IMPLICATIONS
DES ACQUIS
SCIENTIFIQUES

la-physique-revisitee.science
ISSN : 3096-5020

LA PHYSIQUE REVISITÉE

Numéro 2 Juin 2026

Article central de ce numéro / *Central article of this issue*

L'impédance d'onde plane dans le vide Z_0 est une constante de couplage électromécanique

The plane wave impedance in vacuum Z_0 is an electromechanical coupling constant

DOI 10.5281/zenodo.20571644

Article d'histoire des sciences associé / *Related article on the history of science*

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

History of field concept. From action at a distance by gravitational attraction to vector fields

Jean-Marc Augustin ROUX[1]

[1]Marseille France
E-mail : jm.a.r.physique@free.fr

Voici le deuxième numéro de *« La physique revisitée »* qui présente un article scientifique qui complète les avancées conceptuelles du premier. Ce nouvel article scientifique nous replonge dans l'interprétation de l'impédance d'onde du vide qui semblait bien floue jusqu'à ce jour. Il déconstruit la vision simpliste qui pour certains faisait de cette constante une impédance électrique. Il montre qu'il ne s'agit pas non plus d'une propriété du vide mais d'une constante de couplage électromécanique, ce qui ne manque pas de surprendre à la lecture du titre. La démonstration se base sur le rôle des champs dont elle est le rapport. Les champs d'effet mécanique et les champs d'excitation y sont distingués et cette distinction est la clef du raisonnement.

Chaque numéro de *« La physique revisitée »* concerne un article scientifique et un article associé d'histoire de la physique, les deux articles sont présentés en français et en anglais.

L'article d'histoire des sciences qui l'accompagne, relate l'évolution de la notion d'action à distance jusqu'à nos modernes champs vectoriels en détaillant la façon avec laquelle les champs d'excitation ont été introduits par Maxwell pour l'électromagnétisme. Cet article montre que l'introduction de ces concepts s'est imposée par la nécessité de séparer les effets mécaniques de l'électromagnétisme de leur causes électriques. Cet article revient sur la difficulté historique d'interpréter correctement le champ D comme un champ d'excitation en raison de l'introduction de ce dernier par le déplacement limité de charges dans les matériaux. C'est d'ailleurs avec le mot « déplacement » que Maxwell a initialement désigné ce champ. Il s'agissait alors pour lui de conceptualiser le courant de déplacement, dérivée temporelle du champ D, mais cette représentation dans les matériaux était artificielle puisque ce champ et le courant de déplacement s'appliquent au vide. Au final, l'article interpelle sur la nécessité de revoir le vocabulaire associé aux quatre champs électromagnétiques en distinguant champs d'effet et champs d'excitation.

Nous vous souhaitons une bonne lecture.

Yves Blot
Directeur de la publication

LA PHYSIQUE REVISITÉE

L'impédance d'onde plane dans le vide Z_0 est une constante de couplage électromécanique

Jean-Marc Augustin Roux[1]
[1]Professeur Agrégé

La physique revisitée, Numéro 2, pages 3-11
Reçu le 17 février 2026. Accepté le 02 juin 2026. Publié le 06 juin 2026
DOI : 10.5281/zenodo.20571644

ABSTRACT: Although the plane-wave impedance of vacuum $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$ is a fundamental constant of electromagnetism, it has historically been little used from a strictly theoretical point of view, most often appearing as a derived quantity. Its use is mostly limited to a role as a normalization or reference parameter in electromagnetic engineering applications. However, the recent resolution of the inconsistency in the initial laws of electromagnetism sheds new light on it.

This work makes it possible to deepen its interpretation and to show that its actual role is of considerable importance.

After clarifying the concept of wave impedance, possible misinterpretations are eliminated, and a study of its physical significance is carried out based on the role (effect or excitation) of electromagnetic fields.

It follows that the plane-wave impedance in vacuum is a constant related to the mechanical effects of electromagnetic phenomena.

This result, when confronted with the new expressions of the Ampère and Coulomb forces obtained through the resolution of the inconsistency in the original laws of electromagnetism, shows that it is more precisely an electromechanical coupling constant.

keywords: Vacuum impedance, permittivity, permeability, Coulomb force, Ampère force, Electromagnétic field

RÉSUMÉ : Bien que l'impédance d'onde plane du vide $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$ soit une constante fondamentale de l'électromagnétisme, elle a historiquement été peu exploitée du point de vue strictement théorique, apparaissant en général comme une quantité dérivée. Son usage se limite le plus souvent à un rôle de paramètre de normalisation ou de référence dans les applications d'ingénierie électromagnétique. Cependant la résolution récente de l'incohérence des lois initiales de l'électromagnétisme lui donne un nouvel éclairage.

Ce travail permet d'approfondir son interprétation et montrer que son rôle réel est d'une importance considérable.

Après avoir précisé le concept d'impédance d'onde, les erreurs d'interprétation possibles sont éliminées et une étude concernant sa signification physique est réalisée à partir du rôle, d'effet ou d'excitation, des champs électromagnétiques.

Il résulte que l'impédance d'onde plane dans le vide est une constante liée aux effets mécaniques des phénomènes électromagnétiques.

Ce résultat, confronté aux nouvelles expressions des forces d'Ampère et Coulomb obtenues par la résolution de l'incohérence des lois initiales de l'électromagnétisme, montre qu'il s'agit plus précisément d'une constante de couplage électromécanique.

Mots clés : Impédance du vide, permittivité, permeabilité, Force de Coulomb, Force d'Ampere, Champ électromagnétique

1. INTRODUCTION

Les constantes physiques occupent en général une place centrale en théorie électromagnétique. Il est dès lors remarquable que l'impédance d'onde plane dans le vide, $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$, demeure largement sous-exploitée, étant le plus souvent réduite au rôle de simple référence pour les impédances intrinsèques des milieux matériels. Cette marginalisation contraste avec son caractère fondamental, suggéré par sa définition à partir des constantes électromagnétiques. Une telle situation indique que sa signification physique n'est pas pleinement identifiée. Le présent travail vise à clarifier ce point en écartant méthodiquement les interprétations inadéquates afin de mieux cerner la nature réelle de cette constante. Les développements récents ont apporté un nouvel éclairage qui a favorisé cette étude et c'est l'importance capitale de cette constante qui va être mise en évidence. On va successivement :

1. Effectuer une analyse à partir de sa définition actuelle et éliminer les erreurs d'interprétation qui peuvent se rencontrer.
2. Effectuer une nouvelle approche en tenant compte du rôle, d'effet ou d'excitation, des champs électromagnétiques dont elle est le rapport dans le vide. Ceci permet de mettre en évidence son caractère électromécanique.
3. Intégrer les développements récents qui permettent de préciser sa fonction de constante de couplage électromécanique dans les interactions d'origine électromagnétique.
4. Évaluer la validité des conclusions et proposer une réflexion sur les implications et les perspectives.

2. ANALYSE DE LA CONSTANTE Z_0

2.1. Impédance intrinsèque d'un milieu

2.1.1. Notion d'impédance au sens généralisé et utilisation

Le terme impédance s'utilise au sens généralisé pour désigner un rapport entre une excitation et sa réponse (Impédance mécanique, impédance acoustique etc.). La notion d'impédance peut se synthétiser ainsi :

- L'impédance est un rapport de grandeurs couplées.
- Elle s'applique à des phénomènes dynamiques (sinusoïdaux, transitoires, ou variables dans le temps).
- Elle est complexe pour tenir compte des déphasages.
- Elle est généralisable à différents domaines : électrique (V/I), acoustique (p/v), mécanique (F/v), électromagnétique (E/H), thermique (ϕ/T).

Le concept permet de déterminer facilement la réponse d'un système sans utiliser les équations différentielles : à l'interface de deux milieux de propagation, les impédances Z_1 et Z_2 de chacun des milieux, rentrent dans le calcul des coefficients de réflexion $\mathcal{R}$ et de transmission $1 - \mathcal{R}$:

$$\mathcal{R} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \tag{1}$$

Exemples :

- Le rôle du gel (milieu de propagation d'impédance acoustique Z_1) dans une échographie est une adaptation d'impédance pour diminuer au niveau de la peau (milieu de propagation d'impédance Z_2), la réflexion des ultrasons au profit de leur transmission ($Z_1 \sim Z_2$) [1].
- On place en bout d'une ligne de transmission électrique bifilaire ou coaxiale, d'impédance « caractéristique » Z_1, une impédance électrique de valeur $Z_2 \sim Z_1$ pour supprimer la réflexion et empêcher ainsi la création d'ondes stationnaires de tension et de courant dans la ligne (risque d'interférences) [2]. Cette « impédance caractéristique » est électrique :

$$Z_1 = \sqrt{\frac{R + jL\omega}{G + jC\omega}}$$

Où R, L, G et C sont respectivement la résistance, l'inductance, la conductance et la capacité linéiques. Pour les fréquences élevées (R et G négligeables), on a $Z_1 \sim \sqrt{L/C}$, résistive. L'impédance placée en bout de ligne pour supprimer la réflexion est donc une résistance.

Remarques :

1. Un coefficient de réflexion négatif correspond à une inversion de signe de la grandeur réfléchie.
2. Pour l'acoustique, l'expression du coefficient de réflexion (1) est donnée ci-dessus pour une incidence normale (perpendiculaire à la surface de séparation des milieux), il en est de même pour l'électromagnétisme.

2.1.2. Définition de l'impédance intrinsèque

L'impédance intrinsèque est définie, en l'absence de charges libres, dans un milieu linéaire, homogène et isotrope, par le rapport des intensités du champ électrique E sur le champ d'excitation magnétique H d'une onde électromagnétique plane progressive harmonique et s'exprime de la façon suivante :

$$Z = \left(\frac{E}{H}\right)_{\text{OPPH}} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \tag{2}$$

Où μ et ε sont respectivement la permittivité diélectrique et la perméabilité magnétique du milieu. Cette relation découle des équations de Maxwell. Les deux champs sont perpendiculaires entre eux et sont perpendiculaires à la direction de propagation. On exprime donc plus rigoureusement cette relation sous forme vectorielle, en tenant compte de la direction de propagation unitaire $\vec{n}$:

$$\vec{E} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\vec{H} \wedge \vec{n} \tag{3}$$

L'impédance intrinsèque d'un milieu est souvent désignée sous le nom d'impédance caractéristique, mais cette dénomination est déconseillée en français par la CEI (CEI 705-03-23) [3]. Cette dénomination est source de confusion avec l'impédance caractéristique d'une ligne de transmission électrique. La dénomination « impédance » ne correspond pas dans le cas présent à une interprétation électrique, elle s'utilise au sens général du terme [4].

2.2. Impédance d'onde plane dans le vide

2.2.1. Définition et rôle limité

L'impédance d'onde plane dans le vide s'exprime de la façon suivante :

$$Z_0 = \left(\frac{E}{H}\right)_{\text{OPPH vide}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \sim 376,73 \ \text{kg m}^2 \ \text{s}^{-3} \ \text{A}^{-2} \tag{4}$$

Où μ_0 et ε_0 sont respectivement la permittivité diélectrique et la perméabilité magnétique du vide. L'impédance d'onde plane dans le vide sert principalement de référence pour les autres milieux :

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}}.Z_0 \tag{5}$$

Où μ_r et ε_r sont respectivement la permittivité et la perméabilité relatives. On vérifie aisément que le rôle de l'impédance d'onde plane dans le vide est très limité puisqu'elle est éliminée dans les coefficients de réflexion et de transmission :

$$\mathcal{R} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} = \frac{\sqrt{\mu_{r2}/\varepsilon_{r2}} - \sqrt{\mu_{r1}/\varepsilon_{r1}}}{\sqrt{\mu_{r1}/\varepsilon_{r1}} + \sqrt{\mu_{r2}/\varepsilon_{r2}}} \tag{6}$$

La littérature scientifique lui accorde généralement une attention limitée, et l'impédance d'onde plane dans le vide a jusqu'à présent rarement fait l'objet d'analyses spécifiques. Au regard du rôle fondamental des constantes physiques, qui constituent notamment le socle de la définition des unités du Système international révisé en 2019 [5], cette place marginale interroge et motive un examen approfondi de sa signification physique.

