

Remarques sur l'électricité et le magnétisme

D'après Hist. Gén. Des Sciences, (Taton, XIX, p.210 *sq.*)

A partir de 1820, Ampère met en évidence et étudie ce qu'il nomme *l'électrodynamique*, à savoir l'action magnétique des courants : ils s'attirent ou se repoussent mutuellement. Théorie fondée sur l'hypothèse d'une interaction *newtonienne* entre les éléments de courant.

Principe du moteur *électromagnétique*.

Ohm, en 1827 met en lumière le concept de tension ou *force électromotrice*.

1830 (environ) : Faraday découvre les courants induits. C'est un peu le complément, la réciproque de l'électrodynamique. Des champs magnétiques créent des courants. « Tous ces résultats montrent que le pouvoir d'induire des courants électriques est exercé de manière circulaire par une résultante magnétique, ou axe de force, exactement comme les actions magnétiques circulaires sont produites par un courant électrique » ; (in Taton, 219)

Une question essentielle déjà posée par Faraday ; quelle est la nature de cette action distante ? « Il me semble probable que l'action magnétique peut être communiquée à distance par l'action de particules intermédiaires, d'une manière analogue à la façon dont les forces inductives de l'électricité statique sont transmises à distance ; ces particules intermédiaires se trouvant plus ou moins, pour un temps, dans un état particulier que j'ai plusieurs fois désigné par le terme d'état *électrotonique* » (Faraday, 1838, Taton 223).

Maxwell, sur cette question, écrit, en 1844 : « Impression finale qui fait profondément réfléchir : les particules ne sont que des centres de forces ; la force ou les forces sont les éléments constitutifs de la matière : il n'y a donc pas, entre les particules, d'espace distinct de la matière ; elles se touchent ... elles sont matériellement pénétrables, probablement jusqu'à leur centre même » (*id.* 223). Voici qui fait songer à Leibniz.

Faraday étudie aussi ce qu'il nomme « l'aimantation de la lumière » : « Il est donc prouvé que les forces magnétiques et la lumière ont des rapports mutuels ». Mais « les forces magnétiques n'agissent pas sur le rayon lumineux directement et sans l'intervention de la matière » (Taton, p.224).

Dès les années quarante, on a une alternative : la « voie ouverte par Ampère » : on cherche une loi de force à *distance* entre les éléments de courant ou celle ouverte par Faraday d'une *propagation de proche en proche* des actions électromagnétiques. Avec notamment l'idée d'un milieu interposé, l'éther.

Remarque assez curieuse sur le « renversement national dans ce cas : à distance par les continentaux et par l'éther par les anglais ». Comme le dit Duhem, « l'école anglaise est acquise entièrement aux explications purement mécaniques des phénomènes physiques » (*La T.P.*, p.103).

William Thomson (Kelvin) joue un rôle majeur dans l'éducation *mécaniste* des électriciens britanniques avec sa « représentation mécanique des forces électriques, magnétiques et galvaniques » par l'élasticité des solides. Il observe et fait la découverte des décharges électriques d'un condensateur et montre que « le mouvement de l'électricité pendant cette décharge consiste en une série d'oscillations » (p.232) Il calcule les fréquences et l'amortissement.

Le cadre général, à cette époque (vers 1850) est de constituer une « théorie mécanique de l'électricité et du magnétisme ». (p.233).

Maxwell et la théorie des champs électromagnétiques

James Clerk Maxwell (1831-1879) va être le grand théoricien de l'unification des phénomènes électriques et magnétiques. Il fournit une formalisation mathématique des phénomènes, formalisation dans laquelle le modèle par propagation dans un milieu est privilégiée, l'éther de Maxwell. *Un signal électromagnétique peut se propager de proche en proche dans l'espace à une vitesse que la théorie prévoit identique à celle de la lumière. (p. 238).*

Dans son grand traité *treatise on electricity and magnetism* (1873), il note qu'il postule « l'existence d'un milieu éthéré pénétrant tous les corps...j'ai surtout pour but d'orienter l'esprit du lecteur vers des phénomènes mécaniques qui lui serviront à comprendre les phénomènes électriques [Ceci à valeur] d'illustration et non d'explication [...]L'énergie localisée dans l'espace se trouve sous deux formes différentes qui peuvent être décrites sans hypothèse comme polarisations électriques et magnétique, ou, selon une hypothèse très probable, comme le mouvement et la déformation d'un même milieu » (cité p.239, Taton). Comme le note Poincaré : « Maxwell ne donne pas une explication mécanique de l'électricité et du magnétisme, il se borne à démontrer que cette explication est possible » (*id.*) L'éther imaginé par Thomson et Maxwell est terriblement *ad hoc* : « Ici, c'est un fluide homogène, incompressible, sans viscosité qui remplit tout l'espace ; certaines portions de ce fluide sont animées de mouvements tourbillonnaires persistants ; ces portions représentent les atomes matériels ... Là, le liquide incompressible est figuré par un assemblage de boules rigides que lient les unes aux autres des tiges convenablement articulées » (cité in *TP*, p.120). Ailleurs encore, il sera très visqueux, comme une gelée etc. » (*id.*). Tout ceci, accorde Thomson « ne doit pas être regardé comme vrai en nature ». (p. 123).

