



HAL
open science

Sur l'hystérésis diélectrique

F. Beaulard

► **To cite this version:**

F. Beaulard. Sur l'hystérésis diélectrique. J. Phys. Theor. Appl., 1900, 9 (1), pp.422-437.
10.1051/jphystap:019000090042201 . jpa-00240459

HAL Id: jpa-00240459

<https://hal.science/jpa-00240459>

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

SUR L'HYSTÉRÉSIS DIÉLECTRIQUE ;

Par M. F. BEAULARD.

I. — HISTORIQUE ET CONSIDÉRATIONS PRÉLIMINAIRES.

C'est Siemens ⁽¹⁾ qui paraît avoir constaté le premier, dès 1861, l'échauffement de la paroi de verre d'une bouteille de Leyde chargée, et dans leurs travaux classiques sur la dilatation électrique, MM. Righi et Duter ont dû tenir compte de cette augmentation de température ; mais la dissipation d'énergie qui se produit sous forme de chaleur, dans l'intérieur d'un diélectrique soumis à des actions électriques périodiquement variables, n'a été observée que beaucoup plus tard. C'est ainsi que MM. Naccari et Bellati ⁽²⁾, opérant avec un condensateur fermé à diélectrique liquide (pétrole), et de forme analogue à celle utilisée par Duter, ont constaté un échauffement manifeste du verre et du pétrole, comme conséquence de la polarisation variable, produite dans le diélectrique, lorsqu'on met les armatures en relation avec le secondaire d'une bobine d'induction, sans pouvoir néanmoins fixer les lois du phénomène. M. Borgman ⁽³⁾, par l'emploi d'un dispositif analogue, quoique plus précis, est arrivé à un résultat identique, pour le verre d'un condensateur soumis à l'électrisation intermittente d'un système de charges et de décharges successives, l'échauffement observé étant à peu près proportionnel au carré de la différence de

⁽¹⁾ SIEMENS, *Monatsber d. Berl. Akad.*, oct. 1861.

⁽²⁾ NACCARI et BELLATI, *Atti di Torino*, t. XVII, p. 26, 3, 1882; — et *J. de Phys.*, 2^e série, t. I, p. 430, 1882.

⁽³⁾ J. $\frac{1}{2}$ BORGMAN, *Journal russe de la Société de phys. et de chim.*, t. XVIII, 1886, — et *J. de Phys.*, 2^e série, t. VIII, p. 217; 1888.

potentiel de charge. Néanmoins, malgré ces recherches antérieures, la question de l'hystérésis diélectrique n'a été vraiment posée, sous sa forme actuelle, qu'en 1892, à la suite des recherches de M. Steinmetz ⁽¹⁾; ce physicien, — en soumettant un condensateur en papier paraffiné (3 microfarads), à des charges alternatives de 170 fréquences par seconde, sous un voltage maximum de 80 ou de 230 volts, — trouva que l'énergie dissipée sous forme de chaleur, dans un diélectrique placé dans un champ électrostatique alternatif, est proportionnelle au carré de l'intensité maximum du champ; et par analogie avec ce qui a lieu lorsque l'acier ou le fer doux sont soumis à des forces magnétisantes ayant le caractère cyclique, M. Steinmetz fut ainsi conduit à admettre l'existence d'une sorte d'hystérésis diélectrique. Peu de temps après, M. Kleiner ⁽²⁾, à la suite de mesures effectuées au moyen d'un élément thermo-électrique, sur l'échauffement d'un condensateur, soumis à une charge alternative, arrivait à une conclusion analogue et admettait l'existence d'une hystérésis faible, mais néanmoins mesurable, au moins dans le cas de la paraffine, qui était le diélectrique employé dans ses recherches.

On peut aborder le sujet par une autre voie; on conçoit, en effet, qu'il soit possible de mesurer l'énergie absorbée par le diélectrique, non plus sous la forme calorique, mais sous la forme équivalente de travail mécanique; c'est ainsi que M. R. Arno ⁽³⁾, à qu'on doit de nombreux et intéressants travaux, sur les phénomènes d'hystérésis, équilibre par un couple de torsion le couple de rotation d'un cylindre creux isolant suspendu dans un champ électrostatique tournant; dans ce mode opératoire, la direction du champ polarisant rencontre à chaque instant des régions différentes du diélectrique considéré; mais, à cause du retard d'établissement de la polarisation sur le champ polarisant, ces deux directions font un certain angle, et il en résulte une force attractive appliquée au cylindre diélectrique, dont la composante tangentielle produit la rotation observée,

Soient d , la déviation mesurée, proportionnelle à l'énergie W des forces électriques mises en jeu, et V la différence de potentiel maximum du champ tournant, proportionnelle à l'induction électrosta-

(1) STEINMETZ, *Electrotechnische Zeitschrift*, 29 avril 1892; — *Electr. Engineer*, New-York, 16 mars 1892; *Lumière électrique*, t. XLIV, p. 95, 2 avril 1892.