2.2.2. Z_0 n'est pas une impédance électrique

Le rapport qu'elle représente aboutit à des unités (des V.m^{-1} divisés par des A.m^{-1}) qui sont convertibles en ohms, ce qui lui donne une dimension homogène à celle d'une résistance électrique qu'elle n'est pas. L'impédance d'onde plane dans le vide ne représente pas un rapport tension/courant.

D'autre part, une impédance électrique relie localement la tension et le courant à ses bornes, ce qui correspond à une configuration unidirectionnelle et filaire, tandis que l'impédance d'onde caractérise une relation électromagnétique fondamentalement tridimensionnelle et ce n'est que par simplification que l'on ne retient que le rapport des intensités des champs. Plus rigoureusement, la relation entre le champ électrique et le champ d'excitation magnétique, mutuellement perpendiculaires mais aussi perpendiculaires à la direction de propagation, peut être formulée avec une impédance électromagnétique tensorielle, qui rend compte de cette configuration tridimensionnelle. [4] :

Pour une direction de propagation unitaire $\vec{n}$:

$$\vec{n} = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} \text{ avec } {n_x}^2 + {n_y}^2 + {n_z}^2 = 1$$

La relation vectorielle des deux champs dans le vide est :

$$\vec{E} = Z_0(\vec{n})\vec{H} \quad \text{avec} \quad Z_0(\vec{n}) = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}.\begin{bmatrix} 0 & n_z & -n_y \\ -n_z & 0 & n_x \\ n_y & -n_x & 0 \end{bmatrix} \tag{7}$$

Il s'agit d'une différence fondamentale entre l'impédance d'un circuit électrique limité et fermé et l'impédance d'onde associée à un espace de propagation tridimensionnel et illimité. L'assimilation erronée à une impédance électrique n'est rendue possible que par les conversions d'unités inappropriées et l'usage, pour l'électromagnétisme, d'une forme simplifiée du concept d'impédance, réduite au rapport des amplitudes des champs, cette simplification étant généralement suffisante pour les applications courantes.

D'autre part, par définition, aucune charge ne circule dans le vide et aucune perte par effet joule ne se manifeste avec le courant de déplacement, il n'y a pas d'absorption donc pas de comportement résistif. Il n'y a pas non plus de comportement réactif dans le cas d'une onde plane progressive (cadre de la définition de Z_0), puisque, quelle que soit la fréquence, aucun déphasage n'apparaît entre les deux champs. Aucun schéma électrique équivalent ne peut donc être proposé pour l'impédance d'onde dans le vide, ce qui serait évidemment possible si Z_0 était une impédance électrique.

2.2.3. L'impédance Z_0 n'est pas une propriété du vide

L'impédance Z_0 correspond à un cas particulier des ondes électromagnétiques, celui des ondes planes dans le vide. Dans le cas général, l'impédance d'onde E/H dépend de la nature de l'onde électromagnétique. On donne, figure 1, les composantes des champs produits dans le vide par un dipôle court de longueur L , à une distance r de celui-ci [6] :

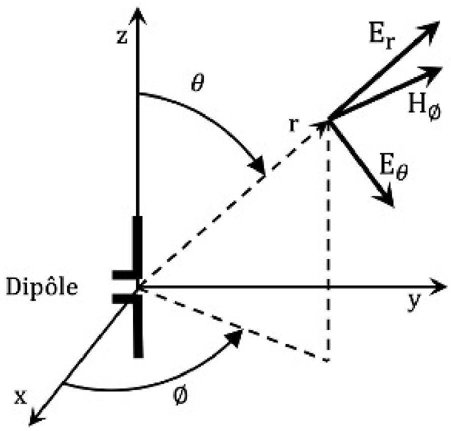

FIGURE 1. Composantes produites par un dipôle court

Les composantes des champs dans le repère orthogonal (r, θ, ϕ), sont :

$$E_r = \frac{I_0.e^{j\omega(t-r/c)}.L.cos\theta}{2\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{c.r^2}+\frac{1}{j\omega.r^3}\right)$$

$$E_\theta = \frac{I_0.e^{j\omega(t-r/c)}.L.sin\theta}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{j\omega}{c^2.r}+\frac{1}{c.r^2}+\frac{1}{j\omega.r^3}\right)$$

$$E_\phi = 0$$

$$H_r = 0$$

$$H_\theta = 0$$

$$H_\phi = \frac{I_0.e^{j\omega(t-r/c)}.L.sin\theta}{4\pi}\left(\frac{j\omega}{c.r}+\frac{1}{r^2}\right)$$

En champ proche, le rapport entre le champ électrique et le champ d'excitation magnétique présente une partie imaginaire, signe d'un déphasage temporel entre E et H et son module varie avec la distance à la source contrairement au cas des ondes planes. L'impédance d'onde E/H dans le vide est donc un rapport local qui dépend à la fois de la géométrie de l'onde et de la distance à la source. En champ lointain, ce rapport devient constant et réel et ce cas s'assimile à celui des ondes planes :

$$r \longrightarrow \infty \;\Rightarrow\; \frac{E}{H} \longrightarrow \frac{E_\theta}{H_\phi} \longrightarrow \frac{1}{\varepsilon_0.c} = Z_0 \tag{8}$$

L'impédance d'onde plane dans le vide ne caractérise donc pas le vide en tant que milieu matériel, mais un cas particulier des ondes. Elle constitue ainsi une caractéristique des ondes planes dans l'absence de matière et non une propriété du vide.

Le vide, en tant qu'absence de milieu matériel, ne peut être doté de propriétés physiques intrinsèques. L'attribution de telles propriétés reviendrait à réintroduire l'hypothèse d'un « éther luminifère », invalidée par l'expérience de Michelson et Morley (1887).

2.3. Pertinence du rapport E/H

L'impédance intrinsèque est un rapport champ électrique/champ d'excitation magnétique, mais on doit s'interroger désormais sur la pertinence du rapport des champs E/H plutôt que D/H, D/B ou E/B.

2.3.1. Pour un changement de milieux

Masao Kitano apporte un premier élément de réponse à cette question pour un changement de milieu à propos du choix de H [7] :

« La raison pour laquelle H est utilisé au lieu de B est la suivante : les conditions aux limites pour les champs magnétiques à l'interface des milieux 1 et 2 sont H1t = H2t (tangentiel) et B1n = B2n (normal). Dans le cas d'une incidence normale, qui est le plus important en pratique, cette dernière condition devient triviale et ne peut être utilisée. Par conséquent, H est utilisé plus commodément. »

La même raison peut être avancée pour le choix de E plutôt que D puisque les conditions aux limites sont E1t=E2t et D1n = D2n en l'absence de charges libres. En suivant cette argumentation, c'est donc le rapport E/H qui est le plus approprié pour rendre compte des phénomènes de réflexion et de transmission lors d'un changement de milieu.

2.3.2. Sans changement de milieux

Lorsqu'on ne considère pas les phénomènes de réflexion ou de transmission à une interface, mais uniquement l'effet du milieu sur la propagation, on constate que c'est le paramètre « vitesse de phase » qui est impacté et que c'est le rapport E/B qui est approprié pour l'exprimer :

$$\left(\frac{E}{B}\right)_{\text{OPPH}} = \frac{1}{\sqrt{\mu.\varepsilon}} = v \tag{9}$$

L'impédance intrinsèque n'est donc pas le seul rapport entre les champs électrique et magnétique, qui soit pertinent. L'impédance intrinsèque n'est que le rapport approprié à l'étude des changements de milieux. Quant à l'impédance d'onde du vide, elle n'est que la valeur de référence qui s'élimine dans le calcul des coefficients de réflexion.

2.4. Un rôle difficile à cerner

On a vu au 2.2.1 que l'impédance d'onde plane du vide avait peu suscité l'intérêt des physiciens et qu'il fallait s'interroger sur son interprétation. On a vu au 2.2.2 et au 2.2.3 que Z_0 n'est ni une impédance électrique ni une propriété du vide. On a vu également au 2.3 que Z_0 ne représente même pas un rapport pertinent pour les changements de milieu puisqu'elle est éliminée dans le calcul du coefficient de réflexion. Elle semble n'avoir qu'une fonction insignifiante. On va donc chercher à cerner sa signification physique à partir du rôle des champs.

3. NOUVELLE APPROCHE EN FONCTION DU RÔLE DES CHAMPS

3.1. Rôles physiques des champs D, E, H et B

3.1.1. Descriptions des rôles

Les champs électromagnétiques peuvent avoir le rôle physique de champ d'effet mécanique ou celui de champ d'excitation :

- Les champs d'effet mécanique se manifestent physiquement par la force de Lorentz qu'ils exercent sur une charge. Ils dépendent des champs d'excitation mais aussi des milieux car la polarisation ou l'aimantation résultent des sources liées de ces derniers. Ce sont les champs fondamentaux.
- Les champs d'excitation sont indépendants du milieu et correspondent à la configuration géométrique des sources libres. En tant qu'outils mathématiques, ce sont des champs auxiliaires.

3.1.2. Rôles physiques des champs électriques

Le champ électrique d'effet mécanique est le champ E, ceci se vérifie avec la part électrique de la force de Lorentz qui s'exerce sur une charge q :

$$\vec{F}_{elec} = q.\vec{E}$$

Le champ d'excitation électrique est le champ D. Une interprétation incorrecte que l'on rencontre souvent est de dire qu'il dépend de la polarisation du fait de la relation suivante :

$$\vec{D} = \varepsilon_0.\vec{E} + \vec{P}$$

En effet, on utilise, par exemple, cette relation dans le cas des diélectriques séparant les armatures d'un condensateur plan aux bornes duquel est appliquée une tension. Dans cette configuration, la tension V impose la valeur du champ $E = V/l$ en fonction de l'épaisseur l du diélectrique et impose par conséquent la polarisation puisque c'est le champ E qui agit sur les charges liées au matériau. Ainsi cette expression donne l'illusion que le champ d'excitation D est une conséquence de la réaction du milieu, mais ce n'est pas le cas : *« le champ D n'est relié qu'aux charges extérieures au matériau, contrôlées par l'expérimentateur »* [8]. Ce contrôle des charges s'effectuant ici par la tension :

$$Q = C.V = \frac{\varepsilon.S}{l}.V$$

La valeur du champ D dépend, dans l'exemple du condensateur, uniquement des charges $+Q$ et $-Q$ sur chaque armature et de l'aire S des surfaces chargées, indépendamment du milieu :

$$D = \frac{Q}{S}$$

Ainsi, pour une valeur de charge Q donnée, ce sont le champ E et la polarisation P qui dépendent du diélectrique séparant les armatures.

On peut aussi vérifier, de façon simplifiée, dans le cas particulier d'une charge isolée Q, qu'à une distance r, l'expression du champ $E = Q/(4\pi.\varepsilon.r^2)$ dépend de la permittivité du milieu, alors que celle du champ d'excitation $D = \varepsilon.E \ = Q/(4\pi.r^2)$ correspond à la configuration géométrique de la source indépendamment du milieu. Pour vérifier de façon générale que le champ d'excitation D est indépendant du milieu, il faut se référer à l'équation de Maxwell-Gauss dans laquelle la permittivité du milieu n'apparaît pas :

$$div\ \vec{D} = \rho_f$$

Où ρ_f est la densité de charges libres. L'équation de Maxwell-Gauss macroscopique équivalente mais formulée avec le champ électrique dans un milieu isotrope, montre que c'est le champ E qui dépend du milieu :

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

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

$$\vec{E} = \frac{1}{\varepsilon}.\vec{D} = \frac{1}{\varepsilon_0}.(\vec{D} - \vec{P})$$

3.1.3. Rôles physiques des champs magnétiques

Le champ magnétique d'effet mécanique est le champ B. Ceci se vérifie avec la part magnétique de la force de Lorentz qui s'exerce sur une charge q en mouvement à la vitesse $\vec{v}$:

$$\vec{F}_{mag} = q.\vec{v} \wedge \vec{B}$$

Le champ d'excitation magnétique est le champ H. Ceci se vérifie avec l'équation macroscopique de Maxwell-Ampère dans les milieux :

$$\overrightarrow{rot}\ \vec{H} = \vec{J}_f + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

Cette relation montre que le champ d'excitation H dépend uniquement des courants libres et des variations du champ d'excitation électrique D dont on a vu précédemment qu'il ne dépend lui-même que des sources libres. Le champ d'excitation H est donc indépendant du milieu. Le champ magnétique d'effet mécanique B dépend du champ d'excitation et de la réponse du milieu :

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

3.1.4. Récapitulatif des rôles physiques des champs

- Les champs E et B sont les champs d'effet mécanique. Ils dépendent des champs d'excitation ainsi que des milieux à travers la polarisation ou l'aimantation.
- Les champs D et H sont les champs d'excitation. Ils sont indépendants des milieux et ne dépendent que des sources libres.

