



Maxwell, Hertz et l'électromagnétisme

par Evariste Sanchez-Palencia, membre de l'Académie des sciences

Synopsis

Ce texte s'adresse à tous les publics, tout en admettant plusieurs lectures, l'une anecdotique, d'autres plus profondes, concernant la nature des champs et des théories. Il concerne la découverte des ondes électromagnétiques, alors que son auteur cherchait à établir une explication des phénomènes électromagnétiques qui est apparue fautive par la suite. La découverte, largement spéculative sous sa forme initiale, n'a été confirmée expérimentalement qu'après la mort de Maxwell.

Ce texte fait partie d'un ensemble dont le but est de montrer, par des exemples ponctuels de l'histoire, les paradoxes de la découverte et les voies détournées suivies par l'évolution des connaissances. Ces textes sont pris (parfois adaptés) de «Promenade dialectique dans les sciences», par Evariste Sanchez-Palencia, Masson, Paris 2012. Il y a lieu de signaler dans le même esprit le remarquable ouvrage «Causalités et accidents de la découverte scientifique» René Taton, Masson, Paris 1955, malheureusement peu accessible de nos jours.

Le prestige de la mécanique céleste au 19^{ème} siècle est immense. Plus généralement, la mécanique de Newton et ses développements, qui constituent la « mécanique rationnelle » est plus que prestigieuse, elle est le modèle idéal des sciences de la nature. Partant d'un minimum de données expérimentales, elle a atteint un degré de mathématisation qui la rend pratiquement aussi rigoureuse que la géométrie (avec les standards de rigueur de l'époque). Toutes les sciences physiques la prennent pour modèle et rêvent, lors d'un développement futur, de se hisser aux mêmes sommets de rigueur. Il convient de bien réaliser qu'il n'en a pas été toujours ainsi. L'acceptation de la mécanique de Newton a trouvé de fortes réticences, en raison principalement de la mise en œuvre de forces exercées à distance. Les forces, les actions des corps les uns sur les autres proviennent des contacts. Quelle était la nature de cette force, à nulle autre pareille, qui agissait sans toucher, comme un ordre, comme quelque chose d'immatériel? Newton coupât court à ces réticences avec son fameux « hypothèses non fingo » (= je ne fais pas d'hypothèses). Une façon comme une autre d'évacuer la critique, de s'en tenir à l'empirisme en retenant l'efficacité de la théorie, qui était précisément basée sur l'hypothèse de l'existence de cette force mystérieuse. Empirisme qui l'emporta rapidement sur ces réticences théoriques. La mécanique est la reine des sciences de la nature aux 18^{ème} et 19^{ème} siècles.

L'électricité et le magnétisme qui viennent plus tard que la mécanique, sont probablement plus difficiles et tardent à acquérir une structure systématique. Elles comportent aussi ces gênantes actions à distance, mais d'une façon plus complexe que la gravitation. L'électricité et le magnétisme de cette époque se ressemblent, tout en étant différents, et la multiplicité de ces actions à distance pose problème. Qui plus est, H. C. Oersted (1791 – 1851) découvre un phénomène remarquable: un courant électrique en mouvement produit des effets magnétiques. Puis M. Faraday (1791 – 1867) découvre que réciproquement le mouvement d'un aimant engendre des courants électriques. Voici que ces actions à distance sont autre chose que des ordres; elles interagissent, elles sont presque matérielles, tout en n'étant pas des corps et n'ayant pas de masse!

La mécanique des fluides (étude des mouvements des liquides et gaz) est très embryonnaire à cette époque, se réduisant pratiquement à quelques résultats concernant des fluides idéaux sans frottement (viscosité est le terme précis). H. Helmholtz (1821 - 1894) avait établi des propriétés remarquables des tourbillons (portions du fluide comportant des rotations de particules fluides autour d'elles-mêmes), en particulier le fait que dans un fluide idéal ils ne pouvaient pas apparaître spontanément (c'est dû au fait que les actions de pression sur les particules, passant par leur centre d'inertie, ne peuvent modifier leur rotation).

C'est dans ce contexte que James Clerk Maxwell (1831 – 1879) publie son premier travail sur l'électricité: « On Faraday lines of force » en 1855. Il y présente des images hydrodynamiques lui permettant d'exprimer les lois connues de l'électromagnétisme dans un langage nouveau largement inspiré par la mécanique des fluides. Il montre en particulier l'analogie formelle entre l'électrostatique, la magnétostatique et le mouvement des fluides idéaux¹.

