

P. HENRY

L'emploi des diélectriques chlorés

Annales de l'université de Grenoble, tome 22 (1946), p. 25-46

http://www.numdam.org/item?id=AUG_1946__22__25_0

© Annales de l'université de Grenoble, 1946, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « Annales de l'université de Grenoble » implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques

<http://www.numdam.org/>

L'EMPLOI DES DIÉLECTRIQUES CHLORÉS

Conférence de M. P. HENRY

J'ai à vous entretenir de la question des diélectriques chlorés et de leur emploi comme huile isolante dans la construction des transformateurs. J'étudierai avec vous le rôle de ces diélectriques et les spécifications qui leur sont imposées, les raisons qui ont amené les producteurs français à se pencher sur ce problème, et les réalisations auxquelles ils ont abouti.

Nous examinerons successivement les différents produits mis au point et leurs caractéristiques. Nous verrons quelles difficultés l'emploi de ces produits nouveaux a soulevées, et les solutions adoptées pour la construction des transformateurs.

Je vous exposerai les résultats obtenus et ce qu'il convient de penser de l'avenir des diélectriques chlorés.

A. — CONSTRUCTION DES TRANSFORMATEURS

Sans entrer dans les détails, je rappellerai brièvement qu'un transformateur comporte un circuit magnétique sur lequel est monté un enroulement de basse tension et un enroulement de haute tension. Ces deux enroulements se présentent généralement sous forme de bobines concentriques séparées par un cylindre isolant. L'ensemble est assujéti sur des barres rigides et immergé dans une cuve remplie de diélectrique. A la partie supérieure, il y a un dispositif conservateur et un trop-plein.

On a utilisé pour diélectrique des huiles de résine, ultérieurement des huiles minérales spéciales. Les qualités requises pour ces produits sont en particulier une faible conductivité et une faible visco-

sité, de manière à assurer par convection un refroidissement suffisant.

On est ainsi amené à utiliser des huiles de plus en plus légères, ce qui augmente notablement les risques d'inflammabilité. Les huiles minérales isolantes doivent répondre à des spécifications précises tant au point de vue diélectrique qu'en raison des conditions d'emploi.

Je vous rappellerai ici brièvement les principales normes de l'U. S. E.

1° *Tendance à former des dépôts.*

Les dépôts doivent être nuls après chauffage pendant 5 heures à 150°.

2° *Point d'inflammabilité.*

Le point d'inflammabilité doit être supérieur à 160° pour les vapeurs émises à 180° pour l'huile proprement dite.

3° *Viscosité.*

La viscosité doit être inférieure à 2,5 à 50°.

4° *Perte de poids par évaporation.*

La perte de poids doit être inférieure à 0,2 pour 100 après chauffage à 100° pendant 5 heures.

5° *Température de décongélation.*

La température de décongélation doit être inférieure à — 5°.

6° *Humidité.*

Les huiles isolantes doivent être pratiquement exemptes d'eau.

7° *Rigidité diélectrique.*

La rigidité diélectrique doit être supérieure à 40000 volts, mesurée en tension alternative entre sphères de 12 mm. 5 de diamètre avec écartement de 5 millimètres.

Voyons maintenant l'ORIGINE DES DIÉLECTRIQUES CHLORÉS.

Comment se présentait la situation de la France au moment du blocus ?

Notre pays recevait toutes les huiles isolantes d'origine minérale d'importation, soit sous forme de pétrole brut, soit à l'état d'huile raffinée. En 1940, sous l'influence du blocus ces importations devinrent impossibles et la construction des transformateurs risquait d'être totalement arrêtée.

A quels produits de remplacement pouvait-on faire appel?

a. — *Huiles anthracéniques* : Ces huiles obtenues par distillation de la houille et convenablement épaissies, peuvent servir de lubrifiants, mais leur emploi dans les transformateurs n'a pas été poussé très loin.

b. — *Huiles de colophane* : Ces huiles obtenues par pyrogénéation de la colophane suivie de distillation et hydrogénation, ont de bonnes qualités lubrifiantes et diélectriques. Malheureusement, les livraisons faites aux utilisateurs étaient à peu près nulles et n'ont pas dépassé la proportion de simples échantillons.

c. — *Huiles de synthèse* : Ces huiles proviennent de condensation entre des carbures cycliques et des chlorures d'oléfines. On pourrait obtenir ainsi des produits d'excellente tenue à la chaleur. Toutefois, il n'y a pas eu dans ce domaine de livraisons importantes aux utilisateurs.

d. — *Dérivés chlorés* : En France et à l'étranger, on avait étudié la fabrication de dérivés chlorés, du benzène, du naphthalène et du diphenyle. On avait recherché des produits susceptibles d'être utilisés pour des transformateurs installés dans les salles de spectacles, les mines et les endroits où l'inflammabilité est particulièrement désirable.

Voyons maintenant ce qui se faisait à l'étranger.

Parmi les principaux produits mis au point à l'étranger on peut citer :

En Amérique : les pyranols — les inerteens — les aroclors.

En Angleterre : les permitols.

En Allemagne : les clophens.

Ces produits sont surtout des composés à base de diphenyl chloré. Il convient de noter que l'Amérique a reconnu que l'emploi des diélectriques chlorés permettait d'éliminer les risques d'incendie dus à l'huile pour transformateurs, si bien que l'on a modifié dans ce sens le code électrique national aux U. S. A.

Dès le début de 1941, le Comité d'organisation de la Construction électrique demandait au Comité d'organisation de l'Industrie chimique de participer à un programme d'ensemble de fabrications d'huiles pour transformateurs. Les principaux producteurs de chlore se mirent rapidement à l'étude, et des livraisons de diélec-

triques chlorés purent être exécutées immédiatement aux fabricants de transformateurs.

Quelle a été l'orientation prise par les trois firmes françaises ?

Les trois producteurs : Établissements PROGIL, Électrochimie UGINE, Compagnie ALAIS, FROGES et CAMARGUE, utilisèrent comme matière première pour ces diélectriques les dérivés de la houille, tels que le benzène, le naphthalène et le diphényle qui est lui-même obtenu à partir du benzène.