3.2. Signification électromécanique de la constante Z_0

3.2.1. Les rôles différents des champs du rapport E/H

Les rôles des champs E (champ d'effet mécanique) et H (champ d'excitation) ne sont pas les mêmes et ce rapport n'a été utilisé que pour son utilité lors d'un changement de milieu parce que E1t=E2t et H1t=H2t. Hors de ce contexte spécifique, un rapport de grandeurs qui ne sont pas comparables n'est pas pertinent. La signification de Z_0 doit être cherchée dans cette différence de rôles.

En utilisant les champs E et H, les équations de Maxwell-Faraday et Maxwell-Ampère en l'absence de courants libres, sont les suivantes dans le vide :

$$\overrightarrow{rot}\ \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$$

$$\overrightarrow{rot}\ \vec{H} = \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Ces équations conduisent à l'expression de l'impédance d'onde plane dans le vide. Dans une onde électromagnétique, les champs électrique et magnétique n'ont pas de sources distinctes : ce sont deux composantes générées simultanément et couplées via ces équations où les termes de variation temporelle de E et H apparaissent comme les sources effectives l'un de l'autre.

En conséquence, dans le cas d'une onde plane progressive, ces sources s'éliminent dans le rapport E/H. On peut ainsi faire l'hypothèse que ce rapport n'est représentatif que de l'effet mécanique propre au champ E. L'impédance d'onde dans le vide pourrait alors s'interpréter comme une constante électromécanique mais cela doit être confirmé par le deuxième rapport de champs « effet mécanique/excitation » c'est à dire B/D.

3.2.2. Vérification avec le rapport B/D

Le rapport B/D représente une inversion, pour le numérateur et le dénominateur, des champs électrique et magnétique mais il correspond, comme E/H, au rapport d'un champ d'effet sur un champ d'excitation. Dans le vide, on peut écrire pour le rapport B/D d'une onde électromagnétique :

$$\frac{B}{D} = \frac{\mu_0.H}{\varepsilon_0.E} = {Z_0}^2.\frac{1}{Z_0} = Z_0 \tag{10}$$

On constate que l'impédance d'onde dans le vide n'est ni un rapport de champs, « électrique/magnétique » ni un rapport, « magnétique/électrique ». Elle est un rapport de champs, « effet mécanique/excitation ». Ceci confirme qu'elle est en réalité une constante liée à l'effet mécanique.

4. INTÉGRATION DES DÉVELOPPEMENTS RÉCENTS

4.1. Développements récents

L'incohérence des lois initiales de l'électromagnétisme est rappelée en annexe A. Cette incohérence avait été contournée dans le SI par l'utilisation de constantes sans que la cause de cette incohérence soit résolue. Les constantes avaient été calculées pour accorder ces lois en tenant comptes des unités MKSA et de la rationalisation. La cause de cette incohérence initiale venait de la vitesse de la lumière non prise en compte. Ce problème a été résolu en 2024 [9].

4.1.1. Forces d'Ampère et Coulomb

La résolution en 2024 de l'incohérence des lois initiales de l'électromagnétisme conduit aux expressions suivantes de la force électromagnétique d'Ampère et de la force électrostatique de Coulomb :

$$\frac{F_A}{L} = K_{MKS-A} \cdot \frac{1}{c} \cdot \frac{I.\,I\prime}{2\pi.r} \tag{11}$$

F_A/L est la force par unité de longueur s'exerçant sur les conducteurs rectilignes, parallèles et infinis séparés d'une distance r. I et I' sont les courants circulant dans les deux conducteurs.

$$F_C = K_{MKS-A} \cdot c \cdot \frac{Q.Q\prime}{4\pi.r^2} \tag{12}$$

Les charges Q et Q' sont séparées d'une distance r.

4.1.2. Constante K_{MKS-A}

Dans ces deux expressions apparaît la constante K_{MKS-A}. Il s'agit de la constante de rationalisation et d'adaptation aux unités MKSA des expressions complètes des forces. C'est donc une constante qui est la conséquence, d'une part de la rationalisation prenant en compte le facteur 4π d'Heaviside et l'adaptation aux unités SI et d'autre part de la résolution de l'incohérence initiale qui conduit à la prise en compte de la vitesse de la lumière. En effet, on rappelle que l'expression initiale de la force d'Ampère qui avait servi de base à la définition des unités du système CGS-UEM à partir duquel furent définies les unités MKSA, était la suivante :

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

L'ampère fut défini à partir de cette expression pour une intensité dans les deux conducteurs aboutissant à une force de $2\ .10^{-7}$ N avec $L = r = 1$m. Ainsi, faute d'avoir été pris en compte dans cette expression initiale, le facteur 4π, la vitesse de la lumière c et le coefficient $K_A = 10^{-7}$ N.A^{-2} constituent la constante qui fait la rationalisation et l'adaptation aux unités SI, de l'expression complète :

$$K_{MKS-A} \ = 4\pi.c.10^{-7}\ \mathrm{N\ A}^{-2} \tag{13}$$

$$K_{MKS-A}\ \sim\ 376,73\ \ \mathrm{kg\ m^2\ s^{-3}\ A^{-2}}$$

4.1.3. Perméabilité et permittivité du vide

On reconnait ci-dessus la valeur de l'impédance d'onde plane dans le vide. En effet, par identification de ces nouvelles expressions des forces d'Ampère et Coulomb avec les expressions SI, on obtient :

$$\mu_0 = K_{MKS-A} \cdot \frac{1}{c} \tag{14}$$

$$\frac{1}{\varepsilon_0} = K_{MKS-A} \cdot c \tag{15}$$

Par conséquent le calcul de l'impédance d'onde plane dans le vide donne :

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = K_{MKS-A} \tag{16}$$

Ainsi la constante K_{MKS-A} n'est pas seulement la constante de rationalisation et d'adaptation aux unités MKSA des expressions complètes des forces, puisqu'elle correspond aussi à l'impédance d'onde plane dans le vide.

4.2. Synthèse

La valeur de l'impédance d'onde plane dans le vide vient uniquement de la construction historique du système d'unités mais sa signification physique doit se synthétiser à partir de deux constats :

- La constante Z_0 est une constante liée aux effets mécaniques des champs qu'ils soient électriques ou magnétiques.
- Cette constante intervient dans les expressions des forces d'Ampère et Coulomb lors d'un effet mutuel à distance de grandeurs électriques (charges ou courant).

> L'impédance d'onde plane dans le vide Z_0 est liée aux effets mécaniques des champs électromagnétiques. Elle intervient systématiquement en multiplicateur lors des interactions entre deux entités électriques (charges ou courants). Il s'agit donc d'une constante de couplage électromécanique.

5. CONCLUSIONS, ÉVALUATION, PERSPECTIVES

5.1. Conclusions

L'impédance d'onde plane du vide n'est ni une impédance électrique ni une propriété du vide, elle est autant le rapport E/H que le rapport B/D et est donc liée uniquement aux effets mécaniques des champs E ou B. Ces constats, ajoutés à sa présence dans la force électrostatique de Coulomb et la force électromagnétique d'Ampère, montrent qu'elle est une constante de couplage électromécanique.

$$Z_0 = K_{CEM} \tag{17}$$

À ne pas confondre avec le coefficient de couplage électromécanique, sans dimension, qui intervient en physique des matériaux piézoélectriques.

Cette constante, invisibilisée dans la perméabilité et la permittivité du vide, est d'une importance capitale car elle intervient dans tous les phénomènes utilisant ces deux constantes.

5.2. Evaluation des conclusions

Un effet mécanique d'origine électromagnétique fait intervenir soit μ_0 soit $1/\varepsilon_0$ qui sont des combinaisons de Z_0 et de la vitesse de la lumière c. L'implication systématique de Z_0 en facteur multiplicateur dans ces phénomènes d'interactions électromagnétiques corrobore son rôle de constante de couplage entre mécanique et électromagnétisme.

Vérification dimensionnelle du couplage électromécanique :

Le watt et le joule (qui correspond au watt au temps près) sont les seules unités communes des domaines électrique et mécanique. L'ampère est l'unité de base de l'électricité : c'est à partir du watt défini par la mécanique et de l'ampère que se définissent toutes les unités électriques (unités dérivées) [5]. Dans l'expression de Z_0, l'interaction entre deux entités électriques s'exprime avec des ampères carrés : $Z_0 \sim 376,73$ kg m^2 s^{-3} A^{-2}. On constate aussi que les trois unités mécaniques fondamentales de cette constante, correspondent précisément à l'expression mécanique du watt (1 kg m^2 s^{-3}) qui est l'unité commune aux deux domaines. Ainsi la dimension de Z_0 est :

$$[Z_0] = M.L^2.T^{-3}.I^{-2} = \left[P_{meca}/I^2\right]$$

Ceci confirme son rôle de couplage entre les domaines mécanique et électrique pour les interactions électromagnétiques. L'expression de Z_0 avec ses unités doit être :

$$Z_0 \sim 376,73 \ \text{W.A}^{-2}$$

La conversion en ohms a vidé historiquement cette constante de sa signification fondamentale autant qu'une conversion de newton-mètre en joule aurait vidé de sa signification le moment d'une force.

5.3. Perspectives de recherche

La résolution de l'incohérence des lois initiales de l'électromagnétisme ouvrait des perspectives de recherche qui concernaient d'une part le rôle de l'impédance d'onde dans les lois statiques de l'électromagnétisme et d'autre part les actions physiques que la vitesse de la lumière représente dans les nouvelles expressions de ces lois.

Cette deuxième question est toujours d'actualité mais la signification physique de l'impédance du vide est déterminée : il ne s'agit pas spécifiquement d'une impédance et surtout elle n'est ni intrinsèque ni caractéristique du vide. Sa nouvelle interprétation en tant que constante de couplage électromécanique est une avancée très importante dans la compréhension des nouvelles expressions des forces d'Ampère et Coulomb. En effet, les actions physiques que la vitesse de la lumière représente dans ces expressions, ne sont à ce stade que le résultat d'une résolution mathématique sans explication physique. Ce travail reste à faire en tenant compte de cette nouvelle donnée.

D'autre part, le fait que l'impédance d'onde dans le vide soit une constante de couplage électromécanique devrait permettre de mieux comprendre les relations électromagnétiques dans lesquelles interviennent μ_0 ou $1/\varepsilon_0$. Par exemple la constante de structure fine peut s'exprimer :

$$\alpha = \frac{e^2}{2.\varepsilon_0.h.c} = \frac{K_{CEM}.e^2}{2h}$$

Or la constante de couplage électromécanique K_{CEM} possède la dimension d'une puissance par ampères carrés ou d'une action par coulombs carrés (voir annexe B). Il apparait donc au numérateur une quantité d'action électromécanique entre deux charges élémentaires et au dénominateur la constante de Planck représente le quantum d'action.

Cet exemple montre que l'interprétation de Z_0 en tant que constante de couplage électromécanique K_{CEM} ouvre des perspectives intéressantes.

ANNEXES

A. Rappel du contournement historique de l'incohérence des lois initiales

A.1. L'incohérence entre les lois de Coulomb et Ampère

[10]

En 1856, Wilhelm Weber et Rudolph Kohlrausch, communiquaient sur une observation. Le rapport entre la mesure d'une charge électrique à partir de la force électrostatique de Coulomb (système UES) et sa mesure à partir de la force électromagnétique d'Ampère (système UEM), donnait la vitesse de la lumière :

Force électrostatique (formulation de l'époque) :

$$F_C = \frac{Q.Q\prime}{r^2} \quad \text{Sans le facteur } K_C = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \text{ du système SI} \tag{18}$$

Charges Q et Q sont séparées d'une distance r.

