Un «effet» surprenant

par Élie LÉVY
Professeur honoraire au lycée Pasteur
92200 Neuilly-sur-Seine

Rappelons qu'il s'agit de l'action inattendue d'un champ électrostatique sur une aiguille aimantée (voir Bulletin n° 732, page 533)

J'ai pour ma part utilisé une banale petite aiguille aimantée, plate, en forme de losange allongé, nue (non recouverte de substance plastique), montée sur pivot vertical. Le champ électrostatique est un champ uniforme obtenu en établissant, au moyen d'une machine de Wimshurst, une tension électrique entre les armatures circulaires planes d'un condensateur d'AEpinus. L'aiguille est placée au centre de symétrie du condensateur.

Les lecteurs qui ont tenté l'expérience ont pu constater que l'aiguille aimantée, contrairement à toute attente, n'est pas du tout insensible à l'action d'un champ électrostatique.

Voici plus précisément quelques unes des premières observations que chacun peut faire facilement.

LES PREMIÈRES OBSERVATIONS

1 - Plongée dans un champ électrostatique uniforme, de direction perpendiculaire au méridien magnétique et de faible intensité (machine de Wimshurst mise en marche puis rapideent arrêtée), l'aiguille dévie de la position d'équilibre que lui imposait le champ magnétique terrestre. Elle oscille légèrement puis s'arrête dans une nouvelle position qui fait avec sa position initiale un angle d'autant plus grand que le champ électrostatique est plus intense (appréciation qualitative).

2 - Si le sens du champ électrostatique est inversé, ce que l'on produit en modifiant la polarité respective des armatures du condensateur, le sens de la déviation ne s'inverse pas. On est tenté de dire qu'à une même valeur de l'intensité du champ, quel que soit le sens de celui-ci, correspond une même position d'équilibre. Mais ce n'est qu'une

impression. A-t-on réalisé chaque fois la même valeur pour l'intensité du champ ?

3 - Le sens de la déviation dépend par contre de la position initiale de l'aiguille, dont le grand axe n'est jamais tout à fait parallèle aux plans des armatures. En donnant délibérément une valeur significative au petit angle θ entre ce grand axe et le plan médian du condensateur, on constate que la déviation se fait toujours dans le sens qui entraîne un accroissement de cet angle (quel que soit par ailleurs le sens du champ électrique !)

4 - Lorsque l'intensité du champ électrostatique prend une valeur suffisante (machine en rotation franche) l'aiguille oscille avec une amplitude de plus en plus grande, puis se met à tourner autour de son pivot, d'autant plus vivement que la vitesse de rotation de la machine est plus grande (champ plus intense ?).

5 - Ce mouvement de rotation de l'aiguille autour de son pivot s'amorce dans un sens ou dans l'autre, de façon apparemment aléatoire !

6 - Si l'on cesse de faire tourner la machine de Wimshurst, le mouvement de l'aiguille s'amortit progressivement, puis l'aiguille s'arrête dans une nouvelle position d'équilibre.

7 - L'aiguille reprend en toute circonstance la position d'équilibre initiale imposée par le champ terrestre, si le champ électrostatique est annulé par mise en liaison électrique des deux armatures du condensateur.

Les Collègues à qui je fis part de ces observations se montrèrent très sceptiques. L'un d'entre eux, tout à fait incrédule, me suggéra finement que le mouvement de l'aiguille était dû sans doute... au courant d'air provoqué par la rotation des plateaux de la machine électrostatique ! Un autre me traita plaisamment d'hérétique. Un troisième, plus réaliste, me demanda une démonstration...

Il faut convenir que ces observations, en apparence paradoxales, sont à première vue à peine croyables. Mais les faits sont là. Chacun peut facilement s'en assurer. Il faut donc essayer d'en trouver l'explication.

PREMIÈRE TENTATIVE D'EXPLICATION

Une première hypothèse vient facilement à l'esprit. Initialement, l'aiguille aimantée est en équilibre sous l'action de la composante horizontale du champ magnétique terrestre. La déviation qu'elle subit lors de la mise sous tension du condensateur peut résulter de l'apparition d'un champ magnétique supplémentaire, comme dans l'expérience d'Oersted.

