

ÉTUDES SUR LA THÉORIE DU TÉLÉPHONE;

PAR M. E. MERCADIER.

Une étude complète du téléphone électromagnétique comporte trois recherches principales, savoir :

I. Recherches du mécanisme en vertu duquel des ondes sonores simples, comme celles des sons musicaux, ou complexes, comme celle de bruits ou de la parole articulée, font varier le champ magnétique d'un aimant où se trouve une lame de fer ou d'acier et produisent ainsi dans une hélice qui entoure l'aimant des courants induits.

II. Recherche de la nature intime de ces courants.

III. Recherche du mécanisme en vertu duquel la propagation de ces courants dans un appareil semblable au transmetteur permet de reproduire les sons ou bruits qui leur ont donné naissance, avec leur hauteur, leur timbre, leur complexité, sauf une réduction considérable d'intensité.

De ces trois genres de recherches, le second n'a guère donné lieu qu'à des études théoriques, basées sur des hypothèses relatives au mécanisme qui doit faire l'objet du premier, et à quelques expériences en vue de déterminer l'intensité des courants induits téléphoniques.

Le troisième, au contraire, a été effectué, on peut le dire, sous presque toutes les faces, au point de vue expérimental, dans le but de chercher à accroître l'intensité des effets produits. Une quantité considérable de Mémoires ont été publiés à ce sujet dans la plupart des pays du monde; mais il est à remarquer que, dans le plus grand nombre de ces recherches, on ne s'est pas servi comme transmetteur du récepteur lui-même, en profitant de sa réversibilité : on a employé des transmetteurs microphoniques à pile, dont les effets sont plus intenses, mais qui compliquent au fond les études de cette espèce.

Quoi qu'il en soit, peu de personnes ont cru devoir s'occuper de l'étude du *transmetteur* électromagnétique lui-même et de son

perfectionnement. Et l'on est étonné de lire, dans des livres scientifiques où la question du téléphone est traitée, que la théorie du téléphone électromagnétique *transmetteur* n'offre pas de difficultés! Je crois qu'il serait certainement plus exact d'affirmer que cette théorie n'a pas encore été véritablement étudiée.

Jusqu'à présent, en effet, on s'en est à peu près tenu aux explications données par M. G. Bell dans son Mémoire présenté à la Société des ingénieurs télégraphistes de Londres, le 31 octobre 1877. Or, dans ce Mémoire, si remarquable d'ailleurs, M. G. Bell a défini ce qu'il entend par courants ondulatoires, courants qui se succèdent d'une manière continue avec des intensités successivement croissantes et décroissantes; il a soutenu la nécessité de leur emploi pour reproduire, par des moyens électromagnétiques, la parole articulée; mais le mécanisme même en vertu duquel ces courants sont produits n'est pas nettement expliqué; toutes les explications à ce sujet se réduisent à dire que les courants en question sont les courants qui résultent des rapprochements et éloignements de l'armature vibrante qui est en face du pôle d'un aimant, sous l'influence des ondes aériennes produites par la voix.

Jusqu'à ce jour (du moins à ma connaissance) on n'a pas donné d'autres explications du mécanisme par lequel l'énergie sonore, renfermée dans les ondes aériennes si complexes produites par la voix humaine, est transformée en énergie électrique cinétique, sous la forme de courants induits, par suite de l'interposition, entre les ondes et le pôle d'un aimant entouré d'une hélice, d'un diaphragme en matière magnétique comme le fer ou l'acier.

Je me propose d'exposer une série de recherches expérimentales faites en vue de rendre compte, autant que possible, de ce mécanisme.

THÉORIE DU TRANSMETTEUR.

I. — Étude du diaphragme au point de vue élastique.

Bien que ce ne soit nullement nécessaire (car j'ai construit de bons téléphones avec des diaphragmes de formes diverses), le diaphragme des téléphones a ordinairement la forme d'un disque mince en fer ou en acier.

Avant de l'étudier au point de vue spécial de son application au

téléphone, il était indispensable de l'étudier en lui-même au point de vue de ses propriétés élastiques ou acoustiques.

Tel a été le but des recherches sur les vibrations des lames rectangulaires et circulaires, en fer et en acier, qui ont été publiées dans ce Journal (¹). En particulier, l'étude sur les vibrations des lames circulaires, publiée en décembre 1885, répond précisément au titre ci-dessus : *Étude du diaphragme au point de vue élastique*. Je la supposerai connue dans ce qui suit :

II. — Étude du diaphragme au point de vue téléphonique.

Rappelons, avant tout, ce qu'on peut appeler la définition d'un téléphone transmetteur.

Un téléphone électromagnétique transmetteur, tel que M. G. Bell l'a réalisé après de nombreux essais, se compose essentiellement d'un diaphragme en forme de disque mince, en fer ou en acier, encastré sur ses bords, à peu de distance d'un pôle d'aimant ou d'électro-aimant entouré d'une hélice métallique.

Quand on relie les deux bouts de l'hélice à celle d'un appareil semblable, servant de *récepteur*, on reconnaît au transmetteur les caractères suivants :

1° Quand on produit des vibrations simples de l'air, dans le voisinage du disque, ces vibrations se trouvent reproduites à distance par le récepteur, avec leur *période* et une intensité beaucoup moindre ;

2° Si l'on produit simultanément plusieurs vibrations simples, formant par exemple des accords, le récepteur les reproduit aussi sans altération des intervalles ;

3° Si les vibrations sont plus complexes, comme celles de la parole articulée, leur articulation est reproduite, et leur timbre aussi, au moins approximativement ;

4° Si l'on fait *varier d'une manière continue* la période (la hauteur) des sons, des accords ou des sons complexes correspondant à ces vibrations, le récepteur les reproduit d'une manière continue.

(¹) *Journal de Physique*, 2^e série, t. III, 189; IV, 541; 1884-85.

Cette continuité dans les effets produits est la propriété capitale et caractéristique du téléphone. Elle suppose évidemment dans le diaphragme du transmetteur la possibilité de mouvements très complexes et susceptibles de varier d'une manière continue dans leurs éléments. C'est le premier point à étudier.

A. *Rôle du diaphragme au point de vue élastique, relativement à la nature des mouvements qu'il effectue.* — Le diaphragme est un corps élastique susceptible de vibrer : j'appellerai *sons particuliers* ou *propres* de ce diaphragme, ceux qu'il est capable de produire (fondamental et harmoniques) en vertu de son élasticité, de sa forme géométrique, de la nature de son support, et caractérisés par l'existence de lignes nodales déterminées.

