SUR LES RAYONS DE FORCE ÉLECTRIQUE ;

PAR M. HERTZ ⁽¹⁾.

Dès que j'eus réussi à montrer que les oscillations électriques produisent des actions qui se transmettent dans l'air sous forme d'ondes, j'essayai d'obtenir des effets plus marqués et sensibles à de plus grandes distances, en plaçant le conducteur rectiligne qui fournissait ces oscillations sur la ligne focale d'un cylindre parabolique faisant fonction de miroir concave de grandes dimensions. L'essai ne réussit pas et la cause en était simple : les dimensions du miroir n'étaient point en rapport avec la longueur d'onde employée, laquelle était de 4^m à 5^m. Ayant reconnu plus tard que je pouvais reproduire les mêmes phénomènes avec des oscillations au moins dix fois plus rapides et par suite avec des ondes dix fois plus courtes, j'ai repris l'expérience du miroir, laquelle a alors réussi au delà de mes espérances. J'ai pu produire de véritables rayons de force électrique et répéter avec eux les expériences fondamentales auxquelles donnent lieu les rayons lumineux ou calorifiques. C'est de ces expériences que je me propose de rendre compte.

Les appareils. — Le moyen employé pour obtenir des ondes très courtes est toujours le même. Je définirai en deux mots le nouvel excitateur, en disant que c'est un cylindre de laiton de 3^{cm} de diamètre et de 26^{cm} de longueur, lequel est coupé en son milieu pour le passage de l'étincelle. Les deux parties en regard sont terminées par des surfaces sphériques de 2^{cm} de rayon. La longueur du conducteur ne peut différer beaucoup de la demi-longueur des ondes que ses oscillations développent dans un fil rectiligne : c'est une première indication sur la durée de l'oscillation. Il est essentiel que les surfaces terminales entre lesquelles

(¹) *Sitzungsberichte der K. P. Akad. der Wissenschaften zu Berlin*, t. L, p. 1297; 1888.

L'article précédent était imprimé quand nous avons reçu le dernier Mémoire de M. Hertz dont nous donnons ici la traduction complète. J. J.

éclate l'étincelle soient très souvent polies à nouveau ; il faut aussi avoir bien soin de les soustraire à l'éclairement d'étincelles voisines : autrement les oscillations ne se produisent pas ⁽¹⁾. On reconnaît du reste facilement si tout marche bien, à l'aspect et au bruit de l'étincelle.

Les deux moitiés de l'excitateur sont reliées aux pôles de la bobine par deux gros fils de cuivre recouverts de gutta-percha ; ils viennent s'attacher tout près de l'interruption. Au lieu de la grosse bobine de Ruhmkorff des expériences précédentes, j'ai employé avec avantage un petit appareil à étincelles de Keiser et Schmidt, donnant au maximum des étincelles de 4^{cm} à 5^{cm} entre deux pointes. Il était excité par trois accumulateurs et pouvait donner, entre les deux surfaces sphériques de l'excitateur, des étincelles de 1^{cm} à 2^{cm}. Dans les expériences on réduisait la distance explosive à 3^{mm}.

Le mode d'exploration employé est toujours la production de petites étincelles dans un conducteur secondaire. J'employais souvent, comme dans mes premières expériences, un cercle presque fermé sur lui-même et ayant à peu près la même durée d'oscillation propre que l'excitateur. Il n'avait dans le cas actuel que 7^{cm}, 5 de diamètre. C'était un fil de cuivre de 1^{mm} : l'une des extrémités était terminée par une petite sphère de laiton polie de quelques millimètres de diamètre ; l'autre portait une pointe qu'une vis isolée permettait d'amener à une distance voulue de la boule. On n'obtient jamais que des étincelles de quelques centièmes de millimètre de longueur, et le plus souvent il faut, pour juger de l'intensité de l'action, s'en rapporter à l'éclat des étincelles plutôt qu'à leur longueur.

Le résonateur circulaire ne donne jamais que la différence de deux actions et n'a pas une forme qui permette de le placer sur la ligne focale du miroir concave. Aussi me suis-je servi le plus

(1) Dans le cours de ses recherches, M. Hertz a observé une influence très curieuse de l'étincelle électrique sur une étincelle voisine (*Ann. de Wiedemann*, t. XXXI, p. 983, et t. XXXIV, p. 169).