Les produits commerciaux mis à la disposition des constructeurs sont soit des composés définis tels que l' α -monochloronaphtalène et le diphényle chloré, soit des mélanges tels que :

α -monochloronaphtalène et trichlorobenzène
Trichlorobenzène et orthodichlorobenzène
Trichlorobenzène et tétrachloronaphtalène, etc.

Il convient de souligner tout de suite que le diphényle chloré, qui est un produit visqueux, est utilisé pour l'isolement des condensateurs. Tous les autres produits que je viens de citer sont des liquides fluides, destinés au remplissage des transformateurs. On les trouve sur le marché sous les noms de :

Diélectrols
Chloranols
Afcoline.

Nous allons examiner plus attentivement ce que sont ces différents produits, leur mode de fabrication et leurs caractéristiques.

1° Produits adoptés.

Les produits de base utilisés soit purs, soit en mélange sont les suivants :

Dérivés du benzène : Orthodichlorobenzène
Trichlorobenzène.

Dérivés du naphthalène : α -monochloronaphtalène
Tétrachloronaphtalène.

Dérivés du diphényle : Pentachlorodiphényle
Hexachlorodiphényle.

2° Spécification chimique.

Ces différents produits sont des dérivés de substitution obtenus par remplacement d'un ou de plusieurs atomes d'hydrogène par un pour plusieurs atomes de chlore, soit sur le noyau benzénique, soit sur l'un ou les deux noyaux des naphthalènes ou du diphényle.

Trichlorobenzène : $C^6H^3Cl^3$.

α -monochloronaphtalène : $C^{10}H^7Cl$.

Hexachlorodiphényle : $C^{12}H^4Cl^6$.

3° Fabrication.

a) **Matière première.** — Les diélectriques chlorés font tous appel comme nous venons de le voir à des sous-produits de la distillation de la houille : benzène, naphtalène. Le diphényle est obtenu à partir du benzène par chauffage à 700° en présence de catalyseurs appropriés. Le chlore nécessaire à leur fabrication provient de l'électrolyse du chlorure de sodium.

Les éléments servant à l'élaboration de tous les diélectriques chlorés sont donc : le courant électrique fourni par la houille blanche, le sel marin et le charbon.

La fabrication de ces produits est ainsi une industrie essentiellement française tirant toutes ses matières premières du domaine national.

b) **Mode de fabrication.** — La fabrication de ces différents composés est délicate du fait de l'agressivité du chlore. Elle comporte en principe une fusion pour les produits solides, suivie de chloruration, neutralisation, distillation, rectification et raffinage.

Je n'entrerai pas dans le détail de chacune de ces fabrications, en raison même de leur similitude. Je vous donnerai, à titre d'exemple, la réalisation pratique de la fabrication de l' α -monochloronaphtalène.

Tout d'abord, rappelons que la naphtaline est retirée de l'huile de goudron obtenue par une distillation sèche de la houille. Si on soumet cette huile à une distillation fractionnée, on sait que l'on obtient :

- une huile légère à $150^\circ C$,
- une huile moyenne entre 150 et 210° ,
- une huile lourde entre 210 et 270° ,
- une huile d'anthracène entre 270 et $400^\circ C$.

L'huile moyenne renferme le naphtalène, du crésol et du phénol.

« L'huile lourde » passant entre 230 et $270^\circ C$ renferme des produits qui sont en partie identiques avec les produits principaux de « l'huile moyenne » et avec ceux que l'on trouve dans la fraction « huile d'anthracène », à point d'ébullition plus élevé, soit des hydrocarbures supérieurs : Acénaphène et diphényle.

La fabrication de l' α -monochloronaphtalène comporte essentiellement les phases suivantes :

- fusion de la naphthaline,
- chloruration,
- neutralisation,
- distillation et rectification,
- raffinage.

Pratiquement on opère de la façon suivante :

Dans un appareil cylindrique avec double enveloppe chauffée par la circulation de vapeur, on charge de la naphthaline et on chauffe. Lorsque la fusion est obtenue, on commence la chloruration. L'opération dure de 18 à 20 heures. On suit le degré de chloruration par la densité du produit obtenu.

L'acide chlorhydrique qui se dégage au cours de l'opération est condensé dans des colonnes en grès ou en quartz. Lorsque le degré de chloruration voulu est atteint, le liquide est envoyé dans un pot de neutralisation. On obtient ainsi :

l' α -monochloronaphtalène brut.

La chloruration ne pouvant être rigoureusement uniforme, il faut séparer les fractions d'un degré de chloruration plus élevé qui ont pris naissance. La masse est donc soumise à une distillation discontinue dans une chaudière. Les parties lourdes restent dans la chaudière. L' α -monochloronaphtalène distille et va au condenseur.

Cette opération se fait sous un vide poussé obtenu sous l'action de pompes spéciales.

Finalement on obtient en condensat l' α -monochloronaphtalène distillé, et en résidu dans la chaudière un brai noir, un polychloronaphtalène.

L' α -monochloronaphtalène distillé contient encore en suspension des impuretés, dont la présence diminue la résistance du liquide au passage du courant. Pour s'en débarrasser, on procède à un dernier raffinage qui permet d'obtenir l' α -monochloronaphtalène pur.

c) Matériel.

Pour ces différentes opérations, l'atelier de fabrication comporte donc les appareils suivants :

- pot de chloruration,

- pot de neutralisation,
- chaudière de distillation,
- installation de raffinage,

ainsi que des appareils annexes :

- condenseurs à acide chlorhydrique.
- pompes à vide, etc.

d) Ateliers.

Pour l'ensemble des diélectriques chlorés, il existe maintenant des ateliers de fabrication dont la capacité globale de production est de l'ordre de 300 tonnes par mois. Géographiquement, ces ateliers sont répartis de la façon suivante :

Pour le Nord de la France :

A Ribecourt, dans l'Oise, un atelier appartenant à la Compagnie ALAIS, FROGES et CAMARGUE.

Pour le Sud de la France :

A Jarrie, dans l'Isère, un atelier appartenant à la Compagnie d'Électrochimie d'Ugine.