Quand on produit dans l'air, devant le diaphragme, des mouvements vibratoires simples ou complexes comme ceux qui résultent de la parole articulée, il s'agit de savoir si les mouvements qui se produisent sont ceux qui correspondent aux sons particuliers du diaphragme ou des mouvements d'une autre nature.

I. Il est à remarquer d'abord que, dans le fonctionnement ordinaire du téléphone transmetteur, le diaphragme n'est jamais mis en mouvement, comme on le fait quand on veut produire la série des harmoniques et des lignes nodales qui les caractérisent; car on ne les abandonne pas à eux-mêmes lorsqu'ils ont commencé à vibrer, on ne laisse pas un libre jeu à l'action des forces élastiques; en un mot, les mouvements qu'ils peuvent effectuer sont des mouvements *forcés*; observation importante, car, si l'on ne peut en conclure l'impossibilité des mouvements correspondant aux sons *particuliers* du diaphragme, elle permet déjà de concevoir la possibilité de mouvements d'une autre nature.

II. En second lieu, la *continuité* nécessaire des mouvements indiqués ci-dessus est en contradiction avec les résultats de la théorie des disques vibrants et de l'expérience.

En effet, considérons en premier lieu un disque vibrant *librement*; il ne peut prendre qu'une série *limitée* de déformations correspondant au son fondamental et à ses harmoniques, et il y en a très peu : 2 dans l'octave du son fondamental; 2 dans la 2^e octave; 4 dans la 3^e; 4 dans la 4^e, etc.

L'expérience confirme ces résultats, même pour des disques de fer, de fer-blanc ou d'acier très minces, tels que ceux des téléphones ordinaires. Les résultats qu'on obtient, en effet, en étudiant les diaphragmes dont on se sert dans la fabrication usuelle des transmetteurs téléphoniques, ne diffèrent pas de ceux que nous avons indiqués dans la première partie de ces études, pour des disques minces en acier le meilleur possible et le mieux travaillé.

Ainsi : 1° ils présentent la même hétérogénéité intérieure, manifestée à l'oreille par des battements de sons simultanés, quand on produit le son fondamental, et à l'œil, par les déformations de la nodale circulaire du 1^{er} harmonique. En voici un exemple, pour fixer les idées. J'ai pris au hasard 114 diaphragmes en fer-blanc, de 0^m, 10 de diamètre et de 0^{mm}, 6 à 0^{mm}, 7 d'épaisseur, servant à construire des transmetteurs d'Arsonval. Sur ce nombre, 10 pour 100 ont présenté une nodale circulaire et donnent un son musical assez pur ; 35 pour 100 ont une nodale circulaire un peu déformée ; 30 pour 100 sont médiocres au point de vue acoustique ; ou bien leur nodale est franchement elliptique, ou bien elle a la forme ovoïde ; leur son est généralement médiocre. Enfin 25 pour 100 produisent généralement un son mauvais et ont des nodales encore plus déformées ; soit que l'un des axes de la figure s'allonge à une extrémité ; soit que la nodale prenne une forme triangulaire curviligne qui n'est bien nette que lorsque les trois sommets coïncident avec les trois points d'appui en triangle équilatéral des supports sur lesquels les disques sont placés, et il est à remarquer que, dans cette position, le son du disque est généralement pur, soit que la nodale ait une forme hexagonale, ou enfin qu'il n'y ait pas de nodale nette, auquel cas le disque ne rend qu'un son mat ou plutôt un *bruit sonore*.

2° Des diaphragmes de ce genre qui ne sont pas travaillés avec soin et dont la surface est étamée ou nickelée, et dont l'épaisseur varie, par suite, généralement en chaque point, offrent d'ailleurs, cela va sans dire, la même discordance que les disques minces du meilleur acier, entre la théorie et l'expérience, en ce qui concerne la hauteur des sons fondamentaux et des harmoniques.

3° Enfin, et c'est le point sur lequel il y a lieu d'insister actuellement, les sons particuliers de ces disques, fondamental et harmoniques, forment toujours une série *discontinue* et *limitée*.

Considérons maintenant des diaphragmes, non plus libres, mais encastrés sur leur contour, comme ils le sont dans les téléphones.

Dans ce cas, la théorie supposant des disques infiniment minces et un encastrement *absolu*, c'est-à-dire où tous les points encastrés sont complètement *immobiles*, indique qu'un tel encastrement fait seulement varier légèrement la hauteur du son fondamental et des premiers harmoniques qu'avait le disque non encastré; mais ils restent toujours discontinus et en nombre limité.

Voici ce que dit Wertheim à ce sujet (*Annales de Chim. et de Phys.*, 3^e série, t. XXXI, p. 18) : « On ne peut vérifier cette partie de la théorie, puisqu'il est impossible d'encastrier une plaque sur toute sa circonférence ; cependant on peut obtenir des sons et des figures correspondantes qui forment la transition du bord libre au bord encastré et qui s'accordent tout à fait avec la théorie. A cet effet, on fixe certains points de la circonférence au moyen d'un support à bouchons et l'on continue à ébranler par le centre ; on obtient alors de ces figures à festons qui sont connues depuis Chladni, mais dont la théorie n'a pas encore été donnée, et en même temps le son monte sensiblement, tant qu'on n'a pas dépassé le troisième son. Les figures ne se sont bien formées que sur les plaques en laiton.... »

En premier lieu, notons ce dernier point, car il n'est pas réalisé dans le téléphone où l'on n'emploie jusqu'ici que des lames en fer ⁽¹⁾ ou en acier.

En second lieu, il est à remarquer que les figures dont parle Wertheim, et qui sont des sortes de cercles festonnés, n'ont jamais été obtenues qu'en employant des moyens énergiques, tels que celui qui consiste à percer au milieu de la plaque un trou dont on frotte les bords avec une mèche de crin colophanée, ce qui n'a véritablement qu'un rapport extrêmement éloigné avec le mode d'ébranlement qui consiste à parler sur le centre de la plaque.

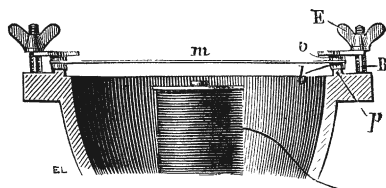
Il paraît donc nécessaire de voir quels peuvent être les effets de

(1) Wertheim n'a jamais employé dans ses expériences qu'un disque en fer doux, et il avait 4^{mm}, 48 d'épaisseur, condition indispensable pour que la théorie soit vérifiée, ainsi qu'on l'a montré (*Journal de Physique*, 2^e série, t. IV, décembre 1885).

l'encastrement dans les cas des plaques habituellement en usage en téléphonie, et avec un mode d'ébranlement en rapport avec celui qu'on y emploie.