La lumière qui émane d'une étincelle, ou mieux la partie violette de cette lumière, tombant sur les boules d'un excitateur voisin, favorise la production de l'étincelle entre les boules de cet excitateur, mais elle met obstacle à la production des oscillations qui lui sont propres.

souvent, dans les expériences actuelles, d'un conducteur disposé comme il suit : deux fils rectilignes, de 5^{mm} de diamètre et de 50^{cm} de longueur, sont placés en prolongement l'un de l'autre avec une distance de 5^{cm} entre leurs extrémités en regard. De ces deux extrémités partent deux fils de 1^{mm} de diamètre et de 15^{cm} de longueur, perpendiculaires aux premiers et parallèles entre eux et qui se terminent par un micromètre à étincelles disposé comme celui du résonateur circulaire. Avec cette disposition on se prive à peu près complètement des effets de résonance. On aurait pu laisser l'interruption sur l'axe même du fil ; mais, quand l'appareil aurait été placé sur l'axe du miroir, on n'aurait pu observer l'étincelle qu'en masquant une partie de la surface. La disposition adoptée m'a paru la plus avantageuse.

Production du rayon. — En se plaçant dans une grande salle, on peut, avec le nouvel excitateur et le résonateur circulaire, répéter, mais à une échelle moindre, les expériences des Mémoires précédents. La plus grande distance à laquelle les étincelles sont encore perceptibles est de 1^m,5 ou 2^m dans des conditions exceptionnelles. L'action est augmentée quand, de l'autre côté de l'excitateur par rapport à l'observateur, on place, à une distance convenable et parallèlement aux oscillations, un plan conducteur. A une distance très petite et à une distance un peu supérieure à 30^{cm} l'action du plan est plutôt nuisible ; mais elle a un effet favorable très marqué à une distance de 8^{cm} à 15^{cm} ; marqué encore, mais beaucoup moins, à 45^{cm} ; au delà il n'y a plus d'effet sensible. Ce fait a été expliqué antérieurement ; dans le cas actuel, il montre que la demi-longueur d'onde qui correspond aux vibrations de l'excitateur est d'environ 30^{cm} dans l'air. On aura évidemment un renforcement plus marqué quand on remplacera la paroi plane par un miroir concave ayant la forme d'un cylindre parabolique et qu'on fera coïncider l'axe de l'excitateur avec la ligne focale. Pour obtenir une concentration énergique, il faut prendre la distance focale aussi petite que possible ; d'autre part, il ne faut pas que les ondes directes nuisent à l'action des ondes réfléchies ; pour cela il faut, comme on vient de le voir, que la distance focale ne soit guère inférieure au quart de la longueur d'onde. J'ai adopté 12^{cm},5 pour la distance focale. Le miroir a été fait d'une feuille de

zinc d'un demi-millimètre d'épaisseur, formant un carré de 2^m de côté et qu'on a cintrée sur un châssis en bois qui avait la courbure voulue. Le miroir avait 2^m de hauteur, 1^m,2 d'ouverture et 0^m,7 de flèche. L'excitateur était fixé au milieu de la ligne focale. Les fils de charge traversaient le miroir; la bobine et la pile étaient derrière, ce qui évitait tout embarras. En explorant avec le résonateur l'état du milieu dans le voisinage, on ne constate aucune action ni derrière le miroir, ni sur les côtés; mais, dans la direction de l'axe optique, les étincelles restent visibles jusqu'à une distance de 5^m à 6^m. A une distance plus grande, à 9^m ou 10^m par exemple, elles sont encore perceptibles dans le voisinage d'une paroi conductrice perpendiculaire à l'axe. On trouve aussi qu'en certains points les ondes réfléchies renforcent les ondes incidentes; dans d'autres, qu'elles les affaiblissent. Le résonateur rectiligne met en évidence d'une façon très nette, en avant du plan, les maxima et les minima qui caractérisent les ondes stationnaires. J'ai pu constater l'existence d'un premier nœud sur la surface même; les autres étaient à des distances de 33^{cm}, 65^{cm} et 98^{cm}. On déduit de là, avec une grande approximation, que la demi-longueur d'onde est de 33^{cm} et la durée d'oscillation correspondante de 1,1 billionième de seconde, étant admis que la vitesse de propagation est celle de la lumière. Dans un fil, la même oscillation donne une onde de 29^{cm}. Ici encore, la vitesse de propagation dans un fil est plus petite que dans l'air; mais le rapport des deux vitesses diffère moins de l'unité que dans les premières expériences où la période était plus longue. C'est un résultat remarquable et qui mérite attention.

