

MARCEL MOULINE

Recherches expérimentales sur l'hystérésis diélectrique

Annales de la faculté des sciences de Toulouse 3^e série, tome 14 (1922), p. 71-135

http://www.numdam.org/item?id=AFST_1922_3_14__71_0

© Université Paul Sabatier, 1922, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « Annales de la faculté des sciences de Toulouse » (<http://picard.ups-tlse.fr/~annales/>) 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/>

RECHERCHES EXPÉRIMENTALES

SUR

L'HYSTÉRÉSIS DIÉLECTRIQUE

Par M. MARCEL MOULINE,

Agrégé de Physique,
Docteur ès Sciences, Professeur au Lycée de Mont-de-Marsan.

INTRODUCTION ET HISTORIQUE

Les pertes d'énergie qui se produisent dans la polarisation des diélectriques, ont été observées pour la première fois en 1861 par Siemens (1), qui constata que le verre d'une bouteille de Leyde s'échauffe quand on la charge. Mais leur étude systématique ne fut commencée qu'en 1882 par Naccari et Bellati (2), qui se servirent d'un condensateur à pétrole, dont les armatures étaient reliées aux extrémités du circuit secondaire d'une bobine d'induction. La chaleur dégagée, notablement plus grande dans ce champ alternatif, était déterminée par la mesure de la dilatation du liquide.

Depuis cette époque, de nombreux expérimentateurs ont étudié cette absorption d'énergie dans des diélectriques de natures très diverses, toujours soumis à des champs électriques de direction invariable et d'intensité périodique. Nous analyserons quelques-uns de leurs travaux.

Enfin, Guye et Denso (55, 1905) ont reconnu que le même phénomène se produit encore dans un champ électrique tournant.

Les diélectriques possédant généralement une certaine conductibilité électrique et la chaleur dégagée paraissant proportionnelle au carré de la valeur maxima de la différence de niveau potentiel qui crée le champ, Benischke (49, 1895), Hess (22, 1895) et quelques autres, ont cru pouvoir l'attribuer principalement à l'Effet Joule, conséquence du courant qui traverse le diélectrique. Mais cette explication n'est pas

bonne, car cette chaleur devrait être indépendante de la fréquence du champ et l'expérience a toujours montré le contraire; en particulier, pour la même intensité efficace, elle est beaucoup plus grande dans un champ alternatif que dans un champ constant : ainsi, Moscicki et Altenberg (53, 1904) ont trouvé pour le verre, que le rapport des quantités de chaleur produites dans ces deux champs est 2 pour cent.

D'ailleurs, si toute cette chaleur était de la chaleur de Joule, il serait possible d'en déduire la valeur de la résistance ohmique du diélectrique. Corbino (54, 1905) a obtenu de cette manière 1400 ohms pour un condensateur à papier paraffiné chargé par un courant alternatif; résultat inacceptable à cause de son extrême petitesse relative : un condensateur aussi peu résistant ne conserverait aucune charge, même pendant un temps très court. S'il est incontestable qu'il existe ordinairement de la chaleur de Joule, elle ne forme qu'une infime portion de la chaleur totale.

En 1892, Steinmetz (9) et Kleiner (8) avaient proposé à peu près simultanément, d'admettre dans la polarisation diélectrique, une hystérésis analogue à l'hystérésis magnétique, ou à l'hystérésis observée dans l'étude des déformations mécaniques permanentes des solides.

Cette hypothèse bien meilleure, a paru d'abord légitimée par les expériences de Janet (16, 1893). Dans un condensateur à diélectrique autre que l'air, soumis à un champ périodique dont la fréquence est de l'ordre de 1000, il a constaté que les charges sont représentées en fonction de la différence de n . potentiel imposée, par une courbe fermée entourant l'origine des coordonnées; à une valeur déterminée du champ correspondent en général, deux valeurs différentes de la charge, la plus grande étant réalisée quand le champ décroît; cette courbe présente une certaine ressemblance avec les courbes d'aimantation du fer.

L'hystérésis rend parfaitement compte des curieux phénomènes d'entraînement des diélectriques par un champ électrique tournant, qui ont fait l'objet des recherches d'Arno (6, 1892; 18, 1894; 24, 1896), de Threlfall (28, 1897), etc.; elle explique de même, l'amortissement des oscillations d'un diélectrique dans un champ invariable, étudié par Schaufelberger (27, 1897; 30, 1898; 33, 1899) et par Drago et Arcidiacono (71, 1921).

Comme dans la plupart des diélectriques la grandeur de la polarisation dépend considérablement de la durée de la période du champ, quelques physiciens, particulièrement Eisler (21, 1895), Porter et Morris (23, 1895), Beaulard (34, 1900; 39, 1901)..., ont pensé que ces phénomènes, inexplicables dans la théorie précédente, ont plutôt pour cause une sorte de viscosité électrique des milieux polarisables. Dans cette conception, l'effet d'un champ constant se produit lentement et peut mettre un temps énorme pour arriver à sa valeur définitive. Dans le cas d'actions périodiques, si la période est trop courte, la polarisation peut même n'avoir pas le

temps de se produire; pour une très longue période, elle prend à chaque instant, une valeur pratiquement égale à sa grandeur limite : la courbe des charges en fonction des champs, se réduit à une branche unique, qui passe par l'origine des coordonnées. Pour les durées extrêmes, zéro ou l'infini, de la période, l'énergie dépensée pendant un cycle, qui est proportionnelle à l'aire embrassée par cette courbe, devient nulle.

Voici les principales expériences qui les ont conduits à rejeter l'hypothèse de l'hystérésis, pour adopter celle de la viscosité :

Curie (4, 1889) a constaté que pour des variations très lentes du champ, l'intensité du courant de charge d'un condensateur est à chaque instant, rigoureusement proportionnelle à la force électromotrice imposée (L'effet accompagnant la cause, pas d'hystérésis).

Eisler (*loc. cit.*), dans un condensateur à papier paraffiné, trouva que l'énergie dissipée par cycle, tend vers zéro, pour une période très longue, ou extrêmement courte (Pas d'hystérésis, mais seulement viscosité diélectrique).

Porter et Morris (*loc. cit.*) ont mesuré au galvanomètre balistique, la charge prise par un condensateur également à papier paraffiné, sous l'influence d'un même champ établi de deux manières différentes, à partir de zéro et par variations extrêmement lentes : dans la première, il augmente régulièrement jusqu'à la valeur désirée; dans la seconde, il y arrive en décroissant. Les deux mesures ont donné le même résultat : la grandeur de la charge du condensateur est parfaitement déterminée par la valeur actuelle du champ, elle est indépendante du sens de ses variations. (Pas d'hystérésis, les phénomènes observés par d'autres sont dus certainement à la viscosité diélectrique, dont l'effet a été supprimé ici, par la très grande lenteur de la charge).

Pellat (31, 1899) dans l'hypothèse de la viscosité, a établi la théorie de la polarisation d'un diélectrique par un champ constant. Pellat et Beaulard (36, 1900) ont étendu cette théorie au cas d'un champ sinusoïdal. Enfin, Schweidler (60, 1907) a rémanié et complété cette théorie. Ashton (68, 1913) a comparé les conclusions de Schweidler avec les résultats numériques obtenus par divers expérimentateurs.

Quoi qu'il en soit, il est impossible de conserver cette théorie de la viscosité, car elle conduit à des exponentielles pour exprimer en fonction du temps, la polarisation d'un diélectrique par un champ invariable, ce qui est en contradiction formelle avec l'expérience, qui suggère dans ce cas, une loi logarithmique. De plus, elle ne peut expliquer les interversions des signes des charges de dépolarisation, qui apparaissent dans un condensateur, préalablement assujéti à des champs constants successifs et de signes contraires, appliqués dans des conditions convenables (Bouasse, 70, A), vol. III, ch. VII).

Vraisemblablement, une bonne théorie doit reposer sur les deux hypothèses réunies de l'hystérésis et de la viscosité diélectriques. D'ailleurs, hystérésis et viscosité vont presque toujours ensemble : les phénomènes à hystérésis étant généralement sous la dépendance de la durée des périodes des causes. On sait que la forme des courbes d'hystérésis mécanique varie beaucoup avec le temps employé à décrire les cycles et avec la loi de leur parcours; et si pour des champs suffisamment intenses, les courbes d'aimantation du fer sont peu déformées par les changements de la durée des cycles d'aimantation, il n'en est plus de même dans les champs faibles (traînage magnétique).

Il est facile de déterminer expérimentalement la part qui revient à l'hystérésis seule : en utilisant des actions périodiques de très longue période, la viscosité n'intervient plus que d'une manière insensible et les phénomènes observés peuvent être uniquement attribués à l'hystérésis.

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

Les méthodes employées peuvent être ramenées à trois types principaux :

- 1° Étude des dégagements de chaleur;
- 2° Mesure des actions mécaniques exercées sur les diélectriques, quand il y a rotation relative du diélectrique et du champ;
- 3° Construction des courbes cycliques.

1° **Étude des dégagements de chaleur.** — On peut citer les travaux de Siemens (1, 1864), Naccari et Bellati (2, 1882), Borgmann (3, 1888), Kleiner (8, 1892), Steinmetz (9, 1892), Fritz (14, 1893), Benischke (19, 1895), Düggelin (20, 1895), Houllevigue (26, 1897), Moscicki et Altenberg (53, 1904), Guye et Denso (55, 1905).

On mesure la chaleur produite dans le diélectrique soumis à un champ alternatif : la source électrique étant le circuit secondaire d'une bobine d'induction, une machine électrostatique munie d'un micromètre à étincelles, ou un alternateur. Cette chaleur est ordinairement déduite de l'élévation de la température du condensateur, ce changement de température étant évalué par une mesure de dilatation (Naccari et Bellati), par l'emploi d'un thermomètre différentiel (Borgmann), par l'accroissement de la résistance électrique d'un fil fin et long de platine entièrement immergé dans le diélectrique (Benischke), ou encore au moyen de couples thermoélectriques (Kleiner, Düggelin, Houllevigue, etc). La méthode calorimétrique, qui paraît être la meilleure, a été employée par Fritz pour étudier l'échauffement du verre : son condensateur était l'éprouvette d'un calorimètre Bunsen, platinée au dedans et au dehors; et par Rosa et Schmid (32, 1899), dans leurs essais sur le rendement des condensateurs industriels.

Il a été reconnu que la chaleur qui prend naissance dans différents diélectriques placés dans les mêmes conditions expérimentales, dépend essentiellement de leur nature : ainsi, l'échauffement est notable pour le verre, le caoutchouc, la gutta-percha, l'ébonite, la cire à cacheter, le quartz perpendiculaire à l'axe... ; il est beaucoup plus faible dans la colophane, la paraffine, le quartz parallèle à l'axe et pour un certain nombre de liquides organiques, tels que l'huile de vaseline, le benzène et le toluène.

La plupart des expérimentateurs ont trouvé que les quantités de chaleur dégagées par unité de temps, sont proportionnelles au carré de la valeur maxima de la différence de n . potentiel appliquée au condensateur (Naccari et Bellati, Borgmann, Steinmetz, Benischke, Houllévigie, etc.).

Guye et Denso (*loc. cit.*) ont étudié l'échauffement de la paraffine dans un champ circulaire tournant. Leur appareil comprend quatre armatures métalliques, parallèles deux à deux, noyées dans un bloc de paraffine, et formant un système de deux condensateurs disposés à angle droit. Pour obtenir le champ, on compose deux champs rectilignes sinusoïdaux perpendiculaires, de même amplitude et de même fréquence, présentant une différence de phase d'un quart de période, et respectivement établis entre chacun des groupes d'armatures. L'élévation de la température du diélectrique est déterminée à l'aide de couples fer-constantan, dont l'une des soudures est dans un second condensateur identique au premier, mais non chargé. On peut intervertir l'appareil en expérience. Voici les résultats :

1° Pour une même fréquence, la puissance dissipée sous forme de chaleur, est proportionnelle au carré de la tension électrique maxima.

2° A tension maxima constante, cette puissance est proportionnelle à la fréquence (cette dernière étant comprise entre 400 et 1200).

La tension maxima et la fréquence étant invariables, il se dégage plus de chaleur dans le champ tournant que dans un champ alternatif en repos (ce qui est évident) : le rapport de ces quantités de chaleur vaut environ 2,56 ; ce nombre est plutôt l'ordre de grandeur de ce rapport que sa valeur véritable.

2° Mesure des actions mécaniques exercées sur un diélectrique entouré d'air et soumis à un champ d'intensité constante, lorsqu'il y a rotation relative du diélectrique et du champ.

a) *Champ tournant.* [Recherches d'Arno (6, 1892 ; 10, 1893 ; 18, 1894 ; 24, 1896), de Borel (13, 1893), de Threlfall (28, 1897), de Lampa (56, 1905), etc.]

On réalise le champ tournant en composant deux champs rectangulaires, comme il a été dit plus haut ; ou bien en faisant tourner d'un mouvement uniforme, l'ensem-

ble de deux plateaux conducteurs parallèles, entre lesquels on maintient une différence constante de n . potentiel. On varie l'expérience en changeant l'intensité du champ ou sa période. Le diélectrique a la forme d'un solide de révolution, cylindre ou sphère, dont l'axe géométrique coïncide avec l'axe de rotation du champ; il est suspendu par un fil de torsion appliqué le long de l'axe.

Le diélectrique tend à être entraîné par le mouvement du champ. Le travail pour un tour du couple qui le sollicite, égale l'énergie dépensée pendant une période dans l'unité de volume du diélectrique. On mesure la déviation d'équilibre, pour laquelle le couple de torsion du fil, qui est proportionnel à cette déviation, est égal au couple de rotation. L'expérience a donné pour l'expression de ce couple :

$$C = AP^n$$

A , est une constante dépendant uniquement de la nature du diélectrique;

P , est l'intensité constante du champ;

n , un exposant variable avec la grandeur de l'induction : sa valeur est comprise entre 1,50 et 1,96, mais toujours inférieure à 2,00 (Arno); il est compris entre 1,00 et 2,00 (Threlfall). Récemment Lertes (72, 1921), à la suite d'expériences sur divers liquides diélectriques contenus dans une enveloppe sphérique de verre, a obtenu $n = 2,00$.

Arno a observé encore que ce couple augmente avec la vitesse de rotation du champ, ce qui l'a conduit à admettre l'hypothèse d'une hystérésis visqueuse. Lertes a reconnu qu'il présente un maximum pour une certaine fréquence.

b) *Oscillations d'un diélectrique dans un champ invariable.* [Schaufelberger (27, 1897; 30, 1898; 33, 1899), Drago et Arcidiacono (71, 1921.).]

Dans les expériences de Schaufelberger, le diélectrique (ébonite ou paraffine) qui a la forme d'un ellipsoïde de révolution allongé suivant son axe, est suspendu à un fil de torsion disposé dans le prolongement de cet axe. Il est assujéti à un champ constant en grandeur et en direction, agissant dans le plan horizontal.

On impose au diélectrique des oscillations de torsion. En présence du champ, l'amortissement de ces oscillations est augmenté par l'hystérésis. On étudie cet amortissement dans le champ et après avoir supprimé le champ. Des décrets logarithmiques correspondant à ces différentes conditions expérimentales, l'auteur déduit la perte d'énergie due à l'hystérésis pendant une période. Elle est proportionnelle au carré du champ.

Drago et Arcidiacono arrivent à la même conclusion.

3° **Construction des courbes cycliques.** — On sait que leur aire est proportionnelle à l'énergie absorbée. Plus exactement, en représentant par 1 centimètre d'abscisse

1 unité C. G. S. de champ polarisant et par 1 centimètre d'ordonnée 1 unité C. G. S. d'intensité de polarisation, cette aire évaluée en centimètres carrés, égale le nombre d'ergs dépensés pendant une période dans un centimètre cube du diélectrique.

Janet (*loc. cit.*) paraît les avoir obtenues le premier. Peu de temps après, Bedell, Ballantyne et Williamson (41, 1893) les ont utilisées pour déterminer l'énergie dissipée dans un condensateur, chargé par un courant alternatif de fréquence 140. Plus récemment, Thornton (66, 1912) a tracé les courbes d'hystérésis d'un certain nombre d'isolants industriels, se proposant d'en déduire la nature de la polarisation qui y donne naissance à l'absorption d'énergie. Il a employé la méthode des expérimentateurs précédents. A l'aide d'un oscillographe, il obtient les courbes de force électromotrice et d'intensité du courant alternatif (fréquence 36) avec lequel il charge son condensateur, monté avec le diélectrique à étudier. Il en tire les éléments nécessaires à la détermination de la courbe cyclique. Suivant la nature de ce diélectrique, certaines des courbes obtenues ont leurs branches rectilignes et parallèles, avec l'apparence de longs parallélogrammes (verre, gutta-percha); d'autres sont lenticulaires (presspahn); entre ces deux types extrêmes, on trouve des formes intermédiaires (ébonite). L'auteur estime que pour les premières, il y a hystérésis véritable; dans le cas des secondes, viscosité pure; enfin, que les deux causes réunies interviennent pour les autres.

Pour étudier les pertes d'énergie, Beaulard (34, 1900; 39, 1901) et Mercanton (47, 1902) ont employé des courbes d'hystérésis décrites avec des périodes notablement plus longues.

Voici la technique de Beaulard :

Son condensateur (à diélectrique) est chargé par communication d'une armature avec un contact glissant le long d'un conducteur cylindrique et homogène (solution concentrée de sulfate de cuivre), parcouru par un courant constant. L'autre armature et le milieu de la colonne électrolytique sont au sol. Ce contact passant d'une extrémité à l'autre de la résistance liquide, la différence de n . potentiel appliquée au condensateur, varie linéairement de $-V$ à $+V$ volts. On modifie l'amplitude V en changeant le nombre des accumulateurs qui fournissent le courant.

Pour construire une courbe cyclique, Beaulard mesure au galvanomètre balistique, la charge du condensateur pour les différences de n . potentiel

$$-V, -V/2, 0, +V/2, +V.$$

Excepté pour les valeurs extrêmes, la charge est susceptible de deux déterminations différentes, selon qu'en traversant la valeur choisie le champ augmente ou diminue. Chaque courbe est ainsi déterminée par huit opérations. L'observateur se guidant sur les battements d'un métronome, déplace à la main le curseur, d'un mouvement qu'il s'efforce de maintenir uniforme : partant du milieu de la cuve, il commence

toujours par lui faire parcourir la région positive des n . potentiels; arrivé à son extrémité, il le ramène en arrière jusqu'à l'extrémité de la région négative; alors changeant pour la seconde fois le sens du mouvement, il revient au point de départ, où il l'arrête. Ce cycle entier n'est décrit qu'une seule fois : pour la détermination du huitième et dernier point. Dans tous les autres cas, le curseur est arrêté dès qu'il atteint le n . potentiel fixé pour la mesure, avec un sens convenable des variations du champ.

Les recherches ont porté sur la paraffine, le mica et la diélectrine.

Les amplitudes ont été successivement 8, 18 et 23 volts.

Les périodes ont varié entre 4 secondes et 600 secondes.

La courbe cyclique de la paraffine se réduit à une droite passant par l'origine des coordonnées. L'auteur estime que ce résultat provient plutôt du manque d'intensité du phénomène que de son absence.

Le mica a donné une courbe formée de deux branches distinctes, mais très voisines, renfermant une aire très petite.

