LA PHYSIQUE REVISITÉE

Histoire de la notion de champ. De l'action à distance par attraction gravitationnelle aux champs vectoriels

Jean-Marc, Augustin ROUX[1]
[1]Professeur Agrégé

La physique revisitée, Numéro 2, pages 12-22
Reçu le 17 février 2026. Accepté le 15 mars 2026. Publié le 05 juin 2026
DOI : 10.5281/zenodo.20555333
Licence: CC BY 4.0 †

Cet article d'histoire des sciences accompagne l'article scientifique :
L'impédance d'onde plane dans le vide Z0 est une constante de couplage électromécanique

ABSTRACT: The subtleties that distinguish the different electromagnetic fields are often difficult for many students to grasp; however, they result from the historical necessities that accompanied the progressive conceptualization of the phenomena.

This article aims to understand the evolution of the concepts that led to these tools, the mastery of which can be improved if their use is justified by their historical necessity.

The proposed reflection will lead from the first intuition of the existence of action at a distance on the scale of the solar system to the subtleties distinguishing mechanical effect fields and excitation fields in electromagnetism.

It appears that the notion of a vector field, so familiar to us, was far from self-evident and that it took a long succession of scientific advances to arrive at it. On the other hand, even if they never used the vector tool themselves, it is to Faraday that we owe the notion of fields in electromagnetism and then to Maxwell the use of the term, as well as the introduction of the concepts of excitation fields to distinguish the effect from the cause.

The concept of the D field arose from the need to introduce displacement current, and this indirect conceptualization made its interpretation as an electrical excitation field more difficult. The confusing terminology used today to designate the four electromagnetic fields is a consequence of this historical difficulty.

keywords: Magnetic field, electric field, gravitation, excitation field

RÉSUMÉ : Les subtilités qui distinguent les différents champs électromagnétiques sont souvent difficiles à saisir pour de nombreux étudiants ; elles résultent pourtant des nécessités historiques qui ont accompagné la conceptualisation progressive des phénomènes.

Cet article vise à comprendre l'évolution des concepts qui ont conduit à ces outils dont la maîtrise peut être améliorée si leur utilisation est justifiée par leur nécessité historique.

La réflexion proposée conduira de la première intuition de l'existence d'une action à distance à l'échelle du système solaire jusqu'aux subtilités distinguant champs d'effet mécanique et champs d'excitation en électromagnétisme.

Il apparait que la notion de champ vectoriel qui nous est si familière, était loin d'être une évidence et qu'il a fallu une longue succession d'avancées scientifiques pour y parvenir. D'autre part, même s'ils n'ont jamais utilisé eux-mêmes l'outil vectoriel, c'est à Faraday que l'on doit la notion de champs en électromagnétisme puis à Maxwell l'emploi du terme, ainsi que l'introduction des concepts de champs d'excitation pour distinguer l'effet de la cause.

Le concept de champ D s'est imposé par la nécessité d'introduire le courant de déplacement et cette conceptualisation indirecte a rendu plus difficile son interprétation en tant que champ d'excitation électrique. La terminologie confuse qui règne aujourd'hui pour désigner les quatre champs électromagnétiques est une conséquence de cette difficulté historique.

Mots clés : Champ magnétique , champ électrique, gravitation, champ d'excitation

1. LES PRÉMICES DE L'ACTION À DISTANCE : LOI UNIVERSELLE DE LA GRAVITATION

1.1. IIIe siècle avant notre ère

D'après ses conclusions, Aristarque de Samos (310-230 avant notre ère) semble avoir pressenti le principe de la gravitation universelle presque deux millénaires avant Newton mais son héliocentrisme ne fut pas admis. Il avait effectué des mesures astronomiques en utilisant comme référence le diamètre de la terre qu'on ne connaissait pas encore, il s'agissait donc de mesures relatives. Il avait déterminé le diamètre relatif de la lune par rapport à la terre, par comptage des durées des phases d'une éclipse [1]:

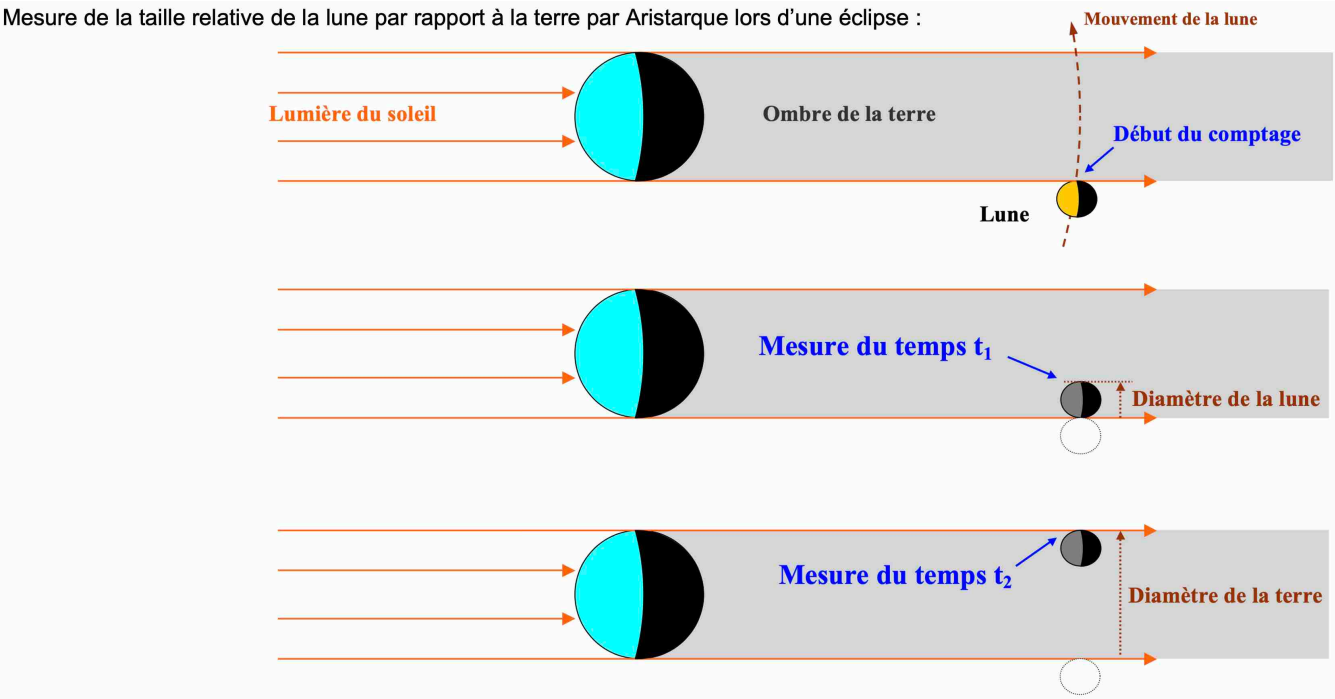


FIGURE 1. Principe (simplifié) sur lequel Aristarque de Samos a fondé sa méthode de mesure du diamètre relatif de la lune

Le rapport des diamètres étant celui des durées, il avait déterminé le diamètre de la lune égal à environ un tiers de celui de la terre. A partir des dimensions relatives de la lune et des mesures d'angles, il avait calculé les distances terre-lune et terre-soleil et déduit le diamètre du soleil, celui de la terre servant d'unité. Il avait alors déduit du gigantisme du soleil que c'était la terre qui tournait autour de lui et non l'inverse. Ceci montre que le principe de la gravitation était déjà en germe dans l'esprit d'Aristarque.

Nous n'avons malheureusement pas de précisions sur cette question précise. En effet, ces premiers calculs des dimensions et distances à l'intérieur du système solaire, nous sont connus par son traité *« Peri megethon kai apostematon »* (Sur les dimenssions et les distances) [2] où il n'évoque pas l'héliocentrime. Celui-ci nous est rapporté par Archimède dans son « Arénaire » mais ce dernier ne croyait pas à l'héliocentrisme et contestait cette conclusion finale. Il faudra attendre près de deux mille ans pour que l'héliocentrisme avec Copernic et la gravitation universelle avec Newton soient totalement compris et acceptés par le monde scientifique.

1.2. Année 1684

En 1684 Edmond HALLEY présente devant la Royal society le manuscrit d'Isaac NEWTON « De motu corporum in gyrum » (Du mouvement des corps en orbite), contenant les calculs qui démontrent pourquoi l'orbite suivie par une planète est une ellipse (lois de Kepler).

Dans le manuscrit présenté par Edmond Halley, Newton expose la loi de la gravitation universelle en fonction des masses des corps et de la distance [3]:

$$F \propto \frac{M_1.M_2}{d^2}$$

Comme on le voit dans l'expression précédente, la constante gravitationnelle G n'apparait pas encore, cette constante gravitationnelle sera mesurée avec précision par Henry CAVENDISH plus d'un siècle après, en 1798. Cavendish utilisera la même méthode que celle mise au point par Charles Coulomb pour la mesure de la force électrostatique attractive (voir plus loin), mais la période des oscillations est ici de l'ordre de la dizaine de minutes. La constante gravitationnelle, notée f ou G, ne sera explicitement introduite dans une nouvelle expression de la force gravitationnelle que 75 ans plus tard, en 1873 :

$$F = G.\frac{M_1.M_2}{d^2}$$

Il aura donc fallu presque deux siècles pour que l'expression soit complète. Entre-temps on a déjà calculé les distances séparant les planètes du soleil puis, grâce à cette loi, en tenant compte de leurs influences mutuelles, on a calculé leurs masses respectives.

En réalité, en raison des lois de Kepler, il était déjà admis par Halley et Hooke que la force d'attraction du soleil sur les planètes est inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare mais ils n'avaient ni la démonstration que l'orbite consécutive à cette force était une ellipse ni intégré la nécessaire prise en compte des masses respectives des corps. La démonstration de l'ellipse est due à Newton et cette prise en compte des masses découle de ces travaux précédents établissant le principe fondamental de la dynamique.

Malgré cette extraordinaire avancée, la cause du phénomène d'attraction n'est pas abordée: Newton écrit dans son œuvre complète *« Philosophiæ naturalis principia mathematica »* (Principes mathématiques de la philosophie naturelle) publiée trois ans plus tard : *« J'ai expliqué jusqu'ici les phénomènes célestes et ceux de la mer par la force de la gravitation, mais je n'ai assigné nulle part la cause de cette gravitation »*[4].

Newton se refuse à donner une explication sur l'origine de cette force de gravitation et préfère, dans les commentaires de son introduction de la « force centripète » prouver son existence avec la formulation suivante : *« ... la force, quelle qu'elle soit, qui retire à tout moment les planètes du mouvement rectiligne »*. Ainsi, s'appuyant sur l'effet de fronde, il décrit avec une logique imparable, les effets qu'aurait son absence pour justifier son existence à l'échelle de l'univers. La gravitation « universelle » est démontrée par une analyse.

Il est important de rappeler que l'action à distance était déjà connue pour les phénomènes magnétiques et électrostatiques et que la gravitation à la surface de la terre est constatée quotidiennement sans qu'on y réfléchisse, mais avant Newton personne n'avait pu établir, sans conteste, que cette action à distance pouvait s'appliquer à la « mécanique céleste ».

Les progrès dans notre représentation spatiale des actions à distance vont venir de l'électromagnétisme [5], mais ce sera un long processus qui commencera initialement par une recherche de lois newtoniennes appliquées à ce domaine.