Il n'existe pas ici de conducteur filiforme, ni, à première vue, de courant électrique. Cependant, l'air ambiant qui sert de diélectrique n'est pas un isolant parfait. Sa conductivité σ, très faible certes, n'est pas nulle. En outre lorsque nous chargeons le condensateur, nous créons dans le diélectrique un champ électrostatique $\vec{E}$. A ce champ variable (son intensité initiale était nulle) correspond un «courant de déplacement». Au total, il existe en tout point du diélectrique, pendant la mise en charge, du courant de densité $\vec{j} = \vec{j}_c + \vec{j}_d$, où $\vec{j}_c = \sigma\vec{E}$ est la densité du courant de conduction, et $\vec{j}_d + \varepsilon\,\partial\vec{E}/\partial t$ est la densité du courant de déplacement. (ε est la permittivité absolue du diélectrique). Seule l'intensité du champ $\vec{E}$ étant ici variable, toutes les lignes de courant, comme les lignes de champ, sont normales aux armatures.

En somme l'air entre armatures joue le rôle d'un conducteur, non filiforme mais cylindrique, parcouru par un courant de densité uniforme $\vec{j}$. On peut donc dire, en simplifiant, que l'on réalise ainsi une «expérience d'Oersted» dans laquelle l'aiguille aimantée est libre de s'orienter, à l'intérieur même du conducteur, sous l'action combinée de la composante $\vec{H}$ du champ terrestre et du champ magnétique $\vec{B}$ créé par le courant.

Ce champ $\vec{B}$ serait calculable si l'on connaissait la loi de variation du champ électrique $\vec{E}(t)$. En fait, compte tenu de la symétrie du montage, on peut affirmer sans calculs que les lignes de champ magnétique sont, à tout instant, des cercles concentriques, contenus dans des plans verticaux parallèles aux armatures, et dont l'axe commun est confondu avec l'axe du condensateur. Le «théorème d'Ampère» pourrait servir à préciser la valeur de l'intensité du champ $\vec{B}$ en chaque point.

Admettons que, localement, le champ $\vec{B}$ soit pratiquement uniforme dans le petit volume occupé par notre petite aiguille. Il en résulte que sous l'action éventuelle de ce champ, l'aiguille serait soumise à un couple de forces, dont le moment $\vec{C}$, horizontal, tendrait à la faire tourner dans un plan vertical. Or comme il a été dit, l'aiguille est montée sur pivot vertical et ne peut donc tourner que dans un plan horizontal, et elle tourne effectivement dans un plan horizontal ! ...

Il est certes possible, et même vraisemblable, que notre montage ne possède pas la structure spatiale symétrique que nous lui supposons. Le champ $\vec{E}$ n'est peut-être pas rigoureusement horizontal. Comme on peut facilement le voir cela se traduirait par le fait que le moment $\vec{C}$ du couple magnétique pourrait posséder une composante verticale à laquelle on pourrait alors attribuer le mouvement observé de l'aiguille.

Mais cette explication est à rejeter. Lorsqu'on inverse, en effet, le sens du champ $\vec{E}$, la composante verticale de $\vec{C}$ devrait également changer de sens, et donc la déviation de l'aiguille s'inverser. Or les expériences 2) et 3) montrent nettement que le sens de la déviation de l'aiguille est indépendant du sens du champ $\vec{E}$...

En conclusion, il semble, si ces raisonnements sont corrects (?) que la déviation observée ne peut être attribuée au champ magnétique $\vec{B}$ dont l'existence est prévisible dans le cadre des théories classiques.

Faut-il alors imaginer l'existence d'un champ magnétique que ces théories ne prévoient pas ? Il nous a semblé plus prudent d'étudier au préalable la possibilité d'attribuer le mouvement de l'aiguille à l'action directe du champ électrostatique $\vec{E}$, et nous allons essayer de montrer que cette seconde hypothèse mène à des explications plausibles.

SECONDE TENTATIVE D'EXPLICATION

L'aiguille aimantée est évidemment une pièce métallique. Plongée dans un champ électrostatique, elle s'électrise par influence. Faisons l'hypothèse que les charges induites libres qui en résultent se répartissent quasi instantanément sur la surface de l'aiguille et que leur répartition s'ajuste à tout instant, même lorsque l'aiguille est en mouvement, de telle sorte que dans chacune de ses positions elle soit

assimilable à un conducteur en équilibre électrique (champ global nul en tout point intérieur). On sait que la densité surfacique des charges induites est alors particulièrement forte dans les régions de forte courbure, en particulier aux pointes de l'aiguille (extrémités de son grand axe).