A Pont-de-Claix, dans l'Isère, un atelier appartenant à la Société PROGIL.

A Saint-Auban, dans les Basses-Alpes, un atelier appartenant à la Compagnie ALAIS, FROGES et CAMARGUE.

4° Caractéristiques des produits obtenus.

Tout d'abord, *caractéristiques physiques.*

a) Densité. — La densité des diélectriques chlorés est beaucoup plus élevée que celle des huiles minérales. Elle varie suivant les types de 1,2 à 1,6.

Il importe de tenir compte de cette densité pour déterminer la quantité de diélectriques chlorés nécessaire au remplissage d'un transformateur. La densité moyenne des huiles minérales pour transformateurs étant 0,9, les quantités de diélectriques chlorés nécessaires pour garnir un transformateur nécessitant 1 000 kilogrammes d'huile minérale seront :

en α -monochloronaphtalène. . . .	1 387 kilogrammes.
en mélange α -trichlorobenzène. . .	1 443 —
en mélange trichlorobenzène-diphényle.	1 665 —

Du fait de la densité élevée des diélectriques chlorés, les traces d'humidité pouvant se produire restent à la surface et ne souillent

pas le diélectrique, comme c'est le cas avec les huiles minérales dont la densité est inférieure à celle de l'eau.

Lors de l'étuvage du transformateur, l'eau reviendra ainsi à la partie supérieure, ce qui facilitera son élimination, mais la rendra indispensable, en raison de la présence des électrodes à la partie haute.

b) **Viscosité.** — Les diélectriques chlorés ont une viscosité de 1,2 à 1,5 à 20° et de 1 à 1,2 à 90°. Cette basse viscosité favorise les mouvements de convection et assure un refroidissement meilleur. Cette viscosité est de même ordre de grandeur que celle des huiles minérales aux températures d'utilisation.

c) **Point de décongélation.** — Les diélectriques chlorés pour transformateurs ont un point de décongélation inférieur à celui des meilleures huiles pour transformateurs. Cette température est en effet toujours inférieure à moins 40°, dans le cas du mélange α -monochloronaphtalène-trichlorobenzène, elle atteint moins 55° C.

Ceci est intéressant en particulier pour la construction de transformateurs destinés à être placés à l'extérieur.

d) **Chaleur spécifique.** — Les diélectriques chlorés ont une chaleur spécifique qui varie de 0,25 à 0,35. Cette valeur permet d'assurer le refroidissement normal des appareils.

e) **Coefficient de dilatation.** — Les diélectriques chlorés ont un coefficient de dilatation très voisin de celui des huiles minérales. Pour certains types, il est très légèrement inférieur, pour d'autres légèrement supérieur. Ces faibles différences n'entraînent pas de servitude particulière pour la prévision de vase d'expansion d'un volume supérieur à ceux utilisés pour les huiles minérales.

f) **Conductibilité thermique.** — La conductibilité thermique des diélectriques chlorés est comparable à celle des huiles minérales. Étant donné que le refroidissement des transformateurs se fait surtout par convection, les différences qui peuvent exister entre les différents types sont sans influence sur le fonctionnement des appareils.

g) **Point d'inflammabilité.** — Les diélectriques chlorés ont des points d'inflammabilité qui varient entre 115 et 130°.

J'attire cependant tout particulièrement votre attention sur le fait que malgré la détermination d'un point d'inflammabilité à une certaine température et dans des conditions expérimentales définies les diélectriques chlorés sont pratiquement ininflammables. En effet,

les produits qui se forment par décomposition pyrogénée des diélectriques chlorés renferment du chlore en proportion telle qu'ils sont ininflammables alors que la décomposition des huiles minérales conduit à des vapeurs au contraire très inflammables.

La production d'une étincelle électrique au sein d'une huile minérale peut amener l'inflammation de cette huile, alors qu'il n'y a pas d'inflammation lorsque cette étincelle se produit au sein d'un diélectrique chloré. Ce point a d'ailleurs fait l'objet d'un échange de vues entre les constructeurs de transformateurs et les producteurs de diélectriques chlorés, au cours d'une réunion qui s'est tenue à Paris en mars 1945, et les conclusions adoptées à cette époque étaient les suivantes :

1. — que pour tous les produits actuellement fabriqués, l'incombustibilité à l'état liquide est absolue.

2. — que pour certains types de diélectriques chlorés actuels, l'incombustibilité des vapeurs, dans certaines conditions de température et de foyer entretenu, n'est pas absolue.

3. — que dans la pratique, il n'y a pas d'exemple d'inflammation réelle, même pour ces derniers types.

4. — que les fabricants de diélectriques chlorés sont parfaitement à même, si on le désire, d'orienter leur production vers les types dont l'incombustibilité est absolue.

h) Tension de vapeur. — Les diélectriques chlorés ont une tension de vapeur plus élevée que les huiles minérales. Les pertes par évaporation sont donc plus importantes sans qu'elles atteignent cependant des valeurs excessives.

Les transformateurs étant des appareils fermés, les pertes réelles dues à l'évaporation dans un appareil industriel sont toujours très faibles.

Les essais officiels effectués au Laboratoire Central d'Électricité donnent des chiffres variant de 0,2 pour 100 pour l'alphamonochloronaphtalène à 1 pour 100 pour le mélange alpha-trichlorobenzène.

Les dispositifs utilisés dans les transformateurs pour réduire la surface de contact de l'huile avec l'air en vue d'éviter l'oxydation des huiles minérales et la formation de dépôts, sont parfaitement efficaces pour réduire les pertes par évaporation, lors de l'emploi des diélectriques chlorés.

Nous aurons d'ailleurs l'occasion d'examiner tout à l'heure les dispositifs divers adoptés dans ce but par les constructeurs.

Voyons maintenant les *caractéristiques chimiques* :

a) **Teneur en acide.** — Les diélectriques chlorés ont une teneur en acide extrêmement faible et souvent non décelable par les méthodes habituelles d'analyse. La méthode habituellement reconnue comme la plus sensible utilise comme indicateur coloré le bleu 6 B. L'acidité totale exprimée en $\text{SO}^{\prime}\text{H}^2$ peut aller jusqu'à 0,001 pour 100, mais les valeurs généralement obtenues sont de l'ordre de 0,001 et moins.