(2) KLEINER, *Wied. Ann.*, t. L, p. 138; 1893.

(3) R. ARNO, *Rendic. d. Acc. Lincei*, 16 oct. 1892, 30 avril, 12 nov. 1893, 18 mars, 17 juin, 18 nov. 1894.

tique maximum B; M. R. Arno représente les résultats de ses expériences par une expression de la forme :

$$(1) \quad d = hV^\epsilon,$$

l'exposant ϵ ayant du reste une valeur différente suivant la valeur de B; ainsi pour $B = 4,75$ unités électrostatiques C.G.S., ϵ est égal à 4,65. Dans cette formule, la vitesse de variation du cycle n'intervient pas, de telle sorte qu'il semble que l'on se trouve en présence d'un effet dû à l'hystérésis; mais, dans un autre travail ⁽¹⁾, effectué avec des fréquences diverses, M. R. Arno attribue plutôt la perte d'énergie produite dans le diélectrique, placé dans un champ tournant, à l'existence d'une sorte d'*hystérésis visqueuse*, provenant du retard qui existe entre l'instant où la force électrique est appliquée et celui où la polarisation du diélectrique prend la valeur correspondante à cette force; l'énergie dissipée est, en effet, d'autant plus grande que la vitesse de rotation du champ est plus considérable, ce qui montre bien qu'elle est due à un retard dépendant du temps, c'est-à-dire à un phénomène de viscosité. Dans l'intervalle des recherches précédentes, M. Janet ⁽²⁾, abordant le même sujet, avait institué des expériences, dans le but d'étudier les phénomènes de charge d'un condensateur, soumis à des oscillations rapides, lorsque pour un réglage convenable de sa capacité et de la self-induction du circuit le courant de charge affecte la forme oscillatoire, et de rechercher en même temps si, dans de telles conditions, la notion de capacité subsiste, c'est-à-dire s'il y a un rapport rigoureusement constant entre la charge et la différence de potentiel correspondante. Or l'expérience a montré qu'il n'en était rien, et qu'à différence de potentiel égale les charges sont moins grandes pour les potentiels croissants que pour les potentiels décroissants; il y a, par suite, un retard des charges sur les différences de potentiel, pour un diélectrique solide soumis à des oscillations rapides de période relativement lente ($\frac{1}{1000}$ de seconde), et la courbe figurative des charges en fonction des différences de potentiel présente nettement la forme d'une boucle, et non celle d'une droite passant par l'origine.

(1) R. ARNO, *Il Nuovo Cimento*, 4^e série, t. V, 1^{er} semestre 1897; — et *Journ. de Phys.*, 3^e série, t. VIII, p. 607; 1898. — Voir aussi *Rendic. d. Lincei*. t. VII, p. 167, 1899, et *Eclairage Elect.*, 19 mars 1900.

(2) JANET, *Comptes Rendus Ac. Sciences*, t. CXVI, p. 373; 1892; — et *Journ. de Phys.*, 3^e série, t. II, p. 337; 1893.

Quelle est la cause d'un pareil retard, dont on trouve en physique de nombreux exemples? On sait que les physiciens rattachent ces phénomènes à deux causes bien différentes : l'hystérésis et la viscosité ou hystérésis visqueuse.

Dans le cas de l'hystérésis proprement dite, on a deux effets différents pour une même cause, suivant l'action de cette cause et, quelle qu'en soit la durée, l'effet obtenu ne dépendant que de la grandeur et du sens de la cause agissante et nullement de la vitesse avec laquelle elle agit. Il en est autrement pour la viscosité : pour une même cause agissant dans un sens déterminé, l'effet obtenu dépend, au contraire, du temps d'action de la cause agissante, c'est-à-dire de sa lenteur ou de sa rapidité ; si la cause agit très rapidement, l'effet peut même n'avoir pas le temps de se produire, tandis que, si elle est lentement et progressivement variable, l'effet suit la variation de la cause et tend vers la valeur définitive que lui assigne la grandeur et le sens de cette action, la viscosité s'opposant d'autant moins à l'établissement de cette valeur définitive que les variations sont plus lentes. Il peut par suite arriver que, dans certains cas, les phénomènes de retard soient dus à l'hystérésis ou à la viscosité ou aux deux causes réunies; il est, du reste, possible de les séparer par l'emploi judicieux de variations cycliques convenables ; en particulier pour des cycles très lentement parcourus, les phénomènes de viscosité disparaissent et les phénomènes d'hystérésis subsistent seuls, puisqu'ils sont indépendants de la vitesse de variation cyclique. Il ne me paraît pas inutile de remarquer en passant, que les phénomènes dits de polarisation tournante, utilisés dans les expériences de M. R. Arno, pour lesquels la cause agissante est *constante en grandeur*, mais animée d'une vitesse de rotation uniforme, sont particulièrement propres à déceler l'hystérésis visqueuse, mais impuissants, croyons-nous, à mettre en évidence l'hystérésis proprement dite, à cause précisément de la constance de l'intensité de la force polarisante dont la direction seule varie.