L'action n'étant sensible que dans le voisinage de l'axe optique, son champ peut être considéré comme un *rayon électrique* émanant du miroir concave.

Prenons maintenant un second miroir concave identique au premier et plaçons sur la ligne focale les deux fils de 50^{cm} du résonateur rectiligne, les deux fils auxiliaires qui vont au micromètre traversant la paroi tout en restant isolés. Le micromètre se trouve ainsi derrière le miroir et l'on peut observer l'étincelle tout à son aise, sans masquer le miroir. Je m'attendais, en recevant le rayon sur le second miroir, à observer les phénomènes à des distances beaucoup plus grandes : je ne m'étais pas trompé. J'ob-

tenais des étincelles, en utilisant tout l'espace dont je pouvais disposer. En faisant passer le rayon par une porte, je pouvais aller jusqu'à 16^m ; les résultats obtenus montrent qu'on aurait encore des étincelles sensibles à des distances de plus de 20^m . Pour les recherches que j'avais en vue, ces grandes distances n'étaient pas nécessaires; d'ailleurs, il y a avantage à opérer avec des étincelles qui ne soient pas trop faibles. Dans le cas actuel, la distance la plus convenable est de 6^m à 10^m . Voici maintenant les expériences très simples qu'on peut faire avec le rayon. A moins d'indication contraire, les lignes focales des deux miroirs sont toujours verticales.

Propagation rectiligne. — Supposons les axes optiques des deux miroirs en coïncidence. On interpose perpendiculairement à l'axe commun une feuille de zinc de 2^m de haut et de 1^m de large : l'étincelle disparaît. Même effet avec un cadre recouvert d'une feuille d'étain ou de papier doré. L'étincelle disparaît également quand un aide se place sur le trajet du rayon et elle reparait sitôt qu'il s'en écarte. Les corps isolants, au contraire, ne produisent aucun effet. Le rayon traverse parfaitement une planche de bois, une porte; et ce n'est pas sans étonnement qu'on voit les étincelles continuer à se produire dans la pièce voisine après qu'on a fermé la porte. Deux écrans métalliques de 2^m de haut sur 1^m de large, placés symétriquement à gauche et à droite du rayon, n'ont aucun effet sur l'étincelle, tant que leur distance est supérieure à $1^m, 2$; mais, dès que l'intervalle devient plus étroit, les étincelles diminuent; elles disparaissent complètement quand l'intervalle est moindre que 50^{cm} . Si on laisse à la fente la largeur de $1^m, 2$, mais qu'on la déplace latéralement dans un sens perpendiculaire au rayon, on fait également disparaître l'étincelle.

Enfin, quand on déplace seulement de 10° à droite ou à gauche l'axe de l'un des miroirs, l'étincelle devient très faible et elle disparaît complètement quand la déviation est de 15° . Le rayon a donc un contour parfaitement arrêté; il n'en est pas de même des ombres; on constate des phénomènes évidents de diffraction. Cependant je n'ai pu encore constater l'existence de maxima et de minima à la limite de l'ombre.

Polarisation. — Notre rayon est constitué par des vibrations transversales; comme on dit en Optique, il est polarisé rectilignement; c'est ce qui résulte d'une manière indiscutable de la façon dont il est produit. Mais nous pouvons vérifier le fait expérimentalement. Faisons tourner le miroir récepteur autour du rayon comme axe, jusqu'à ce que la ligne focale et l'axe du résonateur prennent la position horizontale : l'étincelle va en diminuant à mesure que l'inclinaison augmente et cesse complètement quand les deux lignes focales sont en croix, alors même que les deux miroirs sont très voisins. Ils agissent alors, l'un comme le polariseur, l'autre comme l'analyseur d'un appareil de polarisation.