Le Ph des diélectriques chlorés n'est jamais inférieur à 6.

b) **Teneur en alcalis.** — Les diélectriques chlorés ont une teneur en alcali nulle.

c) **Teneur en impuretés après chauffage.** — Les diélectriques chlorés présentent sur les huiles minérales l'avantage de ne donner aucun dépôt, même après chauffage prolongé à 150°. On sait que les huiles minérales exposées au contact de l'air à une température de 100° donnent des produits d'oxydation se dispersant dans l'huile, en fines particules qui se déposent sous forme de boues. Ces dépôts sur les enroulements et les parois de la cuve entravent l'évacuation de la chaleur. Cet inconvénient n'est pas à craindre avec les diélectriques chlorés qui restent parfaitement limpides, quelles que soient la durée d'exposition à l'air et la température de l'essai.

d) **Hygroscopicité.** — Les diélectriques chlorés ne sont pas hygroscopiques. Néanmoins il est recommandé de faire le remplissage des transformateurs en s'entourant de toutes les précautions nécessaires pour éviter l'introduction d'eau ou la condensation d'humidité à l'intérieur des appareils. La précaution que prennent certains constructeurs d'étuver des huiles minérales avant le remplissage des transformateurs est à recommander également pour les diélectriques chlorés.

e) **Pouvoir solvant des diélectriques chlorés.** — Contrairement aux huiles minérales, les diélectriques chlorés ont un pouvoir solvant pour un certain nombre de substances isolantes utilisées en électrotechnique.

Les diélectriques chlorés dissolvent en particulier :

les résines naturelles,
 les résines d'acétate de vinyle,
 les asphaltes et les brais,
 le caoutchouc.

Les diélectriques sont sans action sur :

l'acétate de cellulose,
la viscosse,
le coton,
la rayonne,
le papier,
les résines formo-phénoliques polymérisées,
les résines amino-formoliques polymérisées.

Les isolants composites obtenus par imprégnation d'une substance à l'aide d'un vernis sont dissous si le vernis d'imprégnation est lui-même dissous. C'est ainsi que le souplisseau, les rubans jaunes, les presspahn, les micanites, le linoliège sont attaqués.

On s'adressera de préférence aux supports vernis avec des résines formophénoliques qui offrent l'avantage de résister parfaitement aux diélectriques chlorés.

Notons que le coton ayant séjourné longuement dans les diélectriques chlorés ne présente aucune diminution de résistance à la traction, comme cela se produit avec les huiles minérales.

f) Action des diélectriques chlorés sur les métaux. — Les diélectriques chlorés sont sans action sur les métaux entrant dans la construction des transformateurs. Les essais ont porté sur les métaux usuels : cuivre, aluminium, fer, bronze, étain. Ces métaux soit pris isolément, soit introduits ensemble dans les diélectriques chlorés, n'ont pas produit d'altération sur les diélectriques chlorés et n'ont pas été altérés.

Des essais ont été faits également sur les liaisons soudées avec les différentes compositions à base d'étain, de plomb, de cadmium utilisées pour la soudure du cuivre et de l'aluminium.

Caractéristiques électriques.

1° *Rigidité.* — Les diélectriques chlorés possèdent une rigidité diélectrique très supérieure à celle des huiles minérales. Des séries d'essais effectuées avec l'éclateur normalisé de l'U. S. E. ont permis d'obtenir des tensions de claquage de l'ordre de 100 000 volts. Avec l'éclateur G. E. C° dont l'écartement des disques est de 2,54 mm., on obtient couramment 40 000 volts. Avec les huiles minérales, les valeurs courantes de la tension de claquage sont respectivement de 60 000 et 20 000 volts avec les éclateurs dont je viens de vous parler.

2° *Résistivité.* — Les diélectriques chlorés présentent une résistivité en courant continu comprise entre 30×10^9 à 10×10^{12} . Une huile minérale réputée bonne possède une résistivité de 10×10^{13} . Cette résistivité en courant continu n'est d'ailleurs pas caractéristique de la qualité des isolants chlorés. On constate que c'est une valeur dont la mesure est extrêmement difficile et de peu d'intérêt, car elle varie dans de très grandes proportions, suivant les conditions opératoires (temps d'application, potentiel, surface des électrodes, distance des électrodes, nature des électrodes, etc.).

On lui préfère la résistivité apparente en courant alternatif qui est beaucoup plus caractéristique de la valeur du produit. Pour les diélectriques chlorés, la résistivité apparente à 50 périodes est toujours supérieure à 40×10^9 ohms cm².

3° *Tangente de l'angle de perte.* — Rappelons tout d'abord ce que l'on désigne sous le nom de tangente δ . Quand un condensateur est soumis à une tension alternative, le courant engendré est déphasé en avant par rapport à la tension d'un angle δ . On appelle angle de perte, l'angle δ qui est nul pour un diélectrique parfait. La tangente d'angle de perte apparaît comme la caractéristique la plus sensible de la qualité des diélectriques chlorés. Une commission technique groupant les producteurs, les utilisateurs et le Laboratoire central d'électricité en décembre 1942 a adopté la mesure de la tangente δ comme contrôle de la qualité de ces diélectriques. La valeur obtenue pour la tangente d'angle de perte varie à 20° de 2/100 à 2/10 environ.

4° *Pouvoir inducteur spécifique.* — Les diélectriques chlorés ont un pouvoir inducteur spécifique beaucoup plus élevé que celui des huiles minérales. Il est compris entre 4,5 et 5,5, suivant les types. Ceci présente un avantage considérable. En effet, la plupart des diélectriques utilisés pour l'isolement des bobinages ont une constante diélectrique voisine de 5 ; l'emploi d'un liquide isolant, ayant une constante diélectrique voisine de celle des isolants solides, assure une répartition meilleure du champ électrique.