Avant de reprendre l'exposé théorique des recherches qui ont été faites sur le sujet qui nous occupe, je tiens à rappeler brièvement, — à cause de leur ingéniosité, — quelques-unes des vues théoriques émises par M. Hess ⁽¹⁾ sur la constitution possible des diélectriques ; ce physicien, rejetant absolument toute idée d'hystérésis ou de viscosité,

(1) Hess, *Journ. de Phys.*, 3^e série, t. II, p. 143 ; 1893.

envisage les choses tout autrement, en admettant la simple intervention des conceptions intérieures à travers les diélectriques hétérogènes ; en développant la théorie si connue de Maxwell, Hess, par l'emploi d'un assemblage de condensateurs groupés d'une certaine façon, arrive à une sorte d'imitation des principaux phénomènes observés dans les diélectriques hétérogènes, tels que, par exemple, l'existence du résidu électrique, etc. Un diélectrique hétérogène est constitué par des corpuscules conducteurs, ayant un pouvoir inducteur spécifique fini, disséminés à l'intérieur d'un isolant parfait ; il en résulte qu'une tranche d'un pareil isolant peut être assimilée, schématiquement, à un ensemble de deux condensateurs en cascade, l'un de capacité C et de résistance infinie, l'autre de capacité C' shunté sur une résistance ρ . Dans cet ordre d'idées, l'échauffement du diélectrique s'explique tout naturellement par le courant dérivé à travers le condensateur C' , et la théorie de Hess, pour laquelle je renvoie au mémoire original ⁽¹⁾ montre que la quantité d'énergie absorbée, à peu près indépendante du temps, dans le cas d'une force électromotrice constante E appliquée aux bornes du système CC' , augmente au contraire rapidement avec la fréquence n , dans le cas d'une force électromotrice alternative $E \sin \omega t$, pour diminuer ensuite ; de telle sorte que l'énergie dissipée en chaleur atteint un maximum pour une certaine fréquence ; elle est, en outre, proportionnelle au carré E^2 de la force électromotrice maxima. On voit qu'en définitive M. Hess nie l'hystérésis et la viscosité et ne conserve que l'idée des conceptions intérieures ; voici sur quels faits expérimentaux ce physicien fonde sa manière de voir : tout d'abord l'hystérésis doit être écartée : il résulte, en effet, des recherches de M. J. Curie ⁽²⁾, que lorsqu'on passe *lentement* d'une force électromotrice à une autre, il y a proportionnalité rigoureuse entre les intensités du courant de charge aux diverses époques et la force électromotrice correspondante appliquée au condensateur ; ensuite l'hypothèse d'une viscosité n'est, à son tour, guère probable : il paraît en effet bien difficile d'admettre, d'après le résultat bien connu, que les diélectriques homogènes ne donnent pas de résidus électriques ⁽³⁾, que deux iso-

(1) HESS, *Ecl. électr.*, t. III, 240 ; 1895.

(2) J. CURIE, *Ann. de chim. et de phys.*, 7^e série, t. XVII et XVIII ; 1889.

(3) ROWLAND et NICHOLS, *Ph. Mag.*, (5), II, p. 44 ; 1881 ; — HERTZ, *Ann. Wied.*, t. XX, p. 279 ; 1883 ; — DIETERICI, *Ann. Wied.*, t. XXV, p. 545 ; 1883 ; — ARONS, *Ann. Wied.*, t. XXXV, p. 290 ; 1888 ; — ΜΥΡΑΚΟΑ, *Ann. Wied.*, t. XL, p. 329 ; 1890.

lants purs, séparément sans viscosité, puissent constituer un diélectrique complexe doué de viscosité *réelle* ; il ne peut évidemment être ici question que d'une viscosité *apparente* (c'est du moins l'opinion de M. Hess) et non d'une propriété moléculaire des corps, cette viscosité apparente ayant son origine dans l'hétérogénéité de la substance et non dans une sorte d'inertie de la matière.

Cette conception de la dissipation de l'énergie à travers les particules conductrices du diélectrique solide a été également émise par M. Ch. Borel ⁽¹⁾, à la suite d'observations faites sur la rotation d'un disque de papier paraffiné, placé dans un champ électrostatique alternatif, à variations lentes ($\frac{1}{50}$ de seconde environ).