Seule, la diélectrine fournit des courbes bien ouvertes. L'énergie absorbée pendant un cycle par cette matière, est maxima pour une certaine durée de la période. Aucune loi exprimant cette énergie en fonction du champ maximum, n'a pu être vérifiée; cependant, parmi les nombres de Beaulard, Mercanton en signale plusieurs qui sont proportionnels au carré de ce champ.

Mercanton (42, 1901; 47, 1902) se sert d'un dispositif analogue à celui de Beaulard, mais amélioré. La résistance électrolytique (solution d'acide sulfurique) possède une forme annulaire, les électrodes sont aux extrémités d'un diamètre; un fil de platine plongeant dans le liquide relie au sol le milieu de chaque moitié. Le contact entraîné par un moteur, est animé d'un mouvement circulaire uniforme. Au moment voulu, le moteur sépare automatiquement le condensateur de la source électrique et le décharge dans le galvanomètre balistique.

Le condensateur est formé d'une lame diélectrique, obtenue généralement par fusion et coulage sur une plaque de fonte et recouverte de feuilles d'étain, fixées par un peu de vaseline, reconnue sans influence sur les déterminations.

La paraffine (t. de fusion 52° C.) et le mica ne donnent aucun retard; les phénomènes deviennent très apparents pour le verre à vitres; la glace d'étang a donné les plus forts résultats. Ceux-ci sont notablement modifiés par les changements de la température.

L'auteur a étudié des mélanges de cette paraffine avec d'autres isolants et avec diverses poudres conductrices. Il n'a rien obtenu, excepté pour les mélanges avec du noir de fumée brut (jusqu'à 9,4 pour cent), qui ont fourni des courbes embrassant des aires mesurables. C'est sur le mélange à 9,4 pour cent de noir de fumée brut qu'ont été déterminées les pertes d'énergie.

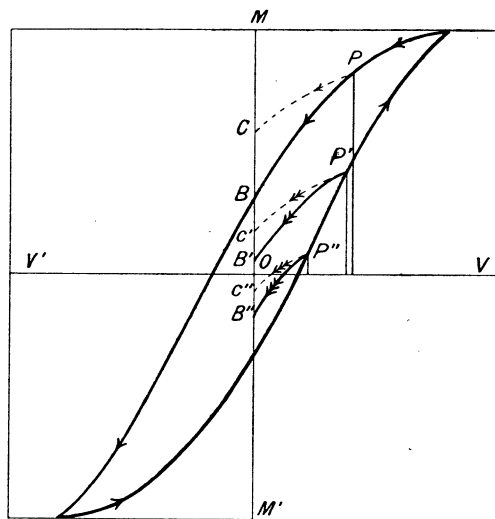
Les périodes allant de un quart de seconde à 50 secondes et les valeurs maxima

du n . potentiel de champ étant respectivement 19,0, 36,0 et 73,8 volts, il trouve un maximum d'énergie pour une période un peu inférieure à 3 secondes.

Il ne peut établir expérimentalement aucune relation entre l'énergie et l'amplitude du champ. (Deux séries d'expériences avec des périodes respectives de 1 seconde et de 20 secondes, les amplitudes des n . potentiels de champ étant successivement 16,7, 34,0 et 73,0 volts pour la première; 34,5 et 69,0 volts pour la seconde).

Saegusa (73, 1921) a déterminé les courbes d'hystérésis de quelques cristaux : calcite, quartz et mica. Il a observé que leur forme, variable avec la nature du diélectrique, dépend de la grandeur du champ maximum, de la durée des cycles de polarisation et de l'orientation du champ par rapport à l'axe cristallographique principal. La température, accélérant la production des phénomènes, paraît diminuer la viscosité diélectrique; son action est surtout sensible dans les champs intenses.

Pour terminer, nous signalerons quelques recherches sur les pertes d'énergie qui ont été faites à l'aide de méthodes spéciales : Hanauer (29, 1898) et Monasch (59, 1907) ont mesuré au Pont de Wheatstone, la capacité actuelle de leur condensateur; Mather (43, 1901), dans un circuit parcouru par un courant alternatif, compense cette capacité par une self-induction sans fer, convenablement choisie.



*Décharge instantanée d'un condensateur
à diélectrique doué d'hystérésis*

Fig. 1

La petitesse des effets à mesurer rend difficiles et incertaines la plupart des déterminations expérimentales dont nous avons parlé dans cet exposé : elle entraîne des erreurs relatives considérables. Souvent, dans les condensateurs d'étude, les dimen-

sions du diélectrique dépassent celles des armatures : le champ polarisant n'est pas uniforme dans tout l'espace occupé par le diélectrique. La mesure des chaleurs de polarisation par des méthodes thermométriques paraît peu précise à cause du refroidissement du condensateur et surtout parce que la température du diélectrique est loin d'être uniforme, comme l'ont constaté plusieurs expérimentateurs et en particulier Duggelin (*loc. cit.*).

L'emploi d'un galvanomètre balistique dans la mesure de la charge d'un condensateur, n'est légitime que pour un condensateur à air, ou à diélectrique parfait, dans lequel la polarisation est instantanée et *déterminée uniquement par la valeur actuelle de l'intensité du champ polarisant*. Il conduit nécessairement à des erreurs dans le cas des diélectriques à hystérésis, où la polarisation persiste partiellement quand on annule ce champ. C'est ce que montre la figure 1, dans laquelle l'ordonnée de P représente la charge due à la polarisation actuelle du diélectrique. En déchargeant le condensateur dans le galvanomètre balistique, on ramène brusquement le champ à zéro; s'il y a seulement hystérésis, le point figuratif décrit l'arc PB de la courbe cyclique; s'il y a aussi viscosité, la dépolarisation partielle n'étant plus instantanée se fait incomplètement et ce point décrit la courbe pointillée PC, située au-dessus. Le galvanomètre permet seulement de déterminer la portion de la charge qui disparaît pendant la mesure et qui correspond à la différence des ordonnées des points extrêmes de la courbe décrite pendant la décharge.

Objet de ces recherches.

Elles ont été entreprises pour déterminer les courbes d'hystérésis de certains diélectriques soumis à des champs électriques sinusoïdaux de période longue, au moyen d'une méthode donnant la charge entière de polarisation et en opérant toujours sur des cycles fixés. Elles ont été poursuivies pendant plusieurs années, dans un laboratoire installé dans la maison que j'habite à Mont-de-Marsan.

M. Bouasse, professeur à la Faculté des Sciences de Toulouse, dont on connaît les travaux remarquables sur les déformations permanentes des solides et la haute compétence dans les questions d'hystérésis, a bien voulu diriger ce travail, qu'il m'avait proposé. J'ai toujours rencontré en lui un guide bienveillant et sûr, dont les conseils m'ont été précieux. Je le prie d'accepter l'expression de ma respectueuse reconnaissance.

Ma femme a été pour moi une collaboratrice intelligente et dévouée; elle m'a aidé dans le montage et l'entretien des appareils, les surveillant en mon absence; enfin, elle m'a assisté dans certaines expériences qu'il m'eût été difficile de faire seul. Grâce à son concours, la durée de ces recherches a pu être beaucoup diminuée.

BIBLIOGRAPHIE

(Ordre chronologique annuel et alphabétique.)

1. W. SIEMENS. *Monatsber. berlin. Akad.*, oct., 1861; *Pogg. Ann.*, CXXV, p. 137, 1864.
2. A. NACCARI et F. BELLATI. *Atti di Torino*, XVII, 1882; *Journal de Phys.*, (2), I, p. 430, 1882.
3. J. BORGMANN. *Journal de la Soc. russe phys. chim.*, XVIII, p. 6, 1886; *Journal de Phys.*, (2), VIII, p. 217, 1888.
4. J. CURIE. *Ann. de Chim. et de Phys.*, (6), XVIII, p. 203, 1889.
5. E. BOUTY. *Journal de Phys.*, (2), IX, 1890.
6. R. ARNO. *Rendic. Accad. dei Lincèi*, I, p. 284, 1892.
7. E. BOUTY. *Journal de Phys.*, (3), I, 1892.
8. A. KLEINER. *Ueber die durch elektrische Polarisisation in Isolatoren erzeugte Wärme (Vierteljahrsschr. d. natf. Gesellschaft, Zurich, XXXVII, 1892).*
9. C. P. STEINMETZ. *Elektrotechn. Zeitschr.*, XIII, p. 227, 1892; *Electrician*, XXVIII, pp. 384, 408, 425, 602, 1892; *Lumière électr.*, XLIV, p. 95, 1892.
10. R. ARNO. *Nuov. Cim.*, (3), XXXIII, p. 15, 1893; *Rendic. Accad. dei Lincèi*, (5), II, I, p. 341, 1893; *id.*, (5), II, II, p. 260, 1893.
11. F. BEDELL, N. F. BALLANTYNE et R. B. WILLIAMSON. *Alternate Current and dielectric Hysteresis (Phys. Rev., sept., 1893).*
12. G. BENISCHKE. *Wiener Sitzungsber.*, CII, p. 1345, 1893.
13. C. BOREL. *Arch. de Genève*, (3), XXX, p. 45, 1893.
14. H. FRITZ. *Ueber Wärmelönung bei electrischer Polarisisation des Glases. (Diss., Zurich, 1893).*
15. A. HESS. *Lumière électr.*, XLVII, p. 466, 1893; *Journal de Phys.*, (3), II, p. 145, 1893.
16. P. JANET. *Journal de Phys.*, (3), II, p. 337, 1893.
17. W. WEILER. *Zeitschr. f. Phys. und Chem.*, VII, p. 1, 1893.
18. R. ARNO. *Rendic. Accad. dei Lincèi*, (5), III, I, p. 585, 1894; *id.*, (5), III, II, p. 294, 1894.

19. G. BENISCHKE. *Zeitschr. f. Elektrotechn.*, Heft 16, 1895.
20. H. DUEGGELIN. *Vierteljahrsschr. d. natf. Gesellschaft*, Zurich, XL, p. 121, 1895.
21. H. EISLER. *Zeitschr. f. Elektrotechn.*, Heft 16, 1895.
22. A. HESS. *Éclair. électr.*, IV, p. 205, 1895; *Journal de Phys.*, (3), II, 1895.
23. W. PORTER et D. MORRIS. *Proc. Roy. Soc.*, LVII, p. 469, 1895.
24. R. ARNO. *Rendic. Accad. dei Lincèi*, (5), V, I, p. 262, 1896; *Nuov. Cim.*, (4), V, p. 52, 1896.
25. F. WEBER. *Arch. de Genève*, (4), II, p. 519, 1896.
26. L. HOULLEVIGUE. *Journal de Phys.*, (3), VI, p. 120, 1897.
27. W. SCHAUFELBERGER. *Ueber Hysteresis in dielektrischen Medien*. (Diss., Zurich, 1897).
28. R. THRELFALL. *Phys. Rev.*, juillet 1897.
29. J. HANAUER. *Wied. Ann.*, LXV, p. 577, 1898.
30. W. SCHAUFELBERGER. *Wied. Ann.*, LXV, p. 635, 1898.
31. H. PELLAT. *C. R. Acad. Sc.*, Paris, CXXVIII, p. 1312, 1899.
32. E. ROSA et W. SCHMID. *Phys. Rev.*, VIII, 1899; *Phil. Mag.*, (4), XLVII, p. 222, 1899.
33. W. SCHAUFELBERGER. *Wied. Ann.*, LXVII, p. 307, 1899.
34. F. BEAULARD. *C. R. Ac. Sc.*, Paris, CXXX, p. 1182, 1900; *Journal de Phys.*, (3), IX, p. 422, 1900.
35. G. BENISCHKE. *Éclair. électr.*, nov. 1900.
36. H. PELLAT et F. BEAULARD. *C. R. Ac. Sc.*, Paris, CXXX, p. 1457, 1900; *Journal de Phys.*, (3), IX, p. 313, 1900.
37. W. ASHTON. *Phil. Mag.*, (6), II, p. 501, 1901.
38. E. AYRTON. *Electrician*, XLVI, p. 476, 1901.
39. F. BEAULARD. *Sur l'hystérisis diélectrique* (*Ann. Univ. de Grenoble*, p. 191, 1901).
40. E. HOSPITALIER. *Sur les pertes d'énergie dans les diélectriques* (*Industrie électr.*, p. 317, 1901).
41. F. MACCARRONE. *Nuov. Cim.*, (5), II, p. 88, 1901.
42. P. MERCANTON. *Bull. Soc. Vaud.*, oct., 1901.
43. MATHER. *Revue de l'Électr.*, n° 4, 1901.
44. C. P. STEINMETZ. *Electr. World*, XXXVII, p. 1065, 1901; *Éclair. électr.*, XXIX, p. 27, 1901; *Electrician*, XLVII, p. 412, 1901.
45. P. DUHEM. *Actions exercées par des courants alternatifs sur une masse conductrice ou diélectrique* (Congrès de Montauban de l'Assoc. Franç. pour l'avanc. des Sc., 1902); *Sur l'électrostatique de Maxwell et la polarisation diélectrique* (*Mém. Soc. Sc. Phys. et Nat.*, Bordeaux, (6), II, p. 45, 1902).
46. F. MACCARRONE. *Conducibilità e ritardo di polarizzazione dielettrica* (*Nuov. Cim.*, (5), IV, p. 313, 1902).
47. P. MERCANTON. *Journal de Phys.*, (4), I, p. 33, 1902; *Contribution à l'étude des pertes d'énergie dans les diélectriques* (Diss., Lausanne, 1902).

48. CL. PASINI. *L'isteresi dielettrica* (Nizza, Monferrato, 1902).
49. J. SANFORD SHEARER. *Some experiments on the behavior of dielectrics when subjected to high potentials* (Phys. Rev., Ithaca, XIV, p. 89, 1902).
50. E. VON SCHWEIDLER. *Einige Fälle der Energieumwandlung bei der Ladung von Condensatoren* (Wiener Sitzungsber., Akad. Wiss., CXI, p. 573, 1902).
51. R. APT et C. MAURITIUS. *Energieverluste im Dielektrikum* (Elektrotechn. Zeitschr., p. 879, 1903).
52. F. BEAULARD. Congrès d'Angers de l'Assoc. Franç. pour l'avanc. des Sc., 1903.
53. J. MOSCICKI et M. ALTENBERG. *Sur les pertes diélectriques dans les condensateurs soumis à l'action de courants alternatifs* (Krakow. Rozpr. Akad., A, XLIV, p. 54, 1904).
54. O. M. CORBINO. *Ueber die dielektrische Viskosität der Dielektrika* (Phys. Zeitschr., Leipzig, VI, p. 138, 1905); *Sulla viscosità dielettrica dei condensatori* (Nuov. Cim., (5), IX, p. 81, 1905).
55. Ch. GUYE et P. DENSO. *Sur la chaleur dégagée dans la paraffine soumise à l'action d'un champ électrostatique tournant de fréquence élevée* (C. R. Ac. Sc., Paris, CXL, p. 433, 1905); *Éclair. électr.*, XLIV, pp. 361 et 401, 1905.
56. A. LAMPA. *Rotation im elektrostatischen Drehfelde. Dielektrische Hysteresis* (Wien. Sitzungsber. Ak. Wiss., CXV, p. 1659; 1905).
57. F. A. SCHULZE. *Änderung der Dielektrizitätskonstante durch mechanische Deformationen und Temperaturänderungen* (Marburg. Sitzungsber. Gesellsch. Nat. Wiss., p. 75, 1906).
58. M. HOOR. *Nachwirkungserscheinungen in dielektrischen Körpern* (Math. Natw. Ungarn, XXI, p. 25, 1907).
59. B. MONASCH. *Ueber den Energieverluste im Dielektrikum in wechselnden elektrischen Feldern* (Leipzig, Ann. der Phys. und Chem., (4), XXII, p. 905, 1907).
60. E. VON SCHWEIDLER. *Studien über die Anomalien im Verhalten der Dielektrika* (Leipzig, Ann. der Phys. und Chem., (4), XXIV, p. 711, 1907).
61. L. EMANUELI. *Ricèrce sperimentali sulle perdite del dielettrico* (Atti Ass. electro-tecn., Milano, XIII, p. 23, 1909).
62. L. MALCLÈS. *Recherches expérimentales sur les diélectriques* (Thèse, Paris, 1909); *Journal de Phys.*, (4), VIII, p. 631, 1909.
63. W. M. THORNTON. *Measurement of dielectric constants by the oscillations of ellipsoids and cylinders in a field of force* (London, Proc. Roy. Soc., (A), LXXXII, p. 422, 1909).
64. L. DECOMBE. *Sur la chaleur de Siemens* (C. R. Ac. Sc., Paris, CLII, p. 1755, 1911).
65. G. L. ADDENBROOKE. *Properties of dielectrics in alternating fields* (Electrician, LXVIII, p. 829, 1912).
66. W. M. THORNTON. *Dielectric hysteresis at low frequencies* (Proc. Phys. Soc., XXIV, p. 301, 1912).

67. G. L. ADDENBROOKE. *Electrician*, LXX, p. 673, 1913.
 68. W. ASHTON. *Polarisation and energy loss in dielectrics* (*Proc. Phys. Soc.*, XXIV, p. 43, 1913).
 69. L. DECOMBE. *La chaleur de Joule considérée comme chaleur de Siemens* (*Journal de Phys.*, (5), IV, p. 116, 1914).
 70. H. BOUASSE. *Physique*, Delagrave, Paris : A) *Cours de Magnétisme et d'Électricité*, volumes I, II et III; B) *Théorie de l'Élasticité. Résistance des Matériaux*.
 71. E. DRAGO et G. ARCIDIACONO. *Action des ondes électriques sur l'hystérèse diélectrique* (*Nuov. Cim.*, XXII, p. 68, 1921).
 72. P. LERTES. *Recherches sur la rotation des liquides diélectriques dans un champ tournant électrostatique* (*Zeitschr. f. Phys.*, IV, p. 315, 1921).
 73. H. SAEGUSA. *L'hystérésis diélectrique et les phénomènes connexes* (*Sc. Rep. Toh. Imp. Univ.*, X, p. 101, 1921).
 74. E. SCHOTT. *Pertes en haute fréquence dans les verres et dans quelques autres diélectriques* (*Jahrb. f. Drahtl. Teleg.*, XVIII, p. 82, 1921).
 75. W. STEINHAUS. *Pertes dans les diélectriques tels que la cire, etc...* (*Jahrb. f. Drahtl. Teleg.*, XVIII, p. 29, 1921).
 76. A. JAQUEROD et H. MUGELI. *Recherches sur les anomalies diélectriques du verre de silice* (*Arch. Sc. Phys. Nat.*, IV, p. 69, 1922).
 77. W. HITTORF. *Ueber die Wanderungen der Ionen während der Elektrolyse* (*Pogg. Ann.*, LXXXIX, p. 177, 1853; *id.*, LXXXVIII, p. 1, 1856; *id.*, CIII, p. 1, 1858; *id.*, CVI, pp. 337 et 513, 1859).
 78. W. KNOTHE. *Ueber Führungszahl von Schwefelsäure* (*Diss.*, Greifswald, 1910).
-

PREMIÈRE PARTIE

La technique expérimentale.

CHAPITRE PREMIER

La méthode et le plan de ces recherches.

Le champ de polarisation est sinusoïdal; sa période va de 1 minute à 60 minutes. On le produit entre les plateaux parallèles d'un condensateur plan, dont l'un est relié à la source électrique et l'autre au sol. L'amplitude des n . potentiels appliqués à l'armature isolée varie de 5 volts à 30 volts.