En tendant sur un cadre en bois de 2^m⁷ une série de fils de cuivre parallèles entre eux, j'ai construit une espèce de réseau; les fils avaient 1^{mm} et étaient distants de 3^{cm}. Les deux lignes focales étant parallèles, on place le cadre perpendiculairement au rayon. Si les fils sont perpendiculaires aux lignes focales, l'effet sur l'étincelle est nul. Si, au contraire, les fils sont parallèles aux lignes focales, le rayon est complètement intercepté. Au point de vue de la transmission de l'énergie, le réseau se comporte vis-à-vis de notre rayon, comme une tourmaline par rapport à un rayon lumineux polarisé rectilignement. Plaçons horizontalement la ligne focale du second miroir : l'étincelle ne se produit pas quand les fils sont horizontaux ou verticaux; mais, si on les incline, dans un sens ou dans l'autre, à 45°, on la fait reparaître.

Il est évident que le réseau décompose la vibration incidente en deux autres et laisse seulement passer celle des deux composantes qui est perpendiculaire à la direction des fils; cette composante, qui fait un angle de 45° avec la ligne focale du miroir, se décompose elle-même en deux autres dont l'une seulement contribue à la production de l'étincelle. C'est tout à fait l'analogue de l'expérience qui consiste à faire reparaître la lumière dans le champ de deux nicols croisés, en interposant une tourmaline sous une orientation convenable.

J'ajouterai encore quelques remarques au sujet de la polarisation.

Le procédé d'exploration que nous employons ne nous fait connaître que la force électrique totale. Quand l'axe de l'excitateur est

vertical, les oscillations de la force électrique s'effectuent nécessairement dans le plan vertical du rayon; il n'y a rien dans le plan horizontal. D'après ce que nous savons des courants à oscillations lentes, nous devons supposer que les oscillations électriques sont accompagnées d'oscillations de la force magnétique, ces dernières s'effectuant dans le plan horizontal et ne donnant rien dans le plan vertical. La polarisation du rayon n'est donc pas caractérisée seulement par le fait qu'il n'existe de vibrations que dans le plan vertical, mais par cette double condition que les vibrations qui s'exécutent dans le plan vertical sont de nature électrique et celles qui s'exécutent dans le plan horizontal de nature magnétique. Si donc l'on demande simplement quel est le plan de vibration du rayon, sans dire s'il s'agit de vibrations électriques ou magnétiques, la question n'a pas de réponse. Ces considérations expliquent pourquoi toutes les controverses qui ont été soulevées à propos de ce problème d'Optique sont restées sans résultat. C'est du reste ce qui a été établi d'une manière très claire par M. Kolacek dans un Mémoire récent ⁽¹⁾.

Réflexion. — Nous avons déjà mis en évidence le phénomène de la réflexion en constatant l'interférence des ondes directes avec les ondes réfléchies et nous l'avons utilisé dans la construction de nos miroirs. Dans ces deux cas l'onde réfléchie se superpose à l'onde directe; rien n'est plus facile que de séparer l'un de l'autre les deux systèmes d'ondes.

Au milieu de la salle, je place côte à côte les deux miroirs, en tournant leurs ouvertures du même côté et de telle manière que leurs axes optiques se coupent à une distance de 3^m. Naturellement l'excitateur ne donne rien dans le miroir récepteur; mais si, à l'intersection des deux axes et perpendiculairement à la bissectrice de leur angle, on place un plan vertical constitué par une feuille carrée de zinc de 2^m de côté, on obtient un flux nourri d'étincelles, par suite de la réflexion du rayon sur le miroir plan. Les étincelles disparaissent dès qu'on fait tourner le plan autour d'un axe vertical, dans un sens ou dans l'autre, seulement d'une

(¹) F. KOLACEK, *Ann. Wied.*, t. XXXIV, p. 676.

J. de Phys., 2^e série, t. VIII. (Mars 1889.)

quinzaine de degrés. Il s'agit donc bien d'une réflexion régulière et non d'une diffusion.

Si l'on éloigne le plan et qu'en même temps on déplace un des miroirs, de manière que le plan passe toujours par l'intersection des deux axes, les étincelles ne diminuent que très lentement. On les voit encore très bien à une distance de 10^m , alors que les ondes ont parcouru une distance de 20^m .