Herz-L'électromagnétisme, d'après Pestre et Atten

2 février 1888 dans les *Comptes rendus de l'Académie de Berlin*, Herz annonce la production d'ondes électrodynamiques se propageant à une vitesse finie dans des fils et dans l'air.

Il a produit des décharges électriques qui oscillent très rapidement et qui provoquent des effets induits sur un circuit placé à distance : les étincelles du primaire provoquent des étincelles sur le secondaire (cf schémas, p.19). Une décharge électrique : à la coupure, la résistance passe presque instantanément à zéro, l'oscillation électrique dans le primaire est extrêmement rapide (il estimera son circuit de période 10^{-8} sec) ; l'étincelle à la coupure est très vive. Herz annonce que, dans ces conditions, leur action à distance peut être observable. Un récepteur (secondaire), avec une coupure du même genre « reçoit » des courants induits et, à sa coupure, on peut observer des étincelles. Ceci fonctionne, que les circuits soient ou non reliés entre eux.

Les réglages de fréquence du primaire et du secondaire font apparaître l'existence de maximum dans les étincelles obtenues, et aussi des « points d'indifférence ». Il « paramètre » son outil de base (les étincelles) selon la couleur, la longueur, le bruit, l'éclat. Il se persuade que l'oscillation est régulière, périodique (qui dépend des paramètres du circuit) : il réussit à mettre ses deux circuits « en résonance » (à leur donner la même fréquence).

Etape suivante : il estime que l'oscillation le long d'un fil qui « allonge » le primaire est détectable par le secondaire. Il enrichit son dispositif et le primaire donne un aller-retour des ondes électriques qui forment des ventres et des nœuds ; il fait coulisser le secondaire le long du fil primaire et obtient des endroits à étincelles très brillantes (les ventres) et des endroits de quasi extinction (les nœuds). En mesurant la distance des nœuds (2,8m), il obtient la longueur d'onde de ses étincelles électriques dont il connaît la période ($1,4 \cdot 10^{-8}$ s.). Il peut en déduire la vitesse de propagation de ses ondes dans les fils : 200 000km/s. Il reste prudent sur cette « vitesse de propagation de l'électricité dans les fils ».

A l'aide d'un dispositif complexe et de l'effet induit sur un secondaire distant, dans l'air, il estime pouvoir calculer la vitesse de propagation des ondes électriques dans l'air à 320 000 km/s. La proximité de ce résultat avec la lumière le convainc de la thèse fondamentale de Maxwell (émise 25 ans avant): « les ondes transversales de lumière sont des ondes électrodynamiques » (p.25). Il en aurait ainsi établi une preuve expérimentale.

Mesure directe des interférences électrodynamiques dans l'air

Constatant des perturbations des effets sur le secondaire, dus aux murs du laboratoire, il imagine de systématiser en faisant « rebondir » ces ondes émises par les étincelles électriques

sur des miroirs. Il évacue les fils en quelque sorte. Les miroirs sont des grandes feuilles de zinc et il dispose un secondaire qui révèle les ventres et les nœuds ; c'est à dire la réalisation d'ondes stationnaires (longueurs d'onde de 4 à 10 mètres selon les réglages de l'oscillateur). Il trouve une vitesse de propagation de l'ordre de la lumière. Il admet qu'il existe une difficulté : la différence de vitesse de propagation dans les fils et dans l'air.

Les maxwelliens britanniques sont convaincus

Fitzgerald, de Dublin est enthousiaste il parle le 8 juin 88 de « sa splendide vérification de la théorie de Maxwell que les perturbations électromagnétiques sont propagées à la vitesse de la lumière » (p.31). Surtout, il y voit une « expérience cruciale » qui permet de choisir « parmi les théories électrodynamiques, entre celles basées sur l'action à distance et celles concevant l'action comme agissant à travers l'éther » (*id.* p.32).

Oliver Lodge annonce que « Herz a établi l'existence et mesure la longueur des ondes d'éther excitées par les décharges d'une bobine en les convertissant en ondes stationnaires [...] Il l'a fait par réflexion d'ondes propagées dans l'air libre » (*id.* p.32).

Les électriciens britanniques sont en général partisans de l'éther, mais les conceptions de cet éther et ses représentations mathématiques sont très diverses : « L'éther est visualisé comme une sorte de gelée par G.Stokes, comme un solide élastique par W.Thomson, comme une éponge de tourbillons par Fitzgerald et les diverses grandeurs électromagnétiques font l'objets d'analogies mécaniques variées souvent faites de roues et de courroies » (Pestre..., p.35)

Herz, quoique flatté, est plus prudent et souligne que ses expériences ne sont pas suffisantes pour constituer une *experimentum crucis*. Notamment car le monde de la physique théorique ne se « réduit pas (encore ?) pour lui au monde binaire et simple que Fitzgerald et ses collègues britanniques ont construit et qui oppose une vision maxwellienne (des actions se propageant de proche en proche à travers l'éther) à une vision continentale de l'électrodynamique (qui penserait en terme d'action à distance » (*id.* p.37).