Force électromagnétique (formulation de l'époque) :

$$\frac{F_A}{L} = 2.\frac{I.\,I\prime}{r} \quad \text{Sans le facteur } K_A = \frac{\mu_0}{4\pi} \text{ du système SI} \tag{19}$$

F_A/L est la force par unité de longueur s'exerçant sur les conducteurs rectilignes, parallèles et infinis séparés d'une distance r. I et I' sont les courants circulant dans les deux conducteurs.

Nos unités électriques n'existaient pas encore, les charges ou les courants étaient exprimés avec les unités millimètres, milligrammes et secondes à partir des mesures mécaniques (mesures qualifiées d'absolues par opposition aux mesures relatives). Cependant les mesures étaient incohérentes entre le système électrostatique (UES) et le système électromagnétique (UEM). En effet avec la force de Coulomb, la charge électrique avait la dimension suivante :

$$[Q_{UES}] = \left[\sqrt{F_C}.r\right] = M^{\frac{1}{2}}.L^{\frac{3}{2}}.T^{-1}$$

Avec la force d'Ampère, le courant avait la dimension suivante :

$$[I_{UEM}] = \left[\sqrt{\frac{F_A.r}{2.L}}.\right] = M^{\frac{1}{2}}.L^{\frac{1}{2}}.T^{-1}$$

Soit pour la charge :

$$[Q_{UEM}] = M^{\frac{1}{2}}.L^{\frac{1}{2}}$$

Le rapport des dimensions des charges est une vitesse, les systèmes de mesure n'étaient pas cohérents. Mais de façon très intéressante, pour une même charge, Weber et Kohlrausch obtenaient un rapport qui était égal à la vitesse de la lumière (mesurée sept ans plus tôt) :

$$\frac{Q_{ESU}}{Q_{EMU}} = c \tag{20}$$

Ce rapport et la découverte de l'effet magnéto-optique par Faraday onze ans plus tôt permirent à Maxwell de comprendre le lien entre l'électromagnétisme et la lumière. Il synthétisa l'électromagnétisme et démontra la propagation des ondes électromagnétiques, cependant, l'incohérence entre les expressions initiales des forces ne fut pas résolue.

A.2. Contournement historique de l'incohérence

[11]

À partir de 1874, des unités spécifiques à l'électricité (ampère, volt, ohm etc.) furent créées. Elles étaient basées sur la force d'Ampère. Giovanni Giorgi adapta les deux lois à ces unités électriques et aux unités MKS par des constantes dimensionnelles. Enfin, Oliver Heaviside proposa de remplacer les constantes précédentes par deux nouvelles constantes, μ_0 et ε_0, qu'il nomma permittivité et perméabilité du vide. Il proposa ce remplacement pour introduire dans les lois un facteur 4π (angle solide de tout l'espace) qui permettait une simplification de l'écriture des équations de Maxwell où ce facteur 4π disparaissait. Le problème fut donc contourné grâce à l'utilisation des constantes, mais la façon dont la vitesse de la lumière doit être prise en compte dans les expressions des forces d'Ampère et Coulomb pour éliminer cette incohérence ne fut pas résolue. Ce problème a obtenu une résolution mathématique en 2024.

B. Statut conventionnel d'unité de base de l'ampère

La notion d'unités de base a été repensée dans la neuvième édition du SI, en effet ce sont désormais les constantes fondamentales qui servent de base aux unités [5]. L'ampère était défini depuis l'avènement du SI par la force électromagnétique d'Ampère avec la définition suivante jusqu'à la huitième édition [12] :

« L'ampère est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance de 1 mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à $2 \,.\, 10^{-7}$ *newton par mètre de longueur. »*

Le statut d'unité de base de l'électricité de l'ampère était factuel puisque les autres unités électriques, telles que le coulomb étaient dérivées de l'ampère. La nouvelle définition dans la neuvième édition est la suivante :

« L'ampère, symbole A*, est l'unité de courant électrique du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la charge élémentaire, e, égale à* $1,602\ 176\ 634 \,.\, 10^{-19}$ *lorsqu'elle est exprimée en* C*, unité égale à* A s*. »*

On voit ainsi que c'est désormais le coulomb qui à travers la charge élémentaire est devenu en réalité l'unité électrique à partir de laquelle se définit l'ampère. Cependant l'ampère, par cette subtile définition, conserve son statut conventionnel d'unité de base, il est en effet précisé dans cette neuvième édition du SI : *« les concepts d'unités de base sont conservés car ils sont pratiques et historiquement bien établis »* (§ 2.3 Définitions des unités du SI). A propos des unités de base ou dérivées, il est également précisé : *« cette distinction n'est en principe pas nécessaire car les définitions de toutes les unités, qu'elles soient de base ou dérivées, peuvent être directement établies à partir des sept constantes. ».*

Écrire la constante de couplage électromécanique avec des unités plus adaptées à la force de Coulomb est donc justifié :

$$K_{CEM} \sim 376,73 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ C}^{-2}$$

Il apparait ainsi une action par coulombs carrés.

REFERENCES

[1] Kinsler, L. E., A. R. Frey, A. B. Coppens, and J. V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics*, 4th ed. New York: Wiley, 2000.

[2] Bruhat, G., *Electricite, Cours de Physique Generale, revue par Georges GOUDET*, 8th ed. Paris: Masson & Cie, 1963.

[3] IEC, , "International Electrotechnical Commission. electropedia: The world's online electrotechnical vocabulary, https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/6d6bdd8667c378f7c12581fa003d80e7?OpenForm."

[4] Schelkunoff, S. A., "The impedance concept and its application to problems of reflection, refraction, shielding, and power absorption," *The Bell System Technical journal*, Vol. 17, No. 1, 17–48, 1938, https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1938.tb00774.x.

[5] CCU, , *(Comite consultatif des unites). Le systeme international d'unites (SI)*, 9th ed. Sevres: BIPM, 2019.

[6] Kraus, J. D., *Antennas*, 2nd ed. New-Delhi: McGraw-Hill Company, 1997.

[7] Kitano, M., "The vacuum impedance and unit systems," *IEICE Transactions on Electronics*, Vol. E92-C, No. 1, 3–8, 2009, https://doi.org/10.1587/transele.E92.C.3.

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

[9] Roux, J.-M. A., "Resolution of the inconsistency of the initial laws of electromagnetism, implications and perspectives," *La physique revisitee*, Vol. 1, No. 1, 14–23, 2025, https://doi.org/10.5281/zenodo.17116208.

[10] Blondel, C. and G. Borvon, "Cnrs : Ampere et l'histoire de l'electricite. les unites electriques et leur unification," 2008," http://www.ampere.cnrs.fr/parcourspedagogique/zoom/unitelec/systeme/index.php.

[11] Borvon, G. and C. Blondel, "Cnrs : Ampere et l'histoire de l'electricite. le coulomb, l'ampere, le volt, le watt, l'ohm," 2008," http://www.ampere.cnrs.fr/parcourspedagogique/zoom/unitelec/borvon/index.php.

[12] CCU, , *(Comite consultatif des unites). Le systeme international d'unites (SI)*, 8th ed. Sevres: BIPM, 2006.

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

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. III^e 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]:

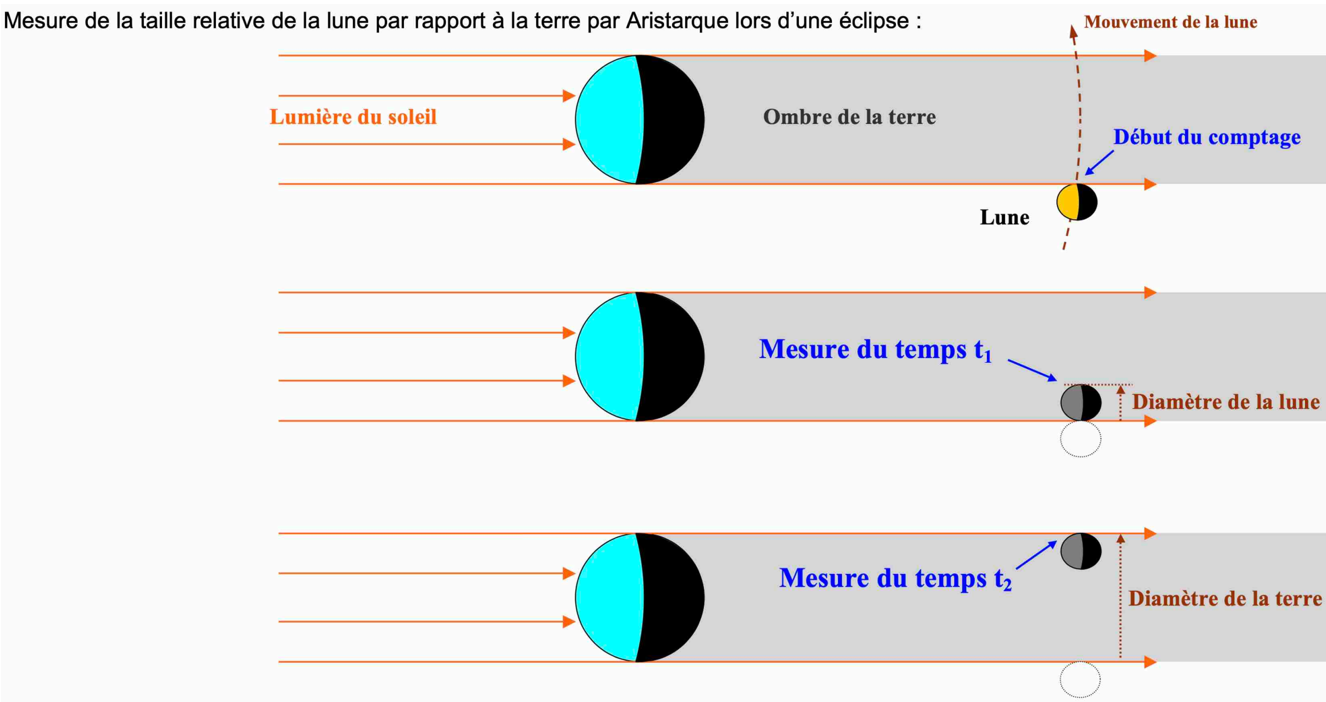

FIGURE 1. Principe (simplifié) sur lequel Aristarque de Samos a fondé sa méthode de mesure du diamètre relatif de la lune

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]:

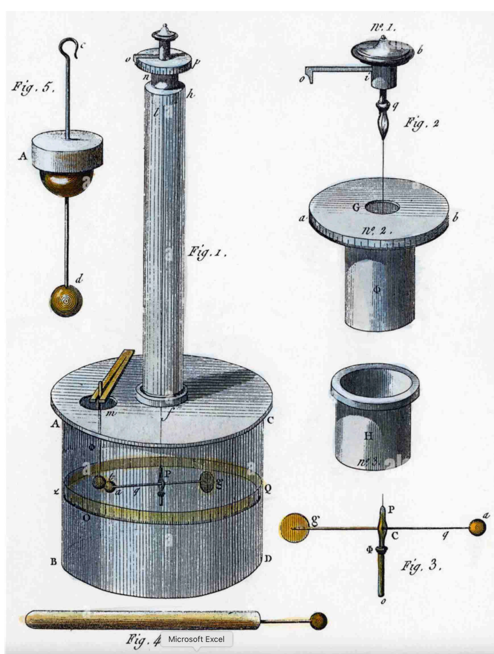

FIGURE 2. Balance de Coulomb pour la mesure de la force de répulsion électrostatique

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 »).