Cette disposition pourrait être employée avec avantage, si l'on avait à comparer la vitesse de propagation dans l'air à une vitesse de propagation moindre, dans un fil par exemple.

Pour étudier la réflexion en dehors de l'incidence normale, j'ai disposé le rayon parallèlement à un des murs de la salle, lequel présentait une baie fermée par une porte à deux vantaux. Le miroir récepteur était placé dans la pièce à laquelle cette porte donnait accès; il était tourné de manière que son axe passât par le milieu de la porte et fût perpendiculaire au rayon. Au point de croisement était dressé verticalement le plan conducteur, faisant un angle de 45° avec les deux directions. Le résonateur donne des étincelles qui continuent après qu'on a fermé la porte. Il suffit de tourner le miroir de 10° pour les faire disparaître. La réflexion est donc régulière et l'angle d'incidence égal à l'angle de réflexion.

Pour vérifier que la propagation est bien rectiligne et que l'action se transmet en ligne droite de l'excitateur au miroir et de celui-ci au résonateur, il suffit de vérifier que l'interposition d'un écran sur cette direction supprime les étincelles et qu'elle n'a aucun effet dans toute autre position.

Le résonateur circulaire, qui permet de déterminer en chaque point la direction du plan de l'onde, montre que celui-ci est perpendiculaire au rayon après comme avant la réflexion et, par suite, que la réflexion lui fait subir une rotation de 90° .

Jusqu'ici les lignes focales des deux miroirs étaient verticales et, par suite, le plan d'oscillation perpendiculaire au plan d'incidence. Pour rendre le plan d'oscillation parallèle au plan d'incidence et observer la réflexion dans ce cas, il suffit de faire tourner les deux miroirs de manière que les lignes focales soient horizontales. Rien ne paraît changé dans le phénomène et je n'ai pu constater aucune différence dans l'intensité du rayon réfléchi dans les deux cas. Si on laisse l'une des lignes focales verticale, l'autre étant

horizontale, on n'a aucune étincelle. Ainsi, quand le plan de vibration est perpendiculaire ou parallèle au plan d'incidence, sa direction n'est pas modifiée par la réflexion. Il est probable qu'il n'en est pas de même pour les autres inclinaisons ; on peut même prévoir que le rayon réfléchi n'est plus polarisé rectilignement. Les interférences auxquelles donnent lieu les deux systèmes d'ondes qui se croisent en avant du miroir et qui peuvent être mises en évidence par les phénomènes caractéristiques qu'elles produisent dans le résonateur circulaire, fourniront peut-être un excellent moyen de résoudre quelques problèmes, intéressants pour l'Optique, sur les changements apportés par la réflexion dans l'amplitude et dans la phase.

Nous mentionnerons encore quelques expériences relatives à la réflexion sur une surface anisotrope au point de vue électrique. Les deux miroirs sont placés côte à côte comme dans la première expérience de réflexion, mais on emploie comme plan réflecteur le réseau de fils parallèles dont il a été question plus haut. L'étincelle disparaît quand les fils sont perpendiculaires à la direction de l'oscillation ; elle apparaît, au contraire, quand les fils sont parallèles aux oscillations. L'analogie entre notre surface transparente dans une seule direction et la tourmaline n'existe que pour la partie transmise du rayon : la tourmaline absorbe la partie qui ne passe pas, notre surface la réfléchit. Si l'on met en croix les lignes focales des deux miroirs, on n'obtient aucune étincelle par la réflexion du rayon sur une surface isotrope ; mais j'ai pu en obtenir avec la surface anisotrope en la tournant de manière que les fils fissent un angle de 45° avec les lignes focales. Ce résultat s'explique facilement par ce qui précède.

Réfraction. — Pour voir si le rayon se réfracte en passant de l'air dans un milieu isolant, je me suis servi d'un grand prisme en asphalte. Le prisme avait une hauteur de $1^m,5$ et sa base, en forme de triangle isocèle, avait $1^m,2$ de côté et un angle au sommet de 30° . Comme il pesait environ 12 quintaux et que son maniement eût été trop difficile, on l'avait composé de trois parties superposées de $0^m,50$ de hauteur.