Il est assez difficile de vérifier si l'hypothèse des conceptions intérieures de Hess, qui rend théoriquement compte des phénomènes observés, correspond à la réalité expérimentale, tandis qu'il est au contraire relativement facile de trancher la question entre la viscosité et l'hystérésis, puisqu'il s'agit en définitive de chercher si la perte d'énergie dépend ou ne dépend pas de la vitesse de variation du cycle parcouru ; en cherchant en particulier la loi de variation de l'énergie dissipée dans le diélectrique en fonction de la fréquence du champ alternatif employé, on pourra séparer l'effet dû aux propriétés hystérésiques de l'effet provenant de la viscosité, en considérant le cas limite d'une vitesse cyclique nulle, qui exclut tout phénomène possible de viscosité.

C'est dans cet ordre d'idées qu'ont été instituées les expériences de MM. A.-W. Porter et D.-K. Morris ⁽²⁾ ; ces physiciens ont expérimenté avec un condensateur à lame de paraffine, dont les armatures, d'abord au même potentiel, étaient portées *lentement* à une différence de potentiel V , au moyen d'une dérivation à contact glissant, prise sur le circuit d'une pile ; après quoi le condensateur était déchargé dans un galvanomètre balistique, et mis ensuite en court circuit ; dans une autre expérience on portait le condensateur à un potentiel $V' > V$, puis, sans le décharger, par un mouvement rétrograde du contact glissant, on revenait de nouveau au potentiel primitif V , et on effectuait alors la décharge dans le balistique ; ce dis-

⁽¹⁾ Ch. BOREL, *C. R. Ac. Sciences*, t. CXVI, p. 1192 ; — *Arch. de Genève*, t. XXX, p. 45 ; 1893.

⁽²⁾ A.-W. PORTER et D.-K. MORRIS, *The Electrician*, 12 avril 1895 ; — *Proc. Roy. Soc.*, t. LVII, p. 469, 1895 ; — *J. de Phys.*, 3^e série, t. V, p. 34 ; 1896.

positif permettait, par suite, d'effectuer la charge, à un potentiel donné, soit par des variations croissantes, soit par des variations décroissantes ; or l'expérience, dans les deux cas, donnant la même déviation galvanométrique, il n'y a pas lieu d'admettre l'existence d'une hystérésis ; cependant, d'après les physiciens anglais, un pareil condensateur n'est point exempt de ce qu'ils nomment l'effet visqueux, et ils appuient leur opinion sur cette observation qui fut faite, que la charge qui devrait être complète (à $\frac{1}{100}$ près) en $\frac{1}{20000}$ de seconde, si le circuit extérieur était seul le siège d'une dissipation d'énergie, se poursuit encore au bout de cinq secondes ; ce qui doit s'expliquer évidemment par le phénomène de la pénétration des charges, ou de l'absorption électrique ; dans tous les cas, le papier paraffiné est dénué d'hystérésis, ainsi que le prouve l'égalité des déviations galvanométriques, observées à potentiel croissant ou décroissant. M. Eister⁽¹⁾ est arrivé, de son côté, à une conclusion identique ; en étudiant un condensateur à papier paraffiné, soumis aux charges périodiquement variables d'un alternateur, ce physicien constata que la perte d'énergie dépend manifestement de la fréquence du courant alternatif ; c'est ainsi qu'elle est égale à zéro, pour une vitesse cyclique nulle ou infinie ; atteint un maximum pour une fréquence donnée, et se montre, du reste, proportionnelle au carré de la force électromotrice : tout cela est, en définitive, conforme à la théorie des conductions intérieures de M. Hess, dont il a été question plus haut⁽²⁾.

Il nous reste, pour épuiser l'historique du sujet, à mentionner les recherches de M. Schaufelberger⁽³⁾, qui, prenant comme point de

(1) EISTER, *Electrotechnische Zeitschrift*, 15 juin 1895 ; — *Ecl. électrique*, t. IV, p. 210 ; p. 210, août 1895.

(2) HESS, article sur l'hystérésis : *Ecl. élect.*, t. IV, p. 205 ; août 1895 ; — Eister est cité dans cet article ; je n'ai pu avoir son mémoire original.