Le diélectrique, qui a la forme d'une lame plan parallèle, est placé à l'intérieur du condensateur, *dans la région où le champ est uniforme*, ses faces étant disposées parallèlement à celles des plateaux *qu'il ne touche jamais*. Par suite de la polarisation, des charges apparentes se développent sur elles; le champ étant normal à la surface du diélectrique, *leur densité uniforme, prise avec un signe convenable, est égale à l'intensité de polarisation*. Elles induisent sur les armatures en regard, des quantités d'électricité de même grandeur et de signes contraires, se superposant aux masses électriques réelles (de mêmes signes que les charges induites) qui résultent de l'action du champ sur le condensateur, indépendamment de la présence du diélectrique.

Pour avoir la valeur actuelle de la charge totale, on commence par séparer le condensateur de la source électrique; puis faisant glisser le diélectrique dans le plan d'une de ses faces, on l'enlève hors du champ. Il reste alors à mesurer la charge du condensateur à air ainsi obtenu. La quantité d'électricité due à la polarisation, est la différence entre cette charge et celle que prend le condensateur *sans diélectrique*, quand on impose le même champ; on aura cette dernière par une seconde opération. Le quotient de la charge de polarisation par la grandeur de la surface de l'une des faces de l'isolant, est la valeur de l'intensité de polarisation.

Voici le plan de ces recherches :

Il est indispensable d'opérer sur des cycles de polarisation fixés : il faudra donc en premier lieu, déterminer le nombre des parcours cycliques nécessaires pour obtenir avec certitude de tels cycles, soit en partant d'un diélectrique à l'état naturel; soit encore, avec un diélectrique polarisé, quand on passe d'un certain cycle à un autre d'amplitude ou de période différentes.

Ensuite, faire l'étude systématique de la polarisation dans un *même* diélectrique, sous l'influence d'un champ dont on fait varier *uniquement* la fréquence ou l'amplitude.

Enfin, examiner les phénomènes qui prennent naissance dans quelques autres diélectriques, placés dans des conditions expérimentales identiques.

CHAPITRE II

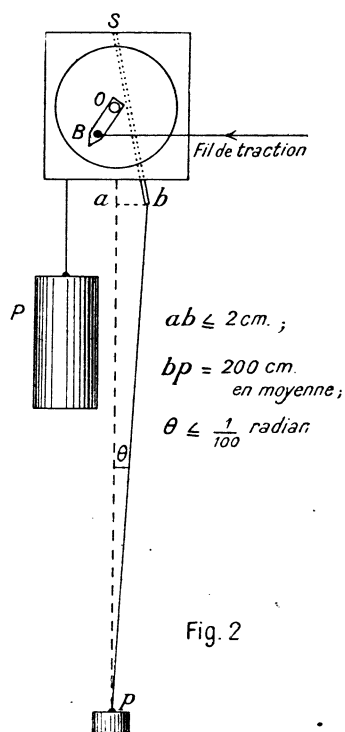
La disposition des appareils.

L'installation expérimentale se compose d'un potentiomètre, du condensateur polarisant et de l'appareil de mesure.

Le potentiomètre. — Sa résistance est un électrolyte (solution aqueuse d'acide sulfurique), dont on peut faire varier la résistivité à volonté et dans une large mesure, en modifiant la concentration, et qui présente l'avantage d'un contact facile et toujours sûr avec son curseur. Cet électrolyte est contenu dans une auge parallépipédique, formée de lames de glace (des miroitiers) assemblées avec de la glu marine; ses dimensions intérieures sont en centimètres : longueur, 40,0; largeur, 1,1; profondeur, 1,4. Sur l'une des faces latérales est collée extérieurement une bande de papier graduée en centimètres, servant à repérer les abscisses le long du conducteur liquide. Les électrodes sont deux lames de platine disposées près des extrémités; un plongeur (fil de platine) relie au sol le milieu de l'électrolyte.

Le contact mobile est un autre fil de platine, soigneusement isolé, communiquant avec le condensateur à charger et fixé à la partie inférieure d'une longue règle de bois, qui peut tourner autour d'un axe horizontal (tranchant de lame de couteau de table, reposant sur deux plaques de glace entaillées d'une rainure) disposé près de l'autre bout et dans une direction perpendiculaire à la longueur de la cuve électrolytique, dont le milieu est sur la verticale de l'axe, à une distance d'environ 225 centimètres. Près de l'axe et perpendiculairement à sa direction, un levier latéral fixé à la règle, porte un contrepoids (*fig. 5*, à droite), qui lui fait prendre une position d'équi-

libre inclinée d'une dizaine de degrés sur la verticale. Cette règle est reliée au bouton de la manivelle d'un moteur, par un long fil métallique de 0,25 millimètres de diamètre, attaché à 56 centimètres au-dessous de l'axe (quart de sa distance à l'électrolyte). La manivelle, en tournant, fait osciller cette sorte de pendule. On règle la longueur du fil (280 centimètres) de manière que les deux amplitudes d'une oscillation soient symétriques par rapport à la verticale. Le cercle décrit par la manivelle ayant 3,5 centimètres de rayon, l'amplitude du mouvement oscillatoire du curseur est de 14 centimètres, à partir du milieu de la cuve, où se trouve le zéro de la graduation. Pour connaître la position du curseur, on a disposé à la partie inférieure du pendule une aiguille indicative, fixée dans le plan déterminé par l'axe et par le fil de platine du contact; cette aiguille se déplace à l'extérieur, devant l'échelle divisée portée par le voltamètre.



Le moteur est une horloge de campagne, dite comtoise, dont les aiguilles ont été enlevées; une lame de zinc, large de 1 centimètre, montée sur l'arbre des minutes, sert de manivelle; le bouton est une épingle d'acier, soudée perpendiculairement à sa surface; cette épingle s'engage dans un anneau auquel est attachée l'extrémité du fil. On peut changer la durée d'un tour en modifiant la longueur du pendule régulateur; mais ce procédé ne permet pas de la rendre inférieure à 20 minutes.

Pour avoir des périodes plus courtes, on remplace la partie inférieure de ce pendule où se trouve la lentille, par un poids convenable p (*fig. 2*) suspendu par un fil à coudre de longueur telle, qu'on puisse constamment le considérer comme vertical et que ce poids demeure à peu près immobile pendant les oscillations; on augmente ainsi la grandeur du couple qui les produit, sans changer sensiblement le moment d'inertie de la partie mobile. Comme conséquence, il faut prendre un poids moteur P plus grand. De cette manière, nous avons pu abaisser la période à 4 minutes. Pour cela il faut choisir pour p , 250 grammes; pour P , 14 kilogrammes (au lieu de 6, quand l'horloge est réglée par son pendule); le fil doit être long de 213 centimètres. Nous avons encore utilisé un mouvement de tournebroche à poids, pour réaliser une période de 1 minute.

Le courant est fourni par une pile Lalande et Chaperon (à l'oxyde de cuivre) pouvant comprendre jusqu'à 110 petits éléments, montés en série et disposés sur une couche isolante de paraffine bien neutre, dans des boîtes couvertes contenant chacune 25 ou 30 éléments. Sa capacité est voisine de 3 ampères-heure.

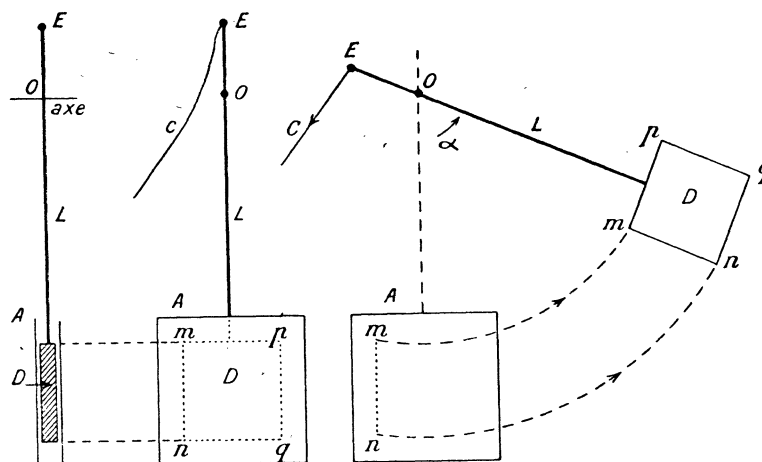


Fig. 3

Le condensateur polarisant. — Il est formé de deux plaques carrées de glace à miroir A (*fig. 3*, à gauche et au milieu), d'environ 25 centimètres de côté, argentées, puis cuivrées (par dépôt électrolytique) sur leur surface entière, placées verticalement à 2 centimètres d'intervalle. L'une d'elles est en communication permanente avec le sol; l'autre, parfaitement isolée par des supports de soufre, est reliée au contact du potentiomètre, par l'intermédiaire d'une clef ACB (*fig. 5*), qui sera décrite plus loin. Le diélectrique D (*fig. 3*), dont on veut étudier la polarisation, a la forme d'une lame à faces parallèles, de dimensions inférieures à celles des pla-

teaux, ce qui permet de le faire *entièrement* contenir dans la région où le champ établi entre eux est *uniforme*; il est fixé à l'extrémité d'un levier de bois, dont l'axe est dirigé normalement à sa surface. Ce diélectrique est disposé symétriquement entre les plateaux du condensateur, qu'il ne doit jamais toucher. Une cordelette *c*, attachée à l'autre extrémité E du levier, peut servir, en le faisant tourner autour de son axe, à enlever le diélectrique hors de l'intervalle des plateaux (*fig. 3*, à droite). Dans son mouvement, le centre de la lame isolante décrit un arc d'à peu près 80 degrés, dans un cercle de 50 centimètres de rayon. Le condensateur est enfermé dans une boîte métallique communiquant avec le sol et présentant seulement les ouvertures nécessaires au passage du diélectrique.

L'appareil de mesure. — Toutes les mesures dont il est question dans ce travail, étant des opérations d'électrométrie, ont été effectuées avec un électromètre Curie, appartenant au laboratoire de physique de la Faculté des Sciences de Toulouse et qui m'a été aimablement prêté par M. Bouasse.

La pile de charge est composée d'un nombre pair d'éléments cuivre, zinc, solution aqueuse de sulfate de magnésium à 5 p. 100, dont la force électromotrice est sensiblement indépendante des variations de la concentration de son électrolyte (Damien, *Ann. de Chim. et de Phys.* (6), VI, p. 289, 1885). Ces éléments sont placés sur de la paraffine chimiquement neutre, à l'intérieur d'une boîte fermée. Le milieu de la pile est au sol; ses deux pôles sont respectivement réunis à chacune des paires de quadrants de l'électromètre.

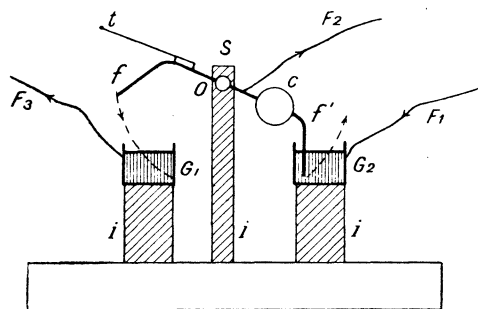


Fig. 4

Il a paru utile d'associer un condensateur à l'électromètre. Ce condensateur est constitué par deux plateaux circulaires de laiton épais, ayant 25 centimètres de diamètre, séparés par trois disques de galalite, d'environ 2 millimètres d'épaisseur et 5 millimètres de diamètre. Pour le soustraire à l'influence de l'humidité, qui en rend la charge tout à fait impossible, il est enfermé dans une boîte de métal notablement plus grande et retournée de manière à reposer sur son couvercle; dans cette

position elle est rendue parfaitement étanche, en garnissant avec de la paraffine fondue l'intervalle circulaire qui la sépare de ce couvercle. Un large tube, mastiqué dans le fond supérieur, fait communiquer son intérieur avec un flacon, dont le bouchon a été aussi paraffiné et qui renferme du sodium. Cette boîte est reliée électriquement au sol. L'une des armatures du condensateur est aussi au sol, l'autre est en communication avec l'aiguille de l'électromètre. L'isolement de l'ensemble est très bon. La capacité totale (déterminée expérimentalement) est 240 C. G. S.

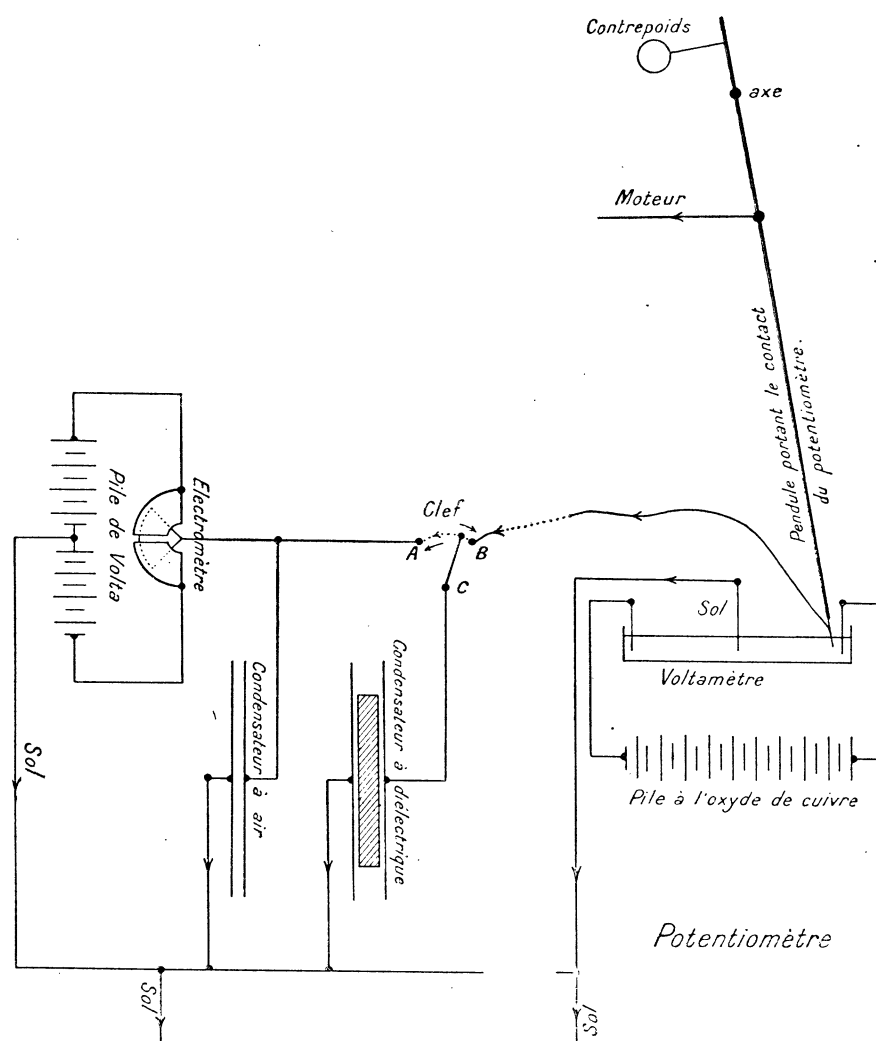


Fig. 5

La clef (*fig. 4*) est un gros fil de cuivre $\mathcal{M}'$, doublement recourbé, pouvant tourner autour d'un axe O, porté par un support SI, parfaitement isolant; un contre-

poids C, oblige ce fil à plonger dans le mercure du godet G_2 . Une touche isolante t permet d'abaisser la clef. Les godets G_1 et G_2 sont aussi très bien isolés par les colonnes I, qui les supportent. Le fil F_1 aboutit au curseur du potentiomètre; F_2 va au condensateur polarisant; F_3 communique avec l'aiguille de l'électromètre. Dans sa position naturelle (position de charge), la clef réunit le condensateur polarisant à la source électrique; quand elle est abaissée, elle fait communiquer ce condensateur avec l'électromètre, après l'avoir séparé du potentiomètre. Un troisième godet G_3 , non représenté sur la figure, placé à une petite distance du godet G_1 et constamment au sol, sert à ramener l'électromètre au zéro. Les deux godets G_1 et G_3 sont en cuivre; c'est aussi avec un pont de cuivre qu'on les réunit.

La disposition d'ensemble des appareils est représentée dans la figure 5; la partie qui est à droite (potentiomètre) est projetée sur un plan vertical; le reste est vu dans un plan horizontal.

Dans cette installation, j'ai dû employer quelques instruments : milliampèremètre, voltmètre..., appartenant au lycée de Mont-de-Marsan. J'adresse tous mes remerciements à M. Coville, directeur de l'Enseignement supérieur et ancien directeur de l'Enseignement secondaire, qui m'a autorisé alors à les emprunter.

CHAPITRE III

La préparation des expériences et les mesures.

L'électrolyte. — *A priori*, il paraît avantageux d'employer des solutions d'électrolyte extrêmement peu concentrées : en raison de leur grande résistivité, on peut réaliser aisément des résistances énormes, permettant d'utiliser au mieux la force électromotrice de la pile tout en assurant sa durée (elle est épuisée en une vingtaine de jours, par un courant de 5 milliampères); enfin, de prendre assez courte la longueur utile du conducteur électrolytique.

Cependant, l'expérience montre que cette concentration ne doit jamais être inférieure à une certaine valeur, qui est de 0,000 500 pour les solutions d'acide sulfurique dans l'eau distillée. En effet, pour des concentrations plus faibles, la résistivité, uniforme au début de l'électrolyse, varie lentement à mesure qu'on en prolonge la durée, croissant régulièrement de l'anode à la cathode; il en résulte des variations locales des n . potentiels. On trouve par exemple, qu'au milieu d'un conducteur cylindrique, formé d'une solution aqueuse d'acide sulfurique de concentration 0,000 040, ayant ses extrémités en communication avec les pôles d'une pile de force

électromotrice 54 volts dont le milieu est au sol, le *n.* potentiel prend successivement les valeurs suivantes :

	Température 15° C.	Température 25° C.
Au début	0,0 volt	0,0 volt
Après 2 heures d'électrolyse,	6,6 —	8,8 —
— 4 —	—	18,6 —
— 6 —	13,4 —	19,4 —
— 10 —	15,0 —	—
— 14 —	16,0 —	—

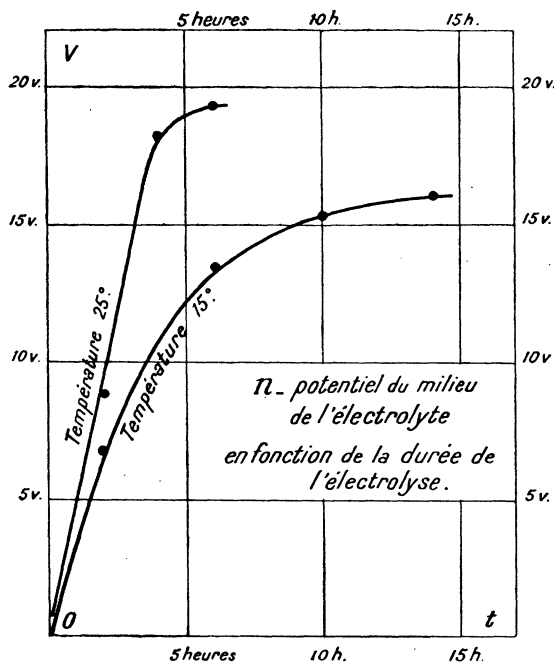


Fig. 6

Ces variations considérables apparaissent d'une manière frappante dans le graphique de la figure 6, où l'on peut tout particulièrement remarquer l'énorme influence de la température sur l'allure des phénomènes.