Guidé par ces analogies, Maxwell publie en 1862 un important travail « On physical lines of force », portant sur une interprétation mécanique des phénomènes magnétiques. Le siège de ces phénomènes est l'« éther », matière idéale censée remplir l'espace. Selon Maxwell, il est essentiellement constitué de minuscules cellules qui, soumises à un champ magnétique, tournent toutes dans le même sens autour d'axes parallèles aux lignes de force de ce champ. La transmission de la rotation dans le même sens entre cellules adjacentes est assurée par de minuscules billes qui constituent l'électricité, jouant un rôle de roulements à billes. Cette structure microscopique de l'espace lui permet de donner des interprétations fort intéressantes des énergies magnétique et électrique du champ, assimilées respectivement aux énergies cinétique et potentielle de cellules et billes.

Il s'agit là, nous l'avons vu, d'une *explication des phénomènes électromagnétiques* en invoquant la présence d'une structure mécanique sous-jacente. Or, en acceptant la réalité effective de cette structure mécanique microscopique, Maxwell est conduit à la conclusion que, dans le cas d'un milieu diélectrique (le vide, par exemple, ou un isolant), une variation dans le temps du champ électrique imposé de l'extérieur doit mettre en mouvement les petites billes d'électricité qui doivent à leur tour faire tourner les cellules magnétiques. L'effet sur le champ magnétique serait analogue à celui d'un

¹ Cette analogie est en fait la structure d'un champ de vecteurs dont on connaît la divergence et le rotationnel (en particulier la loi de Biot et Savart).

courant électrique. C'est le *courant de déplacement de Maxwell* (égal à $-\text{dE}/\text{dt}$, E et t étant le champ électrique et t le temps), *qui n'était pas connu phénoménologiquement*.

Les équations connues du champ électromagnétique dans le vide étaient

- (1) $\text{rot } H = 0$
- (2) $\text{rot } E = \text{dH}/\text{dt}$

où H et E sont les vecteurs champ magnétique et électrique et rot est un opérateur de dérivation dans les variables d'espace exprimant un tourbillon (une rotation) local. L'adjonction du courant de déplacement de Maxwell conduirait aux équations

- (3) $\text{dE}/\text{dt} = -\text{rot } H$
- (4) $\text{dH}/\text{dt} = \text{rot } E$.

Lequel des deux systèmes était-il correct? Le nouveau terme de courant de déplacement n'est qu'une conséquence d'une hypothétique structure mécanique du milieu. A priori, si l'on était sûr de la justesse du système initial (1), (2), cela devrait conduire à invalider l'hypothèse. Mais il n'en est pas ainsi. Le terme dH/dt des équations (2) ou (4), qui n'est pas en litige, exprime l'induction magnétique, le phénomène déjà signalé découvert par Faraday dans les décades de 1820 et 1830, qui faisait toujours l'objet de recherches actives. L'électromagnétisme était loin d'être maîtrisé et compris, il y avait lieu de penser que de nouveaux phénomènes pourraient être découverts. Le nouveau terme de courant de déplacement était cohérent avec une certaine symétrie des équations; c'était dans l'air du temps, où l'on avait déjà compris que les phénomènes électriques et magnétiques étaient intimement liés. Le courant de déplacement de Maxwell apparaissait donc comme une hypothèse très plausible, qui, au cas où elle serait confirmée, donnerait en même temps un nouveau type de phénomènes physiques et une explication de l'électromagnétisme sur une base mécanique.

La question était claire: le courant de déplacement existe-t-il bel et bien ou non? Elle ne pouvait être tranchée que par des expériences, portant nécessairement sur des variations du champ électrique avec le temps et leurs conséquences. Une analyse fine de l'affaire montre que, pour être significatives, les variations avec le temps doivent être extrêmement rapides, pratiquement irréalisables avec les appareillages usuels des laboratoires de l'époque; la question reste longtemps sans réponse...

Regardons bien les équations (3) et (4) issues de l'hypothèse de la structure mécanique. E et H sont les champs électrique et magnétique respectivement, dE/dt et dH/dt leurs variations par unité de temps (à chaque point de l'espace). Même si on ne sait pas très bien ce que signifie rot , une chose est claire: puisque l'équation (3) contient un signe $-$ au second membre qui n'existe pas dans l'équation (4), les variations par unité de temps de chacun des champs E et H dépend de l'autre champ, mais pas de la même façon, *E réagit à H exactement à l'inverse de la façon dont H réagit à E* . J'ai dit plus haut que le courant de déplacement était cohérent avec une certaine symétrie des équations; en fait, c'est le contraire, cela s'appelle une *antisymétrie*.