(3) W. SCHAUFELBERGER, *Ann. Wied.*, t. LXV, p. 635 ; 1898, et t. LXVIII, p. 307 ; 1899 ; — *J. de Phys.*, 3^e série, t. VII, p. 683 ; 1898. Dans son mémoire, l'auteur cite dans l'historique du sujet MM. LOMBARDI (*Estratto dall'Electricista*, p. 5, 1896) et H.-F. WEBER (*Sitzungsberichte der Schweiz. naturf. gessellsch.* ; 1896) comme ayant employé la même méthode de recherche basée sur l'emploi du wattmètre. Je n'ai pu me procurer leurs mémoires ; j'ai seulement trouvé, dans les *Archives des sciences de Genève* (4^e période, t. II, p. 519 ; 1896), une note très concise ; d'après cette analyse, M. H.-E. Weber aurait employé un procédé sensible pour mesurer le retard dû à l'hystérésis (6 à 1.600 millièmes de seconde) et mis en œuvre une méthode ingénieuse pour mesurer l'énergie absorbée dans le diélectrique par suite de ce retard. Cette énergie est si faible que l'échauffement comporte quelque

départ une observation de Quincke, relative à l'amortissement des oscillations d'une sphère isolante dans un champ électrique *constant*, a mesuré la perte d'énergie dans un diélectrique soumis à une polarisation de direction variable, et non sous la forme mécanique d'un travail d'amortissement; après amortissement, la méthode employée consiste à faire osciller un ellipsoïde de la substance isolante, dans le champ d'un condensateur chargé et non chargé; pendant le mouvement oscillatoire, la direction constante de la polarisation rencontre des régions différentes de l'ellipsoïde, et dans le cas d'une hystérésis visqueuse, l'orientation du champ polarisant présente un retard t sur l'orientation du champ polarisant. La quantité d'énergie absorbée par hystérésis pendant la durée d'une oscillation se déduit de la connaissance du décrement logarithmique, au moyen de formules théoriques établies par M. Schaufelberger; dans le cas de la paraffine, la perte par hystérésis est faible; elle est proportionnelle au carré du champ polarisant.

II. — DESCRIPTION DE LA MÉTHODE ET RÉSULTATS.

J'ai repris, depuis plusieurs années, l'étude de cette question si controversée de l'hystérésis, et tenté de porter quelque clarté dans le débat; à cet effet j'ai utilisé la méthode de la détermination des aires cycliques; le dispositif employé ne diffère pas essentiellement de celui adopté par MM. Porter et Morris, dont j'ignorais le travail, au début de mes recherches; il est représenté par la figure (1) ci-dessous.

L'armature C' du condensateur co , étant en relation permanente avec la terre, l'autre armature C est reliée, au moyen d'un commutateur à bascule $\alpha\beta\gamma$ (position 1) et par l'intermédiaire d'un fil flexible f , à un contact mobile; celui-ci, porté par un petit chariot ch , est guidé dans son mouvement de translation horizontale par un système de rails rr' , et son extrémité, recourbée verticalement à angle droit, plonge dans une colonne AB de sulfate de cuivre en solution, contenue dans une gouttière creusée dans un bloc d'ébonite, long d'environ 1 mètre. Le milieu O de cette colonne est en communication constante avec la terre, tandis que les deux extré-

cent millièmes de degré (mesurés au bolomètre); les observations ne comportent qu'une lecture unique faite au moyen de l'électromètre à quadrant de Thomson?

mités A et B communiquent avec les pôles d'une batterie d'accumulateurs et sont, par suite de ce dispositif, respectivement aux potentiels $+V$ et $-V$ égaux et de signes contraires.

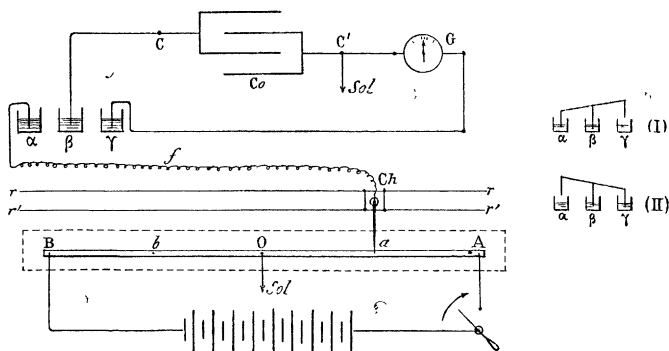


FIG. 1.

Le mode opératoire est le suivant: Le contact ch , disposé au début de l'expérience en 0 , est déplacé d'un mouvement uniforme, et amené au bout d'un temps t — (déterminé par le son d'un métronome taré sur un chronomètre) — en un point a de la colonne AB , correspondant à un certain potentiel $+v$, choisi peu différent de $\frac{1}{2}V$; à ce moment, par un rapide mouvement de bascule du commutateur, on passe de la position (I) à la position (II), ce qui décharge le condensateur à travers un galvanomètre G ; on obtient ainsi une déviation d ; on a soin de laisser le condensateur en court circuit pendant un temps suffisamment prolongé pour que toute trace de charge résiduelle disparaisse; ce résultat obtenu, le contact de nouveau ramené à 0 (pendant que le condensateur était en court circuit) est ensuite déplacé, uniformément, de façon à l'amener, après un temps $2t$, à l'extrémité A , c'est-à-dire à un potentiel de charge égal à $+V$; à ce moment, on procède à la décharge du condensateur à travers le galvanomètre, ce qui donne une déviation D ; après une mise en court-circuit et un retour du contact mobile au point 0 , tout est de nouveau prêt pour l'expérience suivante, particulièrement importante; elle consiste, en effet, à charger de nouveau le condensateur au même potentiel $+v$ que précédemment, mais par une variation de potentiels décroissants; à cet effet on déplace uniformément le contact mobile, de façon à lui

faire parcourir, pendant un temps égal à $3t$, le trajet $OaAa$; la décharge dans le galvanomètre donne une déviation d' , laquelle se montre en général supérieure à d , du moins lorsque le diélectrique est de composition complexe, comme la diélectrine.