Le gradient du *n.* potentiel, qui vaut uniformément 1,4 volts par centimètre au commencement de l'électrolyse, varie sous le passage prolongé du courant, entre les valeurs extrêmes :

	Température 15° C.	Température 25° C.
Après 2 heures.....	de 0,8 à 5,0	de 0,7 à 6,0
— 6 —	0,4 6,7	0,2 8,0

en volts par centimètre. Les plus petites valeurs étant observées au voisinage de l'anode, les plus grandes près de la cathode.

Ces changements de la résistivité, correspondent à la variation progressive de la concentration de l'électrolyte, d'une extrémité à l'autre de la colonne liquide : la matière active se rassemble très lentement vers l'anode, comme on peut le vérifier directement par l'analyse chimique des diverses régions de l'électrolyte. Ainsi, dans la solution sulfurique de concentration 0,000 040, après six heures d'électrolyse à la température de 15° C., la concentration est devenue 0,000 095 auprès de l'anode, 0,000 034 au milieu et seulement 0,000 009 près de la cathode.

Tous ces phénomènes s'atténuent à mesure que croît la concentration de l'électrolyte; ils disparaissent quand elle atteint une certaine valeur (qui est 0,000 500 pour les solutions d'acide sulfurique). A partir de cette concentration et pour des concentrations plus grandes, l'électrolyte demeure homogène dans l'électrolyse, excepté auprès des électrodes*. Avant ces recherches, et comme conséquence de la conservation du flux des ions à travers une section quelconque du liquide, on admettait qu'il en était ainsi dans tous les électrolytes, *même extrêmement dilués*; les quelques expérimentateurs, en particulier Knothe (78), qui ont étudié des solutions d'électrolytes aussi peu concentrées que les nôtres, se proposaient uniquement d'y déterminer les vitesses (ou nombres de transport) des ions : ils se sont bornés à mesurer les variations de la concentration au voisinage des électrodes.

Pour former nos résistances liquides, nous avons employé des solutions aqueuses d'acide sulfurique, dont la concentration était 0,000 800 ou 0,001 600; le voltamètre en reçoit 52 grammes *pesés*; l'électrolyte est renouvelé chaque soir après la dernière mesure. Les électrodes sont distantes de 38 centimètres; en oscillant, le curseur n'en approche jamais à plus de 5 centimètres : ainsi, il reste toujours en contact avec la partie homogène de la résistance liquide. L'intensité du courant utilisé dans nos expériences varie, avec le nombre des éléments de la pile et avec la concentration de l'électrolyte, de 2,5 à 15,0 milliampères. Maintes fois, nous avons vérifié la distribution linéaire des *n.* potentiels, le long du conducteur électrolytique.

* Pendant cette électrolyse, les bulles gazeuses apparaissent progressivement, non seulement à la surface des électrodes, mais encore sur le fond et sur les parois latérales du voltamètre, en avant et en arrière des électrodes. Du côté de l'anode, elles sont plus nombreuses et plus grosses et elles se forment plus loin de l'électrode. Pour un courant assez faible (de l'ordre de 3 milliampères), elles grossissent très lentement et mettent un temps considérable à se dégager : on peut alors en observer simultanément un nombre assez grand. Ainsi, après une heure et demie d'électrolyse à la température de 13° C., d'une solution de concentration 0,000 160, avec un courant de 2,2 milliampères et le milieu de la pile étant au sol, elles sont très fines, assez serrées et arrivent en s'épaçant, à 8 centimètres de l'anode et seulement à 2 centimètres de la cathode. A ce moment, les régions positive et négative des *n.* potentiels occupent respectivement dans le voltamètre des longueurs de 22 centimètres et de 14 centimètres. Après une dizaine d'heures, on en trouve jusqu'à 19 centimètres de l'anode et 10 centimètres de la cathode; elles sont alors assez clairsemées.

Le champ de polarisation. — Le rapport du rayon (3,5 centimètres) du cercle décrit par la manivelle du moteur à la longueur (280 centimètres) du fil de traction vaut $1/80$; son carré étant tout à fait négligeable, les oscillations du contact du potentiomètre peuvent être considérées comme *rigoureusement sinusoïdales*, pourvu que le *mouvement de rotation du moteur soit uniforme* : dans ces conditions, le *champ polarisant est aussi sinusoïdal*.

Pour contrôler la constance de l'amplitude du champ, on vérifie au milliampèremètre, la constance de l'intensité du courant.

L'électromètre. — L'intérieur en est desséché par du sodium, l'aiguille est suspendue par un fil de platine de 0,02 millimètre de diamètre et de 43 centimètres de longueur. L'aiguille primitive étant trop légère (elle pèse seulement 0,25 gramme), l'appareil est aperiodique; nous avons dû la remplacer par une autre de plus grand moment d'inertie (masse 1,75 gramme), taillée dans une lame d'aluminium. Les oscillations ont ainsi une période de 1 minute; l'amortissement est encore considérable (0,11).

On fait varier la sensibilité de l'électromètre en modifiant le nombre des éléments de la pile de charge; le déplacement du spot pour 1 volt a été suivant les cas, 30, 50, ou 100 millimètres; on peut aisément faire les lectures à $1/5$ de millimètre près.

Les capacités. — La capacité du système formé par le condensateur et l'électromètre a été mesurée par comparaison avec celle d'un autre condensateur à air, constitué par deux glaces carrées de 19,5 centimètres de côté, entièrement recouvertes de feuilles d'étain et séparées par trois petits disques isolants de 2 millimètres d'épaisseur et de 5 millimètres de diamètre. La capacité de ce condensateur, déduite de ses dimensions, est 150 C. G. S. Chacun des condensateurs a une armature au sol. La seconde armature du condensateur de comparaison est portée à un n . potentiel connu, séparée de la source électrique, enfin réunie à l'armature isolée de l'autre condensateur. On mesure alors le n . potentiel commun. On trouve facilement pour la capacité du système, 240 C. G. S. La grandeur de cette capacité *paraît indépendante de la déviation de l'aiguille de l'électromètre*.

En appliquant la même méthode, on compare la capacité du condensateur polarisant à celle du système formé par le condensateur à air et l'électromètre. On obtient pour sa valeur, 59 C. G. S., le condensateur étant dans sa boîte et sans diélectrique.

Les diélectriques. — Nous avons tout particulièrement étudié les phénomènes d'hystérésis dans la colophane landaise; les résultats donnés dans ce travail ont été obtenus avec un même échantillon de brai clair, provenant de l'usine Farbos à Mont-de-Marsan; mais nous avons examiné d'autres colophanes de colorations différentes et d'origines diverses : la polarisation y prend la même allure. Nous avons aussi tracé

les courbes cycliques de quelques autres diélectriques : fibre, paraffine ordinaire (t. de fusion 52° C.), paraffine dure (t. de fusion 74° C.), soufre et diélectrine, placés dans les mêmes conditions expérimentales. Les lames diélectriques, épaisses d'environ 14 millimètres, ont à peu près 18 centimètres de côté; excepté la plaque de fibre dont les dimensions correspondantes valent respectivement 10 millimètres et 20 centimètres. Toutes les déterminations qui se rapportent à un certain diélectrique, ont été faites sur le même échantillon.

La température des diélectriques, que nous ne pouvions songer à maintenir constante, a été généralement comprise entre 12° C. et 17° C.

Les mesures. — Le diélectrique est préalablement soumis à un nombre suffisant d'oscillations du champ, pour assurer l'accommodation des cycles de polarisation; il faut ensuite mesurer la charge totale du condensateur polarisant et sa charge réelle.

1° *Mesure de la charge totale.* — L'électromètre est mis au zéro et isolé; dès que le champ, variant dans un sens convenable, arrive à la valeur désirée, on enfonce brusquement la clef, puis tirant sur la cordelette, on enlève le diélectrique hors de l'intervalle des plateaux. La déviation de l'électromètre donne alors le n . potentiel V , pris par l'ensemble des condensateurs. La charge a pour expression :

$$M = CV,$$

C , étant la capacité totale.

A l'instant précis où l'on abaisse la clef et par le même geste, on ferme le circuit d'un électro-aimant qui arrête le moteur, et du même coup immobilise le contact du potentiomètre; ainsi, on conserve invariable le n . potentiel de charge, ce qui est indispensable pour l'opération qui reste à faire.

2° *Mesure de la charge réelle.* — On relie l'électromètre au sol, on l'isole; le condensateur polarisant, *toujours sans diélectrique*, est remis en communication avec la source électrique qui lui impose le champ même de la mesure précédente; ensuite, abaissant la clef on le réunit à l'électromètre qui fournit une nouvelle valeur V' du n . potentiel. On a pour la charge réelle :

$$M' = CV'.$$

La charge apparente, due à la polarisation, est la différence des deux charges mesurées :

$$M - M' = C(V - V').$$

On trouve enfin, pour l'intensité de polarisation :

$$\mathfrak{J} = \frac{C(V - V')}{S};$$

S , étant la grandeur de la surface de chacune des faces de la lame diélectrique.

On ramène ensuite le diélectrique entre les plateaux du condensateur polarisant et le moteur est remis en marche. Il faut attendre un nombre suffisant de périodes, avant de recommencer les mesures.

Ces opérations, en apparence si faciles, sont compliquées par de nombreuses causes d'erreur, qu'il a fallu s'efforcer d'éliminer et dont nous allons ci-dessous indiquer les principales.

La plus importante est la déperdition que nous avons presque supprimée par les soins apportés à l'isolement. Nous avons obtenu de très bons résultats par l'emploi d'un mastic préparé en mélangeant après fusion :

colophane landaise	2,
plâtre fin, desséché à 150° C. jusqu'à poids constant...	1;

des colonnes de quelques centimètres de longueur procurent un excellent isolement, même par une humidité excessive. Nous avons encore utilisé la soie brute : avec du fil de cocon, nous avons fait des cordelettes, qui nous ont servi à soutenir le fil conducteur reliant l'électromètre au condensateur à air. C'est par l'intermédiaire d'un cordon de soie naturelle, d'environ 25 centimètres de longueur, qu'on abaisse la clef.

Les différences de n . potentiel au contact, extrêmement gênantes, qui se produisaient quand on coupait la communication de l'électromètre avec le sol lors de sa mise au zéro, ont été supprimées en remplaçant les pots de faïence primitivement utilisés dans le montage de la clef (*fig. 4*), par les godets de cuivre G_1 et G_3 , et en se servant d'un crochet de cuivre tenu par un manche isolant, pour enlever le pont de même métal, qui en les réunissant, sert à relier l'appareil à la terre.

L'influence électrostatique exercée par l'extrémité f (*fig. 4*) de la clef sur le godet G_1 , situé au-dessous, fait naître dans l'électromètre une charge alternative ayant la période du champ, entraînant des oscillations du spot dont l'amplitude peut atteindre 6 millimètres, et qui oblige à une correction des mesures.

Pour rendre sûres les communications électriques entre les diverses parties de l'appareil, il a fallu en général, les réunir par des conducteurs soudés à leurs extrémités, ou par l'intermédiaire de mercure.

La terre doit être excellente. Pour la réaliser nous avons employé à la fois, les conduites d'eau et de gaz; un fil conducteur soudé aux deux bouts réunit, à travers

le compteur, les tuyaux d'arrivée et de sortie, afin d'éviter la résistance électrique possible des joints.

Avant chaque mesure, il est indispensable de repérer la position du zéro de l'électromètre.

La colophane est très sensible à l'humidité. Pour en diminuer les effets, nous avons placé du sodium à l'intérieur de la boîte du condensateur polarisant. Cette précaution devient insuffisante par un temps très humide : les expériences sont alors tout à fait impossibles.

Au début de notre travail, nous avons employé des solutions d'électrolyte trop étendues, et pendant un temps considérable, nous avons été arrêté par les irrégularités qu'y produit une électrolyse prolongée et dont il a été question au commencement de ce chapitre. Nous avons été amené ainsi à les étudier, pour rechercher leur nature et le moyen de les éviter. Elles ont été décrites avec quelque détail, dans l'espoir d'être utile, en évitant à d'autres nos longs tâtonnements.

DEUXIÈME PARTIE

Les résultats.

CHAPITRE IV

L'accommodation des cycles de polarisation.

L'étude systématique de l'hystérésis diélectrique a été faite sur la colophane provenant du pin maritime des Landes. Les résultats en sont contenus dans le présent chapitre et dans les trois chapitres suivants.

Avant tout, il était indispensable de déterminer le nombre des oscillations du champ, qui fixent les phénomènes de polarisation dans le diélectrique. La colophane mise en expérience, n'a jamais été polarisée; aussitôt la plaque préparée par fusion et moulage, on la monte à l'extrémité du levier de rotation et on l'installe entre les plateaux du condensateur polarisant.

Il a paru plus commode de faire figurer dans les tableaux de nombres, non pas l'intensité du champ, mais la différence de n . potentiel (exprimée en volts) qui produit ce champ. C'est aussi en volts que sont comptées les abscisses des courbes correspondantes.

L'intensité de polarisation est donnée en millionnièmes d'unités C. G. S. dans tous les tableaux et en ordonnées de toutes les courbes, sans aucune exception.

Accommodation du cycle de première polarisation.

Les résultats des expériences sont dans le tableau n° 1.

TABLEAU N° 1.

Amplitude du champ polarisant, 20 volts.
Période, 8 minutes.

En tête de chaque colonne, se trouve le numéro d'ordre du cycle.

V	1	2	3	6	46	300
0 volt.	0	— 534	— 572			
10 »	548	+ 466	+ 366			
15 »	1.736					
20 »	2.500	1.600	1.462	1.450	1.440	1.438
10 »	1.536	1.000	1.142	1.170	1.170	1.170
0 »	466	570	617	640	652	650
— 10 »	— 936	— 366	— 240			— 208
— 20 »	— 1.966	— 1.494	— 1.480			— 1.438
— 10 »	— 1.404	— 1.166				
0 »	— 534	— 572				

Le cycle est donc fixé avec certitude, après une vingtaine de parcours.

Les nombres de ce tableau ont servi au tracé des courbes de la figure 7.

Accommodation, quand on change l'amplitude ou la période du champ.

On commence par fixer le cycle de départ, en soumettant le diélectrique à une centaine d'oscillations du champ; le changement d'amplitude ou de période se fait pour $V = 0$, le champ étant croissant. Les tableaux 2 et 3 donnent en fonction du champ, les valeurs de l'intensité de polarisation, après le changement de l'amplitude; les tableaux 4 et 5, celles qui succèdent au changement de la période.

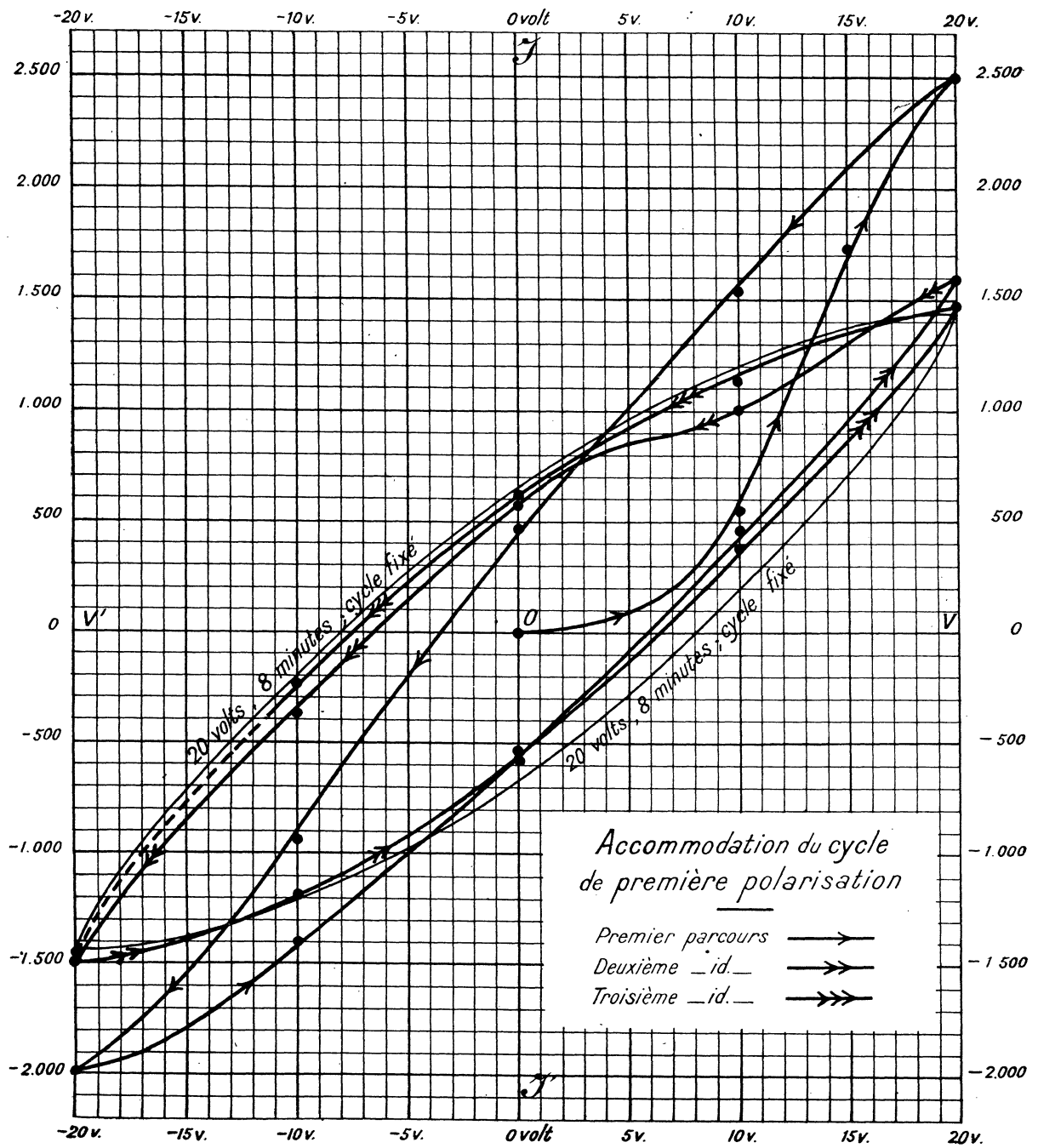


Fig. 7

TABLEAU N° 2.

L'amplitude du champ polarisant passe de 20 volts à 10 volts.

Période *constante* de 8 minutes.

En tête de chaque colonne, se trouve le numéro d'ordre du cycle.

V	1	2	3	LIMITE
0 volt.	— 650	— 366	— 360	— 360
5 »	+ 206	+ 14	+ 120	+ 120
10 »	1.418	932	900	900
5 »	914	680		
0 »	572	414	360	
— 5 »	234	— 60		
— 10 »	— 594	— 870		
— 5 »	— 520	— 700		
0 »	— 366	— 360		

TABLEAU N° 3.

L'amplitude du champ polarisant repasse de 10 volts à 20 volts.

Période *constante* de 8 minutes.

V	1	2	LIMITE
0 volt.	— 360	— 640	
10 »	+ 284	+ 180	
20 »	1.202	1.436	1.438
10 »	776	1.170	1.170
0 »	566	648	650
— 10 »	— 234	— 206	— 208
— 20 »	— 1.370	— 1.438	
— 10 »	— 1.160	— 1.170	
0 »	— 640	— 650	

Pratiquement, les cycles se ferment après un très petit nombre de parcours.