Dans l'emploi des diélectriques chlorés pour les condensateurs, la valeur du pouvoir inducteur spécifique double de celle de la paraffine, permet d'avoir pour un volume égal une capacité plus grande.

Étudions maintenant *les propriétés particulières des diélectriques chlorés.*

Les propriétés des diélectriques chlorés, et en particulier leur pou-

voir solvant vis-à-vis des corps gras et d'un certain nombre de résines et de vernis, la tendance à l'évaporation un peu plus forte que celle des huiles minérales, la densité inférieure à celle de l'eau, ont obligé les constructeurs à fournir un effort spécial pour adapter leurs fabrications à l'emploi de ces produits nouveaux.

Pouvoir solvant énergétique. — Ceci entraîne l'obligation pour le constructeur de n'utiliser que des isolants et des joints spéciaux car l'emploi des joints ou de vernis mal adaptés peut entraîner :

— Un abaissement de la résistivité conduisant à une augmentation des pertes d'autant plus sensible que la puissance du transformateur est plus faible et la tension de service plus élevée.

— Une absorption d'humidité qui ne résulte pas de la nature même du produit, mais bien de l'étanchéité insuffisante de l'appareil.

Difficulté de traitement de régénération. — Notamment en cas de décomposition sous l'arc électrique. En fait, ce traitement est extrêmement facile pour les producteurs et même pour certains constructeurs qui disposent de l'appareillage nécessaire et de l'expérience voulue.

Ces différents points ont fait l'objet d'un échange de vue entre les producteurs de diélectriques chlorés et les constructeurs de transformateurs dont je vous donnerai ici les conclusions :

« La plus grosse difficulté provient certainement du pouvoir solvant considérable des diélectriques chlorés qui oblige à choisir des joints et des isolants spéciaux.

« Les vernis formo-phénoliques convenablement polymérisés pour les isolants et les caoutchoucs synthétiques pour les joints constituent des solutions très satisfaisantes.

« Les joints au plomb sont en service depuis trop peu de temps pour qu'on puisse conclure à leur sujet, malgré l'aspect favorable sous lequel ils se présentent actuellement.

« La résistivité, notablement plus faible que les huiles minérales, conduit à une augmentation des pertes qui constitue le premier point des inconvénients énoncés. L'augmentation de ces pertes semble d'ailleurs due presque exclusivement à l'action dissolvante des diélectriques chlorés sur des papiers de qualité insuffisante ou sur des joints ou des vernis mal adaptés. Ces inconvénients paraissent par conséquent susceptibles d'être pratiquement supprimés.

« Le troisième inconvénient signalé « absorption d'humidité » ne résulte pas de la nature même du produit, mais a toujours été constaté sur les appareils dont l'étanchéité n'était pas suffisante.

« Le quatrième point : densité plus élevée que l'eau, oblige les constructeurs à généraliser des cuves munies de conservateurs et ne paraît pas à retenir, du fait qu'il est également en liaison immédiate avec la question des joints, et que d'autre part, les cuves à conservateur paraissent présenter des avantages, quel que soit le liquide de remplissage.

« D'ailleurs, si le problème existait véritablement, on pourrait opposer la solution américaine consistant en des appareils étanches pouvant supporter une surpression de 500 grammes.

« Les cinquième et septième points relatifs à la décomposition sous l'arc électrique et la difficulté des traitements pourraient être confondus en un seul.

« En effet, la décomposition qui peut se produire sous l'action d'un arc électrique est facilement palliée par une simple neutralisation, suivie d'une filtration et les autres traitements de régénération sont également simples et peuvent être facilement réalisés par l'utilisateur dans des conditions analogues à celles des huiles isolantes. D'ailleurs certains constructeurs disposent déjà de l'appareillage nécessaire. »

En étudiant les caractéristiques chimiques des diélectriques chlorés, nous avons eu l'occasion de voir que tous les essais entrepris avaient démontré que ces produits étaient sans action sur les métaux. La résistance mécanique du coton et du papier n'est pas modifiée après immersion dans les diélectriques chlorés.

Ces considérations ont amené les constructeurs à limiter le choix des matériaux à utiliser : métaux, bois, papier, coton et un certain nombre de résines insolubles dans ces différents produits, en particulier les vernis formo-phénoliques convenablement polymérisés. Citons, par exemple, pour les joints les bons résultats obtenus avec le liège bakéliné.

Les clichés ci-dessous montrent quelques solutions adoptées par les constructeurs.

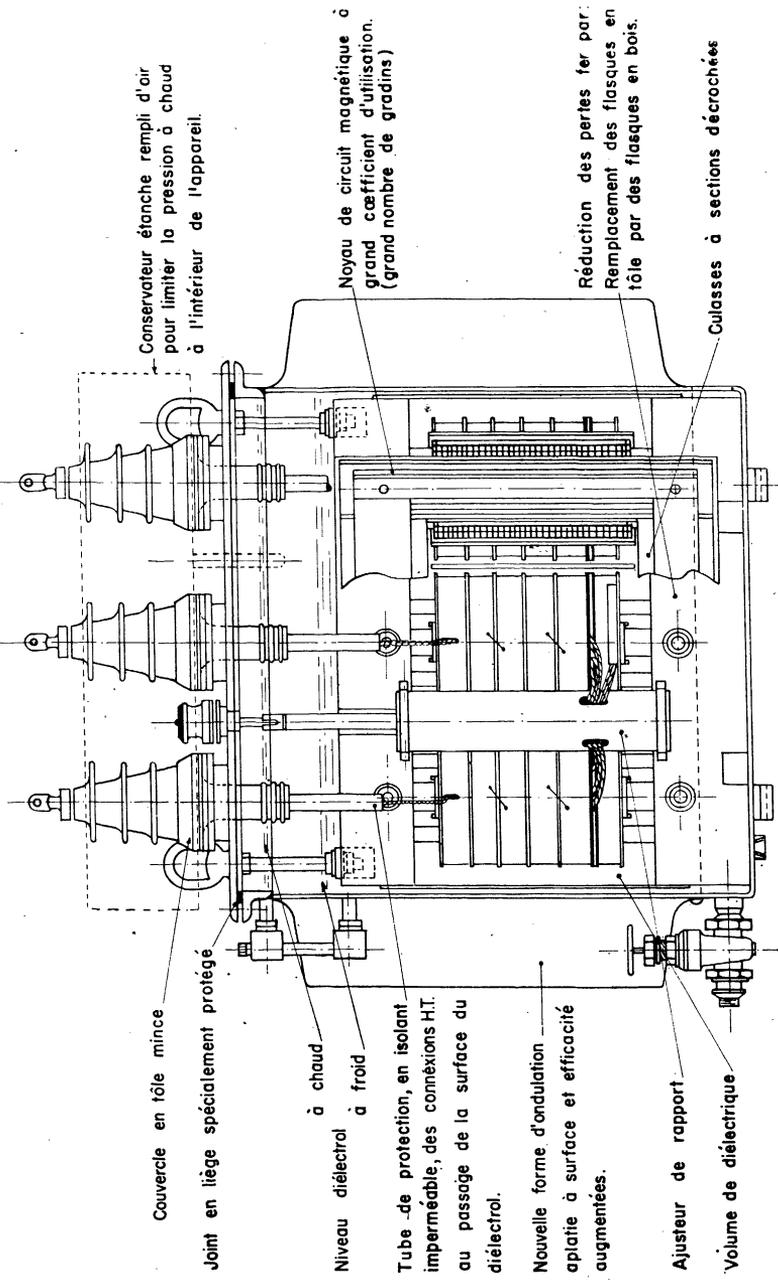
Cliché A. — Schéma de transfo TIRD dans le diélectrol. — Constructeur Alsthom.