A cet effet, dans un téléphone de forme particulière (*fig. 1*) que j'ai fait construire pour servir à des études variées, je puis, à

Fig. 1.



volonté, serrer la membrane de fer étudiée *m* (*fig. 1*)⁽¹⁾ sur une portée bien plane circulaire *p*, avec un anneau plat de bronze épais, à l'aide de huit écrous *E*, placés au sommet d'un octogone, ou bien en encastrent successivement, entre de petits blocs de cuir *b*, huit points de la circonférence (les autres restant libres), à l'aide de brides convenables *B* serrées par les huit écrous.

J'ai soumis à des expériences de ce genre des plaques de toutes les catégories spécifiées précédemment, et j'ai observé les faits suivants :

En encastrant un point de la circonférence d'une de ces plaques, on obtient, en la frappant au centre à petits coups répétés, un mélange de sons confus, plus ou moins clairs, mais il est impossible d'obtenir une figure nodale stable quelconque.

En essayant d'entretenir électriquement le mouvement à l'aide d'un style placé au centre de la plaque, on peut obtenir avec beaucoup de difficulté un son continu qui s'entend à peine.

On peut étudier ainsi ce qui arrive quand on fixe successivement entre deux blocs de cuir 2, 3, 4, ... points de la circonférence du disque, ou quand, appliquant cette circonférence sur la portée du support et l'anneau de bronze au-dessus, on serre successivement les écrous. On reconnaît ainsi : 1° qu'on ne peut obtenir de figure nodale nette en frappant le centre ; 2° que l'en-

(1) Les figures contenues dans cet article ont été obligeamment mises à notre disposition par le journal *La Lumière électrique*.

retien électrique du mouvement ne peut s'effectuer que très mal avec de grandes difficultés; 3° que les disques ne produisent plus de son soutenu et musical, mais bien plutôt une sorte de bruit sonore, de tonalité assez vague quand on les frappe; 4° qu'en faisant varier graduellement le degré d'encastrement ou plutôt de serrage on fait varier cette tonalité (fait déjà signalé dans les téléphones ordinaires). Cette variation peut être de plus d'une octave pour des disques de 0^m, 10 de diamètre et de 0^{mm}, 7 d'épaisseur, d'une quarte pour des disques de 5^{mm} d'épaisseur, et même d'une seconde et plus pour les disques de 10^{mm} d'épaisseur.

Un disque téléphonique aussi imparfaitement encasté est donc, au point de vue mécanique et élastique, un système très complexe et fort peu déterminé; on ne peut guère lui supposer applicables que les résultats les plus généraux de la théorie des disques vibrants, à bords parfaitement encastés et considérés comme *fixes*, tels que l'élévation des premiers harmoniques du disque libre. Nous venons de voir ce résultat réalisé pour le son le plus grave du disque; mais il importe beaucoup de savoir s'il existe encore une série d'harmoniques analogues à ceux du disque non encasté.

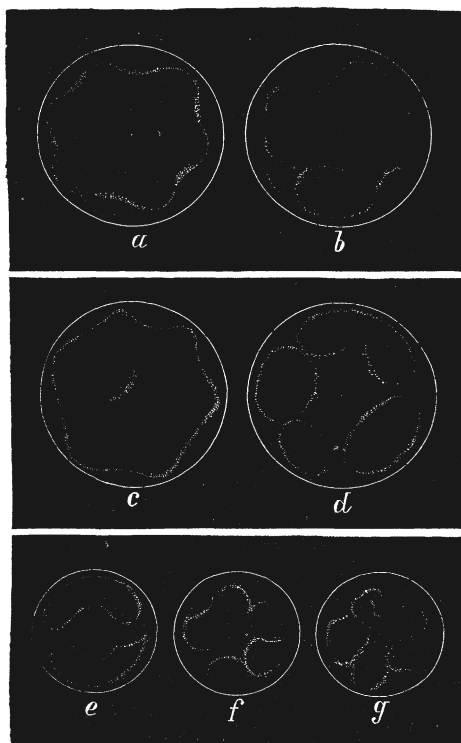
A cet effet, imitant la méthode dont s'est servi M. Bourget pour l'étude des membranes circulaires, j'ai soumis des disques serrés dans une monture ordinaire de téléphone (par exemple de téléphone Gower) à l'action des vibrations de tuyaux d'orgue dont l'ouverture était placée au-dessous de leur centre.

Je me suis servi d'une série de vingt-six tuyaux produisant des sons croissant par intervalle, de secondes majeures ou mineures; des appendices cylindriques en carton permettaient, en allongeant graduellement chacun d'eux, de passer du son de l'un à celui de l'autre sans discontinuité; j'obtenais ainsi une série continue de sons allant du *la*₂ à l'*ut*₆, c'est-à-dire dépassant de beaucoup les limites des sons de la parole articulée.

En versant du sable sur le disque maintenu horizontal, on cherche si, indépendamment des faibles mouvements inévitables communs aux disques et à la monture, il y a des sons que le disque renforce visiblement, en produisant des lignes nodales plus ou moins régulières, et qui correspondraient ainsi à des harmoniques particuliers.

Voici les résultats obtenus avec un disque en fer très mince de 0^{mm},15 d'épaisseur; les dessins représentent les lignes nodales irrégulières obtenues pour un certain degré de serrage du disque (*fig. 2*) :

Fig. 2.



(*a*) correspond à l' ut_3 ; (*b*) aux sons compris entre si_3 et ut_4 ; (*c*) à ut_4 ; (*d*) à fa_4 ; (*e*) à la^*_4 ; (*f*) à $ré^*_3$; (*g*) à fa^*_3 .

Entre les sons indiqués, sauf mi_3 , qui a produit une ébauche de ligne nodale, tous les autres n'ont rien ou à peu près rien produit de sensible.

La *discontinuité* de ce qu'on peut appeler *les sons particuliers du disque* est donc bien évidente.

Si l'on soumet à cette expérience des disques de plus en plus épais, on reconnaît que, toutes choses égales d'ailleurs, le nombre

des sons qui produisent dans le disque des nodales sensibles diminue. A partir de 0^{mm} , 5 d'épaisseur, la série se réduit à un certain son et à des octaves pour lesquels le disque vibre en tous ses points ; mais on peut admettre que pour ces épaisseurs le mode de mise en vibration n'est pas assez énergique, et que les séries d'harmoniques peuvent néanmoins exister en produisant des mouvements d'amplitude trop petite pour être directement visibles ; mais cette circonstance ne saurait évidemment changer leur discontinuité en continuité.