2. LES ACTIONS À DISTANCE ÉLECTROMAGNÉTIQUES

2.1. Année 1785

En 1785, Charles COULOMB établit la loi qui donne la force d'interaction entre deux charges. C'est la première formulation dimensionnelle d'un phénomène électromécanique, on retrouve comme pour la force de gravitation une loi en inverse du carré de la distance mais contrairement à celle-ci, cette force électrostatique peut être à la fois attractive comme la gravitation ou au contraire répulsive si les charges sont de même signe : [6]:

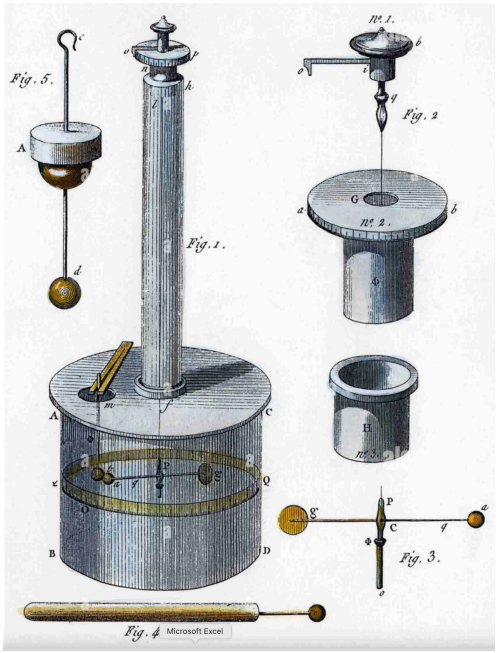


FIGURE 2. Balance de Coulomb pour la mesure de la force de répulsion électrostatique

Pour mesurer la force de répulsion électrostatique, Coulomb a utilisé sa « balance » avec un fil de torsion dont la force est étalonnée. Il obtient, une loi en inverse du carré de la distance :

"La force répulsive de deux petits globes électrisés de la même nature d'électricité est en raison inverse du carré de la distance du centre des deux globes"

Pour mesurer, cette fois, la force d'attraction, un problème se pose : La balance n'est pas exploitable car la force électrostatique croît plus vite que la force de rappel du fil de torsion quand la distance diminue et les balles se collent. Coulomb a donc eu l'idée d'utiliser une astuce pour calculer la force d'attraction électrostatique : s'assurant d'une distance telle que les charges ne peuvent pas entrer en contact, il a mesuré la période des oscillations autour de la position d'équilibre (la force étant proportionnelle au carré de la fréquence), cette période variable selon la force était de l'ordre de quelques secondes. C'est cette méthode qui a été reprise par Henry CAVENDISH en 1798 pour mesurer la constante gravitationnelle (Voir précédemment « Loi universelle de la gravitation »).

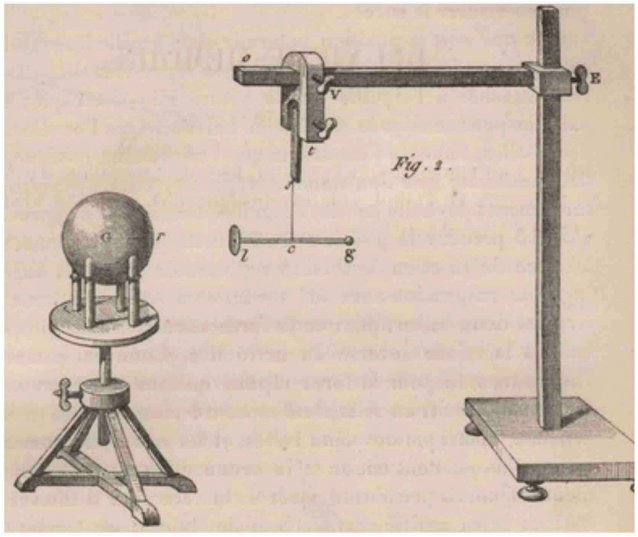


FIGURE 3. Mesure de la force électrostatique attractive par la méthode des oscillations

La force électrostatique qu'elle soit attractive ou répulsive s'exprime :

$$F = \frac{Q.Q\prime}{r^2}$$

Mais à cette époque, l'unité de charge électrique, le coulomb, n'existe pas encore et il manque à cette expression la constante d'adaptation à cette unité, de la même façon que la constante de gravitation manquait à la force gravitationnelle de Newton. Ce sera un long processus qui aboutira en 1946 à l'expression rationalisée du SI [7].

Charles Coulomb établit des lois équivalentes d'attraction et de répulsion pour le magnétisme mais plus délicates à appréhender du fait de la non existence des monopoles magnétiques, elles sont moins connues. L'action à distance, évidente en électromagnétisme, contrairement à la mécanique céleste, est constatée et mesurée ponctuellement mais ne possède cependant toujours pas de formalisme mathématique spatial pour la décrire.

2.2. Avril 1820

En avril 1820, Hans Christian ØERSTED observe que la direction d'une boussole est déviée en présence d'un courant électrique.

L'observation d'ØERSTED parvient à l'académie des sciences de Paris la même année et André-Marie AMPÈRE va développer sa théorie de l'électromagnétisme.

Les effets magnétiques de l'électricité avaient été découverts dès 1802 par Gian Domenico ROMAGNOSI et communiqués à l'académie des sciences de Paris qui les avait curieusement ignorés.

Ainsi, une nouvelle forme d'action à distance s'observe, mais cette fois entre électricité et magnétisme, deux domaines considérés alors comme séparés.