TABLEAU N° 4.

La période passe de 8 minutes à 28 minutes.

Amplitude *constante* du champ, 20 volts.

En tête de chaque colonne, se trouvent les numéros d'ordre des cycles.

V	1	2		5	LIMITE
0 volt.	— 652	— 556			
10 »	+ 632	+ 408			
20 »	1.700	1.400		1.312	1.316
10 »	1.168	1.080			
0 »	534	520		512	512
— 10 »	— 274				
— 20 »	— 1.326				
— 10 »	— 1.074				
0 »	— 556				

TABLEAU N° 5.

La période repasse de 28 minutes à 8 minutes.

Amplitude *constante* du champ, 20 volts.

V	1	2	LIMITE
0 volt.	— 512	— 662	
10 »	+ 434	+ 192	
20 »	1.508	1.438	1.438
10 »	1.220	1.200	1.170
0 »	686	654	650
— 10 »	— 456		
— 20 »	— 1.462		
— 10 »	— 1.210		
0 »	— 662		

Les phénomènes sont donc fixés en moins d'une dizaine de parcours.

Les courbes correspondantes sont représentées dans les figures 8 et 9. La première met en œuvre les nombres des tableaux 2 et 3; la seconde utilise ceux des tableaux 4 et 5. Elles rendent évidentes les facultés d'accommodation des phénomènes.

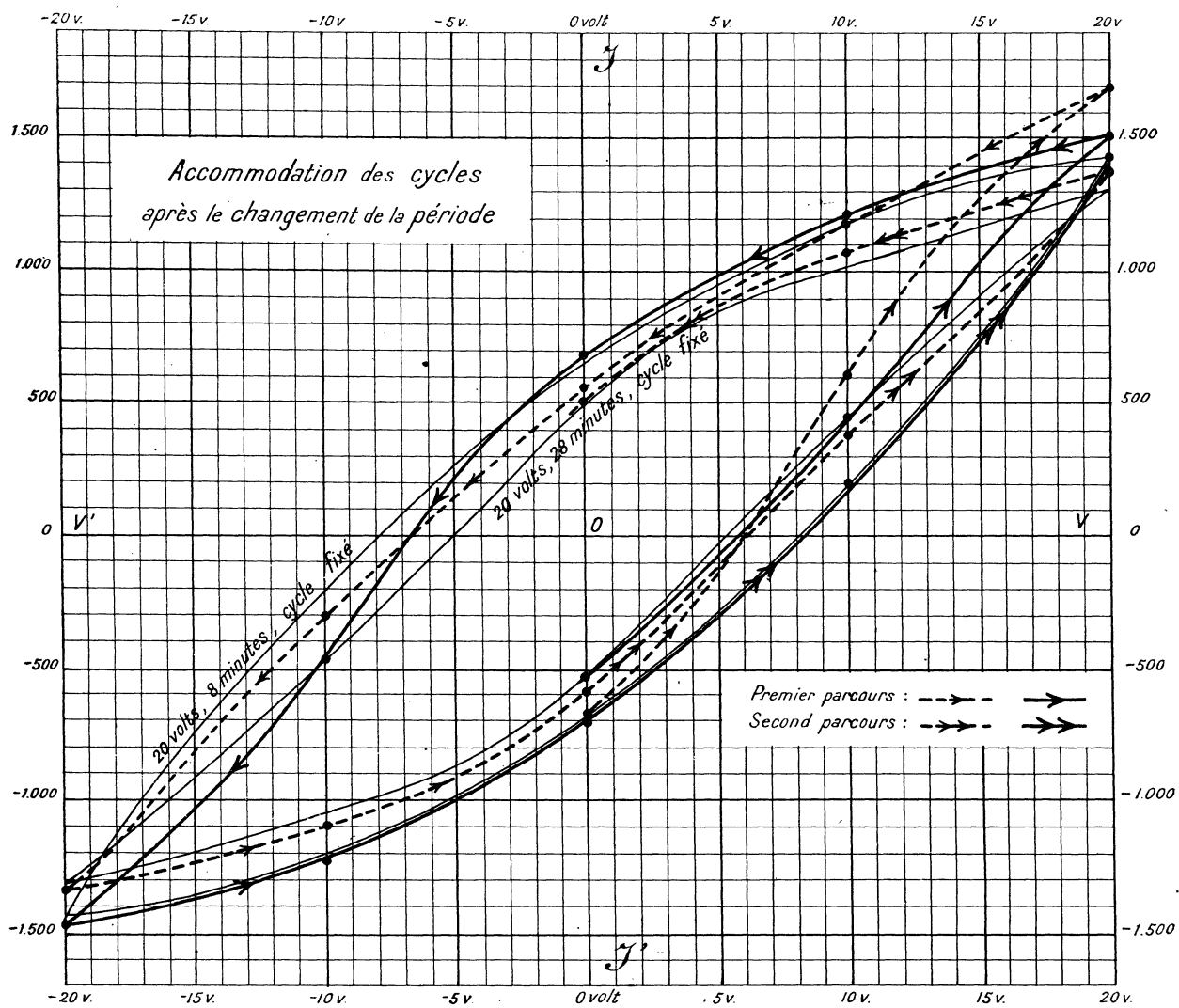


Fig. 9

CHAPITRE II

La polarisation est fonction de la durée de la période des cycles.

L'amplitude du champ étant constante et égale à 10 volts, on donne successivement aux cycles des périodes de :

1, 4, 8, 12, 16, 20, 28, 40 et 60 minutes.

La première est obtenue en utilisant comme moteur, un tournebroche à poids; toutes les autres, au moyen de l'horloge comtoise. Pour les périodes de 20 à 60 minutes, son régulateur est un pendule de longueur convenable; on réalise les périodes inférieures à 20 minutes, par le dispositif représenté dans la figure 2.

Voici les valeurs qu'il faut prendre :

Durée de la période....	p	P.....	Longueur du fil.
20 min.	0 gr.	6 k.	0 cm.
16 -	7 -	7 -	198 —
12 -	30 -	8 -	
8 -	65 -	10 -	
4 -	250 -	14 -	213 —

Toutes les déterminations ont été faites sur des cycles fixés; après chaque changement de période, on prépare le diélectrique en le soumettant, au moins, à une cinquantaine de parcours; entre deux mesures consécutives, on laisse s'écouler de douze à vingt périodes; enfin, on passe autant que possible, d'une certaine période à celle qui en est immédiatement voisine.

On obtient des courbes symétriques, pourvu que les valeurs extrêmes (amplitudes) du champ polarisant soient aussi symétriques. Cette condition a été constamment réalisée dans toutes nos expériences; c'est pourquoi nos tableaux de nombres ne renfermeront que ceux qui correspondent à la moitié de chaque cycle; de même, sur les courbes représentatives, ne seront figurés que les points donnés par les tableaux.

Les résultats sont réunis dans le tableau n° 6.

TABLEAU N° 6.

La période varie de 1 à 60 minutes.

Amplitude du champ *constante* de 10 volts.

V (EN VOLTS)	DURÉE DE LA PÉRIODE EN MINUTES :								
	1	4	8	12	16	20	28	40	60
10,0	300	800	900	880	822	788	742	662	628
7,5	295	776	850	800	754	742	720	640	548
5,0	278	616	710	662	616	572	572	526	446
2,5	230	400	560	480	492	410	434	400	332
0,0	100	260	360	320	274	228	200	172	138
- 2,5	- 40	+ 56	+ 140	+ 114	+ 68	+ 20	- 60	- 92	- 114
- 5,0	- 160	- 142	- 120	- 138	- 182	- 206	- 308	- 332	- 320
- 7,5	- 245			- 400	- 412	- 490	- 592	- 510	- 470
- 8,4		- 458	- 420						
- 10,0	- 300	- 800	- 900	- 880	- 822	- 788	- 742	- 662	- 628

Sur la figure 10 se trouvent représentées les courbes cycliques pour des périodes de 1 minute, 4 minutes, 8 minutes, 28 minutes et 60 minutes.

Comme l'indiquent les nombres du tableau, et comme on le voit immédiatement par les courbes figurées, la polarisation aux sommets augmente progressivement en même temps que la durée de la période, jusqu'à une période de 8 minutes; au voisinage de cette valeur, elle passe par un maximum et diminue ensuite pour les périodes plus longues. En même temps, les courbes cycliques se redressent et s'élargissent jusqu'à la période du maximum; puis, elles se resserrent et s'inclinent vers l'axe des abscisses.

Dans le tableau suivant, nous donnons en fonction de la période, les valeurs de la polarisation quand le champ atteint son maximum (polarisation aux sommets de la courbe d'hystérésis), quand il s'annule (polarisation rémanente), et celles de leur différence (polarisation temporaire). Nous y indiquons aussi la grandeur du champ, déterminée sur les graphiques, pour lequel la polarisation devient égale à zéro (champ coercitif); comme les autres champs, il est exprimé en volts, par la différence de n . potentiel capable de le produire dans le condensateur polarisant.

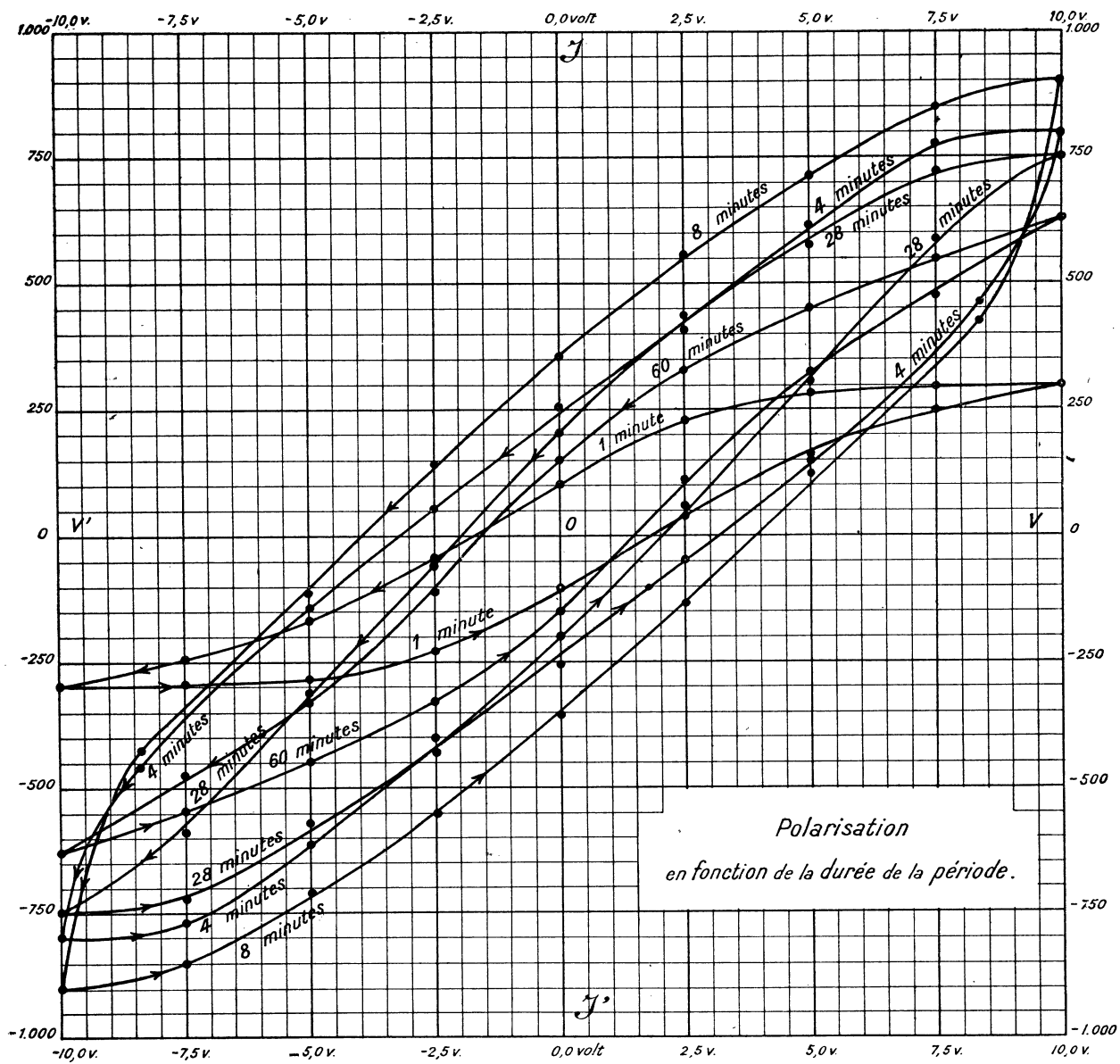


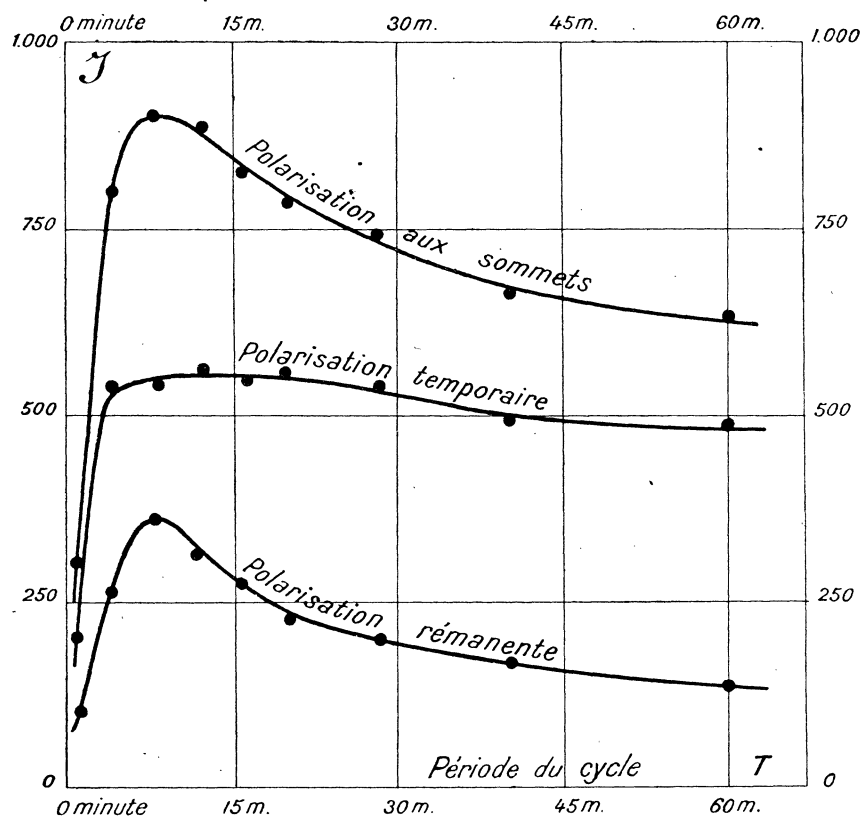
Fig.10

TABLEAU N° 7.

Polarisation aux sommets... $\mathfrak{J}_s$; Polarisation temporaire.... $\mathfrak{J}_t$;
 Polarisation rémanente.... $\mathfrak{J}_r$; Champ coercitif..... $\mathfrak{C}$.

Amplitude constante du champ polarisant, 10 volts.

T MINUTES	$\mathfrak{J}_s$	$\mathfrak{J}_r$	$\mathfrak{J}_t$	$\mathfrak{C}$ VOLTS
1	300	100	200	1,70
4	800	260	540	3,15
8	900	360	540	3,90
12	880	320	560	3,70
16	824	274	550	3,20
20	788	230	558	2,80
28	742	200	542	2,00
40	662	170	492	1,70
60	628	136	492	1,35



*Polarisation aux sommets, P. rémanente et P. temporaire
 en fonction de la durée de la période cyclique.*

Fig. 11

Les nombres de ce tableau sont traduits graphiquement dans les figures 11 (polarisations) et 12 (champ coercitif). On y reconnaît immédiatement que ces diverses quantités passent ensemble par une valeur maxima, quand la période est voisine de 8 minutes; excepté la polarisation temporaire, dont le maximum est atteint pour une période d'environ 12 minutes.

Elles tendent vers une limite différente de zéro, quand les périodes deviennent infinies, et ne paraissent pas s'annuler en même temps que la période.

Pour une autre valeur de l'amplitude du champ polarisant, les phénomènes semblent conserver la même allure par rapport aux variations de la période. Par exemple, le maximum de la différence de n . potentiel imposée étant 30 volts, on trouve :

	J_s	J_r	J_t	Q
Période 8 minutes.....	1 768	818	950	12,6 volts.
— 28 —	1 600	650	950	8,5 —

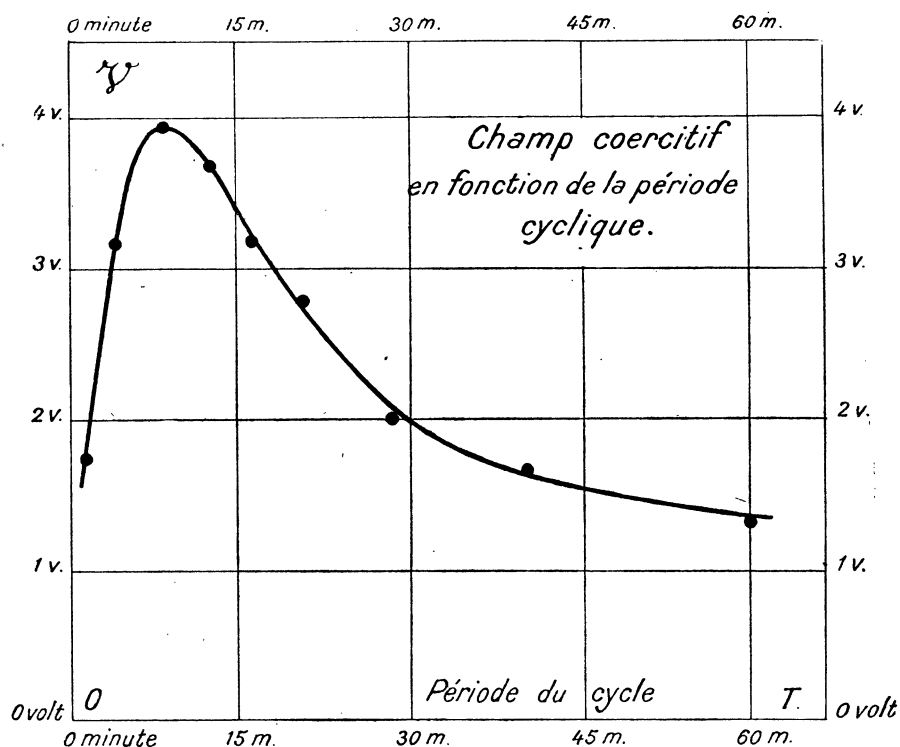


Fig. 12

CHAPITRE III

La polarisation dépend de l'amplitude du champ.

Cette étude a été faite en donnant au *n.* potentiel qui produit le champ polarisant, les amplitudes successives :

5, 10, 15, 20, 25 et 30 volts,

obtenues en modifiant le nombre des éléments de la pile à l'oxyde de cuivre et en formant la résistance du potentiomètre, avec l'une ou l'autre des deux solutions sulfuriques, de concentration 0,001600 ou 0,000800.

La période constante était de 8 minutes; cependant, nous avons encore tracé quelques courbes avec la période de 28 minutes, en utilisant des champs de valeur maxima :

5, 10, 20 et 30 volts.