En remplaçant l'action des tuyaux d'orgue par celle de la voix, en chantant des sons formant une échelle continue dans un tube dont l'extrémité est placée au-dessous du centre du disque, on obtient des résultats analogues aux précédents, mais beaucoup plus faibles.

En parlant, au lieu de chanter, les effets sont encore plus faibles.

En résumé, il paraît démontré que les mouvements correspondant aux sons particuliers de disques encastrés, comme ils le sont dans les téléphones, forment, comme ceux des disques vibrant librement, une échelle *discontinue* ; dès lors ils ne suffisent point à expliquer la transmission d'une série *continue* de sons ou d'accords, et l'on est conduit ainsi d'une nouvelle manière à admettre la *possibilité* de mouvements d'une autre espèce.

III. Nous pouvons aller plus loin et montrer que cette *possibilité* est véritablement une *nécessité*.

En effet, prenons des disques de 2^{mm} d'épaisseur au moins et de 100^{mm} de diamètre : leur son fondamental et, par suite, leurs harmoniques sont supérieurs à l' ut_3 , lorsqu'ils sont encastrés. Si nous produisons devant ces diaphragmes une série continue de sons ou d'accords d'une hauteur inférieure à l' ut_3 , ou bien si un homme parle devant eux en émettant ainsi des sons articulés qui sont toujours compris dans la gamme d'indice 3 au plus, il est impossible que les sons particuliers du diaphragme soient mis en jeu. Pourtant avec des téléphones transmetteurs, dont le diaphragme a 2^{mm} , 3^{mm} ou 4^{mm} d'épaisseur, on entend fort bien, avec une faible intensité il est vrai, dans le récepteur l'échelle continue de sons ou d'accords indiqués ci-dessus et la parole articulée

avec son timbre. Il est donc *nécessaire* ici qu'il se produise dans le diaphragme des mouvements différents de ceux qui correspondent à la production du son fondamental et des harmoniques.

Les considérations précédentes, basées sur les lois de l'acoustique et de l'élasticité, présentent principalement un caractère théorique, bien que s'appuyant sur un certain nombre d'expériences très simples. Elles peuvent être confirmées par une seconde série de faits d'un caractère plus expérimental encore.

IV. On peut agir sur le disque d'un téléphone, non plus directement, mais par l'intermédiaire de substances quelconques, susceptibles ou non d'émettre des sons propres, métalliques ou non, corps magnétiques ou non, élastiques ou mous, fibreux ou cristallisés, homogènes ou hétérogènes, ainsi qu'on le voit dans l'énumération suivante des corps essayés : mica, verre, zinc, fer, cuivre, liège, caoutchouc, bois, papier, coton, plume, linge, cire molle.

Il suffit d'appuyer une lame de ces corps sur les bords destinés habituellement à visser le couvercle de l'instrument, emprisonnant ainsi une couche d'air plus ou moins épaisse entre le disque de fer et la plaque essayée.

On reconnaît que l'interposition de cette lame n'altère pas les propriétés téléphoniques, en particulier la reproduction du timbre, et ne fait même pas varier sensiblement l'intensité des effets, toutes choses égales d'ailleurs ⁽¹⁾.

Pour éviter qu'on ne puisse attribuer ce résultat aux vibrations directes des parties latérales de l'instrument, on entoure le téléphone tout entier d'une épaisse couche d'ouate et l'on constate préalablement qu'on ne transmet rien quand on parle contre les parois, dans ces conditions.

La même précaution étant prise, en augmentant l'épaisseur de la lame interposée, on affaiblit bien en général, il est vrai, graduellement l'intensité de l'effet produit; mais la hauteur et le timbre de la voix ne sont nullement altérés, et ce dernier au contraire devient de plus en plus net.

(1) M. Ochorowicz avait déjà montré qu'on peut interposer une lame de caoutchouc entre la bouche et un téléphone.

J'ai observé ce fait, par exemple, avec une lame de verre de 5^{mm} d'épaisseur, une lame de cuivre de 2^{mm}, 5, une plaque de liège de 75^{mm}, un bloc de bois de 50^{mm}, une couche d'ouate de 20^{mm}, un livre broché de 50^{mm}, une couche d'édredon d'environ 0^m, 30 entourant l'instrument de toutes parts, une couche de sable de 0^m, 05.

Dans l'eau, l'effet produit est remarquable : quand l'instrument est entouré d'une couche d'eau de 0^m, 02 ou 0^m, 03, il donne, quand on parle à la surface du liquide, des résultats un peu affaiblis, mais le timbre est parfaitement reproduit, et, si l'on augmente jusqu'à 0^m, 15 l'épaisseur de la couche d'eau, il n'y a pas de nouvel affaiblissement sensible.

V. Au lieu de faire varier l'action extérieure sur les disques, on peut les mettre manifestement hors d'état de produire des sons fondamentaux et des harmoniques par le jeu de leur élasticité propre.

1° On sait d'abord qu'on construit de bons téléphones transmetteurs en prenant pour diaphragme une membrane quelconque sur laquelle est collé un petit morceau de fer, auquel cas il n'y a pas lieu de songer à des sons propres de ce fragment de fer : c'est même la forme primitive du transmetteur de M. G. Bell. Mais on peut agir sur les disques ordinaires : il suffit de les charger de petites masses en quelques points irrégulièrement distribués sur leur surface. On leur enlève ainsi ce qu'on peut appeler leurs propriétés *acoustiques* habituelles, mais nullement leurs qualités *téléphoniques*.

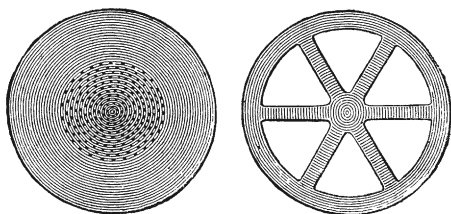
2° On peut agir sur la substance même du disque (*fig. 3*).

Pour cela, on prend deux disques aussi identiques que possible, au point de vue acoustique et téléphonique ; on perce l'un d'eux comme une écumoire, de façon à enlever environ la moitié de la matière de la plaque : celle-ci, acoustiquement, ne donne plus aucun son musical ; mais, téléphoniquement, elle donne absolument les mêmes effets que la première, seulement avec moins d'intensité ; mais il s'agit ici de la *qualité* et de la *nature* des phénomènes et non de leur intensité. Il faut prendre la précaution, dans cette expérience, d'encastrier avec la plaque un disque de papier

fin de même diamètre, ou de recouvrir le téléphone d'une lame de caoutchouc, pour empêcher l'air mù par la voix de traverser la plaque et de produire une résonnance gênante dans la boîte même de l'instrument.