2.3. Septembre 1820

En septembre 1820, André-Marie AMPÈRE constate que la direction dans laquelle se déplace l'aiguille de la boussole dépend de la direction du courant électrique qui circule à proximité et en déduit la règle qui s'est popularisée sous le nom de « règle du bonhomme

d'Ampère ». Puis il franchit un nouveau pas en observant les interactions directes entre courants et attribue le magnétisme à l'existence de courants électriques y compris à l'intérieur des aimants, les phénomènes sont ainsi qualifiés « d'électrodynamiques ». Électricité et magnétisme sont désormais réunis en un seul phénomène. [8]

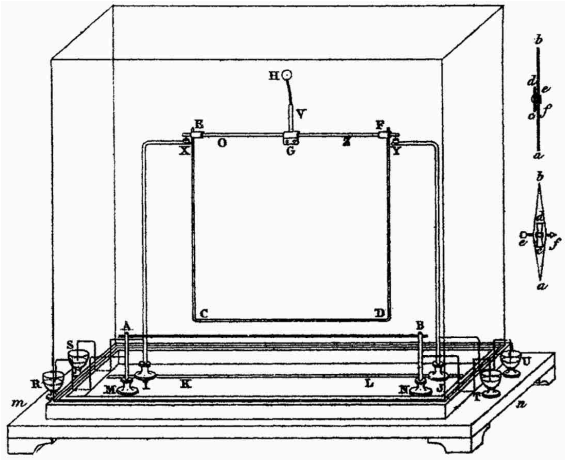


FIGURE 4. Figure de l'appareil mettant en évidence la force d'interaction entre conducteurs parcourus par des courants

2.4. Année 1826

En 1826, Ampère publie sa « théorie des phénomènes électrodynamiques » qui sont formalisés mathématiquement pour la première fois : Il y exprime les forces d'interactions entre aimants et courants et les forces mutuelles entre courants. Il pose les bases de la terminologie moderne de l'électricité en distinguant « l'électricité de tension » de « l'électricité de courant ». [9]

La formulation de la force électrodynamique entre courants, est un travail fondamental basé sur quatre faits expérimentaux qualitatifs utilisant la « méthode des cas d'équilibre » :

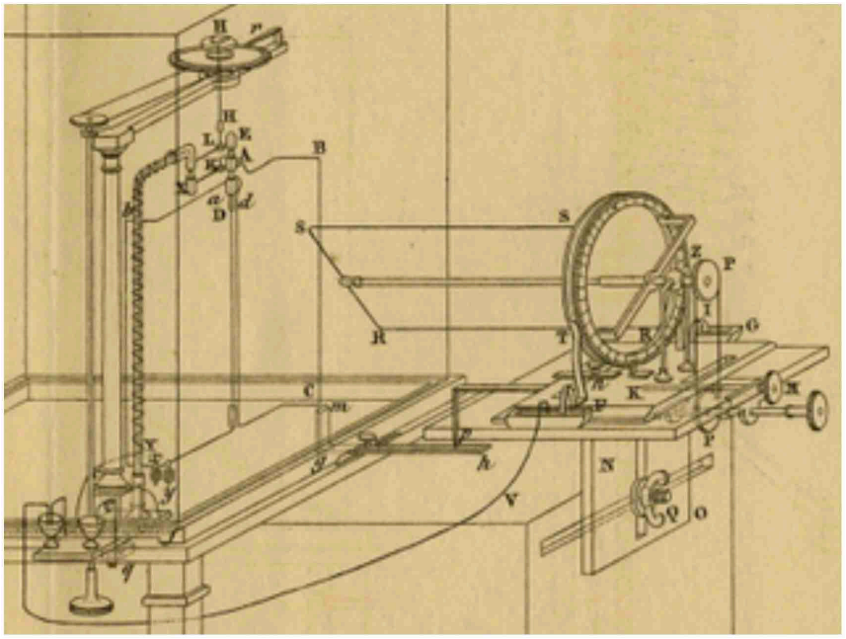


FIGURE 5. Dispositif mis au point par Ampère pour mesurer la force électromagnétique s'exerçant sur le conducteur vertical BC à partir du champ magnétique induit par le conducteur d'inclinaison réglable RS

Ces quatre expériences qualitatives permettent d'élaborer le modèle théorique :

La formule fondamentale d'AMPÈRE exprime la force qu'exerce l'un sur l'autre, deux éléments de courants infinitésimaux I.ds et I'ds', placés à une distance r l'un de l'autre et d'orientations relatives définies par les trois angles α, β et γ.

L'élément de courant I.ds de milieu A, est situé dans le plan P.

L'élément de courant I'.ds' de milieu B, est situé dans le plan Q.

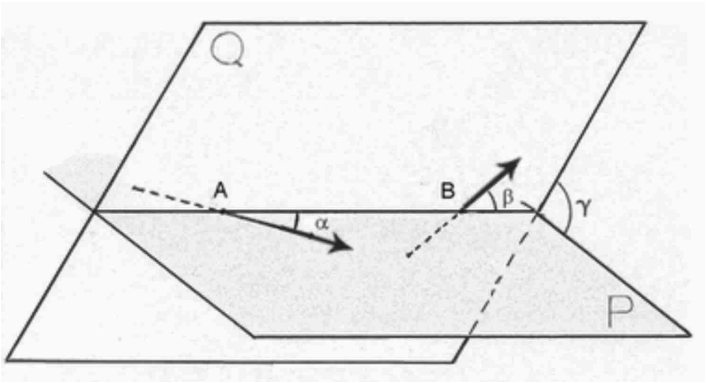


FIGURE 6. Figure faisant apparaitre les différents angles de la formule

$$F = \frac{I\ I' ds\ ds' (\sin\alpha \sin\beta \cos\gamma - \frac{1}{2}\cos\alpha\cos\beta)}{r^2}$$

Ramené au cas où les plans P et Q sont confondus ($\gamma = 0$) et où les angles α et β sont droits, la force s'exprime :

$$F = \frac{I\ I' ds\ ds'}{r^2}$$

Les éléments ds et ds' sont infinitésimaux, il ne s'agit pas de l'expression d'une force avec des longueurs macroscopiques.