La masse avait été coulée dans des caisses en bois et y avait été laissée, le bois n'ayant par lui-même aucune influence. Le prisme

était placé verticalement et à une hauteur telle, que son milieu était dans un même plan horizontal avec les étincelles de deux appareils. Après avoir constaté que la réfraction avait effectivement lieu et pris une idée de sa grandeur, j'ai disposé l'expérience de la manière suivante : le premier miroir est placé à $2^m,6$ de la première face du prisme, de telle manière que l'axe du faisceau aille passer par le centre de gravité, en faisant avec la face d'entrée un angle de 65° . Deux écrans conducteurs, l'un du côté de l'arête, l'autre du côté de la base, enlèvent au rayon tout autre passage qu'à travers le prisme. Du côté du rayon émergent, on avait tracé sur le sol une circonférence de $2^m,5$ de rayon ayant pour centre le centre de gravité de la base. Le second miroir peut être déplacé le long de cette circonférence, sans que l'axe cesse de passer par le centre.

Le miroir était d'abord placé dans le prolongement du rayon incident; on n'avait pas trace d'étincelle et le prisme formait un écran absolu. L'étincelle commençait à apparaître pour une déviation de 11° , et elle allait en augmentant jusqu'à 22° , pour décroître ensuite. Elle disparaissait complètement quand la déviation atteignait 34° . Quand le miroir était dans la direction du maximum, on pouvait l'écarter dans la direction du rayon jusqu'à une distance de 5^m à 6^m sans voir disparaître l'étincelle. Elle disparaissait infailliblement quand on se plaçait sur le trajet, soit en avant, soit en arrière du prisme, ce qui prouve bien que la transmission se fait par le prisme et non par une autre voie. On recommença l'expérience en laissant le prisme dans sa position première, mais en plaçant horizontalement les deux lignes focales. On ne put observer aucun changement. Un angle au sommet de 30° et une déviation minimum égale à 22° , donnent pour l'indice le nombre 1,69. L'indice optique pour les substances de cette nature est compris entre 1,5 et 1,6. L'expérience n'est pas assez précise, ni la matière du prisme assez pure, pour qu'il y ait lieu de tirer aucune déduction de la comparaison de ces nombres.

Dans les phénomènes que nous venons d'étudier, nous avons vu des rayons de force électrique; peut-être aurions-nous pu tout aussi bien y voir des rayons lumineux à grande longueur d'ondulation. Pour moi, les faits observés me paraissent mettre absolument hors de doute l'identité de la lumière, de la chaleur rayon-

nante et des mouvements électrodynamiques. Je crois que l'idée de cette identité conduira à des conséquences aussi profitables pour la théorie de l'Optique que pour celle de l'électricité.

W.-E. SUMPNER. — The variation of the coefficients of induction (Sur la variation des coefficients d'induction); *Philosophical Magazine*, t. XXV, p. 453; 1888.

D'après l'auteur, on peut définir le coefficient de self-induction d'après l'une des équations suivantes :

$$e = L_1 \frac{dI}{dt}, \quad e = \frac{dL_2 I}{dt}, \quad W = \frac{1}{2} L_3 I^2.$$

Dans ces équations, L est le coefficient de self-induction, e la force électromotrice due à la self-induction, W l'énergie électrique de la bobine parcourue par le courant I .

On voit immédiatement qu'on a la relation

$$L_1 = L_2 + I \frac{dL_2}{dI},$$

ce qui montre que L_1 est plus grand que L_2 , lorsque L_2 augmente avec I .

Le flux de force est $\Phi = L_2 I$; la force magnétisante H est proportionnelle à l'intensité de courant I et l'induction magnétique B est proportionnelle au flux de force Φ . Comme on a d'ailleurs $B = \mu H$, on voit que le coefficient de self-induction L_2 est proportionnel à la valeur de la perméabilité magnétique μ qui correspond à la force magnétisante provenant de l'intensité de courant I .

Lorsqu'on connaît la relation qui existe entre l'induction magnétique B et la force magnétisante H ou, ce qui revient au même, entre le flux de force Φ et l'intensité de courant I , on peut en déduire les valeurs des coefficients d'induction L_1 , L_2 et L_3 .

Si l'on représente cette relation par une courbe Ok , on aura, pour le point P_1 ,

$$L_2 = \tan P_1 OC,$$

$P_1 Q_1$ étant la tangente au point P_1 à la courbe Ok . Quant à L_1