Il est alors facile de comprendre que ces pointes sont attirées par les armatures du condensateur. L'aiguille dévie de sa position primitive.

Plus précisément, l'aiguille acquiert un moment électrique dipolaire $\vec{p}$, et se trouve donc soumise à un couple d'origine électrique dont le moment vertical vaut $\vec{C_e} = \vec{p} \Lambda \vec{E}$, si $\vec{E}$ est le champ électrique, supposé uniforme, créé entre les armatures du condensateur. Nous supposerons ici négligeables les perturbations locales dues aux charges induites.

Sous l'action de ce couple, l'aiguille se met en mouvement, puis s'arrête lorsqu'il y a compensation entre ce couple électrique moteur et le couple de rappel d'origine magnétique dû à l'action de la composante horizontale $\vec{H}$ du champ terrestre et dont le moment également vertical s'écrit : $\vec{C_m} = \vec{m} \Lambda \vec{H}$. $\vec{m}$ étant le moment magnétique de l'aiguille.

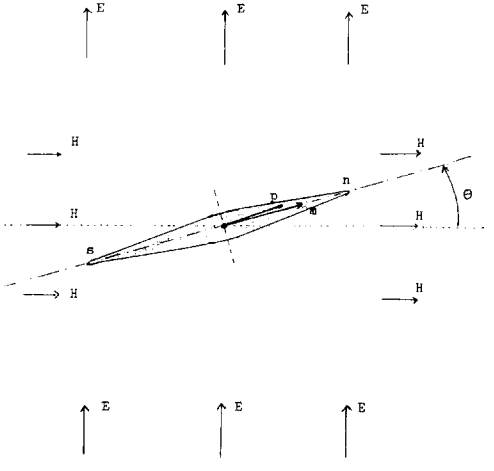
L'observation 1) se trouve ainsi justifiée.

Pour aller plus avant il faudrait en principe posséder plus d'informations sur les deux moments $\vec{p}$ et $\vec{m}$. Nous admettons naturellement que $\vec{m}$ est constant, porté par l'axe de l'aiguille et indépendant du champ électrique $\vec{E}$. (Nous n'avons trouvé dans la littérature scientifique aucune référence signalant l'existence de recherches, expérimentales ou théoriques, sur des modifications éventuelles des propriétés magnétiques macroscopiques d'un matériau provoquées par l'action d'un champ électrique ?). Il est évident par contre que $\vec{p}$ dépend de la répartition des charges induites et de leurs densités surfaciques locales, donc de la position de l'aiguille et de l'intensité du champ $\vec{E}$.

Naturellement pour connaître la forme mathématique de la fonction $\vec{p} = \vec{p}(E, \theta)$, où θ, angle du grand axe de l'aiguille avec le méridien magnétique, sert commodément à repérer l'orientation de celle-ci, il faudrait pouvoir déterminer la loi de répartition des charges induites pour chaque valeur de θ. Cependant, dans une première approche, il est possible, sans faire de calculs, de prévoir deux résultats.

En premier lieu, pour une position donnée de l'aiguille, supposée en équilibre électrostatique, la densité des charges induites en chaque point est proportionnelle à l'intensité du champ $\vec{E}$, et chacune de ces charges change de signe si $\vec{E}$ change de sens. Il en résulte que $\vec{p}$ change de sens avec $\vec{E}$ tandis que son module (sa norme) est proportionnel à celui de $\vec{E}$. Le couple électrique $\vec{C} = \vec{p} \wedge \vec{E}$ est donc indépendant du sens du champ, et sa valeur numérique proportionnelle au carré E^2. Cela justifie l'observation 2), observation que l'on peut compléter en confirmant ce qui était seulement intuitif : l'aiguille reprend exactement la même position d'équilibre lorsque le champ $\vec{E}$ reprend la même intensité après avoir été inversé. Notons que l'on pourrait peut-être utiliser ces circonstances pour mesurer, au moins grossièrement (après étalonnage ?), la valeur de l'intensité du champ et donc la valeur de la tension entre les deux pôles de la machine électrostatique.

En second lieu, il semble évident que le support du vecteur $\vec{p}$, qui se modifie certes lorsque l'aiguille tourne, reste pratiquement confondu avec le grand axe de l'aiguille, sauf pour les valeurs de θ égales à 0^o ou à 180^o. On en déduit une justification aisée pour l'observation 3), qui m'avait beaucoup intrigué



Et le mouvement de rotation continu (observation 4) ?