La première plaque est à son tour découpée en forme de roue à 5 ou 6 rayons étroits, soutenant un disque central dont la surface est un peu supérieure à celle du pôle magnétique en présence. Dans cet état, sa masse est diminuée de moitié, et elle donne les mêmes résultats téléphoniques que lorsqu'elle était pleine.

Fig. 3.



Dans ces deux expériences, il paraît vraiment bien difficile d'admettre la possibilité de mouvements de la plaque, caractérisés par une division en sections séparées par des lignes nodales.

3° En poussant à l'extrême les expériences précédentes, on est conduit naturellement à essayer un système magnétique, manquant autant que possible d'homogénéité et de consistance au point de vue élastique ou acoustique.

A cet effet, on peut prendre une toile métallique en fil de fer. En plaçant un disque de cette toile à la place du disque ordinaire du téléphone, de façon qu'il ne soit pas en contact avec le pôle de l'aimant, en encastrant avec la toile une feuille de papier, pour éviter les effets de résonnance dus à l'introduction de l'air par les mailles de la toile, on obtient des effets de même nature qu'avec un disque en fer, mais avec une intensité moindre.

Il n'est d'ailleurs pas nécessaire d'encastrer la toile métallique; il suffit de la fixer sur un support par trois points, à une petite distance du pôle de l'aimant.

On peut se servir de toiles à mailles de grandeur variable, depuis 1^{mm} jusqu'à 0^{mm},4 et 0^{mm},3; les toiles les plus serrées donnent

les résultats les plus intenses, ce qui se conçoit fort bien, indépendamment de toute théorie, le nombre par unité de surface des éléments magnétiques susceptibles de réagir d'une manière quelconque sur l'aimant placé en face d'eux augmentant avec la finesse du tissu. Il paraît encore bien difficile de songer, avec un diaphragme magnétique de cette nature, à des mouvements transversaux d'ensemble, avec division en concamérations séparées par des lignes nodales.

Toutes les expériences qui viennent d'être indiquées ont été faites d'ailleurs avec des téléphones à champs magnétiques fort différents, savoir :

1° Un téléphone du système Bell avec aimant rectiligne, dont un pôle de forme circulaire est en face du diaphragme magnétique ;

2° Un téléphone du système Gower, où le diaphragme est attiré par deux pôles contraires voisins, de forme rectangulaire allongée ;

3° Un téléphone du système d'Arsonval agissant par deux pôles contraires concentriques, l'un circulaire intérieur, l'autre annulaire extérieur.

Tous les trois ont donné des résultats de même nature (à l'intensité près des phénomènes, qui n'est pas en question pour le moment).

On ne peut alors s'empêcher de penser que le mécanisme en vertu duquel les diaphragmes téléphoniques exécutent leurs mouvements est tout au moins analogue, sinon identique, à celui par lequel tous les corps solides de forme quelconque, un mur par exemple, transmettent à l'une de leurs surfaces tous les mouvements vibratoires, simples ou complexes, successifs ou simultanés, de période variant d'une manière continue ou discontinue, qu'on produit dans l'air en contact avec l'autre surface. Ce serait un phénomène comme ceux qu'on caractérise en Acoustique par le mot de *résonnance*.

Dans les diaphragmes d'épaisseur suffisante, ce genre de mouvements existerait seul ; dans les diaphragmes minces, leurs mouvements d'ensemble correspondant à leurs sons *propres* et caractérisés par des formes particulières de lignes nodales se superposeraient aux précédents, en vertu de la loi de la superpo-

sition des petits mouvements, toutes les fois que l'on émettrait des vibrations dont la période serait la même que celle de ces sons eux-mêmes : superposition peut-être plus fâcheuse qu'utile, d'ailleurs, car, s'il en résulte en ce cas, une augmentation d'intensité, c'est aux dépens de la reproduction du timbre, les harmoniques du diaphragme ne pouvant coïncider que par le plus grand hasard avec ceux des sons qui mettraient en jeu le son fondamental de ce diaphragme.

Dans le premier cas, les plaques se comporteraient véritablement comme de simples *transmetteurs* de mouvements vibratoires, indépendamment de leur forme géométrique. Dans le second, elles agiraient toujours de la même manière, et de plus, à l'occasion, d'une manière en quelque sorte plus active, plus personnelle, d'après les lois de l'élasticité relatives à leur forme géométrique, plus ou moins modifiées par l'hétérogénéité de leur constitution moléculaire, et par l'indétermination et l'insuffisance de leur encastrement.

Il me semble qu'on se rendrait ainsi assez bien compte des mouvements généraux et complexes des diaphragmes téléphoniques transmetteurs, permettant la reproduction d'une échelle continue de sons successifs, et superposés en accords musicaux ou en séries, telles que celles que l'on considère dans l'explication du timbre; et, en même temps, on s'expliquerait les renforcements produits par les diaphragmes très minces, à certains points de cette échelle continue et les altérations du timbre qui les accompagnent généralement.

Le premier point de la théorie du téléphone transmetteur, savoir, la nature des mouvements du diaphragme, se trouverait par là même ramené à un phénomène connu d'acoustique ou d'élasticité.

B. Rôle du diaphragme au point de vue de la transformation d'énergie qui résulte de ses mouvements. — Les mouvements du diaphragme se produisent dans un champ magnétique : il en résulte une transformation d'énergie mécanique cinétique en énergie magnétique également cinétique, constituant le second point à étudier dans la théorie du transmetteur.

En remplaçant dans un téléphone Bell l'aimant permanent par

un électro-aimant, on peut faire varier l'intensité du champ dans lequel est placé le diaphragme, et produire d'ailleurs des champs beaucoup plus intenses que ceux dont on se sert ordinairement.

En opérant de cette manière, on constate :

1° Que si le disque est simplement *fixé* sur ses bords sans être encastré complètement, en faisant varier l'intensité du champ, la hauteur du bruit produit par le choc sur le disque augmente comme si on l'encastrait de plus en plus; mais cette variation de hauteur, même avec des champs intenses, est beaucoup plus petite que celle qui résulte de la pression sur les bords due à l'encastrement progressif. Avec des champs magnétiques ordinaires de téléphone, la variation en question est à peu près insensible.

2° Si le disque est fortement encastré, l'effet du champ est également à peu près insensible ⁽¹⁾.

Il résulte de cette première observation que la présence du champ magnétique dans un téléphone ne change pas les faits précédemment indiqués relatifs aux effets de l'encastrement ni la conclusion qui en a été tirée.