Cliché B. — Schéma de transfo avec conservateur d'air. — Constructeur Société « Le Transformateur ».

Description du dispositif :

Dans ces appareils, dont la cuve est étanche, le niveau du diélectrique est celui que l'on aurait dans un appareil sans conservateur.

TRANSFORMATEUR T.I.R.D DANS LE DIELECTROL



L'air contenu dans le transformateur n'a aucun contact avec l'air extérieur, le dispositif permettant néanmoins la dilatation normale du fluide diélectrique sous l'influence des variations de température au cours du service.

L'appareil se compose d'une cuve à fond rentrant comme un fond de bouteille. Ce fond est coiffé intérieurement par une cloche qui se soulève sous l'effet de la dilatation de l'air intérieur du transformateur. Cette cloche est en communication par une tubulure avec la partie supérieure du transformateur. Un joint hydraulique constitué par le même diélectrique que celui remplissant le transformateur, est ménagé entre la cloche et la cuve, de façon à intercepter la communication de l'air contenu dans la partie supérieure du transformateur avec l'atmosphère extérieure. L'air enfermé dans la partie supérieure de la cuve au-dessus de la cloche est en communication avec l'extérieur par une tubulure. Sur le côté de la cuve est disposé un petit coude, normalement obturé par un bouchon et servant au remplissage.

Cliché C. — Transfo triphasé 125 KVA sous 13 000 V. — Constructeur Alsthom.

Cliché D. — Transfo monophasé à refroidissement naturel : 24 KVA, sous 60 000 V. — Constructeur Alsthom.

Cliché E. — Transfo à réservoir d'expansion. — Constructeur S. F. M. E. Pantin.

Cliché F. — Transfo puissance 30 KVA, tension 30 000 V. — Constructeur Société Savoissienne de Constructions Électriques.

Cliché G. — Transfo puissance 750 KVA, tension 40 000 V. — Constructeur Société Savoissienne de Constructions Électriques.

Je vais encore attirer votre attention sur un point particulier de l'emploi des diélectriques chlorés, soit le remplissage des transformateurs, plus spécialement chez l'utilisateur.

Les caractéristiques diélectriques des dérivés chlorés sont très sensibles à l'action des impuretés, et en particulier la tangente d'angle de perte. L'humidité peut également diminuer la rigidité diélectrique. Il convient donc de prendre quelques précautions spéciales. Lors du remplissage des transformateurs avec des diélectriques, il peut y avoir dissolution de vernis gras, vernis d'apprêt et il est bon d'effectuer un rinçage. Ceci d'ailleurs n'est réalisable que chez les constructeurs.

Pour le remplissage définitif, afin d'éviter la présence d'impuretés provenant des emballages utilisés pour le transport, il y a intérêt à procéder à une filtration. On fait ensuite un étuvage du transformateur rempli comme dans le cas des huiles minérales.

Ces diverses précautions permettent d'éviter cette variation des caractéristiques et en particulier de la tangente delta que l'on observe parfois dans les premiers temps de la mise en service.

Voyons maintenant quels sont les *résultats obtenus* avec ces diélectriques chlorés.

A) *Production des diélectriques chlorés.* — Pour répondre à la demande exprimée par le C. O. Celec, les différents producteurs ont monté des ateliers dont la capacité est aujourd'hui, comme nous l'avons vu, de l'ordre de 300 tonnes par mois. Au 1^{er} janvier 1945, il avait été livré environ 3 000 tonnes de diélectriques chlorés permettant d'équiper 7 500 transformateurs. Un seul constructeur en avait équipé environ 700.

En 1945, malgré le retour des huiles minérales à des prix inférieurs à ceux des diélectriques chlorés, le tonnage livré par l'ensemble des producteurs était d'environ 900 tonnes.

B) *Services rendus.* — Les constructeurs que nous avons questionnés nous ont fait connaître que sur les centaines de transformateurs livrés par eux depuis 1941, aucun incident de marche imputable aux diélectriques chlorés ne leur avait été signalé. D'ailleurs, des transformateurs de puissances diverses sont en service depuis plus de 8 ans sans aucun incident, et l'expérience à laquelle procèdent ainsi les constructeurs depuis 1941 constitue une généralisation de cette première expérience sur une vaste échelle.

Quelques chiffres encore : quelles sont les puissances moyennes et les tensions adoptées avec les diélectriques chlorés : la puissance des transformateurs installés atteint couramment 1 500 KVA. La tension adoptée est en général de l'ordre de 15 000 volts et atteint couramment 30 000 volts, exceptionnellement 60 000 volts.