Lorsque la machine de Wimshurst est en rotation franche, la tension électrique entre ses pôles s'accroît, donc également le champ $\vec{E}$. Le moment du couple électrique, dont le module est proportionnel à E^2, prend vite des valeurs importantes. L'aiguille dévie d'un angle θ de plus en plus grand, et sa vitesse peut lui faire dépasser 90°. On peut se rendre compte que les couples électriques et magnétiques sont alors de sens tels qu'ils rappellent tous deux l'aiguilles vers sa position initiale. On comprend ainsi les mouvements d'oscillations de grande amplitude.

Lorsque le champ électrique dépasse une valeur critique, l'angle de déviation θ peut dépasser 180°. En chaque point de l'aiguille les charges surfaciques induites changent alors de signe et le moment dipolaire $\vec{p}$ change de sens. Les couples électriques et magnétiques sollicitent alors l'aiguille l'un et l'autre dans le sens qui accroît l'angle θ. Celui-ci repasse alors par la valeur 0° et le cycle recommence : l'aiguille tourne d'un mouvement continu. On peut préciser que ce mouvement peut se faire dans un sens ou dans l'autre selon que la valeur critique du champ $\vec{E}$ est atteinte alors que l'aiguille dans son mouvement d'oscillation tourne dans un sens ou dans l'autre. On peut donc avoir l'impression que le sens du mouvement de rotation est aléatoire (observation 5)

Le champ ayant dépassé sa valeur critique il semble que l'arrêt de la machine de Wimshurst ne devrait rien changer au mouvement de l'aiguille. Les armatures du condensateur sont en effet isolées et conservent en principe leurs charges respectives. Le champ $\vec{E}$ devrait donc conserver également sa valeur actuelle... L'observation 6 montre cependant, sans aucune ambiguïté, que le mouvement de l'aiguille s'amortit et cesse complètement !

J'ai pensé à une explication très simple.

La densité surfacique des charges induites sur les pointes de l'aiguille est alors fort importante. Cela peut provoquer une décharge progessive par ionisation de l'air (pouvoir des pointes). Les ions formés vont également neutraliser les charges portées par les armatures du condensateur sans que la machine électrostatique, actuellement à l'arrêt, ne puisse compenser ces pertes. Ce processus, spontané et progressif, s'arrête lorsque le champ $\vec{E}$ a repris une intensité suffisamment faible pour que l'on aboutisse à un nouvel équilibre de l'aiguille.

Effectivement ce phénomène de décharge devient parfaitement visible lorsque l'obscurité est faite dans la salle, et cela confirme croyons-nous notre hypothèse.

L'observation 7 enfin se comprend plus facilement. les armatures du condensateur ayant été mises en liaison électrique (grâce à l'éclateur de la machine électrostatique), le champ $\vec{E}$ disparait totalement. L'aiguille soumise au seul champ magnétique terrestre retrouve sa position d'équilibre initiale.

Il semble donc, en conclusion, qu'en faisant appel à l'action sur l'aiguille du champ électrostatique et sans faire intervenir un quelconque champ magnétique inconnu, il est possible de justifier les divers aspects des observations que nous avons citées et qui paraissent assez extraordinaires lorsqu'on les rencontre pour la première fois.

Cependant les raisonnements utilisés étant pour la plupart seulement intuitifs et le plus souvent purement qualitatifs, il m'a paru nécessaire d'imaginer quelques expériences complémentaires.

EXPÉRIENCES COMPLÉMENTAIRES

8 - En remplaçant l'aiguille aimantée par une aiguille en cuivre pur, de même forme, supportée par le même pivot, j'étais assuré d'éliminer l'influence de tout champ magnétique éventuel. Le résultat est spectaculaire.

a) En l'absence du champ électrique (machine de Wimshurst immobile), l'aiguille est en équilibre indifférent en toute position, ce qui confirme bien qu'elle est insensible au champ magnétique terrestre.

b) Si on a pris la précaution d'orienter son axe perpendiculairement aux armatures du condensateur, elle reste encore immobile lorsque la machine électrostatique est mise en marche. Mais il s'agit maintenant d'un équilibre stable, ce que l'on peut constater en écartant légèrement l'aiguille de sa position au moyen d'une baguette de verre (avec les précautions qui s'imposent !)

c) Si enfin avec cette même baguette on lance l'aiguille, dans un sens ou dans l'autre, on la voit tourner continûment, dans le sens choisi, comme le faisait l'aiguille aimantée. Dans les deux cas, b) et c), il suffit de faire l'obscurité dans la salle pour apercevoir de nouveau la décharge

par effluves entre les pointes de l'aiguille et les armatures du condensateur.