Fitzgerald insiste sur ce schéma *crucis* en le mettant sous la bannière du grand Maxwell qui aurait posé la question selon cette alternative (p.38); cette question a été -dit F.- définitivement tranchée en cette année 1888. Il présente les expériences de Herz ainsi : « il a produit des courants alternant rapidement à une fréquences qui correspond à une longueur d'onde de dix mètres et grâce à un circuit secondaire de même période, il a donné à voir des étincelles induites (à distance) par la vibration primaire » (p.38).

N'oublions pas que F. est *a priori* convaincu de la validité de la théorie de Maxwell. « Il sait que la ... à ces manières de penser » (très bonne citation, p.38-39). Il y a eu une *simple confirmation expérimentale*.

Hertz est -de fait- un diffuseur des conceptions « anglaises » sur le continent ; il est cependant plus circonspect et résume en disant que « la théorie de Maxwell, ce sont les équations de Maxwell » (cité in TP. P.131). Duhem signale qu'une théorie complètement alternative à l'éther de Maxwell existe : « On pourrait penser que l'acceptation d'une théorie aussi litigieuse est nécessitée par l'absence de toute autre doctrine susceptible d'un fondement plus logique et d'une concordance plus exacte avec les faits. Il n'en est rien. Helmholtz (1821-1894 ; il fut le maître de Hertz) a donné une théorie électrodynamique qui découle très logiquement des principes les mieux assis de la science électrique, dont la mise en équation est exempte des paralogismes trop fréquents dans l'œuvre de Maxwell, qui explique tous les faits dont rendent compte les équations de Hertz et de Maxwell, sans se heurter aux démentis que la réalité oppose brutalement à ces dernières ; la raison exige qu'on préfère cette théorie ; mais l'imagination aime mieux jouer de l'élégant modèle algébrique façonné par Hertz. » (Duhem, *T.P.* p. 132-133). La théorie de Helmholtz et de Clausius sont édifiées sur des conceptions d'action à distance.

Suite: un passage excellent sur la détérioration de la rigueur dans tout ce qui est application, industrie et formation des ingénieurs (p.135-137).

Les maxwelliens font des expériences qui confirment les travaux de Hertz. Citons Lodge, Trouton et Howard. Ils ont produit des ondes plus courtes (quelques mètres ou centimètres). L'intérêt des ondes courtes est la possibilité de les traiter de façon analogue aux « ondes lumineuses » : lentilles, miroirs, prismes etc.

Hertz fait des ondes courtes-Analogies optiques

Avec un savoir-faire expérimental remarquable, Hertz réalise des ondes courtes et les soumet à des miroirs paraboliques (pour émettre et recevoir), il les fait « réfléchir » etc. Tout se passe selon les mêmes lois que l'optique. Après d'autres tests, il déclare que son faisceau est constitué de deux vibrations perpendiculaires, l'une électrique (parallèle à la ligne focale de l'émetteur) et l'autre magnétique (perpendiculaire).

Expériences critiques

A côté de l'enthousiasme lié à la confirmation attendue d'une théorie adoptée *a priori*, d'autres démarches se font jour. Des physiciens genevois (Sarasin et de la Rive) reprennent les dispositifs en 1889. Ils trouvent un phénomène fort différent : la longueur d'onde de la

propagation vibrante ne dépend pas de l'oscillateur (du primaire) mais seulement du secondaire et il devient impossible de soutenir que la vitesse de propagation est une constante (c) en l'occurrence. L'expérience de Hertz ne serait alors pas cruciale, seule, en faveur de la théorie de Maxwell. C'est ce que conclut le physicien français Cornu.

En outre, Poincaré, en 1890, reprend en détail les calculs de la fréquence de l'oscillateur de Hertz et découvre une vraie « erreur de calcul » selon laquelle la vitesse, dans l'air est 430 000 km/s au lieu de c . Il élabore une théorie complémentaire à celle de Hertz selon laquelle les ondes de l'excitateur sont fortement amorties et ne peuvent -elles - mêmes- créer des interférences (ventres et nœuds).

Il lance un programme de réexamen et de mesure, tenant compte de ces hypothèses et retrouve, au final, mais sur la base d'une doctrine modifiée, la vitesse c . Il peut alors interpréter l'erreur de calcul de Hertz et les résultats de Genevois. Chose curieuse, Lodge avait repéré l'erreur de calcul et Hertz l'avait tout à fait reconnue, sans qu'aucun des deux ne semblent s'émouvoir de la vitesse qu'on devait déduire.