On continue ainsi de la même façon, en faisant parcourir au contact le trajet $OaAaO$ pendant un temps $5t$; le trajet $OaAaOb$ pendant un temps $5t$, etc., et on ferme le cycle par le trajet $OaAaObBbOaA$, parcouru pendant le temps $10t$; en notant chaque fois la déviation galvanométrique, on a tous les éléments de la construction du cycle dont la durée totale de parcours $T = 10t$. Les expériences ont porté sur trois condensateurs : 1° à lame de paraffine pure ne touchant pas les armatures; 2° à lame de mica, condensateur Carpentier; 3° à diélectrine (mélange de soufre et de paraffine), coulée dans l'intervalle d'une série de plaques métalliques séparées par des cales en ébonite; ce condensateur est de faible capacité : (0,00026 microfarads).

Les résultats obtenus ont été les suivants.

1. — *Condensateur plan à paraffine.*

Avec ce condensateur, il n'a pas été possible de mettre en évidence la moindre trace d'hystérésis ou de viscosité, à cause, sans doute, de la faible intensité plutôt que de l'absence du phénomène; la courbe des charges en fonction des potentiels se réduit à une ligne droite; au cours de ces recherches, j'ai retrouvé le fait bien connu de l'absence de résidus électriques pour la paraffine pure et exempte de bulles d'air de façon à éviter, probablement, la polarisation intérieure, sous forme de double couche, à la surface de séparation air-paraffine.

2. — *Condensateur à lame de mica.*

Avec ce condensateur, la courbe représentative est *presque* une ligne droite; les déviations à potentiels décroissants sont un peu plus grandes qu'à potentiels croissants; la différence est faible, quoique fort nette; l'aire du cycle est presque nulle, ce qui est l'indice d'une faible dissipation d'énergie dans le diélectrique par hystérésis ou viscosité.

3. — Condensateur à diélectrique.

Le condensateur à diélectrique donne des courbes (charges en fonction des potentiels de charge) — affectant nettement la forme habituelle des cycles d'hystérésis, mais suivant la valeur de T , l'aire en est manifestement variable. Ce sont les résultats des expériences effectuées avec ce condensateur que nous allons seulement rapporter. Le tableau suivant, A, est relatif aux observations faites avec la série de voltages — 8; — 4; 0; + 4; + 8 volts, et pour des durées cycliques variant de $T = 4$ à $T = 600$ secondes.

TABLEAU A.

Potentiel de charge	$T = 4''$ d	$T = 10''$ d	$T = 50''$ d	$T = 100''$ d	$T = 600''$ d
+ 4 volts	+ 3	+ 5	+ 6	+ 6	+ 6
+ 8	+ 8	+ 10,5	+ 11,5	+ 12	+ 12
+ 4	+ 6	+ 7	+ 7	+ 7	+ 7
0	+ 2	+ 2	+ 1	+ 1	+ 1
— 4	— 3	— 3	— 3,5	— 5	— 8
— 8	— 8	— 10	— 10	— 11	— 12
— 4	— 6	— 6	— 6	— 6	— 8
0	— 1	— 1	— 1	— 1	— 0,5
+ 4	+ 4	+ 3	+ 3	+ 3	+ 6
+ 8	+ 8	+ 10,5	+ 11,5	+ 11,5	+ 12

La *fig. 2* ci-dessous représente les cycles du tableau A : une longueur égale à $0^{\text{cm}},5$ correspond à 1 volt en abscisses, et la même longueur, en ordonnées, représente, d'après le tarage du galvanomètre, $4,4 \cdot 10^{-10}$ coulombs; par suite 1 centimètre carré vaut $17,6 \cdot 10^{-10}$ joules; en évaluant l'aire des cycles en centimètres carrés, on a l'énergie W consommée par le diélectrique (volume total) et par cycle; d'où le tableau *a*.

TABLEAU a.