9 - En lieu et place de l'aiguille, j'ai eu l'idée de placer sur le même pivot un tourniquet électrique. On sait qu'il s'agit d'un petit disque circulaire plat en cuivre, terminé sur son pourtour par quelques pointes dirigées tangentiellement. On le voit généralement tourner spontanément lorsqu'on le met en contact électrique avec l'un des pôles d'une machine électrostatique. Il suffit ici de placer le tourniquet entre les armatures du condensateur d'AEpinus pour le voir tourner spontanément dès que le condensateur est mis en charge, sans qu'il soit nécessaire de le mettre en contact avec aucun organe. C'est là, me semble-t-il, un moyen d'illustrer simultanément plusieurs phénomènes : influence électrique, pouvoir des pointes, existence des forces de réaction...

10 - Remplaçons le tourniquet par un simple disque en cuivre circulaire plat, sans pointes. A l'obscurité on aperçoit toujours les traces d'une décharge par effluves partant des divers points de son pourtour, mais aucun mouvement de rotation spontané ne se produit et, si le disque est lancé, son mouvement s'amortit progressivement par les simples frottements habituels. Le moment électrique est ici en permanence colinéaire au champ électrique. Il n'y a pas de couple magnétique et le couple électrique est nul.

11 - Ces trois derniers types d'expériences, dans lesquelles l'intervention d'un champ magnétique éventuel est radicalement évité, donnent donc bien les résultats escomptés.

Et si l'on tentait l'inverse ?

C'est la question que je me suis posée, sans avoir pu la résoudre de façon pleinement satisfaisante. J'ai bien remplacé l'aiguille en cuivre par un petit solénoïde en fil de cuivre recouvert par un isolant, soutenu par deux fils conducteurs souples et parcouru par un courant continu. Contrairement à l'aiguille en cuivre, ce dispositif possède un moment magnétique, mais pas de moment électrique ?

Malheureusement, après qu'il se soit orienté spontanément dans le champ terrestre, on le voit se plaquer contre l'une des armatures dès que le condensateur est mis sous tension. L'isolant du fil de cuivre se charge-t-il par influence selon des lois mal connues ? ...

Par ce dernier type d'expériences j'explorais en fait la possibilité d'étudier expérimentalement la structure spatiale du champ magnétique $\vec{B}$. Tout ce qui précède montre qu'il est indispensable pour y arriver de s'affranchir des effets indésirables, car non négligeables, du champ électrique $\vec{E}$ sur une aiguille aimantée.

Peut-être réussirait-on cette étude en utilisant une petite boucle de fil conducteur nu, ou, mieux, une sonde de Hall. On pourrait alors déterminer en particulier l'intensité maximale de $\vec{B}$ (sans doute beaucoup plus faible que celle de la composante $\vec{H}$ du champ terrestre), contrôler l'existence simultanée des courants $\vec{j}_c$ et $\vec{j}_d$ dont nous avons fait état, et avoir une idée de leurs valeurs respectives. Le courant $\vec{j}_c$ existe seul lorsque le champ $\vec{E}$ devient constant en fin de charge. Inversement, s'il s'avère possible d'opérer dans le vide, $\vec{j}_d$ existerait seule, et serait alors une illustration quasi directe de la réalité des «courants de déplacement»... Mais ceci est une autre histoire.

Résumons-nous. Cette série d'observations et d'expériences, qu'il conviendrait certainement d'affiner, de reprendre peut-être dans des conditions différentes, peut sans doute mener à des applications d'ordre pédagogique. Par ailleurs les tentatives d'explications qualitatives et quantitatives qu'elles entraînent et dont nous avons seulement suggéré quelques directions, mériteraient, pensons-nous, d'être complétées, précisées et leurs résultats confrontés à l'expérience. Elles peuvent apparaître a priori comme de simples applications de lois connues, voire comme de simples exercices de calcul... Mais sait-on jamais ?