Ampère réussit à donner une forme newtonienne avec des « courants ponctuels » et une force en inverse du carré de la distance. Cependant, cette expression est une déduction mathématique issue de quatre expériences et elle n'est pas utilisable directement car un courant n'est en pratique jamais ponctuel. Les physiciens lui préfèreront la forme macroscopique correspondant aux contraintes techniques dès que les progrès, dans l'écriture mathématique vectorielle, permettront une formulation des forces s'exerçant sur les conducteurs. Ainsi la force électromagnétique d'Ampère, est une force par unité de longueur, qui pour deux conducteurs parallèles, distants de r, de courants continus I et I', s'exprime :

$$\frac{F}{L} = 2.\frac{I.I\prime}{r}$$

Comme pour la force de Coulomb, l'unité de courant électrique, l'ampère, n'existe pas encore et il manque à cette expression la constante d'adaptation à cette unité. Comme pour la constante électrostatique, ce sera un long processus qui aboutira en 1946 à l'expression rationalisée du SI.

En ce début du XIX^{e} siècle, les lois des phénomènes d'action à distance sont, aux constantes près, toutes posées mais de façon ponctuelle comme s'il s'agissait d'une communication mutuelle entre deux objets. Le formalisme mathématique de la description spatiale de leur influence sur l'environnement, qui nous semble familier aujourd'hui, n'existe pas encore.

3. LIGNES DE FORCE ET NAISSANCE DE LA NOTION DE CHAMP VECTORIEL

3.1. Année 1831

En 1831, Michael FARADAY découvre l'induction magnétique (« convertir le magnétisme en électricité ») et commence à faire émerger la notion de champ mais sans utiliser le mot.

$$e = -N.\frac{d\phi}{dt}$$

Loi de LENZ-FARADAY (énoncée par Emil LENZ à partir des travaux de FARADAY) : La force électromotrice (tension induite) est proportionnelle au nombre de spires N et à la vitesse de variation du flux magnétique dans le circuit. Le signe – indique que la f.em induite s'oppose à la cause qui l'a produite

Faraday, malgré l'efficacité des lois de Newton, Coulomb et Ampère, avait des doutes sur la notion d'action à distance, il trouvait difficile d'admettre que des corps éloignés puissent exercer une force l'un sur l'autre sans l'existence d'un intermédiaire. Mais après sa découverte du phénomène d'induction, il était convaincu que des courants électriques ne pouvaient se créer à distance sans que quelque chose n'agisse dans l'espace qui les sépare.

3.2. Année 1852

En 1852, Michael FARADAY publie son article *« On the physical character of the line of magnetic force »* (Sur le caractère physique des lignes de force magnétique) dans lequel il développe l'idée que les lignes de force magnétique mises en évidence avec de la limaille de fer, doivent être regardées comme l'expression d'un état physique réel de l'espace environnant les aimants et les courants électriques.

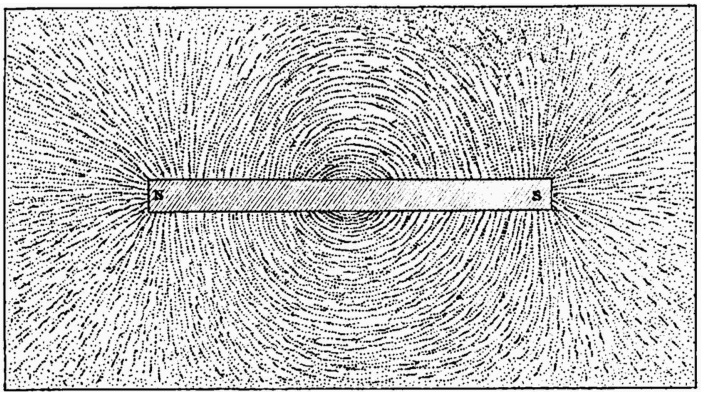


FIGURE 7. Figure décrite par DESCARTES en 1664 (« spectre magnétique ») et reproduite ici par Faraday, de la répartition de la limaille de fer dans l'environnement d'un aimant.

Faraday rejette ainsi la notion d'action à distance, il affirme que les phénomènes magnétiques ne sont pas dus à une action directe entre corps séparés, mais à un état physique de l'espace intermédiaire. C'est une rupture conceptuelle majeure avec la tradition newtonienne. Faraday insiste sur le fait que les lignes de force existent indépendamment des corps tests (limailles) et transportent les effets physiques (forces, induction). Faraday va alors nommer "champ", l'espace sillonné par les lignes de force [10], probablement par analogie à un champ labouré.

3.3. James Clerk MAXWELL

En 1855, James Clerk MAXWELL développe dans sa série d'articles *« On Faraday's Lines of Force »* (sur les lignes de force de Faraday), une théorie mathématique inspirée des lignes de force de Faraday, avec des analogies mécaniques. [11]

En 1865, dans *« A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field »* (Une théorie dynamique du champ électromagnétique), Maxwell formalise mathématiquement le champ pour définir une entité électromagnétique dotée de propriétés dynamiques et capable de représenter l'énergie et la propagation des ondes. En chaque point de cet espace, Maxwell associe un « quaternion » qui désigne la direction et la valeur locale du champ. [10]

Quaternions : Les quaternions sont une extension des nombres complexes, adaptée à l'espace euclidien tridimensionnel. Ce sont des nombres « hypercomplexes » définis comme combinaisons linéaires à coefficients réels de l'unité et des symboles i, j, k tels que :

$$i^2 = j^2 = k^2 = -1 \quad , \quad ij = k \quad , \quad jk = i \quad , \quad ki = j$$

Ainsi Maxwell associe des équations différentielles à cet état de l'espace, il montre que ce champ possède une dynamique propre, une énergie et une capacité de propagation des ondes.