La plupart des constructeurs nous ont confirmé la bonne tenue à l'humidité, l'absence totale d'altération des métaux et des isolants. Plus particulièrement, aucun claquage n'a pu être imputé aux diélectriques chlorés.

C) *Emploi dans les condensateurs.*

Avant d'examiner l'avenir réservé aux diélectriques chlorés, je

voudrais vous dire un mot du cas particulier de leur emploi dans les condensateurs.

Pour l'isolement du condensateur, on utilise depuis longtemps les paraffines. On ne demande à ces produits qu'une bonne constante diélectrique et une tangente de l'angle de perte aussi faible que possible. En effet, dans les condensateurs, la température n'est jamais très élevée et reste généralement inférieure au point de fusion de la paraffine. Une amélioration importante a été réalisée par l'emploi du tétrachloronaphtalène, dont le point de fusion (115° environ) est sensiblement plus élevé que celui de la paraffine. D'autre part, la constante électrique de ce produit est beaucoup plus élevée que celle de la paraffine. On peut réduire d'une façon importante le volume des condensateurs.

Dans le même domaine, les diphényles, penta et hexachlorés apparaissent comme des produits définis amenés à supplanter en grande partie tous les autres produits.

Quel est l'avenir des diélectriques chlorés?

Les diélectriques chlorés sont aujourd'hui en concurrence avec les huiles minérales d'importation qui sont revenues sur notre marché et qui se trouvent à des taux inférieurs aux prix de vente couramment pratiqués pour les diélectriques de synthèse.

Si, actuellement, les huiles minérales d'importation valent environ 30 francs le litre, alors que, compte tenu de leur densité, les diélectriques chlorés valent de 1,5 à 2 fois plus, ceci provient avant tout du taux actuel des changes et révèle un aspect particulier d'un état de choses absolument général.

Il y a peu d'exemples que les produits importés ne soient pas moins chers que les produits fabriqués en France.

Il est possible que le prix français intrinsèque des diélectriques chlorés, qui est pourtant déjà trop bas pour être rémunérateur, puisse être néanmoins aménagé, dès que la production des usines pourra se faire à un rythme normal, et non pas au rythme actuel.

La technique de réalisation des transformateurs pour diélectriques chlorés, compte tenu de leurs caractéristiques, est maintenant au point. Une seule de ces caractéristiques cependant soulève encore des controverses, c'est la tangente de l'angle de perte dont la valeur est en moyenne 10 fois plus élevée que pour les huiles minérales. Toutefois, dans la pratique, les variations observées pour ces pertes n'étaient pas seulement imputables aux diélectriques, mais égale-

ment à la qualité des métaux, des soudures et des isolants employés pendant ces dernières années.

De nos entretiens avec les utilisateurs et avec les sociétés de distribution d'énergie par exemple, nous avons d'ailleurs retiré l'impression que ces pertes attribuées aux diélectriques étaient assez faibles par rapport à l'ensemble des pertes normales, soit par effet Joule, par aimantation, par capacité et des pertes en ligne.

Quoi qu'il en soit, les producteurs ne perdent pas cette question de vue et leurs efforts tendent à améliorer encore cette caractéristique.

A côté de ces imperfections, il faut tout de même souligner les avantages des diélectriques chlorés. Ils ne sont pratiquement pas inflammables et ne donnent pas lieu à formation de gaz explosifs. Ils ne vieillissent pas, donc aucune régénération n'est nécessaire. Leur viscosité est faible. Ceci permet d'assurer un bon refroidissement par convection. Pour un transformateur de volume donné, on estime généralement que cette différence de viscosité par rapport aux huiles minérales permet un gain de puissance de l'ordre de 7 à 8 pour 100.

Enfin au point de vue national, il faut souligner que les matières premières utilisées pour la production des diélectriques chlorés : charbon, sel, houille blanche, sont toutes disponibles sur notre sol.

L'emploi des diélectriques chlorés constitue ainsi, par rapport à celui des huiles minérales d'importation, une économie appréciable de devises.

CONCLUSION

Pour conclure, je n'ajouterai que quelques mots :

Notre industrie dispose de moyens de productions et de matières premières qui lui permettent de répondre aux demandes des constructeurs de transformateurs.

Ces produits ne peuvent aujourd'hui lutter à égalité sur le plan commercial avec les produits d'importation.

Les producteurs, qui n'ont pas hésité en 1941 à monter des ateliers importants pour répondre à l'appel des Pouvoirs Publics seraient heureux aujourd'hui qu'en retour on ne néglige pas l'outil qu'ils ont créé.

Il semble qu'il soit possible tout à la fois d'harmoniser nos importations et la remise en état de nos raffineries de pétrole, de manière à réserver aux huiles minérales d'une part et aux diélectriques chlorés d'autre part, des secteurs correspondant aux possibilités d'emploi des uns et des autres.

DISCUSSION

M. PAYET. — Le conférencier pourrait-il répondre à cette question ? Estimez-vous qu'à prix égal et à conditions d'importations égales que les producteurs français persévéreront dans la voie des diélectriques chlorés, soit pour les transformateurs, soit pour les condensateurs ?

M. HENRY. — Il est difficile de répondre actuellement à votre question, car ces conditions d'égalité n'ont jamais été remplies. L'huile minérale et les diélectriques chlorés ont tous deux leurs avantages et leurs inconvénients. Leurs caractéristiques mêmes devraient permettre de leur réserver des secteurs d'emploi distincts.

D'ailleurs, un groupe d'études des huiles isolantes réunit aujourd'hui, dans le cadre de l'Association française des Techniciens du pétrole, des électriciens d'une part, et des producteurs de diélectriques d'autre part. Il appartient aux premiers de définir, en raison des problèmes qu'ils ont à résoudre, les caractéristiques des produits qui leur sont nécessaires. Les producteurs détermineront, en raison de leurs possibilités, les diélectriques qu'il convient d'utiliser dans chaque cas.