En second lieu, il est évident que l'essentiel, pour la production des phénomènes téléphoniques, est la présence de ce champ magnétique : l'intensité de ces phénomènes dans le récepteur en dépend directement, suivant une loi plus ou moins complexe, et c'est par suite de variations de cette intensité aux divers points du

(1) Si l'on pose des disques sur leur ligne nodale circulaire, à peu de distance du pôle d'un téléphone, les figures nodales ne sont pas sensiblement altérées; il en est de même de la *qualité* des sons produits par le choc et de leur *hauteur*, quand les disques sont bien plans.

Quand les disques sont un peu courbes, ce qui arrive souvent quand ils sont minces, la hauteur du son varie quand on les met à une petite distance de l'aimant; ce son s'élève quand la convexité est tournée vers le pôle; il s'abaisse, quand c'est la concavité. Avec des champs suffisamment intenses, la variation peut atteindre un intervalle d'une seconde mineure environ; mais la nodale n'est pas sensiblement altérée. C'est comme si, les disques ne changeant pas de diamètre, leur épaisseur augmentait légèrement dans le premier cas et diminuait dans le second. Je n'insiste pas pour le moment sur ce fait; mais il est bon de le connaître, car il est sensible, même avec le champ magnétique d'un téléphone Gower, par exemple, et il explique en même temps la difficulté d'entretenir électriquement le mouvement de plaques courbes, la période du son de la plaque libre étant différente de celle du son de la plaque attirée par l'électro-aimant d'entretien au moment même de l'attraction.

champ que s'opère la transformation qui se manifeste par la production de courants induits dans la bobine enroulée autour du pôle magnétique. Il résulte de ce qui précède que ces variations, dues aux mouvements des points du diaphragme, ne sont pas nécessairement liées à la rigidité de ce diaphragme et aux qualités acoustiques ou élastiques correspondant à sa forme géométrique.

En songeant à la faible rigidité d'une toile métallique en fer qui possède pourtant, ainsi que je l'ai montré, les propriétés téléphoniques; en concevant qu'on diminue graduellement cette rigidité jusqu'à arriver à une série de molécules de fer disséminées dans un champ magnétique et qui pourraient en quelque sorte être indépendantes les unes des autres, j'ai été conduit à l'idée qu'on pourrait se passer de diaphragme rigide ou non, et agir plus directement sur le champ magnétique même.

A cet effet, j'ai essayé tout d'abord, enlevant tout diaphragme, d'agir sur le pôle unique ou multiple de divers téléphones. On n'obtient alors rien de net dans un récepteur ordinaire : quelquefois on produit un effet extrêmement faible, qui se traduit dans un téléphone récepteur par un son aigu très faible, se reproduisant quand on prononce la même consonne; mais il n'est pas possible de tenir compte d'un phénomène aussi faible et aussi confus, et il ne saurait entrer en rien en ligne de compte dans les expériences suivantes :

J'ai songé ensuite à matérialiser, pour ainsi dire, le champ magnétique avec de la limaille de fer jetée sur le pôle ou les pôles d'un téléphone. On obtient alors ce résultat remarquable : *il suffit de quelques grains de limaille de fer dessinant dans l'espace des amorces de ligne de force sur le pôle d'un aimant de téléphone pour reproduire les sons musicaux et la parole articulée.*

Pour s'en assurer, on prend comme récepteur un téléphone ordinaire du système d'Arsonval, par exemple, et un transmetteur identique. On enlève le diaphragme en fer-blanc de ce dernier, puis on remet le couvercle portant une embouchure circulaire, dont les dimensions sont à peu près égales à celles du pôle central de l'aimant.

On commence par parler sur l'aimant lui-même, à travers l'embouchure : on n'entend rien de sensible dans le récepteur.

On dévisse le couvercle, on pose une rondelle de papier mince sur l'aimant (pour éviter de remplir de limaille de fer l'intervalle entre les pôles de l'aimant de la bobine); on remet le couvercle, puis on prend une petite pincée de limaille de fer pesant environ un décigramme seulement, et on la laisse tomber à travers l'embouchure sur la rondelle de papier, où elle se dispose en forme de petites houppes dessinant des amorces de lignes de force; le papier se trouve d'ailleurs ainsi appliqué contre les pôles, ce qui permet de tourner le téléphone en tous sens, et même de le renverser sans que la limaille ni le papier ne bougent.

On obtient ainsi un appareil qui possède, sauf l'intensité des effets, toutes les propriétés d'un téléphone ordinaire. En particulier, si l'on parle sur la limaille à travers l'embouchure, comme on fait d'ordinaire sur le diaphragme, on entend dans le récepteur, très faiblement, il est vrai, mais avec une articulation nette, quelques mots des phrases prononcées.

Si, d'ailleurs, on veut éviter de parler directement sur la limaille, à cause des inconvénients que peut produire la vapeur d'eau exhalée par la bouche, on peut fermer l'embouchure avec une lame mince de mica, de verre ou de caoutchouc, ce qui n'altère en rien l'effet produit.

On ajoute ensuite, graduellement, de nouvelles quantités de limaille; les lignes de force se dessinent de mieux en mieux: l'effet devient de plus en plus intense. Mais, en continuant à ajouter de la limaille, on arrive à un maximum d'effet, que l'addition d'une nouvelle quantité de limaille diminue nettement, circonstance intéressante sur laquelle je reviendrai plus tard.

Cet effet maximum est certainement de beaucoup inférieur, dans ces conditions, à l'effet du diaphragme en fer ordinaire, ce qui tient à ce que le nombre de molécules de fer par centimètre carré y est beaucoup moindre.

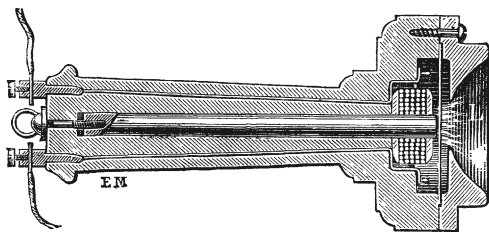
Après avoir obtenu ce premier résultat, j'ai cherché à augmenter l'intensité de l'effet produit. Pour cela, j'ai songé à ajouter à l'action mécanique *directe* des ondes aériennes sur les lignes de force en limaille l'action de ces ondes sur un diaphragme non magnétique, ou du moins dont le pouvoir magnétique spécifique est extrêmement petit par rapport à celui du fer, de sorte que son effet particulier dans le champ de l'aimant est négligeable dans les

conditions de l'expérience. Les mouvements propres de ce diaphragme servant de support à la limaille, devaient contribuer, sans être nuisibles en ce cas, à augmenter les variations du champ.