Les tableaux du chapitre précédent renferment les résultats expérimentaux pour l'amplitude de 10 volts; les autres déterminations sont disposées dans les cinq tableaux suivants (n^{os} 8 à 12 compris) :

TABLEAU N° 8.

Amplitude du champ, 5 volts.
Périodes, 8 minutes et 28 minutes.

V	INTENSITÉ DE POLARISATION	
	8 MINUTES	28 MINUTES
5,0 volts.	502	434
3,3 »	456	412
1,7 »	366	320
0,0 »	218	138
— 1,7 »	+ 58	— 68
— 3,3 »	— 138	— 274
— 5,0 »	— 500	— 434

TABLEAU N° 9.

Amplitude du champ, 15 volts.

Période, 8 minutes.

V	J
15,00 volts.	1.200
11,25 »	1.140
7,50 »	980
3,75 »	790
0,00 »	550
— 5,00 »	— 98
— 8,00 »	— 240
— 11,25 »	— 640
— 15,00 »	— 1.200

TABLEAU N° 10.

Amplitude du champ, 20 volts.

Périodes, 8 minutes et 28 minutes.

V	INTENSITÉ DE POLARISATION	
	8 MINUTES	28 MINUTES
20,0 volts.	1.438	1.316
15,0 »	1.370	1.142
10,0 »	1.170	1.038
5,0 »	974	868
0,0 »	650	512
— 5,0 »	+ 292	0
— 10,0 »	— 208	— 458
— 15,0 »	— 730	— 900
— 20,0 »	— 1.438	— 1.316

TABLEAU N° 11.

Amplitude du champ, 25 volts.

Période, 8 minutes.

V	β
25,00 volts.	1.600
18,75 »	1.490
12,50 »	1.280
6,25 »	1.064
0,00 »	750
— 6,25 »	+ 296
— 12,50 »	— 208
— 18,75 »	— 890
— 25,00 »	— 1.600

TABLEAU N° 12.

Amplitude du champ, 30 volts.

Périodes, 8 minutes et 28 minutes.

V	INTENSITÉ DE POLARISATION	
	8 MINUTES	28 MINUTES
30,0 volts.	1 768	1.600
22,5 »	1.620	1.466
15,0 »	1.430	1.218
7,5 »	1.142	1.034
0,0 »	820	652
— 7,5 »	+ 400	+ 68
— 15,0 »	— 287	— 534
— 22,5 »	— 1.100	— 1.080
— 30,0 »	— 1.768	— 1.600

Nous groupons dans le tableau suivant, la polarisation aux sommets, la polarisation rémanente et la polarisation temporaire, en fonction de l'amplitude de la différence de n . potentiel de champ.

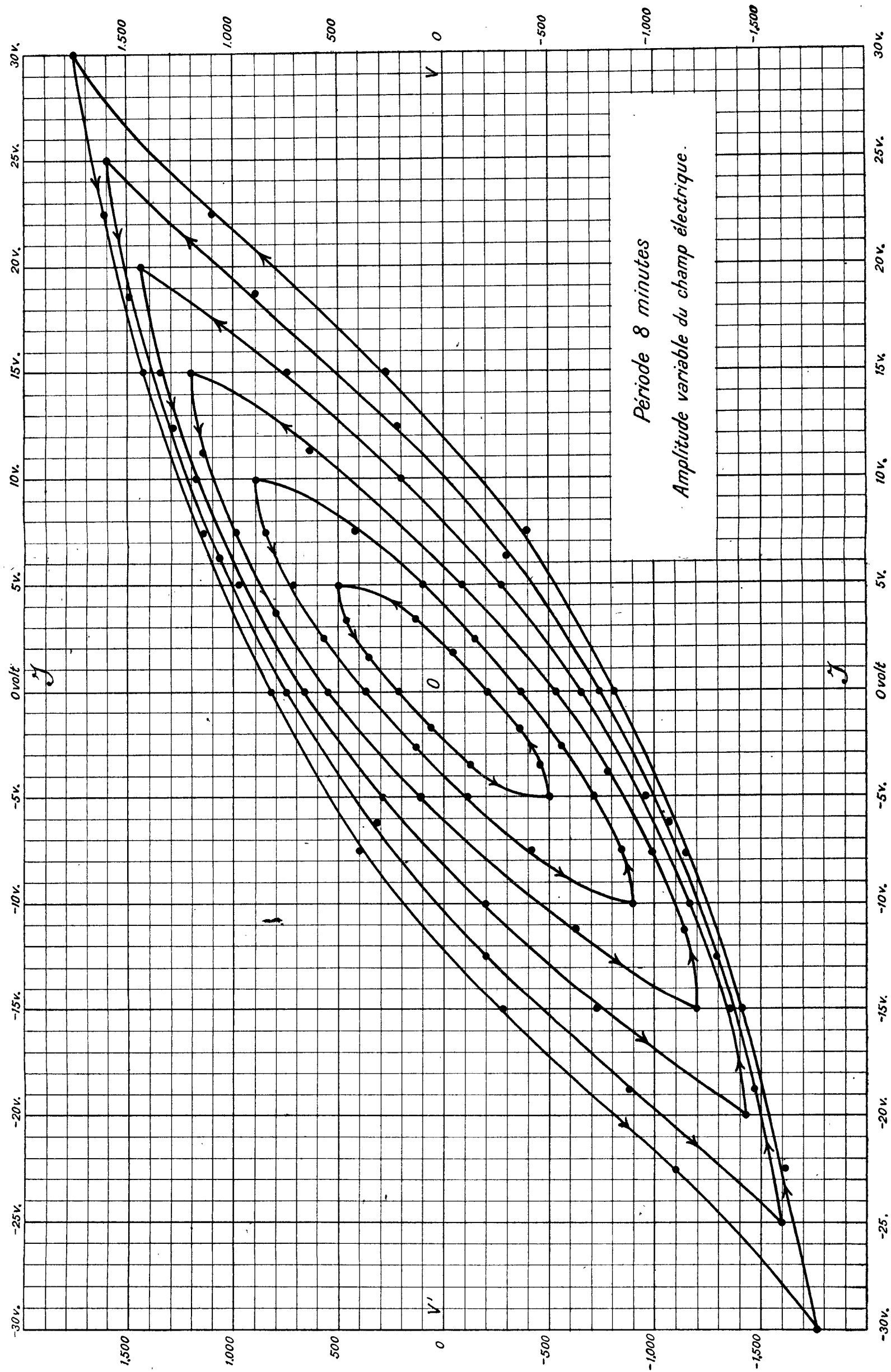


Fig. 13

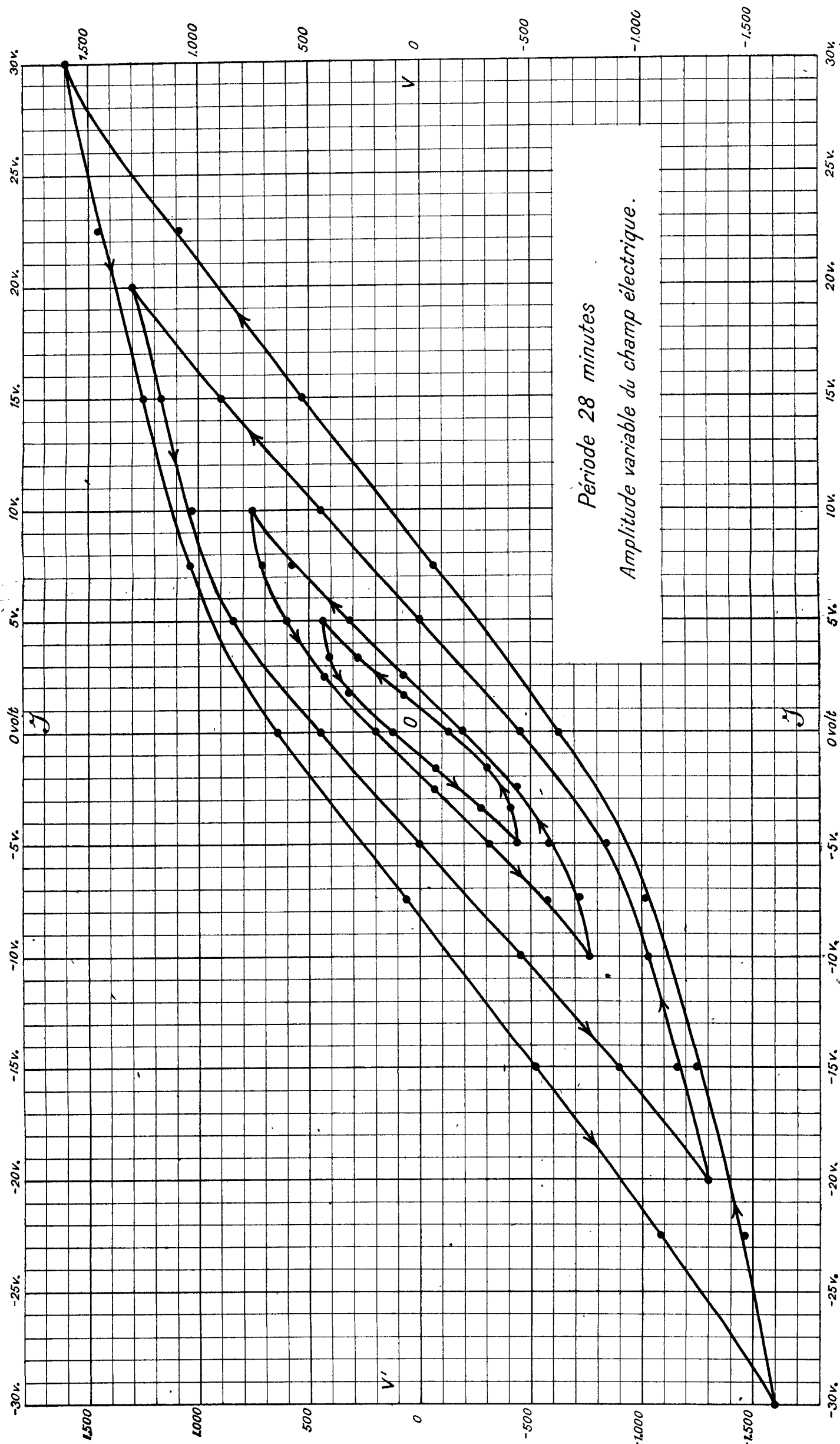


Fig. 14

TABLEAU N° 13.

Polarisation aux sommets..... $\mathfrak{J}_s$;
 Polarisation rémanente..... $\mathfrak{J}_r$;
 Polarisation temporaire..... $\mathfrak{J}_t$;

En fonction de l'amplitude du champ et de la période.

V (AMPLITUDES)	PÉRIODE, 8 MINUTES			PÉRIODE, 28 MINUTES		
	$\mathfrak{J}_s$	$\mathfrak{J}_r$	$\mathfrak{J}_t$	$\mathfrak{J}_s$	$\mathfrak{J}_r$	$\mathfrak{J}_t$
5 volts.	502	218	284	434	138	296
10 »	900	360	540	742	200	542
15 »	1.200	550	650			
20 »	1.438	650	788	1.316	520	796
25 »	1.600	750	850			
30 »	1.768	818	950	1.600	650	950

Nous donnons dans le tableau n° 14 les valeurs du champ coercitif, évaluées sur les courbes des figures 13 et 14, en fonction de l'amplitude du champ de polarisation, pour des périodes de 8 minutes et de 28 minutes.

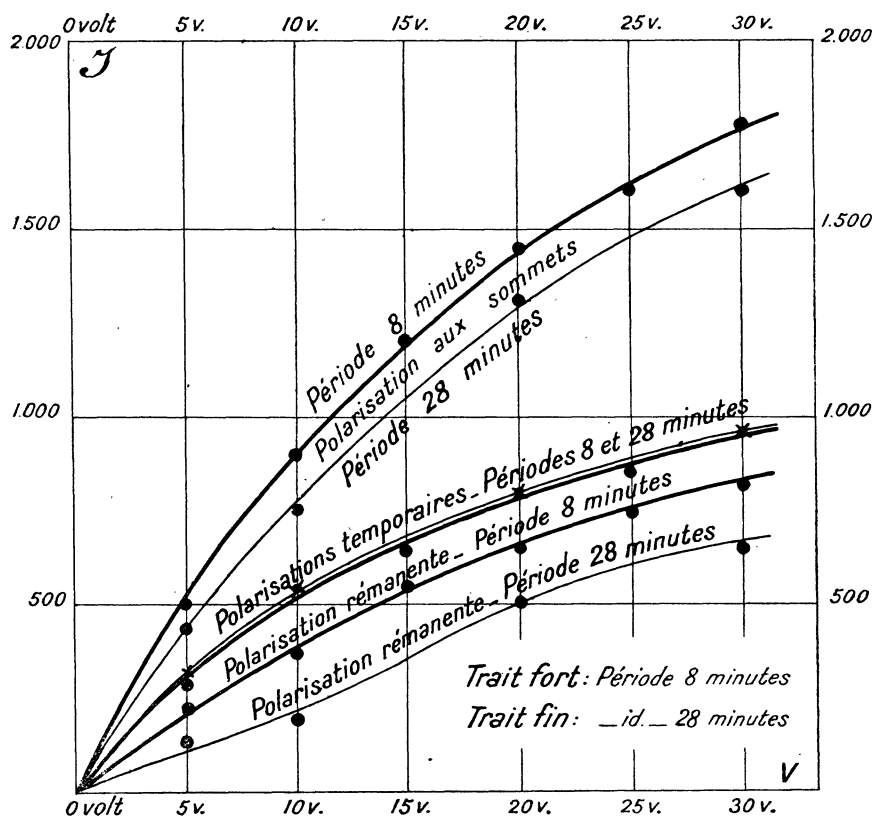
TABLEAU N° 14.

Champ coercitif en fonction de l'amplitude du champ
et de la période.

V	CHAMP COERCITIF	
	8 MINUTES	28 MINUTES
5 volts.	2,2 volts.	1,1 volts.
10 »	3,9 »	2,0 »
15 »	5,8 »	
20 »	8,0 »	5,1 »
25 »	10,3 »	
30 »	12,6 »	8,5 »

Les courbes d'hystérésis correspondant à ces diverses amplitudes, sont représentées dans les figures 13 (période 8 minutes) et 14 (période 28 minutes); les polarisations aux sommets, rémanente et temporaire, dans la figure 15; le champ coercitif, dans la figure 16.

On reconnaît immédiatement sur ces graphiques que les courbes cycliques d'une même série s'inclinent régulièrement vers l'axe des abscisses, quand l'amplitude du champ polarisant augmente; ce qui fait pressentir une limite à la grandeur de la polarisation, ou l'existence vraisemblable d'une saturation diélectrique, encore plus vivement suggérée par l'allure des courbes des polarisations (*fig. 15*).



*Polarisation aux sommets, rémanente et temporaire
en fonction de l'Amplitude du champ.*

Fig. 15

Comme le font prévoir les résultats du chapitre précédent, l'influence du champ maximum sur la forme des courbes d'hystérésis, varie notablement avec la durée constante choisie pour la période. Celle-ci étant de 8 minutes, elles ont une apparence massive et se déforment considérablement quand on fait varier ce champ. Pour les petites valeurs de l'amplitude (5 volts) leurs branches sont rectilignes et parallèles dans leur partie moyenne, avec des extrémités inégalement recourbées; à mesure que le champ croît, elles deviennent courbes dans toute leur longueur et

arrivent progressivement à être symétriques par rapport à la droite des sommets, devenue diamètre de la courbe cyclique (20 volts); enfin, le champ continuant à croître, chaque branche, qui était primitivement convexe, s'infléchit peu à peu, prenant vers ses bouts des courbures de signes différents : convexe en s'éloignant d'un sommet, elle devient concave en se rapprochant de l'autre (30 volts). Ces défor-

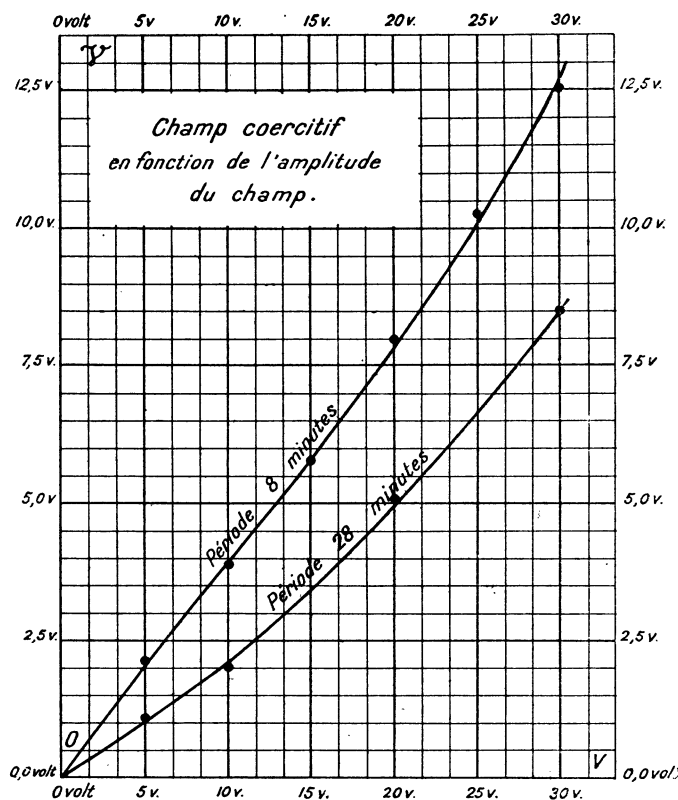


Fig. 16

mations sont moins sensibles pour l'autre période de 28 minutes, tout en conservant la même allure. La polarisation aux sommets et la polarisation rémanente sont maintenant plus petites pour la même valeur du champ maximum; au contraire, la polarisation temporaire est légèrement plus grande; la courbe représentative (*fig. 15*) borde l'autre en dessus, en lui étant presque juxtaposée. Ces différences s'expliquent facilement par une diminution de l'effet de la viscosité diélectrique, ayant pour cause la durée plus longue des parcours cycliques. Dans les limites de nos recherches, le champ coercitif (*fig. 16*), qui est à peu près linéaire pour la période de 8 minutes, paraît croître plus vite que ne l'indique la loi de la proportionnalité au champ maximum.

CHAPITRE IV

L'énergie dissipée.

L'énergie absorbée par l'hystérésis pendant une période dans 1 centimètre cube du diélectrique, est évaluée en ergs par le nombre qui mesure en centimètres carrés, la surface embrassée par la courbe cyclique, établie en représentant une unité électrostatique C. G. S. de champ électrique par 1 centimètre d'abscisse et une unité électrostatique C. G. S. d'intensité de polarisation par 1 centimètre d'ordonnée.

Les plateaux du condensateur polarisant étant à une distance uniforme de 2 centimètres, et l'unité électrostatique C. G. S. de n . potentiel valant 300 volts, la valeur du champ dans ce système d'unités, sera 1/600 de la différence de n . potentiel (en volts) qui lui donne naissance.

Pour avoir l'énergie, nous avons mesuré avec beaucoup de soin, l'aire limitée par des courbes cycliques, construites en prenant pour

1 centimètre d'abscisse, 1/600 d'unité électrostatique C. G. S. de champ;

1 centimètre d'ordonnée, 1/10 000 d'unité électrostatique C. G. S. d'intensité de polarisation.