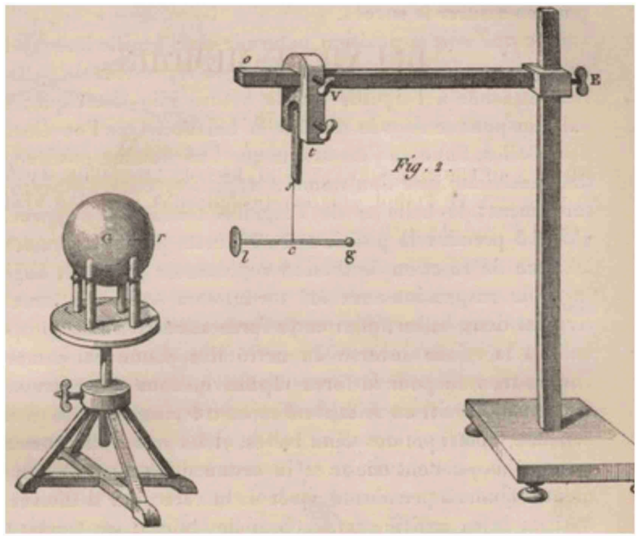

FIGURE 3. Mesure de la force électrostatique attractive par la méthode des oscillations

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

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

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]

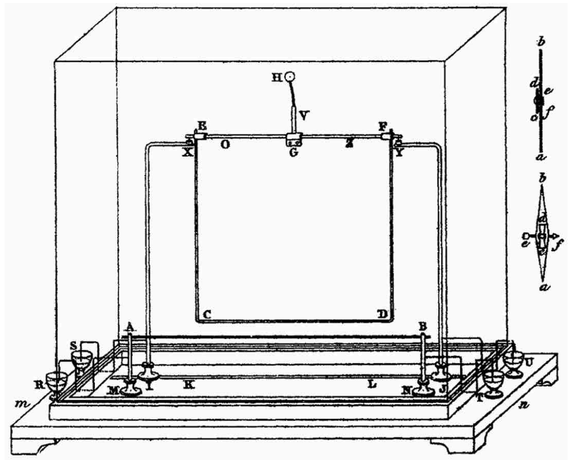

FIGURE 4. Figure de l'appareil mettant en évidence la force d'interaction entre conducteurs parcourus par des courants

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 » :

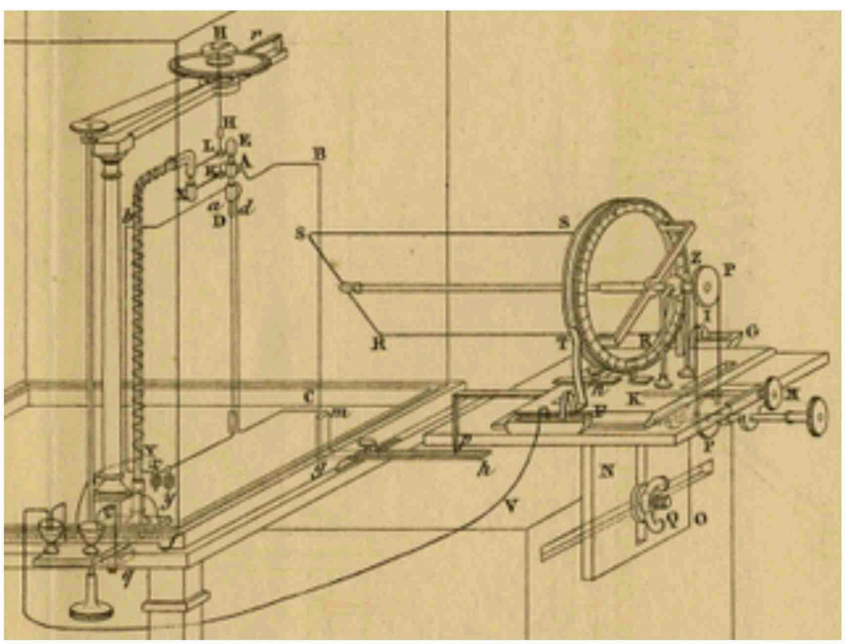

FIGURE 5. Dispositif mis au point par Ampère pour mesurer la force électromagnétique s'exerçant sur le conducteur vertical BC à partir du champ magnétique induit par le conducteur d'inclinaison réglable RS

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.

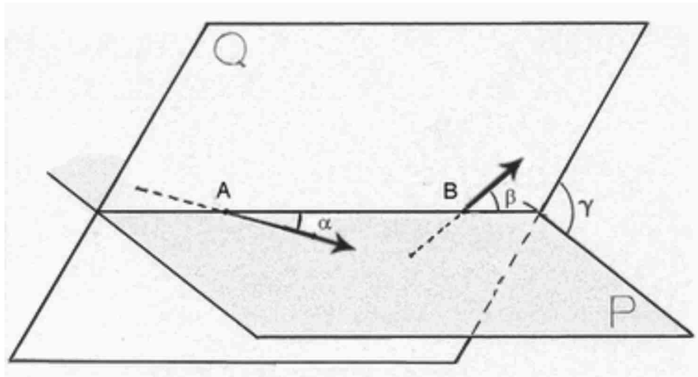

FIGURE 6. Figure faisant apparaitre les différents angles de la formule

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

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.

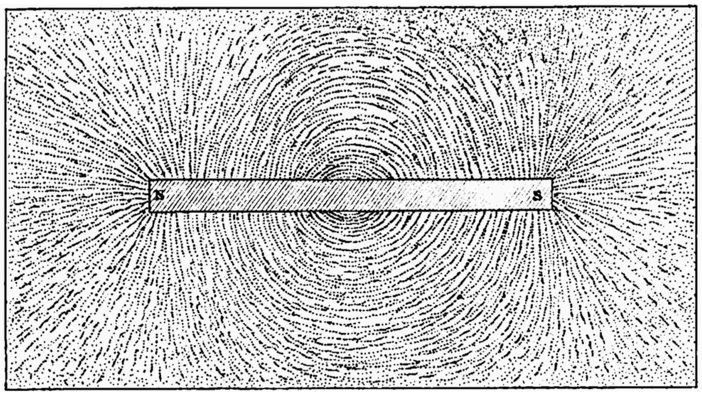

FIGURE 7. Figure décrite par DESCARTES en 1664 (« spectre magnétique ») et reproduite ici par Faraday, de la répartition de la limaille de fer dans l'environnement d'un aimant.

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 :

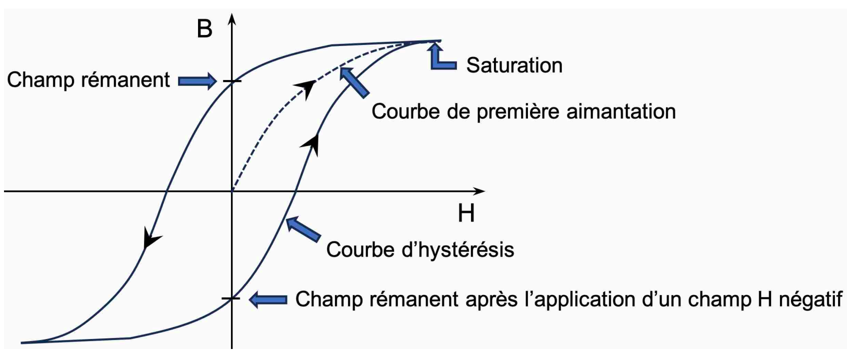

FIGURE 8. Forme de l'hystérésis d'un matériau ferromagnétique

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 XIXe 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 :

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

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 :

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

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 :

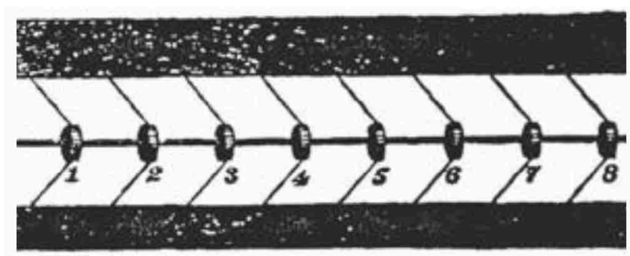

FIGURE 9. Modèle mécanique de Lodge

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 flus 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. http://www.ampere.cnrs.fr/parcourspedagogique/zoom/coulomb/fortification/memoires_coulomb.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, "Cnrs : Ampere et l'histoire de l'electricite. les unites electriques et leur unification," 2008," http://www.ampere.cnrs.fr/histoire/parcours-historique/lois-courants/ampere-electrodynamique.
[9] Borvon, G. and C. Blondel, "Cnrs : A la recherche d'une loi newtonienne pour l'electrodynamique," 2008," http://www.ampere.cnrs.fr/histoire/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.

This is the second issue of *« La physique revisitée »* which presents a scientific article that complements the conceptual advances of the first. This new scientific article takes us back to the interpretation of vacuum wave impedance, which until now seemed quite unclear. It deconstructs the simplistic view that some considered this constant to be an electrical impedance. it shows that it is not a property of the vacuum, but an electromechanical coupling constant, which is surprising when reading the title. The demonstration is based on the role of the fields to which it relates. The fields of mechanical effect and the fields of excitation are distinguished, and this distinction is the key to the reasoning.

Each issue of *« La physique revisitée »* features a scientific article and an associated article on the history of physics; both articles are presented in French and English.

The accompanying article on the history of science relates the evolution of the notion of action at a distance up to our modern vector fields, detailing how excitation fields were introduced by Maxwell for electromagnetismThis article demonstrates that the introduction of these concepts was necessitated by the need to separate the mechanical effects of electromagnetism from their electrical causes. It revisits the historical difficulty in correctly interpreting the D field as an excitation field, due to its introduction through the limited movement of charges within materials. In fact, Maxwell initially used the term "displacement" to designate this field. His aim was to conceptualize the displacement current, the time derivative of the field D, but this representation in materials was artificial since this field and the displacement current apply to a vacuum. Ultimately, the article highlights the need to revise the vocabulary associated with the four electromagnetic fields by distinguishing between effect fields and excitation fields.

We hope you enjoy reading it.

Yves Blot
Director of publication

CHERCHE ET TROUVE
ARISTARQUE

LA PHYSIQUE REVISITÉE

The plane wave impedance in vacuum Z_0 is an electromechanical coupling constant

Jean-Marc Augustin Roux[1]
[1]Professeur Agrégé

La physique revisitée, Issue 2, pages 24-32
Receveid: 17 fFebruary 2026. Accepted: 02 june 2026. Published: 06 june 2026
DOI : 10.5281/zenodo.20571495

ABSTRACT: Although the plane-wave impedance of vacuum $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$ is a fundamental constant of electromagnetism, it has historically been little used from a strictly theoretical point of view, most often appearing as a derived quantity. Its use is mostly limited to a role as a normalization or reference parameter in electromagnetic engineering applications. However, the recent resolution of the inconsistency in the initial laws of electromagnetism sheds new light on it.

This work makes it possible to deepen its interpretation and to show that its actual role is of considerable importance.

After clarifying the concept of wave impedance, possible misinterpretations are eliminated, and a study of its physical significance is carried out based on the role (effect or excitation) of electromagnetic fields.

It follows that the plane-wave impedance in vacuum is a constant related to the mechanical effects of electromagnetic phenomena.

This result, when confronted with the new expressions of the Ampère and Coulomb forces obtained through the resolution of the inconsistency in the original laws of electromagnetism, shows that it is more precisely an electromechanical coupling constant.

keywords: Vacuum impedance, permittivity, permeability, Coulomb force, Ampère force, Electromagnétic field

RÉSUMÉ : Bien que l'impédance d'onde plane du vide $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$ soit une constante fondamentale de l'électromagnétisme, elle a historiquement été peu exploitée du point de vue strictement théorique, apparaissant en général comme une quantité dérivée. Son usage se limite le plus souvent à un rôle de paramètre de normalisation ou de référence dans les applications d'ingénierie électromagnétique. Cependant la résolution récente de l'incohérence des lois initiales de l'électromagnétisme lui donne un nouvel éclairage.

Ce travail permet d'approfondir son interprétation et montrer que son rôle réel est d'une importance considérable.

Après avoir précisé le concept d'impédance d'onde, les erreurs d'interprétation possibles sont éliminées et une étude concernant sa signification physique est réalisée à partir du rôle, d'effet ou d'excitation, des champs électromagnétiques.

Il résulte que l'impédance d'onde plane dans le vide est une constante liée aux effets mécaniques des phénomènes électromagnétiques.

Ce résultat, confronté aux nouvelles expressions des forces d'Ampère et Coulomb obtenues par la résolution de l'incohérence des lois initiales de l'électromagnétisme, montre qu'il s'agit plus précisément d'une constante de couplage électromécanique.