C'est en effet ce qui s'est produit avec des diaphragmes minces tirés des substances les plus variées, savoir : carton, mica, verre, caoutchouc vulcanisé, zinc, aluminium, cuivre, etc.

Pour faire l'expérience, on découpe les disques de ces substances sous une épaisseur de deux à trois dixièmes de millimètre, en leur donnant les dimensions du diaphragme en fer du téléphone que l'on emploie, et on les dispose dans l'instrument comme on le fait de ce diaphragme même. Il suffit alors de laisser tomber de la limaille sur ces disques à travers l'embouchure du couvercle, comme on l'a indiqué tout à l'heure, et l'on obtient un téléphone transmetteur qui peut être retourné en tous sens, et dont les effets sont plus intenses que lorsque la limaille est posée sur le pôle même sans intermédiaire. On peut d'ailleurs remplacer le couvercle par une lame de mica, de verre ou de caoutchouc, qui n'altère pas les effets produits tout en protégeant la limaille et son support (*fig. 4*).

Fig. 4.



On arrive donc ainsi à construire un *téléphone à limaille de fer L*, dont les effets sont moins intenses, il est vrai, que ceux du même téléphone à diaphragme mince en fer, mais qui possède peut-être, à un degré plus élevé, les propriétés téléphoniques essentielles, et en particulier la reproduction du timbre de la parole articulée; de plus, il est réversible comme les autres et peut servir de récepteur, il est vrai, peu intense. Mais, si l'on augmente l'intensité du champ magnétique, l'intensité des effets indiqués ci-dessus augmente notablement.

Par exemple, on prend un gros électro-aimant (tel que ceux qui

servent à montrer les courants de Foucault), animé par un courant de 5 ou 6 ampères; on remplace le noyau aimanté d'un téléphone Bell par un noyau en fer doux de 0^m,04 à 0^m,05 de longueur dont on met une extrémité en contact avec l'un des pôles de l'électro-aimant : on obtient ainsi à l'autre extrémité un champ magnétique assez intense. En répétant avec le téléphone ainsi constitué les expériences ci-dessus, les effets obtenus sont plus intenses; si bien qu'avec un diaphragme en clinquant de cuivre ou en carton et de la limaille on peut arriver à un résultat comparable, pour l'intensité, à celui qu'on obtient avec un téléphone ordinaire muni de son diaphragme de fer.

En résumé, la construction du téléphone à limaille de fer démontre nettement ces deux points :

1° La présence dans le champ magnétique d'un téléphone transmetteur de diaphragmes magnétiques rigides ou non n'est nullement *indispensable* pour produire les effets téléphoniques; mais ils sont *utiles* pour en augmenter l'intensité, en présentant par unité de volume un plus grand nombre de molécules magnétiques à l'action des forces extérieures, ou bien, comme on dit souvent, en opérant une grande concentration des lignes de force du champ.

2° Il suffit, pour produire ces effets, d'exercer des déformations mécaniques directes sur les lignes de force du champ réalisées avec de la limaille de fer.

Ce résultat paraît de nature à mettre mieux en évidence la transformation d'énergie mécanique en énergie magnétique cinétique qui constitue le fond même de la théorie du téléphone transmetteur.

THÉORIE DU RÉCEPTEUR.

Un téléphone électromagnétique récepteur se compose, d'une manière générale, d'un aimant à pôles unique ou multiples, entourés d'hélices, d'un diaphragme mince en fer ou en acier, de forme quelconque, encastré sur ses bords et placé très près des pôles de l'aimant.

Lorsqu'un transmetteur quelconque, téléphonique ou microphonique, fonctionne dans le circuit du récepteur, les hélices de celui-ci

sont sillonnées de courants dont la nature intime n'est pas encore bien connue, mais (et cela suffit pour l'objet que nous avons en vue), par suite de la manière même dont ces courants sont produits, par exemple quand on *parle* sur le transmetteur, il est certain qu'ils résultent de la superposition d'effets complexes et éprouvent à chaque instant des variations continuelles dans toutes leurs propriétés, soit qualitatives, comme leur *signe*, soit quantitatives, comme leur *intensité*.

L'étude de ces courants, de leur nature propre, de leurs variations est fort difficile et fort délicate, et nous la laissons de côté pour le moment. Les effets propres du récepteur commencent à partir du moment où ces courants lui arrivent et où s'opère la transformation d'énergie électrocinétique en énergie magnétique dans l'aimant et dans le champ magnétique qui l'entoure.

Les recherches relatives à ces effets ont été faites à deux points de vue : au point de vue *pratique*, en vue d'augmenter le rendement des récepteurs et l'intensité de leurs mouvements. Une quantité considérable de travaux ont été effectués dans toutes les parties du monde et l'on travaille encore beaucoup, de toutes parts, dans cette voie. Je compte revenir bientôt sur les résultats acquis à cet égard ; mais ce qui m'occupe en ce moment, c'est un second point de vue de la question des récepteurs, celui de la *théorie* de ses effets.

Un grand nombre d'études intéressantes ont été faites aussi de toutes parts sur ce sujet, et leur bibliographie serait certainement très étendue. Du Moncel, principalement, a donné dans *La Lumière électrique* une analyse de ces études, au fur et à mesure qu'elles étaient connues, et il a résumé les plus importantes dans les éditions successives de son livre sur le *Téléphone*, en indiquant les noms de ceux qui les ont faites.

Je crois qu'on peut résumer les résultats ainsi acquis en vue d'éclaircir la théorie du récepteur dans les deux points suivants :

- 1° Toutes les parties d'un récepteur électromagnétique : noyau, hélice, plaque, manche, etc., sont simultanément en vibration ;
- 2° On peut employer dans les transmetteurs des diaphragmes en fer de toutes épaisseurs, jusqu'à 0^m,15.

Il résultait déjà du premier point, mis en lumière principalement

par MM. Boudet de Pâris, Laborde, A. Bréguet, Ader, du Moncel, que la présence du diaphragme n'était pas plus *indispensable* dans le transmetteur qu'elle ne l'est dans le récepteur, ainsi que je l'ai montré plus haut.

Cependant il faut bien remarquer que les effets *de beaucoup* les plus énergiques sont ceux de la plaque. On n'a pu mettre hors de doute les vibrations du noyau et de l'hélice dans les récepteurs *ordinaires* qu'en employant des courants transmetteurs extrêmement énergiques, et, quand on a voulu se servir de transmetteurs ordinaires, il a fallu opérer sur des récepteurs présentant des dispositions spéciales ou très simplifiées, comme l'ont fait particulièrement MM. Ader et du Moncel.