Dans ces conditions, 1 centimètre carré d'aire vaut 1/6 000 000 d'erg.

L'énergie dissipée a été déterminée dans tous les cycles étudiés pour l'hystérésis; d'abord, en fonction de la durée de la période, l'amplitude du champ restant constante (tableau n° 15 et figure 17); ensuite, à période invariable, en fonction de la grandeur du champ maximum (tableau n° 16 et figure 18).

Voici les résultats :

TABLEAU N° 15.

Énergie dissipée W, en fonction de la période du champ.

Amplitude constante du champ polarisant, 10 volts.

PÉRIODE	W EN CM ² D'AIRe CYCLIQUE	W EN MILLIONNIÈMES D'ERGS	PUISSANCE EN CM ² D'AIRe PAR MINUTE
1 minute.	26,0	4,3	26,0
4 »	84,0	14,0	21,0
8 »	112,0	18,7	14,0
12 »	97,0	16,2	8,1
16 »	83,6	13,9	5,2
20 »	67,0	11,2	3,3
28 »	51,0	8,5	1,8
40 »	41,0	6,8	1,0
60 »	28,0	4,7	0,5

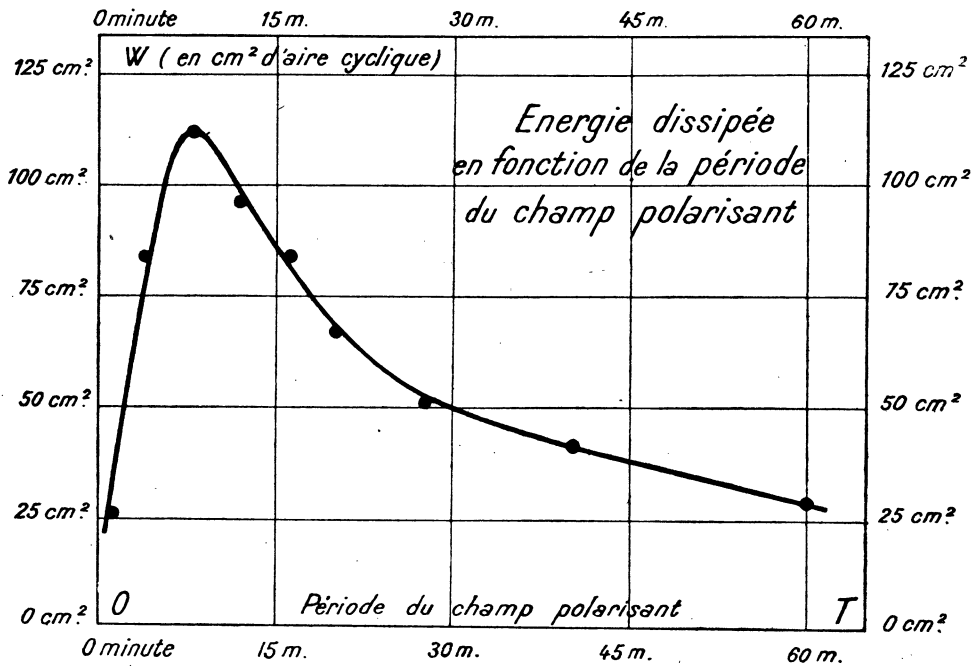


Fig. 17

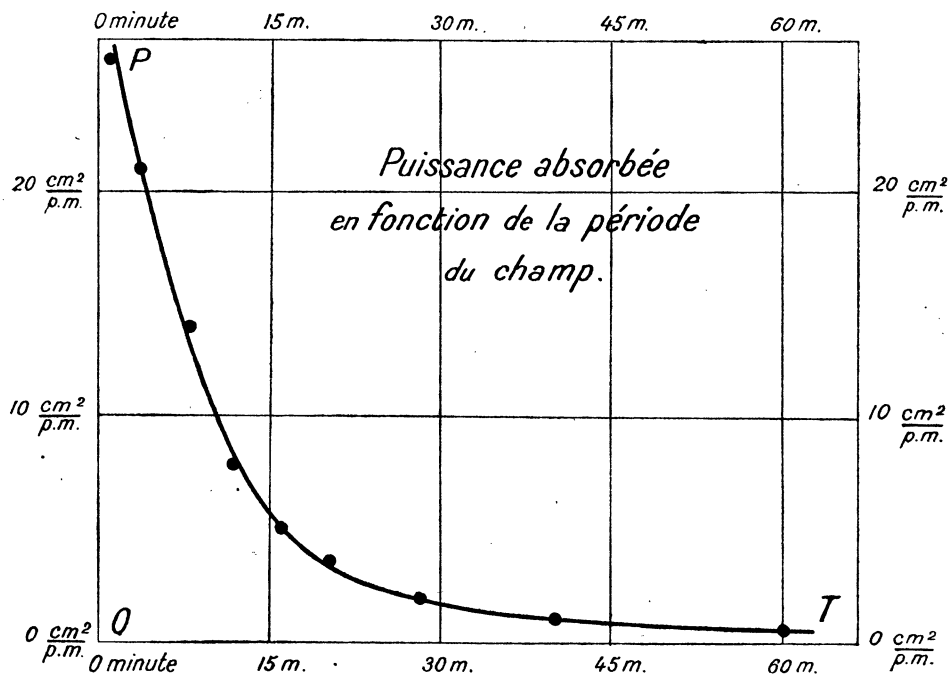


Fig. 18

TABLEAU N° 16.

Énergie dissipée W , en fonction de l'amplitude du champ.

Périodes constantes, 8 minutes et 28 minutes.

AMPLITUDE du CHAMP	PÉRIODE, 8 MINUTES		PÉRIODE, 28 MINUTES	
	W EN CM ² D'AIRE CYCLIQUE	W EN MILLIONNIÈMES D'ERGS	W EN CM ² D'AIRE CYCLIQUE	W EN MILLIONNIÈMES D'ERGS
5 volts.	33,0	5,5	16,6	2,8
10 »	112,0	18,7	51,0	8,5
15 »	220	36,7		
20 »	353	59	230	38,3
25 »	484	81		
30 »	611	102	427	71

L'amplitude du champ demeurant invariable, on trouve (*fig. 17*) que l'énergie dissipée est maxima pour une période d'environ 8 minutes; elle semble tendre vers une limite différente de zéro, quand la période prend de très grandes valeurs.

La puissance dépensée par cycle (tableau n° 17 et figure 18, où elle est exprimée en centimètres carrés d'aire, par minute), diminue rapidement quand la période augmente.

L'énergie croît en même temps que l'amplitude du champ (tableau n° 16 et figure 19), d'après une loi qui paraît d'abord exponentielle; puis, moins vite que ne l'indique une telle loi, les courbes représentatives s'infléchissant légèrement vers l'axe des abscisses. Si, comme beaucoup d'observateurs l'ont trouvé, l'énergie est proportionnelle à une puissance du champ maximum à exposant constant, elle sera représentée en coordonnées logarithmiques, par une ligne droite. Nous avons fait cette construction (*fig. 20*); voici les logarithmes utilisés :

TABLEAU N° 17.

ÉNERGIE, COORDONNÉES LOGARITHMIQUES.

CHAMP	PÉRIODE, 8 MINUTES		PÉRIODE, 28 MINUTES	
	Log. V	Log. W	Log. V	Log. W
5 volts.	0,69 897	1,51 851	0,69 897	1,22 011
10 »	1,00 000	2,04 922	1,00 000	1,70 757
15 »	1,17 609	2,34 242		
20 »	1,30 103	2,54 777	1,30 103	2,36 173
25 »	1,39 794	2,68 845		
30 »	1,47 712	2,78 604	1,47 712	2,63 043

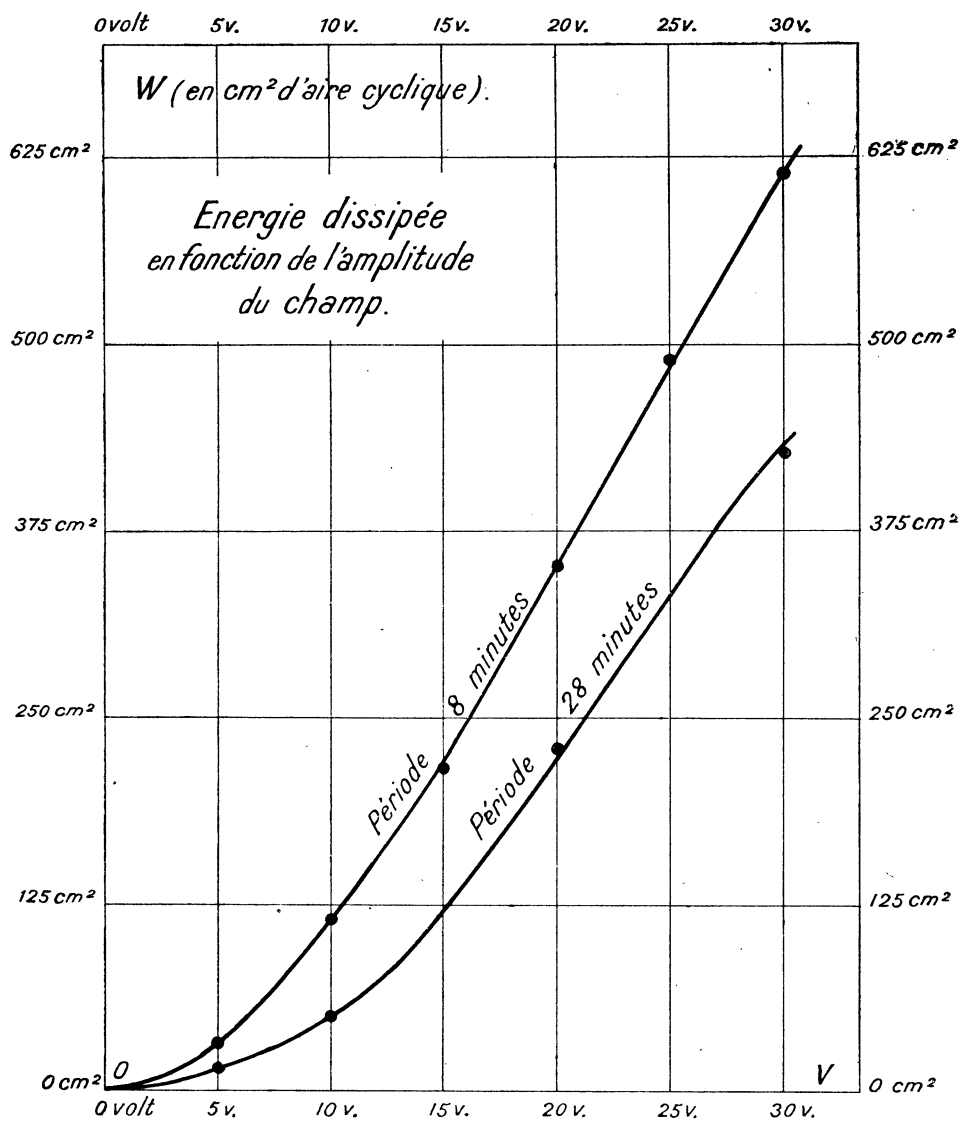


Fig. 19

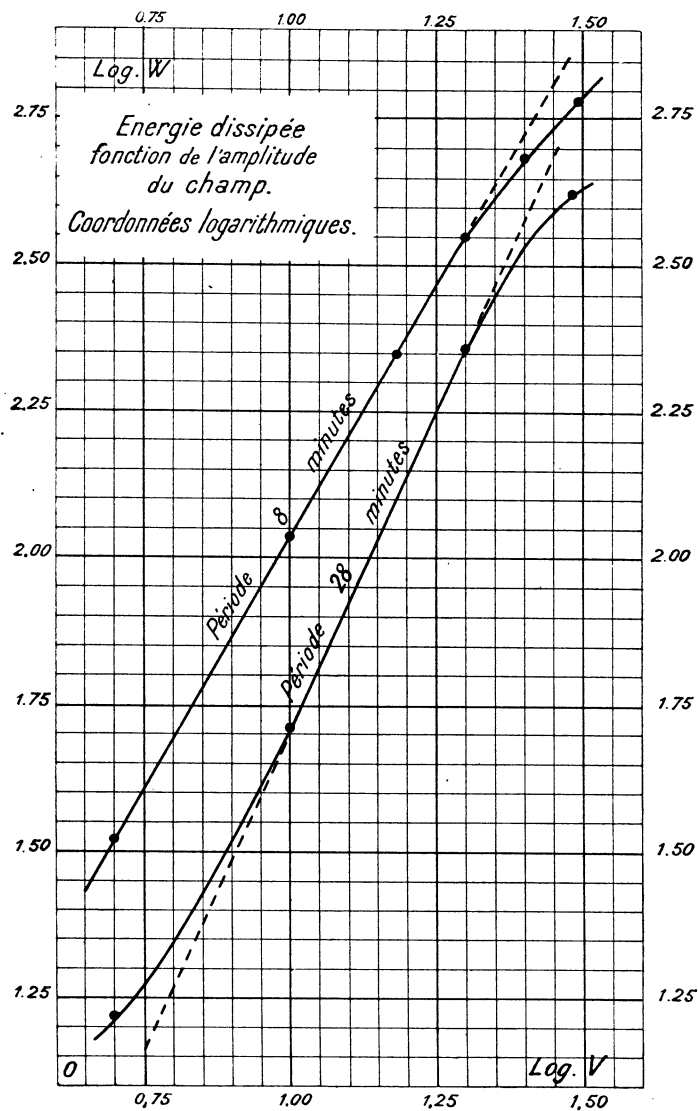


Fig 20

Les courbes obtenues ne sont qu'en partie rectilignes; il faut en conclure que dans nos expériences, l'énergie ne peut être calculée à partir d'une puissance déterminée de l'amplitude du champ. On voit encore sur les figures 19 et 20, comment la période vient modifier les phénomènes.

CHAPITRE V

Les phénomènes d'hystérésis dans divers diélectriques.

Nous avons encore étudié la polarisation dans quelques autres diélectriques : fibre, soufre, paraffine ordinaire (t. de fusion 52° C.), diélectrine et paraffine dure (t. de fusion 74° C.) assujettis aux mêmes conditions expérimentales et nous avons tracé leurs courbes cycliques.

Les résultats de cette étude sont exposés dans le présent chapitre.

Fibre. — L'échantillon de fibre qui a servi dans nos expériences, est une plaque carrée de 20 centimètres de côté, ayant exceptionnellement 1 centimètre d'épaisseur (au lieu de 14 millimètres).

Les cycles de polarisation avaient :

Amplitude 10 volts, période 8 minutes;

— 10 — — 28 —
— 20 — — 8 —

Nous avons obtenu (tableaux 18 et 19) :

TABLEAU N° 18.

POLARISATION DE LA FIBRE

Amplitude du champ, 10 volts.

Périodes, 8 minutes et 28 minutes.

CHAMP	8 MINUTES	28 MINUTES
	$\int$	$\int$
10 volts.	4.464	4.522
5 »	2.530	2.350
0 »	298	190
— 5 »	— 2.134	— 2.132
— 10 »	— 4.462	— 4.526

Les aires limitées par les courbes cycliques, ont respectivement pour valeur :

29,8 centimètres carrés, pour la période de 8 minutes;

19,0 — — — 28 —

TABLEAU N° 19.

POLARISATION DE LA FIBRE

Amplitude du champ, 20 volts.

Période, 8 minutes.

CHAMP	β
20 volts.	9.604
10 »	5.056
5 »	2.626
0 »	388
— 5 »	— 1.792
— 10 »	— 4.236
— 20 »	— 9.606

L'aire correspondante vaut 77,6 centimètres carrés.

Nous avons représenté sur le même graphique (*fig. 21*) comparativement les courbes d'hystérésis de la fibre et de la colophane, soumises au même cycle de polarisation : amplitude, 20 volts ; période, 8 minutes. Elles sont extrêmement différentes : celle de la fibre est un parallélogramme très allongé (l'angle au sommet est inférieur à 2 degrés) ; au contraire, celle de la colophane, de forme lenticulaire, a ses branches en arc de cercle et, doublement symétrique, admet pour diamètre la droite qui unit ses sommets. En ces points, l'intensité de polarisation dans la fibre vaut environ sept fois celle qui existe dans la colophane, ce qui redresse singulièrement sa courbe cyclique, dont l'aire est seulement le cinquième de celle de la colophane.

Les autres courbes d'hystérésis de la fibre, pour les cycles d'amplitude 10 volts et de périodes 8 et 28 minutes (tableau n° 18), qui ne sont pas représentées ici, présentent les mêmes particularités, avec cette forme de parallélogramme d'angle très aigu, à branches très voisines.

Soufre. — Cycles de polarisation d'amplitude 10 volts et de périodes 8 et 16 minutes. Les résultats sont dans le tableau n° 20.

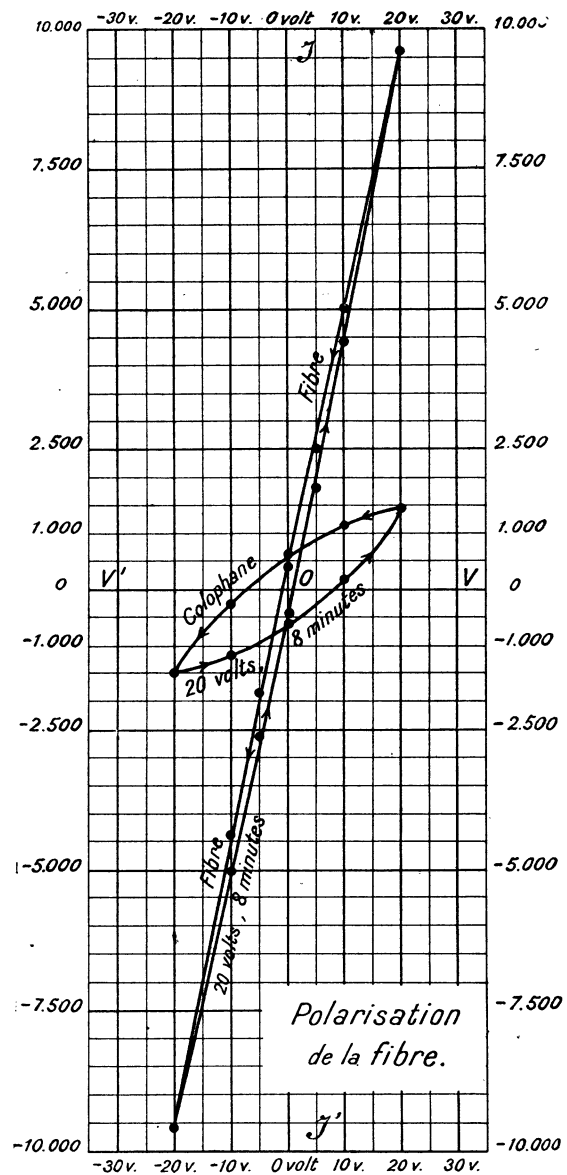


Fig. 21

TABLEAU N° 20.

Polarisation du soufre.