3.4. Année 1884

En 1884, Oliver HEAVISIDE réduit les équations de Maxwell à base de quaternions à quatre équations vectorielles. Bien que très doué en mathématique, il cherchait, comme Faraday avant lui et à contre-courant de leur époque, à réduire autant que possible l'omniprésence des mathématiques dans la physique. Il s'agit d'un choix qu'il résumait ainsi : *« Devrais-je renoncer à mon dîner au prétexte que je ne comprends pas totalement le processus de la digestion ? »*. Ainsi, Heaviside appréciait peu les quaternions qu'il considérait comme une écriture inutilement trop savante, c'est pourquoi il fit le choix de reformuler les équations de Maxwell en termes de champs vectoriels locaux avec les opérateurs différentiels : divergence et rotationnel. [10]

HEAVISIDE est avec Willard GIBBS, un des fondateurs de l'analyse vectorielle à partir des quaternions.

Avec Heaviside le champ prend la forme mathématique moderne d'un vecteur local.

4. CHAMPS D'EFFET MÉCANIQUE ET CHAMPS D'EXCITATION

Avant de continuer les aspects historiques, il est nécessaire de préciser une distinction importante concernant les champs en électromagnétisme.

4.1. Champs d'effet mécanique

On vient d'aboutir à la description moderne du champ vectoriel local en partant de l'action à distance. Il est donc maintenant nécessaire de bien noter qu'il s'agit de champs d'effet mécanique puisque ces champs sont les vecteurs de l'action à distance. Cette précision est sans incidence pour la gravitation qui n'est pas concernée, mais elle est fondamentale pour l'électromagnétisme où règne une grande confusion dans le vocabulaire associé aux champs E, B, D et H dont deux se voient même souvent dénommés « vecteur d'induction » de façon contradictoire entre l'électricité et le magnétisme. [12]

Les champs historiques dont il a été question jusqu'ici, sont les champs d'effet mécanique, représentatifs de l'action à distance qui est observable et mesurable, il s'agit :

- Pour l'électricité, du champ E.
- Pour le magnétisme, du champ B.

Ces deux champs sont ceux qui produisent un effet mécanique exprimé dans la force de Lorentz qui s'exerce sur une charge q en mouvement à la vitesse $\vec{v}$:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$

Les champs E et B, dépendent du milieu qui modifie l'efficacité de leurs effets par rapport au vide, soit en les atténuant (c'est le cas pour l'électricité sauf dans les plasmas et c'est aussi le cas en magnétisme lorsqu'un matériau est diamagnétique), soit en les amplifiant (c'est le cas pour le magnétisme lorsqu'un matériau est paramagnétique ou ferromagnétique).

Expression de la norme du champ électrique d'effet mécanique E à une distance r d'une charge Q dans un milieu de permittivité diélectrique ε :

$$E = \frac{Q}{4\pi.\varepsilon.r^2} \tag{1}$$

Expression de la norme du champ magnétique d'effet mécanique B à une distance r d'un courant rectiligne I dans un milieu de perméabilité magnétique μ :

$$B = \frac{\mu.I}{2\pi.r}$$

4.2. Champs d'excitation

À ces deux champs d'effet mécanique sont associés les champs d'excitation. Ces derniers relèvent d'une représentation purement mathématique décrivant seulement la configuration géométrique des sources [13] :

Les champs d'excitation sont :

- Pour l'électricité, le champ D.
- Pour le magnétisme, le champ H.

Expression de la norme du champ d'excitation électrique D à une distance r d'une charge Q quel que soit le milieu :

$$D = \frac{Q}{4\pi.r^2} \tag{2}$$

Expression de la norme du d'excitation champ magnétique H à une distance r d'un courant rectiligne I quel que soit le milieu :

$$H = \frac{I}{2\pi.r}$$

Ces deux champs dépendent donc uniquement de la configuration géométrique des sources, indépendamment du milieu et du mode d'action du phénomène, ne représentant que l'excitation de ce dernier. N'ayant pas de manifestation physique observable, ce sont des

outils conceptuels qui, chronologiquement, ont été développés après les champs d'effet mécanique. Il fallait, à cause de l'influence des milieux sur ces derniers, distinguer ce qui en était indépendant et ne relevait que des sources.

Le champ électrique d'effet mécanique E dépend du champ d'excitation et de la réponse du milieu :

$$\vec{E} = \frac{1}{\varepsilon}.\vec{D}$$

Le champ magnétique d'effet mécanique B dépend du champ d'excitation et de la réponse du milieu :

$$\vec{B} = \mu.\vec{H}$$

Certains ouvrages d'électromagnétisme théorique négligent de mentionner ces champs d'excitation. Il s'agit de choix qui ne permettent pas de couvrir l'ensemble des questions. En effet la réponse des matériaux n'est pas aussi linéaire que les relations précédentes le laisseraient penser pour deux raisons faciles à illustrer dans le cas des phénomènes magnétiques :

- La première tient au fait que la valeur du champ d'effet B atteint une limite (saturation) une fois atteint un certain niveau d'excitation H.
- La deuxième est que certains matériaux « mémorisent » l'induction (Champ rémanent) une fois qu'on a retiré l'excitation. Ce sont les matériaux dont nous faisons des aimants.

Ces matériaux qui sont qualifiés de ferromagnétiques décrivent les courbes B=f(H) qui montrent le phénomène d'hystérésis correspondant à ces deux remarques lorsqu'on fait varier l'excitation :