Mots clés : Impédance du vide, permittivité, permeabilité, Force de Coulomb, Force d'Ampere, Champ électromagnétique

1. INTRODUCTION

Physical constants generally occupy a central place in electromagnetic theory. It is therefore remarkable that the plane wave impedance in a vacuum, $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$, remains largely underutilized, most often being reduced to the role of a simple reference for the characteristics impedances of material media. This marginalization contrasts with its fundamental nature, suggested by its definition based on electromagnetic constants. Such a situation indicates that its physical meaning is not fully understood. The present work aims to clarify this point by methodically discarding inadequate interpretations in order to better define the true nature of this constant. Recent developments have provided new insight that has facilitated this study, and it is the fundamental importance of this constant that will be brought to light. We will successively:

1. Perform an analysis based on its current definition and eliminate any misinterpretations that may arise.
2. Adopt a new approach by taking into account the role (effect or excitation) of electromagnetic fields, of which it is the ratio in a vacuum. This allows us to highlight its electromechanical nature.
3. Integrate recent developments that allow us to specify its function as an electromechanical coupling constant in interactions of electromagnetic origin.
4. Assess the validity of the conclusions and offer some reflections on the implications and perspectives.

2. ANALYSIS OF THE CONSTANT Z_0

2.1. Intrinsic impedance of a medium

2.1.1. The concept of impedance in its generalized meaning and use

The term impedance is used in its general sense to refer to the relationship between a stimulus and its response (mechanical impedance, acoustic impedance, etc.). The concept of impedance can be summarized as follows:

- Impedance is a ratio of coupled quantities.
- It applies to dynamic phenomena (sinusoidal, transient, or time-varying).
- It is complex to take into account the phase shifts.
- It can be generalized to different fields: electrical (V/I), acoustic (p/v), mechanical (F/v), electromagnetic (E/H), thermal (ϕ/T).

The concept makes it easy to determine the response of a system without using differential equations: at the interface of two propagation media, the impedances Z_1 and Z_2 of each of the media, enter into the calculation of the reflection coefficients $\mathcal{R}$ and transmission coefficients $1-\mathcal{R}$:

$$\mathcal{R} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \tag{1}$$

Examples:

- The role of the gel (acoustic impedance propagation medium Z_1) in an ultrasound scan is an impedance adaptation to decrease at the level of the skin (impedance propagation medium Z_2), the reflection of ultrasounds in favor of their transmission ($Z_1 \sim Z_2$) [1].
- At the end of a two-wire or coaxial electrical transmission line with a "characteristic" impedance Z_1, an electrical impedance of value $Z_2 \sim Z_1$ is placed to suppress reflection and thus prevent the creation of standing voltage and current waves in the line (risk of interference) [2]. This "characteristic impedance" is electrical:

$$Z_1 = \sqrt{\frac{R + jL\omega}{G + jC\omega}}$$

Where R, L, G, and C are respectively the linear resistance, inductance, conductance, and capacitance. For high frequencies (R and G negligible), we have $Z_1 \sim \sqrt{L/C}$, which is resistive. The impedance placed at the end of the line to suppress reflection is therefore a resistance.

Remarks :

1. A negative reflection coefficient corresponds to a reversal of sign of the reflected quantity.
2. For acoustics, the expression for the reflection coefficient (1) is given above for normal incidence (perpendicular to the surface separating the media), the same applies to electromagnetism.

2.1.2. Definition of intrinsic impedance

Intrinsic impedance is defined, in the absence of free charges, in a linear, homogeneous and isotropic medium, by the ratio of the electric field strength E to the magnetic excitation field H of a monochromatic progressive plane wave and is expressed as follows:

$$Z = \left(\frac{E}{H}\right)_{\text{MPPW}} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \tag{2}$$

Where μ and ε are respectively the dielectric permittivity and magnetic permeability of the medium. This relationship follows from Maxwell's equations. The two fields are perpendicular to each other and to the direction of propagation. Therefore, this relationship can be expressed more rigorously in vector form, taking into account the unit propagation direction $\vec{n}$:

$$\vec{E} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\vec{H} \wedge \vec{n} \tag{3}$$

The intrinsic impedance is designated in English as characteristic impedance of a medium, but this term is discouraged in French by the IEC (IEC 705-03-23) [3]. This term is a source of confusion with the characteristic impedance of an electrical transmission line. The term ”impedance” does not correspond in the present case to an electrical interpretation; it is used in the general sense of the term [4].

2.2. Plane wave impedance in a vacuum

2.2.1. Definition and limited role

The plane wave impedance in a vacuum is expressed as follows:

$$Z_0 = \left(\frac{E}{H}\right)_{\text{MPPW vacuum}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \sim 376,73\ \mathrm{kg\,m^2\,s^{-3}\,A^{-2}} \tag{4}$$

Where μ_0 and ε_0 are respectively the dielectric permittivity and the magnetic permeability of free space. The plane wave impedance in a vacuum serves primarily as a reference for other media:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}}.Z_0 \tag{5}$$

Where μ_r and ε_r are respectively the relative permittivity and permeability. It is easily verified that the role of plane wave impedance in a vacuum is very limited since it is eliminated in the reflection and transmission coefficients:

$$\mathcal{R} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} = \frac{\sqrt{\mu_{r2}/\varepsilon_{r2}} - \sqrt{\mu_{r1}/\varepsilon_{r1}}}{\sqrt{\mu_{r1}/\varepsilon_{r1}} + \sqrt{\mu_{r2}/\varepsilon_{r2}}} \tag{6}$$

Scientific literature generally devotes limited attention to it, and plane wave impedance in a vacuum has so far rarely been the subject of specific analyses. Given the fundamental role of physical constants, which notably form the basis of the definition of units in the 2019 revised International System of Units (SI) [5], this marginal status raises questions and justifies a thorough examination of its physical significance.

2.2.2. Z_0 is not an electrical impedance

The ratio it represents results in units (V.m^{-1} divided by A.m^{-1}) that can be converted into ohms, giving it a dimension similar to that of an electrical resistance, which it is not. Plane wave impedance in a vacuum does not represent a voltage/current ratio.

On the other hand, an electrical impedance locally links voltage and current at its terminals, corresponding to a unidirectional, linear configuration, while wave impedance characterizes a fundamentally three-dimensional electromagnetic relationship, and it is only for simplification that we consider only the ratio of the field intensities. More rigorously, the relationship between the electric field and the magnetic excitation field, mutually perpendicular but also perpendicular to the direction of propagation, can be formulated with a tensor electromagnetic impedance, which accounts for this three-dimensional configuration. [4] :

For a unit propagation direction $\vec{n}$:

$$\vec{n} = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} \text{ with } {n_x}^2 + {n_y}^2 + {n_z}^2 = 1$$

The vector relationship between the two fields in a vacuum is:

$$\vec{E} = Z_0(\vec{n})\vec{H} \quad \text{with} \quad Z_0(\vec{n}) = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}.\begin{bmatrix} 0 & n_z & -n_y \\ -n_z & 0 & n_x \\ n_y & -n_x & 0 \end{bmatrix} \tag{7}$$

This represents a fundamental difference between the impedance of a limited, closed electrical circuit and the wave impedance associated with a three-dimensional, unlimited propagation space. The erroneous assimilation to an electrical impedance is only made possible by inappropriate unit conversions and the use, in electromagnetism, of a simplified form of the impedance concept, reduced to the ratio of field amplitudes; this simplification is generally sufficient for common applications.

On the other hand, by definition, no charge circulates in a vacuum and no Joule heating losses occur with the displacement current; there is no absorption, therefore no resistive behavior. There is also no reactive behavior in the case of a progressive plane wave (the setting of the definition of Z_0), since, regardless of the frequency, no phase shift appears between the two fields. Therefore, no equivalent electrical scheme can be proposed for wave impedance in a vacuum, which would obviously be possible if Z_0 were an electrical impedance.

2.2.3. Impedance Z_0 is not a property of a vacuum

The impedance Z_0 corresponds to a special case of electromagnetic waves, that of plane waves in a vacuum. In the general case, the wave impedance E/H depends on the nature of the electromagnetic wave. Figure 1, shows the components of the fields produced in a vacuum by a short dipole of length L, at a distance r from it [6]:

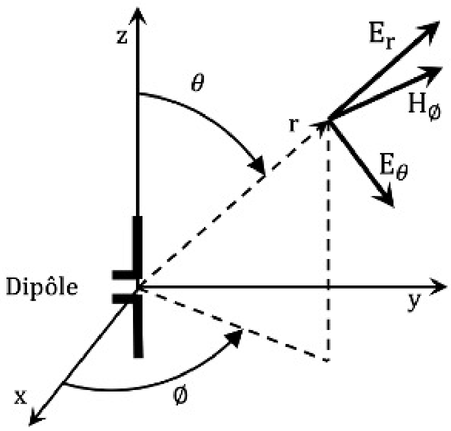

FIGURE 1. Components produced by a short dipole

The components of the fields in the orthogonal coordinate system (r, θ, ϕ), are:

$$E_r = \frac{I_0.e^{j\omega(t-r/c)}.L.cos\theta}{2\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{c.r^2} + \frac{1}{j\omega.r^3}\right)$$

$$E_\theta = \frac{I_0.e^{j\omega(t-r/c)}.L.sin\theta}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{j\omega}{c^2.r} + \frac{1}{c.r^2} + \frac{1}{j\omega.r^3}\right)$$

$$E_\phi = 0$$

$$H_r = 0$$

$$H_\theta = 0$$

$$H_\phi = \frac{I_0.e^{j\omega(t-r/c)}.L.sin\theta}{4\pi}\left(\frac{j\omega}{c.r} + \frac{1}{r^2}\right)$$

In the near field, the ratio between the electric field and the magnetic excitation field has an imaginary component, indicating a time phase shift between E and H, and its magnitude varies with the distance from the source, unlike the case of plane waves. The wave impedance E/H in a vacuum is therefore a local ratio that depends on both the wave geometry and the distance from the source. In the far field, this ratio becomes constant and real, and this case is similar to that of plane waves.

$$r \longrightarrow \infty \;\Rightarrow\; \frac{E}{H} \longrightarrow \frac{E_\theta}{H_\phi} \longrightarrow \frac{1}{\varepsilon_0.c} = Z_0 \qquad (8)$$

The impedance of a plane wave in a vacuum does not characterize the vacuum as a material medium, but rather a specific case of waves. It is thus a characteristic of plane waves in the absence of matter, and not a property of the vacuum itself.

The vacuum, as the absence of a material medium, cannot possess intrinsic physical properties. Attributing such properties would amount to reintroducing the hypothesis of a "luminiferous ether," invalidated by the Michelson and Morley experiment (1887).

2.3. Relevance of the E/H ratio

Intrinsic impedance is an electric field/magnetic excitation field ratio, but we must now question the relevance of the E/H field ratio rather than D/H, D/B or E/B.

2.3.1. For a change of medium

Masao Kitano provides an initial answer to this question regarding a change of medium and the choice of H [7]:

« The reason why H is used instead of B is as follows. The boundary conditions for magnetic fields at the interface of media 1 and 2 are H1t = H2t (tangential) and B1n = B2n (normal). For the case of normal incidence, which is most important practically, the latter condition becomes trivial and cannot be used. Therefore H is used more conveniently. »

The same reason can be given for choosing E rather than D, since the boundary conditions are E1t=E2t and D1n = D2n in the absence of free charges. Following this line of reasoning, the E/H ratio is therefore the most appropriate to account for reflection and transmission phenomena during a change of medium.

2.3.2. Without changing of medium

When we do not consider the phenomena of reflection or transmission at an interface, but only the effect of the medium on propagation, we find that it is the "phase velocity" parameter that is impacted and that the E/B ratio is appropriate to express it:

$$\left(\frac{E}{B}\right)_{\text{MPPW}} = \frac{1}{\sqrt{\mu.\varepsilon}} = v \qquad (9)$$

Intrinsic impedance is therefore not the only relevant ratio between electric and magnetic fields. Intrinsic impedance is simply the appropriate ratio for studying changes of medium. As for the wave impedance of vacuum, it is only the reference value which is eliminated in the calculation of reflection coefficients.

2.4. A role that is difficult to grasp

We saw in 2.2.1 that the plane wave impedance of a vacuum has attracted little interest from physicists and that its interpretation needs to be examined. We saw in sections 2.2.2 and 2.2.3 that Z_0 is neither an electrical impedance nor a property of a vacuum. We also saw in 2.3 that Z_0 represents a relevant ratio only for changes in medium, but its value is eliminated in the calculations of reflection coefficients. It appears to have no function. We will therefore seek to understand its meaning based on the role of fields.