Dans le cas particulier du remplissage des transformateurs, je pense que si certains constructeurs disposaient d'une quantité d'huile minérale suffisante, ils délaisseraient les diélectriques chlorés, en raison même des préjugés de leurs clients.

Toutefois, les services qu'ont rendus ces diélectriques pendant 4 ans ne sont pas à négliger du fait même que tous les transformateurs équipés ainsi n'ont pas bougé et qu'il n'y a eu aucun accident.

M. MERLIN. — Il est incontestable que la clientèle actuellement préfère l'utilisation de l'huile à celle de diélectriques chlorés.

M. CAILLEZ. — Un point serait intéressant à étudier. Un certain nombre d'accidents attirent l'attention sur le danger de l'inflammation de l'huile dans les transformateurs. Je trouve que ce danger, pendant ces dernières années, a été un peu méprisé. Cependant, des incidents récents nous ont montré que cette petite quantité d'huile contenue dans les appareils du transformateur pouvait être dangereuse.

Dans ces conditions, la non-inflammabilité des diélectriques chlorés peut ouvrir un grand champ aux constructeurs, pas telle-

ment pour le transformateur lui-même que pour certaines huiles comme celle du remplissage du transformateur.

Il va sans dire évidemment, que cela demandera une certaine augmentation de prix. Mais ce serait un grand danger de moins.

De cette façon, les diélectriques chlorés pourraient remplacer véritablement les huiles minérales trop dangereuses.

M. SARTRE. — Je ne pense pas que l'on puisse abandonner si vite une solution qui dans le passé a donné de si bons résultats. Mais je reconnais que les diélectriques chlorés peuvent retenir l'attention justement à cause de cette ininflammabilité et aussi du fait de leur non-vieillesse dont nous a parlé M. Henry.

A ce sujet, je vais poser une question à M. Henry. Je ne pense pas que les valeurs élevées de la tangente δ soient très importantes, parce que cette tangente, même si elle s'exprime par des chiffres de l'ordre de 1/10, ne s'exprime jamais qu'en fonction de la puissance capacitive du transformateur. Si on veut complètement écarter l'accroissement de la tangente δ , alors on prend les précautions que M. Henry nous a indiquées ; et ceci non pas parce que l'accroissement de la tangente δ soit gênant, mais parce qu'elle indiquerait une modification continue de l'huile qui irait alors je ne sais où.

M. HENRY. — Les produits chlorés sont des produits purs, parfaitement définis. Il est peu vraisemblable que les fléchissements traduisent des modifications de leur structure. Par contre ces produits ont un pouvoir solvant non négligeable vis-à-vis des résines et vernis. Il est indispensable d'en tenir compte pour éviter des variations importantes de la tangente delta.

M. CHARBONNET. — L'emploi des diélectriques chlorés ne permet-il pas de réduire dans une certaine mesure les dimensions du transformateur ?

M. HENRY. — Si, d'autant plus que ces produits ont une viscosité très faible. Le refroidissement par convection est donc meilleur et permet de réduire les dimensions des cuves.

M. EGGER. — Ces produits chlorés sont très onéreux. D'autre part, la question de l'emploi des diélectriques chlorés dans les transformateurs à haute tension n'a pas été étudiée, et l'expérience n'a pas démontré si, au delà d'une certaine puissance, ces produits chlorés sont utilisables.

M. MERLIN. — Pour les petits transformateurs, je suis tout à fait d'accord avec M. Henry, sur l'emploi des diélectriques chlorés.

M. X. — On doit tenir compte dans l'utilisation des grandes cuves de la pression.

M. MONTCHAMPS. — L'emploi des diélectriques chlorés a également un autre inconvénient : étant donné le grand pouvoir solvant de ces produits, il n'est pas possible d'utiliser des vernis restant suffisamment souples pour l'imprégnation.

Il faut utiliser soit un papier, soit rien du tout.

M. EGGER. — L'emploi des vernis a été à peu près résolu avec les vernis synthétiques. L'emploi des vernis souples a du reste un gros inconvénient, ils sèchent mal. Il faut employer le backélite.

M. CHARBONNET. — Vous avez parlé tout à l'heure des dangers d'incendie de l'huile dans les transformateurs ; eh bien, un grand nombre d'exploitants ont évité ces dangers grâce à l'emploi de dispositifs spéciaux.

M. HENRY. — Ces dispositifs d'extinction d'incendie sont répandus mais assez coûteux.

M. X. — Nous avons eu, récemment encore, des cas d'incendie.

M. SORREZ. — M. Henry nous a dit tout à l'heure que l'évaporation des diélectriques chlorés était supérieure à celle de l'huile ; pourrait-il nous préciser dans quelles conditions de surface, de température, de vitesse même, cette constatation a pu être faite ?

M. HENRY. — Pour les diélectriques chlorés : cette mesure a été faite suivant les normes de l'U. S. E. ; la perte de poids mesurée a été 0,2 pour 100, après chauffage à 100° pendant 5 heures.

M. PAILLET. — La manipulation du produit ne présente-t-elle pas des dangers, peut-être pas à la température ordinaire, mais peut-être à une température de 80 à 90° ?

M. HENRY. — Non, cette manipulation ne présente aucun danger, car elle est normalement effectuée en vase clos.

M. HAEGELEN. — Est-elle toxique ?

M. HENRY. — Non, elle n'est pas toxique. La manipulation normale, dans les postes d'exploitation n'a jamais été cause d'aucun inconvénient.

M. X. (Belge). — Je me permets de faire remarquer qu'en Belgique, nous prenons des précautions, même pour les disjoncteurs à volume d'huile, en vue des incendies.

BIBLIOGRAPHIE

Documents intérieurs de la Compagnie ALAIS, FROGES et CAMARGUE.

Documents et renseignements émanant des constructeurs de transformateurs.

Documents et renseignements émanant des Sociétés de distribution d'énergie.

Documents et notices remis par la Société d'Électrochimie d'UGINE.

Documents et notices remis par la Société PROGIL.

Revue Électricité, mars 1943.

Procès-verbal de la réunion C. O. I. C. H. et C. O. C. E. L. E. C. du 27 mars 1945.
