrans)





Efficacité de la barrière en bakélite en fonction de la position relative pour différentes distances inter-électrodes,  $e=2\text{mm}$ ,  $D=20\text{cm}$ .



Efficacité de la barrière en presspahn en fonction de la position relative pour différentes distances inter-électrodes,  $e=2\text{mm}$ ,  $D=20\text{cm}$ .

# Utilisation des méthodes d'intelligences artificielle dans le diagnostic de l'huile de transformateur

Réseaux de neurones artificiels

Logique floue

**Techniques des essaims** (colonies de fourmis ,essaims d'abeilles, nuées d'oiseaux et autres éventuellement)

---

Prédiction des propriétés diélectriques et physico-chimiques de l'huile de transformateur;

Diagnostic de l'état de l'huile après un grand nombre de claquages, et durant un vieillissement thermique.

2001-2008 - Travaux développés avec SKMK (transfo-Centre)/SONELGAZ

2011 – Travaux en perspective avec GRTE et SKMK - SONELGAZ



conclusion

Questions-réponses