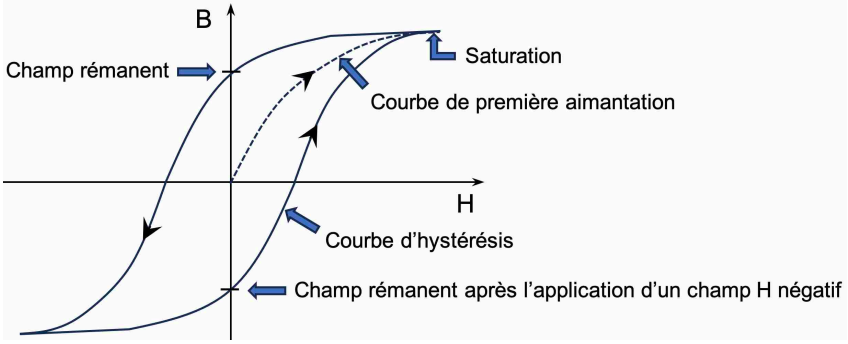


FIGURE 8. Forme de l'hystérésis d'un matériau ferromagnétique

4.3. Les prémices des champs d'excitation

En 1862, dans sa série d'articles *« On Physical Lines of Force »*, Maxwell identifie une quantité qu'il appelle « force magnétique », liée proportionellement au courant électrique. C'est l'introduction originelle du champ d'excitation magnétique mais il ne le nomme pas encore H. Pour le champ d'effet mécanique, il utilise le terme "induction magnétique" qu'il ne bomme pas encore B mais qu'il définit comme dépendant du milieu par le "coefficient d'induction magnétique" qu'il note μ. [14]

Dans ce même mémoire, Maxwell montre à partir des travaux de Faraday sur les diélectriques que les courants ne se limitent pas à l'existence des charges libres. En effet les diélectriques sont des isolants, or on y observe l'établissement de courants momentanés lors de l'application d'une force électromotrice. Il y a donc un « déplacement » de charges qui s'interrompt rapidement. Le champ d'excitation électrique D n'est pas encore totalement identifié mais le terme « déplacement » qui lui donnera son symbole est déjà sur les rails. A ce stade il utilise la lettre minuscule "h" et exprime le courant de déplacement avec la lettre minuscule "r" :

$$r = \frac{\delta h}{\delta t}$$

4.4. Le champ H

En 1873, MAXWELL, dans son travail fondateur, *« A Treatise on Electricity and Magnetism »* nomme enfin le champ d'excitation magnétique avec la lettre H et établit les relations qui lui sont associées. [15]

Maxwell utilise la police gothique/script du XIX^{e} siècle, il utilise les termes "induction magnétique" avec la lettre B, "force magnétique" H pour le champ d'excitation magnétique, "intensité d'aimantation" I pour la magnétisation (que nous notons M aujourd'hui), "coefficient d'aimantation induite" χ pour la susceptibilité magnétique. Il établit les relations :

$$I = \chi.H \qquad B = H + 4\pi.I$$

Remarques : I ne doit par être confondu avec le courant. L'espression est donné en unités CGS UEM, la perméabilité du vide est donc de 1. Le facteur 4π a depuis cette époque été absorbé dans la réorganisation des constantes et des unités avec l'adoption du SI rationalisé. Nous pouvons aussi remarquer que l'expression "coefficient d'aimantation induite" était plus explicite que "susceptibilité magnétique".

Les mêmes relations dans la notation moderne du SI rationalisé sont :

$$M = \chi_m.H \qquad B = \mu_0(H + M)$$

Ces relations sont particulièrement interressantes puisqu'elles montrent explicitement que Maxwell distingait déjà ce qui représente, le champ d'effet mécanique B, le champ d'excitation H et la magnétisation induite par cette excitation. Grace à cette approche efficace dès l'origine, l'acceptation du champ H comme cause électrique indépendante du milieu n'a jamais posé de vrais problèmes.

4.5. Le champ D

Pour l'électrostatique, c'est plus compliqué : Maxwell fait au départ un raisonnement qui est basé sur le « déplacement » de particules du milieu diélectrique qui aboutit à la notion de « courant de déplacement » illustré par le modèle d'Oliver Lodge trois ans plus tard :

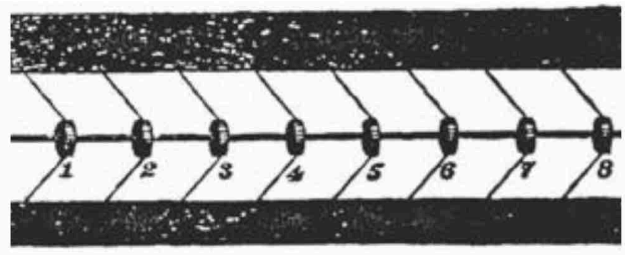


FIGURE 9. Modèle mécanique de Lodge

Dans ce modèle mécanique de Lodge, sous l'application d'une force les perles se déplacent puis sont retenues. Sous l'application d'une force inverse, elles se déplacent dans l'autre sens, etc… ainsi sous l'action d'une force alternative, il y a un déplacement alternatif des perles, ce modèle est une analogie mécanique du phénomène de polarisation. Ainsi, Maxwell confirme son nouveau concept de « courant de déplacement » dû à la dérivée temporelle du « déplacement » auquel il attribue maintenant le symbole D :

$$i_{Deplacement} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

Maxwell va l'appliquer au vide alors qu'il a justifié ce concept par le déplacement limité des charges dans les diélectriques. En effet, sans l'introduction de ce courant de déplacement dans la loi de Maxwell-Ampère, il y aurait violation du principe de conservation de la charge. Son application au vide lui permet de conceptualiser les ondes électromagnétiques.

Remarque : Cette description initiale du champ D comme un déplacement limité de charges à l'intérieur des diélectriques, a rendu difficile de le détacher de cette représentation historique qui l'associe aux milieux, même si ce modèle n'a aucune signification pour le vide. D'autre part E et D avaient les mêmes unités CGS ce qui ne faciltait pas l'interprétation. Cette utilisation d'unités communes étaient tout aussi inadaptée que ne le serait l'utilisation de metres-cube pour exprimer une masse sous pretexte que cette dernière est liée au volume pour une densité donnée.