T en secondes	Aire en centim. carrés	W en joules
4	8	$1,408 \cdot 10^{-8}$
10	6	1,056 —
50	3,5	0,968 —
100	3	0,880 —
150	»	0,875 —
600	2,5	0,440 —

Pour une valeur plus grande de T, c'est-à-dire pour un cycle très

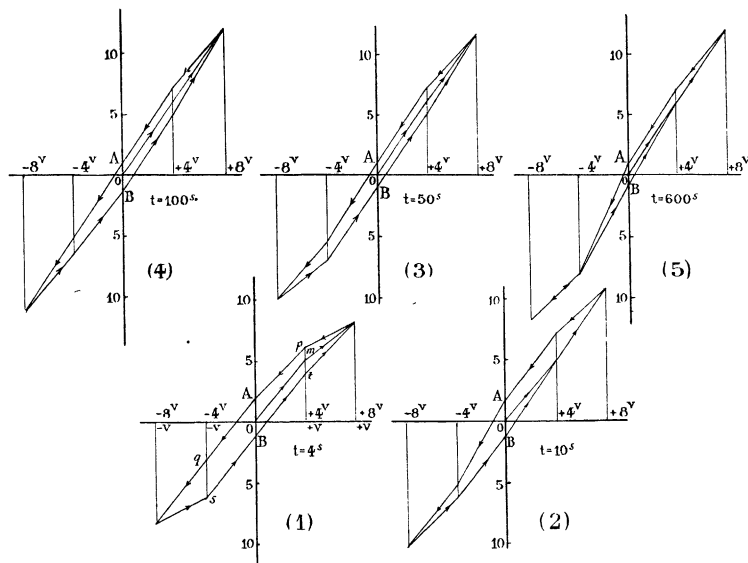


FIG. 2.

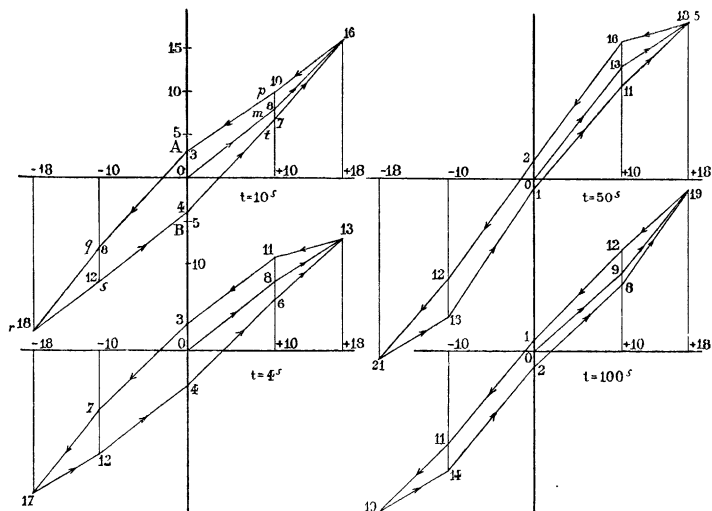


FIG. 3.

lentement parcouru, l'aire tend vers zéro; les décharges résiduelles

OA et OB (Voir les cycles A), obtenues lorsque le contact glissant est au milieu de la colonne de SO^4Cu , vont en diminuant quand la durée T augmente; en particulier, on a vérifié directement que, pour $T = 15$ minutes, l'aire du cycle est nulle; les lectures galvanométriques, pour un même potentiel de charge, sont les mêmes, quel que soit le sens de la variation.

Le tableau suivant, B, est relatif à un cycle de voltage oscillant entre $-18 + 18$ volts; et la figure 3 représente les cycles obtenus pour des valeurs de T différentes; de la mesure des aires, on déduit l'énergie absorbée correspondante à chaque durée cyclique T; les résultats sont consignés dans le tableau b.

TABLEAU B.

Potentiel de charge	T = 4" d	T = 10" d	T = 50" d	T = 100" d
+ 10 volts	+ 8	+ 8	+ 13	+ 9
+ 18	+ 13	+ 16	+ 18,5	+ 19
+ 10	+ 11	+ 10	+ 16	+ 12
0	+ 3	+ 3	+ 2	+ 1
- 10	- 7	- 8	- 12	11
- 18	- 17	- 18	- 21	- 19
- 10	- 12	- 12	- 16	- 14
0	- 4	- 4	- 1	- 2
+ 10	+ 6	+ 7	+ 11	+ 8
+ 18	+ 13	+ 16	+ 18,5	+ 19

TABLEAU b.

T en secondes	Aire en centim. carrés	W en joules
4	40	7,04 10^{-8}
10	34,25	5,33
50	27,75	4,78
100	23,25	4,09
150	»	3,45

Le tableau C correspond à un cycle de voltages oscillant entre -27 et $+27$ volts, toujours pour des valeurs différentes de T. On n'a pas représenté les cycles eux-mêmes, à l'échelle adoptée, la figure sortirait des limites du format.

TABLEAU C.