3. NEW APPROACH BASED ON THE ROLE OF THE FIELDS

3.1. Physical roles of the D, E, H and B fields

3.1.1. Role descriptions

Electromagnetic fields can have the physical role of a mechanical effect field or that of an excitation field:

- Mechanical fields manifest themselves physically as the Lorentz force they exert on a charge. They depend on excitation fields, but also on the media, since polarization or magnetization results from the bound sources within these media. These are the fundamental fields.
- Excitation fields are independent of the medium and correspond to the geometric configuration of free sources. As mathematical tools, they are auxiliary fields.

3.1.2. Physical roles of electric fields

The electric field of mechanical effect is the field E; this can be verified with the electric component of the Lorentz force exerted on a charge q:

$$\vec{F}_{elec} = q.\vec{E}$$

The electric excitation field is the field D. A common, incorrect interpretation is to say that it depends on the polarization due to the following relationship:

$$\vec{D} = \varepsilon_0.\vec{E} + \vec{P}$$

Indeed, this relationship is used, for example, in the case of dielectrics separating the plates of a parallel-plate capacitor across which a voltage is applied. In this configuration, the voltage V determines the value of the field $E = V/l$ as a function of the thickness l of the dielectric and consequently determines the polarization, since it is the field E that acts on the charges bound to the material. Thus, this expression gives the illusion that the excitation field D is a consequence of the reaction of the medium, but this is not the case: *« Field D depends only on the loads outside the material, which are controlled by the experimenter. »* [8]. This control of electrical charges is achieved here through voltage:

$$Q = C.V = \frac{\varepsilon.S}{l}.V$$

In the example of the capacitor, the value of the field D depends only on the charges +Q and -Q on each plate and on the area S of the charged surfaces, and not on the medium:

$$D = \frac{Q}{S}$$

Thus, for a given charge value Q, it is the field E and the polarization P that depend on the dielectric separating the plates.

We can also verify, in a simplified way, in the specific case of an isolated charge Q, that at a distance r, the expression for the field $E = Q/(4\pi.\varepsilon.r^2)$ depends on the permittivity of the medium, while that of the excitation field $D = \varepsilon.E = Q/(4\pi.r^2)$ corresponds to the geometric configuration of the source independently of the medium. To verify in general that the excitation field D is independent of the medium, we must refer to the Maxwell-Gauss equation in which the permittivity of the medium does not appear:

$$div\ \vec{D} = \rho_f$$

Where ρ_f is the free charge density. The equivalent macroscopic Maxwell-Gauss equation, but formulated with the electric field in an isotropic medium, shows that it is the field E that depends on the medium:

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

The electric field of mechanical effect E depends on the excitation field and the response of the medium:

$$\vec{E} = \frac{1}{\varepsilon}.\vec{D} = \frac{1}{\varepsilon_0}.(\vec{D} - \vec{P})$$

3.1.3. Physical roles of magnetic fields

The magnetic field with mechanical effect is the B field. This can be verified with the magnetic component of the Lorentz force exerted on a charge q moving at velocity $\vec{v}$:

$$\vec{F}_{mag} = q.\vec{v} \wedge \vec{B}$$

The magnetic excitation field is the field H. This is verified by the macroscopic Maxwell-Ampère equation in the media:

$$\overrightarrow{rot}\ \vec{H} = \vec{J}_f + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

This relationship shows that the excitation field H depends only on free currents and variations in the electric excitation field D, which, as previously shown, itself depends only on free sources. The excitation field H is therefore independent of the medium. The magnetic field of mechanical effect B depends on the excitation field and the response of the medium.

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

3.1.4. Summary of the physical roles of the fields

- The E and B fields are the mechanical effect fields. They depend on the excitation fields as well as the media through polarization or magnetization.
- The D and H fields are the excitation fields. They are independent of the media and depend only on free sources.

3.2. Electromechanical meaning of the constant Z_0

3.2.1. The distinct roles of the fields in the E/H report

The roles of the E field (mechanical effect field) and the H field (excitation field) are not the same, and this ratio was only used for its utility during a change of medium because E1t=E2t and H1t=H2t. Outside of this specific context, a ratio of quantities that are not comparable is not relevant. The meaning of Z_0 must be sought in this difference in roles.

Using the E and H fields, the Maxwell-Faraday and Maxwell-Ampère equations in the absence of free currents are as follows in a vacuum:

$$\overrightarrow{rot}\ \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$$

$$\overrightarrow{rot}\ \vec{H} = \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

These equations lead to the expression for the plane wave impedance in a vacuum. In an electromagnetic wave, the electric and magnetic fields do not have distinct sources: they are two components generated simultaneously and coupled via these equations, where the time-varying terms of E and H appear as the effective sources of each other.

Consequently, in the case of a progressive plane wave, these sources cancel each other out in the E/H ratio. We can thus hypothesize that this ratio represents only the mechanical effect specific to the electric field E. Wave impedance in vacuum could then be interpreted as an electromechanical constant, but this must be confirmed by the second field ratio ”mechanical effect/excitation”, i.e., B/D.

3.2.2. Verification with the B/D ratio

The ratio B/D represents an inversion, for the numerator and denominator, of the electric and magnetic fields, but like E/H, it corresponds to the ratio of an effect field to an excitation field. In a vacuum, the B/D ratio of an electromagnetic wave can be written as:

$$\frac{B}{D} = \frac{\mu_0.H}{\varepsilon_0.E} = {Z_0}^2.\frac{1}{Z_0} = Z_0 \tag{10}$$

We observe that wave impedance in a vacuum is neither a ratio of fields, ”electric/magnetic” nor a ratio, ”magnetic/electric”. It is a ratio of fields, ”mechanical effect/excitation”. This confirms that it is in fact a constant related to the mechanical effect.

4. INTEGRATION OF RECENT DEVELOPMENTS

4.1. Recent developments

The inconsistency of the initial laws of electromagnetism is recalled in Appendix A. This inconsistency had been worked around in the SI by the use of constants, but the cause of the inconsistency was not resolved. The constants had been calculated to make these laws consistent, taking into account MKSA units and rationalization. The cause of this initial inconsistency stemmed from the failure to account for the speed of light. This problem was resolved in 2024 [9].

4.1.1. Ampère and Coulomb forces

The resolution in 2024 of the inconsistency in the initial laws of electromagnetism leads to the following expressions for Ampère's electromagnetic force and Coulomb's electrostatic force:

$$\frac{F_A}{L} = K_{MKS-A} \cdot \frac{1}{c} \cdot \frac{I.\,I\prime}{2\pi.r} \tag{11}$$

F_A/L is the force per unit length exerted on straight, parallel and infinite conductors separated by a distance r. I and I' are the currents flowing in the two conductors.

$$F_C = K_{MKS-A} \cdot c \cdot \frac{Q.Q\prime}{4\pi.r^2} \tag{12}$$

Charges Q and Q are separated by a distance r.

4.1.2. Constant K_{MKS-A}

In both of these expressions, the constant K_{MKS-A} appears. This is the rationalization and adaptation constant to MKSA units of the complete expressions of forces. It is therefore a constant which is the consequence, on the one hand, of the rationalization taking into account the factor 4π of Heaviside and the adaptation to SI units and on the other hand of the resolution of the initial inconsistency which leads to taking into account the speed of light. Indeed, it is worth recalling that the initial expression for Ampère's force, which served as the basis for defining the units of the CGS-UEM system from which the MKSA units were defined, was as follows:

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

The ampere was defined from this expression for a current in the two conductors resulting in a force of 2 $.10^{-7}$ N with $L = r = 1$m. Thus, since they were not taken into account in this initial expression, the factor 4π, the speed of light c, and the coefficient $K_A = 10^{-7}$ N.A^{-2} constitute the constant that rationalizes and adapts the complete expression to SI units:

$$K_{MKS-A} = 4\pi.c.10^{-7} \text{ N A}^{-2} \tag{13}$$

$$K_{MKS-A} \sim 376,73 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-3} \text{ A}^{-2}$$

4.1.3. Permeability and permittivity of vacuum

We recognize above the value of the plane wave impedance in a vacuum. Indeed, by identifying these new expressions for Ampère and Coulomb forces with the SI expressions, we obtain:

$$\mu_0 = K_{MKS-A} \cdot \frac{1}{c} \tag{14}$$

$$\frac{1}{\varepsilon_0} = K_{MKS-A} \cdot c \tag{15}$$

Therefore, calculating the plane wave impedance in a vacuum gives:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = K_{MKS-A} \tag{16}$$

Thus the constant K_{MKS-A} is not only the rationalization and adaptation constant to MKSA units of the complete expressions of forces, since it also corresponds to the plane wave impedance in vacuum.

4.2. Synthesis

The value of plane wave impedance in a vacuum comes solely from the historical construction of the system of units, but its physical meaning must be synthesized from two observations:

- The constant Z_0 is a constant related to the mechanical effects of fields, whether electric or magnetic.
- This constant appears in the expressions for Ampère and Coulomb forces during a mutual effect at a distance of electrical quantities (charges or current).

> The plane wave impedance in a vacuum Z_0 is related to the mechanical effects of electromagnetic fields. It systematically acts as a multiplier during interactions between two electrical entities (charges or currents). It is therefore an electromechanical coupling constant.

5. CONCLUSIONS, EVALUATION, PERSPECTIVES

5.1. Conclusions

The plane wave impedance of the vacuum is neither an electrical impedance nor a property of the vacuum; it is as much the ratio E/H as the ratio B/D and is therefore linked solely to the mechanical effects of the E or B fields. These observations, added to its presence in the Coulomb electrostatic force and the Ampère electromagnetic force, show that it is an electromechanical coupling constant.

$$Z_0 = K_{CEM} \tag{17}$$

Not to be confused with the dimensionless electromechanical coupling coefficient, which is involved in the physics of piezoelectric materials.

This constant, rendered invisible in the permeability and permittivity of the vacuum, is of paramount importance because it is involved in all phenomena using these two constants.

5.2. Evaluation of the conclusions

A mechanical effect of electromagnetic origin involves either μ_0 or $1/\varepsilon_0$ which are combinations of Z_0 and the speed of light c. The systematic involvement of Z_0 as a multiplying factor in these phenomena of electromagnetic interactions corroborates its role as a coupling constant between mechanics and electromagnetism.

Dimensional verification of the electromechanical coupling:

The watt and the joule (which corresponds to the watt up to the time value) are the only units common to both electrical and mechanical systems. The ampere is the basic unit of electricity: all electrical units (derived units) are defined from the watt, defined by mechanics, and from the ampere. [5]. In the expression for Z_0, the interaction between two electrical entities is expressed with square amperes: $Z_0 \sim 376,73$ kg m^2 s^{-3} A^{-2}. We also note that the three fundamental mechanical units of this constant correspond precisely to the mechanical expression of the watt (1 kg m^2 s^{-3}) which is the unit common to the two domains. Thus the dimension of Z_0 is:

$$[Z_0] = M.L^2.T^{-3}.I^{-2} = \left[P_{meca}/I^2\right]$$

This confirms its role in coupling between the mechanical and electrical domains for electromagnetic interactions. The expression for Z_0 with its units must be:

$$Z_0 \sim 376,73 \text{ W.A}^{-2}$$

The conversion to ohms has historically emptied this constant of its fundamental meaning as much as a conversion from newton-meter to joule would have emptied the moment of a force of its meaning.

5.3. Research prospects

The resolution of the inconsistency of the initial laws of electromagnetism opened up research perspectives which concerned on the one hand the role of wave impedance in the static laws of electromagnetism and on the other hand the physical actions that the speed of light represents in the new expressions of these laws. This second question is still asked but the physical meaning of the impedance of the vacuum is determined: it is not specifically an impedance and above all it is neither intrinsic nor characteristic of the vacuum. Its new interpretation as an electromechanical coupling constant is a very important step forward in understanding the new expressions for Ampère and Coulomb forces. Indeed, the physical actions that the speed of light represents in these expressions are, at this stage, merely the result of a mathematical solution without a physical explanation. This work remains to be done, taking this new information into account.

On the other hand, the fact that wave impedance in a vacuum is an electromechanical coupling constant should allow for a better understanding of the electromagnetic relationships involving μ_0 or $1/\varepsilon_0$. For example, the fine-structure constant can be expressed as:

$$\alpha = \frac{e^2}{2.\varepsilon_0.h.c} = \frac{K_{CEM}.e^2}{2h}$$

Yet, the electromechanical coupling constant K_{CEM} has the dimensions of power per square ampere or action per square coulomb (see appendix B). Therefore, the numerator represents a quantity of electromechanical action between two elementary charges, and the denominator represents Planck's constant, which represents the quantum of action.