CHAMP	8 MINUTES	16 MINUTES
	$\mathcal{J}$	$\mathcal{J}$
10,0 volts.	910	880
7,5 »	880	870
5,0 »	810	800
2,5 »	730	600
0,0 »	560	360
— 2,5 »	+ 110	— 110
— 5,0 »	— 390	— 420
— 7,5 »	— 720	— 640
— 10,0 »	— 910	— 880

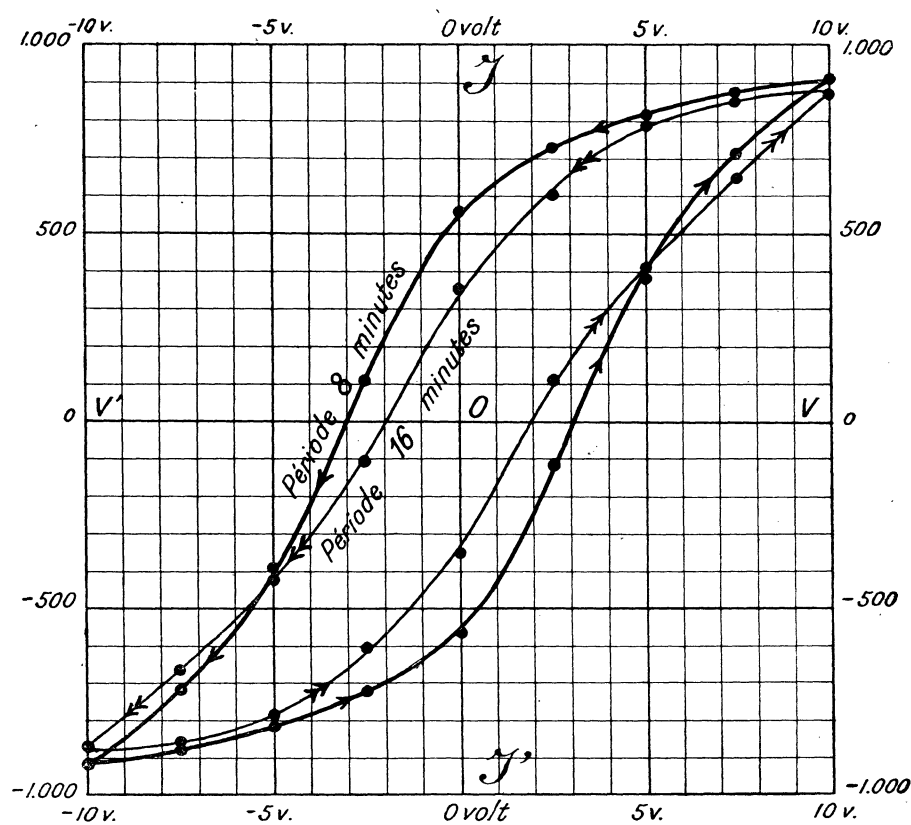


Fig. 22 — Soufre.

Les courbes d'hystérésis du soufre, représentées dans la figure 22, ont beaucoup d'analogie avec les courbes d'aimantation du fer. Les aires limitées sont :

104,0 centimètres carrés (période 8 minutes);
74,4 — — — — 16 —

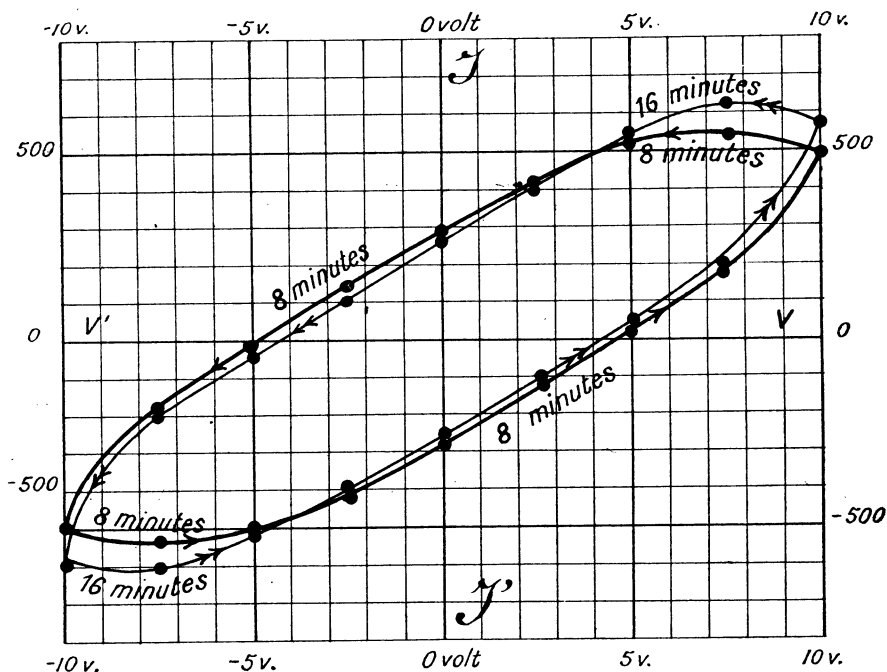


Fig. 23 — Paraffine ordinaire (52°c.)

Paraffine ordinaire et paraffine dure. — La première fond à la température de 52° C., la seconde à 74° C.; ces points de fusion ont été vérifiés.

Ces paraffines ont été toutes les deux, soumises à des champs d'amplitude 10 volts et de périodes 8, 16 et 28 minutes. Les résultats et les courbes sont respectivement dans le tableau n° 21 et dans les figures 23 (paraffine ordinaire) et 24 (paraffine dure).

TABLEAU N° 21.

Polarisation des paraffines.

CHAMP	8 MINUTES		16 MINUTES		28 MINUTES	
	52° C. J	74° C. J	52° C. J	74° C. J	52° C. J	74° C. J
10,0 volts.	500	484	570	590	570	602
7,5 »	528	520	618	610		
5,0 »	512	454	532	554		
2,5 »	430	370	400	382		
0,0 »	270	228	250	228	236	208
— 2,5 »	138	110	110	14		
— 5,0 »	— 24	— 34	— 48	— 188		
— 7,5 »	— 166	— 166	— 200	— 346		
— 10,0 »	— 500	— 484	— 570	— 590	— 570	— 600

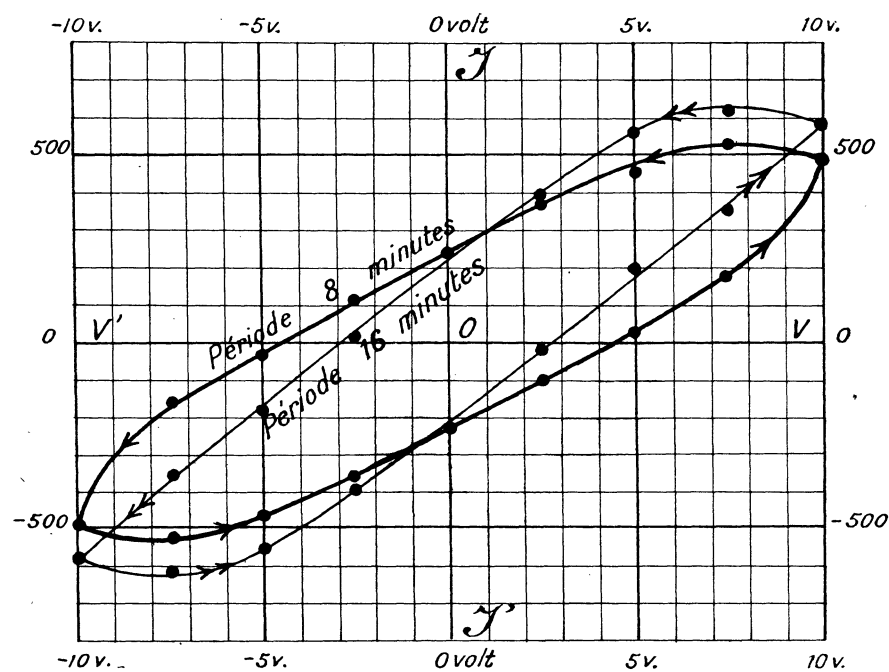


Fig. 24 — Paraffine dure (74°C.)

Les courbes cycliques ont une forme trapue; les deux branches, en grande partie rectilignes et parallèles, terminées par des arcs de longueur inégale, leur donnent une certaine ressemblance avec des parallélogrammes à sommets obtus arrondis. Seules, elles possèdent sur leur branche de retour, un MAXIMUM VÉRITABLE : la polarisation augmentant d'abord, à partir du sommet, quand le champ décroît en valeur absolue; ce maximum a lieu pour $V = 7,5$ volts, environ.

Les aires valent respectivement :

	Période 8 minutes.	Période 16 minutes.
Paraffine ordinaire.....	87,2	84,8
Paraffine dure.....	78,4	65,6

centimètres carrés.

Diélectrine. — Elle est formée de :

Soufre en canons.....	87,5
Paraffine ordinaire.....	12,5

Les champs de polarisation ont une amplitude de 10 volts et des périodes de 8 et de 16 minutes.

Voici les résultats :

TABLEAU N° 22.

Polarisation de la diélectrine.

CHAMP	8 MINUTES	16 MINUTES
	J	J
10,0 volts.	782	672
7,5 »	740	640
5,0 »	672	584
2,5 »	540	470
0,0 »	400	300
— 2,5 »	160	122
— 5,0 »	— 72	— 110
— 7,5 »	— 550	— 358
— 10,0 »	— 782	— 672

Le graphique correspondant (*fig. 25*) donne en trait plein les courbes d'hystérésis de la diélectrine, et en même temps pour comparaison, celles du soufre (trait pointillé) et de la paraffine (trait mixte). On peut remarquer que dans chaque période, la courbe cyclique de la diélectrine rappelle par sa forme, celle de chacun

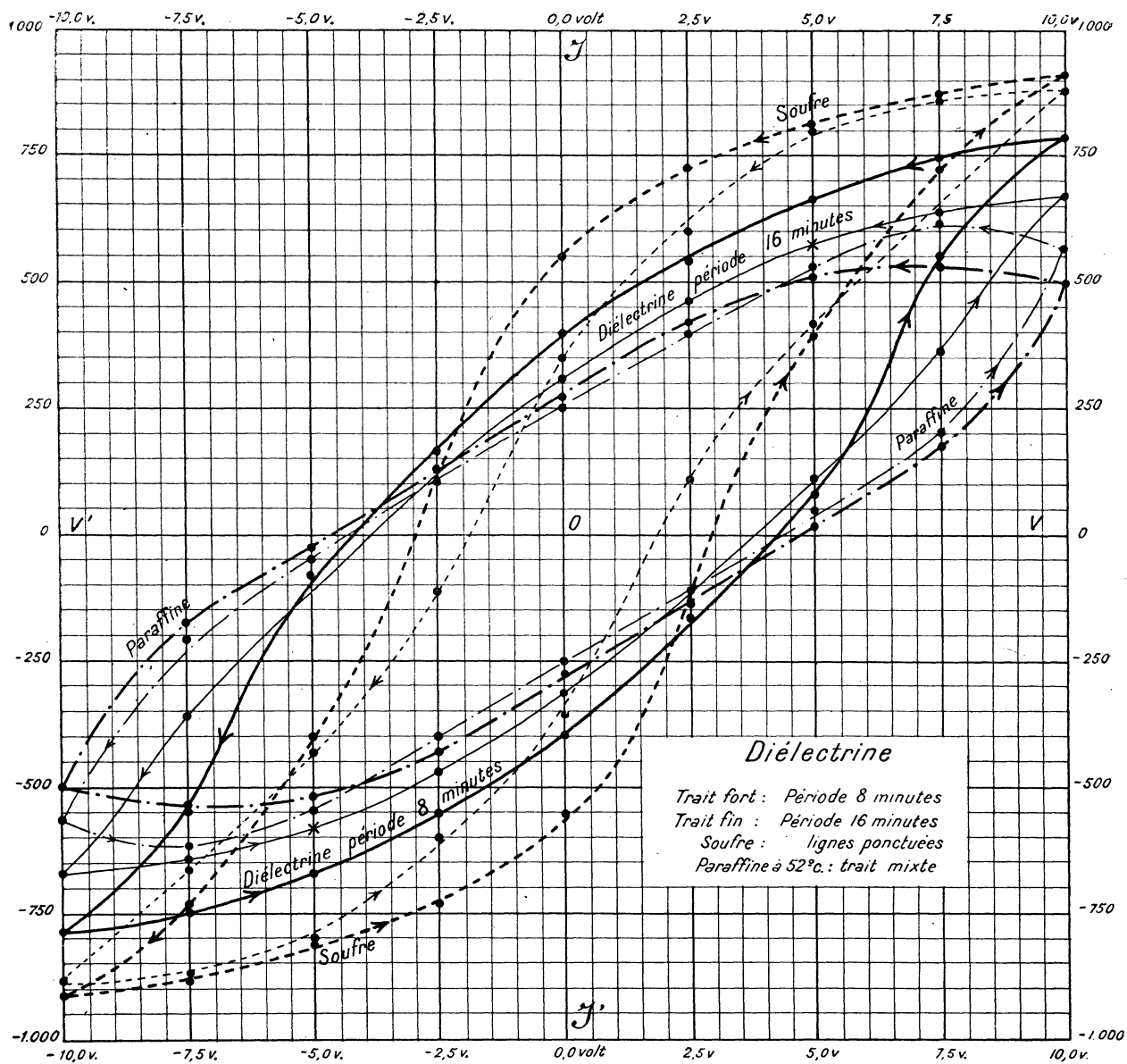


Fig.25

de ses constituants, en se rapprochant surtout de celle de la paraffine, dont elle possède l'allure massive, avec une courbure plus accentuée des branches; au voisinage des sommets, l'influence du soufre prédomine : on retrouve sur la branche d'aller la concavité et la pointe aiguë de la courbe d'hystérésis du soufre.

Les aires embrassées valent respectivement en centimètres carrés, 94,4 (période 8 minutes) et 81.6 (période 16 minutes).

Il nous a paru intéressant de rassembler dans les deux tableaux suivants, les résultats obtenus dans l'étude de ces différents diélectriques.

COMPARAISON DES PROPRIÉTÉS DES DIFFÉRENTS DIÉLECTRIQUES

TABLEAU N° 23.

Amplitude du champ, 10 volts.
Période, 8 minutes.

	FIBRE	SOUFRE	COLOPHANE	DIÉLECTRINE	PARAFFINE	
					52° C.	74° C.
<i>Polarisation</i>						
aux sommets...	4.464	910	900	782	500	484
maxima.....					528	520
rémanente.....	298	560	360	400	270	228
temporaire.....	4.166	350	540	382	258	292
<i>Champ coercitif</i> (en volts).....	1,2	2,9	3,9	4,4	4,8	4,1
<i>Aire du cycle</i> (en cm ²).....	29,8	104,0	112,0	94,4	87,2	78,4

TABLEAU 24.

Amplitude du champ, 10 volts.
Période, 28 minutes pour la fibre.
Période, 16 minutes pour les autres diélectriques.

	FIBRE	SOUFRE	COLOPHANE	DIÉLECTRINE	PARAFFINE	
					52° C.	74° C.
<i>Polarisation</i>						
aux sommets...	4.526	880	822	672	570	590
maxima.....					618	610
rémanente.....	190	360	274	300	250	228
temporaire.....	4.336	520	548	372	368	382
<i>Champ coercitif</i> (en volts).....	0,7	2,0	3,2	3,9	4,3	2,7
<i>Aire du cycle</i> (en cm ²).....	19,0	74,4	83,6	81,6	84,0	65,0

Par la comparaison de ces nombres, on voit que les phénomènes de polarisation et d'hystérésis sont du même ordre de grandeur dans ces différents diélectriques, la fibre exceptée; dans cette substance, à une polarisation aux sommets beaucoup plus grande correspondent une hystérésis et une viscosité notablement plus faibles (c'est pour rendre évidente l'existence de la viscosité qu'on a pris plus longue la seconde période); la déperdition d'énergie y est aussi beaucoup plus petite. Les deux variétés de paraffine ont des propriétés diélectriques assez voisines.

Ensemble des résultats.

Voici les principaux faits expérimentaux établis dans ces recherches :

Résistance électrolytique. — Pour former une résistance liquide qui demeure homogène pendant l'électrolyse (exception faite pour la région des électrodes), la concentration de l'électrolyte doit être supérieure à une certaine valeur, d'ailleurs très petite. (Pour les solutions aqueuses sulfuriques, 0,000 500).

Polarisation diélectrique. — L'étude systématique en a été faite sur la colophane landaise.

1° *Accommodation des cycles de polarisation.* — Ils se ferment après un petit nombre de parcours. (Une vingtaine tout au plus).

2° *Influence de la durée de la période des cycles.* — La forme des courbes d'hystérésis en dépend beaucoup : pour des périodes de durée moyenne (de 4 à 16 minutes), elles sont trapues et à branches *uniquement* convexes; les périodes étant ou très courtes ou extrêmement longues, chacune des branches, d'abord convexe en s'éloignant d'un sommet, devient concave en s'approchant de l'autre : les courbes cycliques sont analogues aux courbes d'aimantation du fer.

Les valeurs de la polarisation aux sommets, rémanente et temporaire, croissent d'abord avec la période, passent à peu près ensemble par un maximum pour une période de 8 minutes, décroissent et paraissent tendre vers une limite différente de zéro, pour des périodes considérables. En même temps, les courbes d'hystérésis, suivant l'allure de la polarisation, se redressent et s'élargissent jusqu'à la période du maximum; puis, elles se resserrent et s'inclinent vers l'axe des abscisses. Le champ de dépolarisation (champ coercitif) varie dans le même sens et prend sa valeur maxima pour la même période de 8 minutes; il tend aussi vers une limite non nulle, quand la période devient très grande.

3° *Influence de l'amplitude du champ.* — Il paraît exister une limite à la grandeur de la polarisation (saturation diélectrique) quand on donne à cette amplitude de très grandes valeurs.

A période constante, les courbes cycliques éprouvent avec les variations du champ maximum, des modifications progressives de forme, dont l'importance dépend beaucoup de la durée des parcours cycliques. A mesure que le champ augmente, elles s'étirent en devenant plus pointues; la courbure de l'extrémité convexe de chaque branche diminue, tandis que celle de l'extrémité concave devient plus

grande. Pour des champs considérables, elles tendent à prendre l'allure des courbes d'aimantation.

4° *Energie dissipée.* — L'amplitude du champ étant invariable, l'énergie absorbée passe par un maximum, en même temps que la polarisation, pour la période de 8 minutes; elle tend vers une limite différente de zéro, quand la période croît indéfiniment. Dans ces conditions de champ, la puissance consommée, représentée en fonction de la période par une courbe d'apparence hyperbolique, décroît très rapidement quand cette période augmente.

A période constante, l'énergie croît en fonction du champ maximum, suivant une loi qui semble exponentielle; cependant, par l'emploi des coordonnées logarithmiques, nous avons pu reconnaître qu'il n'en est rien.

Autres diélectriques. — Dans tous apparaît l'influence de la période; il en résulte que dans tous l'hystérésis est visqueuse.

Les deux variétés de paraffine sont les seuls diélectriques où nous avons constaté l'existence d'un véritable maximum de la polarisation, se plaçant un peu après le sommet, sur la branche de retour de la courbe d'hystérésis, ce qui dénote une viscosité exceptionnelle, également démontrée par l'allure des courbes cycliques.

Les courbes d'hystérésis de la diélectrine sont intermédiaires entre celles de chacun de ses constituants, à valeur égale de la période.

La fibre est, de tous les diélectriques étudiés, celui qui présente les plus faibles phénomènes d'hystérésis; la grande valeur de la polarisation redresse étrangement sa courbe cyclique, qui se rapproche beaucoup de l'axe des ordonnées. Son emploi dans la construction des condensateurs paraît particulièrement avantageux.