Il résultait du second point, indiqué déjà par M. G. Bell et nettement prouvé par M. A. Bréguet, qu'il y avait dans le récepteur *d'autres effets* que ceux qui pouvaient résulter des vibrations transversales correspondant au son fondamental et aux harmoniques du diaphragme.

On sait que du Moncel, appuyant une théorie sur ces deux catégories de faits, a soutenu que les effets du téléphone récepteur étaient principalement dus à des vibrations moléculaires du noyau de l'électro-aimant (analogues à celles qu'avaient étudiées Page, de la Rive, Wertheim, Reiss, etc.) surexcitées et renforcées par le diaphragme fonctionnant comme une armature.

Voici du reste un passage extrait de la 4^e édition (1882) de son livre sur le *Téléphone* (p. 268), qui résume bien la théorie :

« Quelles que soient les conditions magnétiques du barreau, les courants induits de différente intensité qui agissent sur lui provoquent des modifications dans son état magnétique, d'où résultent des vibrations moléculaires par contraction et dilatation. Les vibrations se produisant également dans l'armature, sous l'influence des aimantations et désaimantations qui y sont déterminées par l'action magnétique du noyau, renforcent celles de ce noyau, en même temps que les modifications dans l'état magnétique du système se trouvent amplifiées par suite de la réaction des deux pièces magnétiques l'une sur l'autre. »

Il y a certainement du vrai dans cette théorie; mais elle est incomplète, en ce sens que les vibrations moléculaires du noyau

du récepteur ne sont qu'un phénomène accessoire et non principal.

En tout cas, je crois qu'on peut présenter assez simplement la théorie du téléphone électromagnétique récepteur, en se reportant aux faits qui m'ont servi de base pour la théorie du transmetteur, qui résultent d'études faites sur des téléphones de *formes ordinaires* et qui ont été étendus à des récepteurs de même forme.

Il me suffira de les rappeler successivement en les résumant, et je n'aurai presque partout qu'à remplacer le mot *transmetteur* par le mot *récepteur*.

I. Le récepteur est soumis constamment à des effets variables : les mouvements qui en résultent dans le diaphragme ne peuvent être que *forcés* ; ils ne peuvent pas correspondre en général aux sons *particuliers* de ce diaphragme (fondamental et harmoniques).

II. Le diaphragme du récepteur, avec son encastrement indéterminé, ne peut, pas plus que celui du transmetteur, effectuer, en vibrant transversalement, une série *continue* de sons ou d'accords musicaux dont la hauteur varie graduellement : ses sons particuliers forment une série *limitée* et *discontinue*. A plus forte raison, ne peut-il, à l'aide de mouvements transversaux, effectuer les vibrations complexes nécessaires pour la reproduction du timbre d'une voix qui parle sur le transmetteur.

III. Il est *nécessaire* que ce diaphragme prenne des mouvements d'un autre genre, car on peut lui donner, sans altérer ses propriétés de reproduction téléphonique des sons (intensité des effets mise à part), des épaisseurs telles (de 0^m,002 à 0^m,150) que le son fondamental et ses harmoniques soient beaucoup au-dessus de ceux de la voix humaine.

IV. Ainsi que je l'ai indiqué pour le transmetteur, on peut interposer entre l'oreille et le récepteur des lames d'une matière quelconque : les propriétés téléphoniques et, en particulier, la reproduction du timbre ne sont pas altérées par cette interposition.

V. Un diaphragme fonctionne aussi bien comme récepteur que comme transmetteur, lorsqu'il est chargé de masses, même irrégu-

lièrement distribuées ; il suffit, à la rigueur, pour en être convaincu de songer que les diaphragmes du téléphone Gower, chargés de leur appareil d'appel, sont excellents.

Il en est de même quand on fend, perce, découpe le diaphragme.

VI. Enfin, le téléphone transmetteur à limaille de fer, que j'ai décrit ci-dessus, est *réversible*, ainsi que je l'ai déjà indiqué, et peut fonctionner comme récepteur.

Il est donc bien démontré par cet ensemble de faits :

1° Que pour la réception, pas plus que pour la transmission, la rigidité du diaphragme n'est *indispensable* ;

2° Qu'il suffit, pour recevoir comme pour transmettre, de donner, en quelque sorte, un support matériel aux modifications rapides produites dans le champ magnétique du récepteur par les courants induits qui parcourent l'hélice ; on y arrive simplement avec de la limaille de fer qui se dispose suivant les lignes de force ;

3° Que le diaphragme ne sert qu'à *augmenter l'intensité* des effets : d'abord, en concentrant les lignes de force du champ, et, en second lieu, en augmentant la masse d'air à laquelle sont transmis les mouvements résultant de la transformation d'énergie qui s'opère aux divers points du champ magnétique.

Quand le diaphragme est épais, les mouvements dont il est animé et qui se transmettent à l'air environnant et à l'oreille sont, lorsqu'il fonctionne comme transmetteur, des mouvements de *résonnance* indépendants de la forme extérieure.

Quand il est très mince, les mouvements particuliers correspondant aux sons qu'il peut produire (fondamental et harmoniques), en vertu de sa forme géométrique et de sa structure en vibrant transversalement, peuvent se superposer aux précédents. En effet, il peut arriver alors que ces sons se trouvent dans les limites de hauteur où se meut ordinairement la voix humaine, de l'*ut*₂ à l'*ut*₄ ; mais alors, comme les harmoniques de la voix, pas plus que ceux des instruments de musique usuels, ne peuvent coïncider avec ceux du diaphragme que par le plus grand des hasards, l'intensité des effets ne peut s'obtenir ainsi qu'aux dépens de la bonne reproduction du timbre. L'expérience ne laisse aucun doute sur l'exactitude de cette conséquence de la théorie.

Ainsi donc, en diminuant l'épaisseur du diaphragme, on perd en *qualité* ce qu'on peut gagner, pour ainsi dire, en *quantité* ou intensité. Mais, même sur ce dernier point, il y a un maximum pour le récepteur, comme je l'ai indiqué pour le transmetteur à limaille de fer. Pour un champ magnétique d'intensité donnée, il y a, toutes choses égales d'ailleurs, une épaisseur de diaphragme qui donne un effet téléphonique maximum. Ce résultat, analogue à celui qu'on trouve dans d'autres phénomènes électromagnétiques, peut expliquer l'insuccès de beaucoup de tentatives faites, un peu au hasard, en vue d'augmenter l'intensité des effets des récepteurs téléphoniques électromagnétiques.