Comme on l'a vu au 3.4, c'est avec Heaviside que l'on aboutit aux dénominations et à l'écriture moderne des vecteurs champs et des équations de l'électromagnétisme. La relation reliant le champ D, Le champ E et la polarisation P obtient sa forme actuelle dans le SI mais cette expression ne rend pas suffisament compte de la cause et des conséquences et il ne faut pas hésiter à l'inverser :

$$\vec{D} = \varepsilon_0.\vec{E} + \vec{P} \qquad => \qquad \vec{E} = \frac{1}{\varepsilon_0}.(\vec{D} - \vec{P}) \tag{3}$$

Le champ D dépend des charges indépendamment du milieu, le champ E est dépendant de sa réaction. Ceci se vérifie avec les expressions 1 et 2 des champs E et D données plus haut. Ceci se vérifie également avec l'équation de Maxwell gauss avec D, indépendant de la permittivité ou avec E qui en dépend; ρ_f est la densité de charges libres :

$$div\ \vec{D} = \rho_f \qquad div\ \vec{E} = \frac{\rho_f}{\varepsilon}$$

La relation 3 est l'équivalent pour l'électricité de la relation suivante pour le magnétisme :

$$\vec{B} = \mu_0.(\vec{H} + \vec{M}) \tag{4}$$

Les signes + et – dans les relations 3 et 4, viennent du fait que la polarisation P atténue les effets du champ E par rapport au vide alors que la magnétisation M amplifie généralement les effets du champ B sauf dans le cas particulier des matériaux diamagnétiques où la magnétisation est négative.

4.6. Une terminologie à revoir

Assez curieusement les champs B et D sont parfois, tous les deux, qualifiés de « champs d'induction » alors que le premier est un champ d'effet mécanique et que le second est un champ d'excitation. Cette contradiction ne fait que jeter le trouble dans leurs interprétations.

Le champ D a été conceptualisé par Maxwell lorsqu'il a introduit le courant de déplacement $\partial\vec{D}/\partial t$, qui était le chaînon manquant de l'électromagnétisme. Le terme désuet de « Déplacement », à l'origine du symbole D, est donc parfois encore utilisé pour désigner le champ d'excitation électrique D, ce qui ne simplifie pas l'apprentissage des étudiants.

Ajoutant un peu plus à la confusion, le champ magnétique d'effet mécanique B se voit parfois qualifié de « densité de flux magnétique » ce qui est rigoureusement exact mais ne favorise pas plus la compréhension de sa nature que si on désignait la vitesse d'un liquide par "densité de flux volumique".

Pour compléter la description de cette terminologie confuse, ajoutons que les champs B et H sont souvent qualifiés, l'un ou l'autre de « champs magnétiques ». La CEI précise que l'on doit réserver le terme au champ H, mais s'agissant d'un champ d'excitation ceci est en contradiction avec le « champ électrique » réservé au champ E qui est un champ d'effet mécanique.

Au-delà de ces dénominations hétéroclites, il ne faut donc conserver à l'esprit que leurs rôles de champ d'effet mécanique (E et B) ou de champ d'excitation (D et H) et il serait souhaitable que la communeauté scientifique étudie la possibilité d'une terminologie basée sur cette logique.

REFERENCES

[1] Brahic, A., *Enfants du Soleil : histoire de nos origines*. Paris: Odile Jacob, 1999.

[2] Aristarque de Samos, , *Sur les dimensions et les distances du soleil et de la lune. Traduction de Pierre Paquette*. Québec: Astronomie-Québec. https://ecliptiqc.ca/Aristarque.pdf.

[3] Acker, A. and c. Jaschek, *Astronomie - Méthodes et calculs*. Paris: Elsevier-Masson, 2003.

[4] Newton, I. and E. D. Chatellet, *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*. Malakoff: Dunod, 2011.

[5] Picholle, E., "L'action à distance - des principia à la seconde révolution quantique," *Editions Jérôme Millon*, 124–155, 2024, https://hal.science/hal-03872380v2.

[6] Coulomb, C. A., *Mémoires de Coulomb*. Paris: Gauthier-Villars, 1884. https://ampere-archives.fr/histoire-electricite/files/original/ebee6fcd3f4c3dab0a2cf6673d04a932.pdf.

[7] Roux, J.-M. A., "L'histoire compliquée des unités électriques : implications sur les expressions SI," *La physique revisitee*, Vol. 1, No. 1, 24–31, 2025, https://la-physique-revisitee.science/implications-des-acquis-scientifiques-2/histoire-des-unites-electriques/.

[8] Blondel, C. and G. Borvon, "Les unites electriques et leur unification," Histoire de l'électricité et du magnetisme, 2008, https://ampere-archives.fr/histoire-electricite/parcours-historique/unites-electriques/unification.

[9] Borvon, G. and C. Blondel, "A la recherche d'une loi newtonienne pour l'electrodynamique," Histoire de l'électricité et du magnetisme, 2008, https://ampere-archives.fr/histoire-electricite/parcours-historique/lois-courants/ampere-loi.

[10] Darrigol, O., *Les equations de Maxwell de MacCullagh a Lorentz*. Paris: Belin, 2005.

[11] Maxwell, J. C., "On faraday's lines of force," *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 1855, https://en.wikisource.org/wiki/On_Faraday%27s_Lines_of_Force.

[12] Brouchier, F., "Quelques réflexions sur la dénomination des vecteurs E, B, D et H," *Bulletin de l'Union des Physiciens*, Vol. 90, No. 784, 833–838, 1996.

[13] Perez, J.-P., R. Carles, and R. Fleckinger, *Electromagnetisme Fondements et applications*, 4th ed. Malakoff: Dunod, 2019.

[14] Maxwell, J. C., "On physical lines of force," *Journal of science*, 1861, https://www.math.ucdavis.edu/~temple/MAT22C/MaxwellOnPhysicalLinesOfForce.pdf.

[15] Maxwell, James Clerk, , *Traite d'electricite et de magnetisme. tomes I et II (traduction de la 2eme edition anglaise par G. Seligmann-Lui)*. Paris: Gauthier-Villars, 1885.

H-LPR-H