Potentiel de charge	T = 10° d	T = 50° d	T = 150° d	T = 300° d
+ 15 volts	+ 10	+ 11	+ 12	+ 15
+ 27	+ 23	+ 22,5	+ 24	+ 23
+ 15	+ 15	+ 18	+ 15	+ 17
0	+ 5	+ 3	+ 2	+ 1
- 15	- 10	- 12	- 14	- 18
- 27	- 20	- 27	- 24	- 26
- 15	- 14	- 16	- 16	- 18
0	- 4	- 3	- 2	- 3
+ 15	+ 11	+ 13	+ 12	+ 12
+ 27	+ 23	+ 22,5	+ 24	+ 23

on en déduit le tableau c.

TABLEAU c.

T en secondes	Aire en centim. carrés	W en joules
10	60,75	$10,69 \cdot 10^{-8}$
50	52,875	9,306
100	»	7,37
150	31,875	5,61
300	28,125	4,95

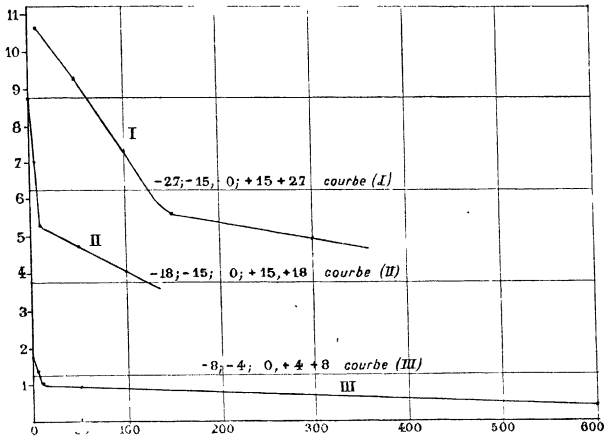


FIG. 4.

Il résulte des tableaux a, b, c, que l'énergie W, dissipée dans le diélectrique, varie avec la vitesse de variation du cycle et tend vers une valeur nulle, quand T augmente indéfiniment; cela ressort également de l'ensemble des courbes suivantes (I, II, III), obtenues en portant T

en abscisses et W en ordonnées ; ces courbes représentent respectivement les tableaux a , b , c , et mettent nettement en évidence le fait de la diminution de W quand T augmente.

On peut essayer de représenter les résultats de l'expérience par une formule semblable à celle donnée par M. Steinmetz pour l'hystérésis magnétique, c'est-à-dire de la forme :

$$(2) \quad W = aW^\varepsilon.$$

On calcule a et ε pour deux valeurs W^I et W^{II} , relatives à une même vitesse cyclique, et on compare ensuite W^{II} calculé d'après (2) avec W^{II} donné par l'observation.

C'est ainsi qu'a été obtenu le tableau suivant :

TABLEAU D.

T	ε	a	W calculé	W^{II} observé	obs. — calc.
50	1,86	0,0197	4,27	4,78	+ 0,51
100	1,74	0,0237	3,62	4,09	+ 0,47
150	1,52	0,0372	3,015	3,45	+ 0,43

Il est visible qu'une relation de la forme (2) ne s'applique pas, l'écart pouvant atteindre 12 0/0 environ.

De plus, si l'on construit les courbes de ε ou de a en fonction de la durée T du cycle, on constate que ε tend vers zéro et a vers l'infini, quand T croît au-delà de toute limite, ce qui donne pour l'énergie W , correspondante à un cycle infiniment lent, une valeur infiniment grande, conclusion contraire aux faits expérimentaux. Il faut donc conclure que les diélectriques ne présentent pas le phénomène de l'hystérésis, mais sont seulement doués de viscosité.

Tout ceci s'explique, du reste, de la façon la plus simple, par l'introduction de l'ingénieuse hypothèse de M. Bouty (1), à savoir que les résidus électriques sont dus à un simple retard temporaire de la polarisation fictive sur le champ polarisant. Il faut également rappeler que M. Pellat (2), dans un important mémoire, a rendu l'idée de M. Bouty indépendante de la notion de polarisation fictive ou instantanée, en montrant d'abord par l'expérience qu'on est en présence d'une polarisation réelle, et en donnant ensuite des formules théoriques, qui, fondées sur la conception d'une polarisation progressive

(1) BOUTY, *J. de Phys.*, 2^e série, t. IX, p. 293-294; 1890.

(2) PELLAT, *Ann. de chim. et de phys.*, 7^e série, t. XVIII, p. 433; 1899.

avec le temps, expliquent de la façon la plus complète les phénomènes que nous venons d'étudier, sans qu'il soit nécessaire de faire intervenir pour les diélectriques les propriétés hystérési-ques analogues à celles que présentent le fer ou l'acier, soumis à des forces magnétiques périodiquement variables.