En fait, le système formé par les deux équations (3) et (4) qui définit l'évolution dans le temps du champ électromagnétique entre dans le cadre d'un ensemble très large de systèmes d'évolution dans le temps, bien connus des mathématiques actuelles². *La propriété fondamentale de ces systèmes est de définir une évolution temporelle de type cyclique faisant intervenir une énergie qui est exactement conservée le long de l'évolution, si bien que le processus cyclique ne s'annule jamais une fois qu'il est commencé.* Le système pré – maxwellien (1), (2) n'entre pas dans ce cadre.

Sur la base du système d'équations (3), (4), Maxwell prédit l'existence d'ondes de nature électromagnétique se propageant à une vitesse proche de celle de la lumière³. La description détaillée des multiples recherches qui ont suivi sortirait du cadre de ce « flash ». Je me limiterai à signaler que *la vérification expérimentale de la validité des équations (3), (4) (et donc de l'existence du courant de déplacement de Maxwell) est venue des expériences de H. R. Hertz (1857 – 1894) en 1888 (neuf ans après la mort de Maxwell) prouvant l'existence et la propagation des ondes électromagnétiques* (de la radio, initialement, mais en fait aussi de la lumière, radar et autres).

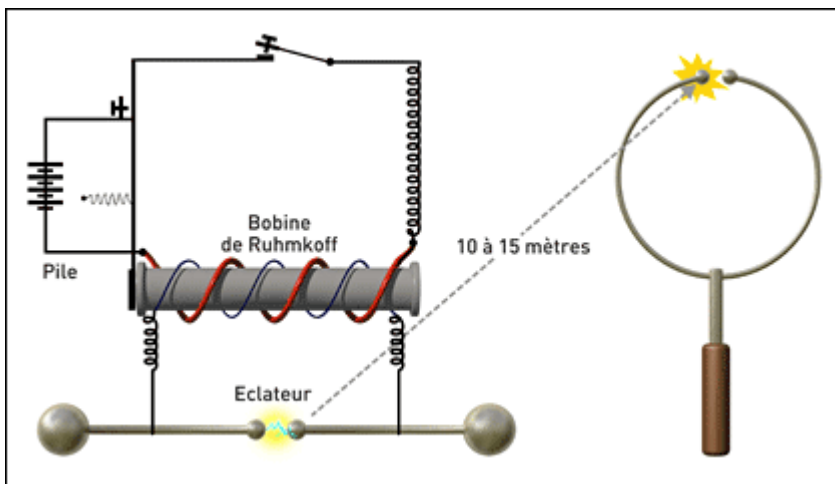


Fig Expérience de Hertz en 1888 prouvant l'existence réelle des ondes électromagnétiques prédites par Maxwell: Hertz réalise un oscillateur à l'aide d'une bobine et d'un condensateur composé de deux sphères. Les oscillations du courant électrique dans ce dispositif sont à l'origine d'une onde qu'il détecte avec un petit résonateur composé d'un anneau métallique presque refermé. Le courant créé par l'onde dans cette antenne provoque une étincelle.

Ainsi donc, *le courant de déplacement de Maxwell, dont la découverte est issue d'une hypothétique structure mécanique du milieu, existe bel et bien. Mais la structure mécanique elle-même a été abandonnée depuis.* Le concept et le terme même d'éther (ainsi d'ailleurs que les tourbillons et corpuscules) ont disparu de la terminologie scientifique depuis longtemps. Cet éther était quelque chose d'étrange. Dans l'air, la vitesse de propagation des ondes sonores est une propriété de celui-ci, égale à la racine carrée du quotient de son coefficient de rigidité par sa densité. La vitesse de propagation des ondes électromagnétiques étant presque un million de fois plus grande que celle du

² Pour les spécialistes: systèmes avec générateur infinitésimal antiadjoint. Les solutions forment un groupe unitaire dans la norme de l'espace (théorème de Stone). Il y a des versions non – linéaires de ce théorème.

³ Il est facile d'obtenir de (3), (4), compte tenu que dans le vide E et H sont des vecteurs de divergence nulle, l'équation des ondes pour E aussi bien que pour H.

son dans l'air, l' « éther » devrait être extrêmement rigide ou léger, ou les deux choses à la fois! Vraiment très difficile à concevoir, mais surtout *inutile, le concept d'éther a été abandonné*⁴; *les ondes électromagnétiques sont devenues de nos jours un mouvement vibratoire... du vide: conceptuellement incompréhensible mais efficace... Démarche analogue au 'je ne fais pas d'hypothèses' » de Newton!*

⁴ Il y a eu d'autres raisons plus tard, notamment l'incompatibilité avec la relativité.