This example shows that interpreting Z_0 as an electromechanical coupling constant K_{CEM} opens up interesting perspectives.

APPENDICES

A. Summary of the historical circumvention of the inconsistency of the initial laws

A.1. The inconsistency between Coulomb's and Ampère's laws

[10]

In 1856, Wilhelm Weber and Rudolph Kohlrausch communicated an observation. The ratio between the measurement of an electric charge based on Coulomb's electrostatic force (UES system) and its measurement based on Ampère's electromagnetic force (UEM system) gave the speed of light:

Electrostatic force (formulation at the time):

$$F_C = \frac{Q.Q\prime}{r^2} \quad \text{Without the factor } K_C = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \text{ of the SI system} \tag{18}$$

Charges Q and Q are separated by a distance r.

Electromagnetic force (formulation at the time):

$$\frac{F_A}{L} = 2.\frac{I.\,I\prime}{r} \quad \text{Without the factor } K_A = \frac{\mu_0}{4\pi} \text{ of the SI system} \tag{19}$$

F_A/L is the force per unit length exerted on straight, parallel and infinite conductors separated by a distance r. I and I' are the currents flowing in the two conductors.

Our electrical units did not yet exist; charges and currents were expressed using millimeters, milligrams, and seconds based on mechanical measurements (measurements described as absolute, as opposed to relative). However, the measurements were inconsistent between the electrostatic system (ESU) and the electromagnetic system (EMU). Indeed, with Coulomb's force, electric charge had the following dimensions:

$$[Q_{UES}] = \left[\sqrt{F_C}.r\right] = M^{\frac{1}{2}}.L^{\frac{3}{2}}.T^{-1}$$

With Ampère's force, the current had the following dimensions:

$$[I_{UEM}] = \left[\sqrt{\frac{F_A.r}{2.L}}.\right] = M^{\frac{1}{2}}.L^{\frac{1}{2}}.T^{-1}$$

Either for the load:

$$[Q_{UEM}] = M^{\frac{1}{2}}.L^{\frac{1}{2}}$$

The ratio of the dimensions of the charges is a speed; the measurement systems were not consistent. But very interestingly, for the same charge, Weber and Kohlrausch obtained a ratio that was equal to the speed of light (measured seven years earlier):

$$\frac{Q_{ESU}}{Q_{EMU}} = c \tag{20}$$

This ratio, along with Faraday's discovery of the magneto-optical effect eleven years earlier, enabled Maxwell to understand the link between electromagnetism and light. He synthesized electromagnetism and demonstrated the propagation of electromagnetic waves; however, the inconsistency between the initial expressions for the forces remained unresolved.

A.2. A historical circumvention of inconsistency

[11]

From 1874 onwards, units specific to electricity (ampere, volt, ohm, etc.) were created. They were based on Ampère's force. Giovanni Giorgi adapted the two laws to these electrical units and to the MKS units using dimensional constants. Finally, Oliver Heaviside proposed replacing the previous constants with two new constants, μ_0 and ε_0, which he named permittivity and permeability of free space. He proposed this replacement to introduce into the laws a factor 4π (the solid angle of all space), which allowed for a simplification of the writing of Maxwell's equations where this factor 4π disappeared. The problem was thus circumvented through the use of constants, but the way in which the speed of light must be taken into account in the expressions for the forces of Ampère and Coulomb to eliminate this inconsistency was not resolved. This problem was mathematically solved in 2024.

B. Conventional status of the ampere as the base unit

The concept of base units was rethought in the ninth edition of the SI; indeed, fundamental constants now serve as the basis for units [5]. The ampere was defined, since the advent of the SI, by Ampère's electromagnetic force, with the following definition until the eighth edition [12]:

« The ampere is that constant current which, if maintained in two straight parallel conductors of infinite length, of negligible circular cross-section, and placed 1 metre apart in vacuum, would produce between these conductors a force equal to $2 \, . \, 10^{-7}$ *newton per metre of length. »*

The status of the ampere as the basic unit of electricity was factual, since other electrical units, such as the coulomb, were derived from the ampere. The new definition in the ninth edition is as follows:

« The ampere, symbol A*, is the electrical current unit of the SI. It is defined by taking the fixed numerical value of the elementary charge, e, equal to* $1,602\ 176\ 634 \, . \, 10^{-19}$ *when it is expressed in* C*, a unit equal to* A s*. »*

Thus, we see that it is now the coulomb, through the elementary charge, that has become the actual electrical unit from which the ampere is defined. However, the ampere, through this subtle definition, retains its conventional status as the base unit; this is indeed specified in this ninth edition of the SI: *« The concepts of basic units are retained because they are practical and historically well-established. »* (§ 2.3 Definitions of SI units). Regarding base or derived units, it is also specified: *« This distinction is not necessary in principle because the definitions of all units, whether basic or derived, can be directly established from the seven constants. »*.

Therefore, writing the electromechanical coupling constant using units more suited to the Coulomb force is justified:

$$K_{CEM} \sim 376,73 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ C}^{-2}$$

This results in an action per square coulomb.

REFERENCES

[1] Kinsler, L. E., A. R. Frey, A. B. Coppens, and J. V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics*, 4th ed. New York: Wiley, 2000.

[2] Bruhat, G., *Electricite, Cours de Physique Generale, revue par Georges GOUDET*, 8th ed. Paris: Masson & Cie, 1963.

[3] IEC, , "International Electrotechnical Commission. electropedia: The world's online electrotechnical vocabulary, https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/6d6bdd8667c378f7c12581fa003d80e7?OpenForm."

[4] Schelkunoff, S. A., "The impedance concept and its application to problems of reflection, refraction, shielding, and power absorption," *The Bell System Technical journal*, Vol. 17, No. 1, 17–48, 1938, https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1938.tb00774.x.

[5] CCU, , *(Comite consultatif des unites). Le systeme international d'unites (SI)*, 9th ed. Sevres: BIPM, 2019.

[6] Kraus, J. D., *Antennas*, 2nd ed. New-Delhi: McGraw-Hill Company, 1997.

[7] Kitano, M., "The vacuum impedance and unit systems," *IEICE Transactions on Electronics*, Vol. E92-C, No. 1, 3–8, 2009, https://doi.org/10.1587/transele.E92.C.3.

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

[9] Roux, J.-M. A., "Resolution of the inconsistency of the initial laws of electromagnetism, implications and perspectives," *La physique revisitee*, Vol. 1, No. 1, 14–23, 2025, https://doi.org/10.5281/zenodo.17116208.

[10] Blondel, C. and G. Borvon, "Cnrs : Ampere et l'histoire de l'electricite. les unites electriques et leur unification," 2008," http://www.ampere.cnrs.fr/parcourspedagogique/zoom/unitelec/systeme/index.php.

[11] Borvon, G. and C. Blondel, "Cnrs : Ampere et l'histoire de l'electricite. le coulomb, l'ampere, le volt, le watt, l'ohm," 2008," http://www.ampere.cnrs.fr/parcourspedagogique/zoom/unitelec/borvon/index.php.

[12] CCU, , *(Comite consultatif des unites). Le systeme international d'unites (SI)*, 8th ed. Sevres: BIPM, 2006.

LA PHYSIQUE REVISITÉE

History of field concept. From action at a distance by gravitational attraction to vector fields

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

La physique revisitée, Issue 1, pages 33-43
Receveid: 17 february 2026. Accepted: 03 march 2026. Published: 05 june 2026
DOI : 10.5281/zenodo.20557817

This article on the history of science accompanies the scientific article:
The plane wave impedance in vacuum Z0 is an electromechanical coupling constant

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

Corresponding author: jm.a.r.physique@free.fr

1. THE BEGINNINGS OF REMOTE ACTION: THE UNIVERSAL LAW OF GRAVITATION

1.1. 3rd century BC

According to his conclusions, Aristarchus of Samos (310-230 BC) seems to have foreseen the principle of universal gravitation almost two millennia before Newton, but his heliocentrism was not accepted. He had carried out astronomical measurements using the Earth's diameter, which was not yet known, as a reference; these were therefore relative measurements. He had determined the relative diameter of the Moon with respect to the Earth by counting the durations of the phases of an eclipse [1]:

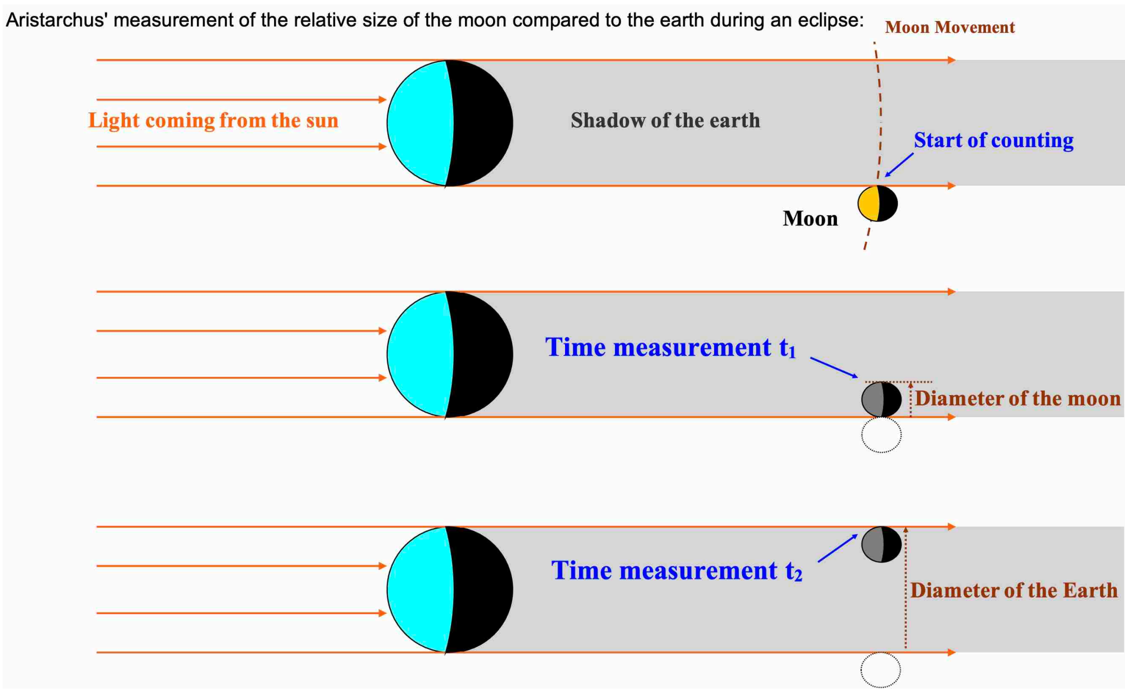

FIGURE 1. Principle (simplified) on which Aristarchus of Samos based his method for measuring the relative diameter of the moon

The ratio of diameters is that of measured time intervals. He had determined the diameter of the moon to be about one-third that of the Earth. From the relative dimensions of the moon and angle measurements, he had calculated the Earth-Moon and Earth-Sun distances and deduced the diameter of the Sun, using that of the Earth as the unit. He then deduced from the Sun's immense size that it was the Earth that revolved around it, and not the other way around. This shows that the principle of gravitation was already taking shape in Aristarchus's mind.

Unfortunately, we lack precise information on this specific question. Indeed, these first calculations of the dimensions and distances within the solar system are known to us through his treatise *"Peri megethon kai apostematon"* (On the dimensions and distances) [2] where he does not mention the heliocentrism. This is reported to us by Archimedes in "The Sand Reckoner," but the latter did not believe in heliocentrism and contested this final conclusion. It would take almost two thousand years for heliocentrism with Copernicus and universal gravitation with Newton to be fully understood and accepted by the scientific world.

1.2. Year 1684

In 1684 Edmond HALLEY presented to the Royal Society Isaac NEWTON's manuscript "De motu corporum in gyrum" (On the motion of bodies in orbit), containing the calculations which demonstrate why the orbit followed by a planet is an ellipse.

In the manuscript presented by Edmond Halley, Newton sets forth the law of universal gravitation as a function of the masses of bodies and the distance [3]:

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

As seen in the preceding expression, the gravitational constant G does not yet appear; this gravitational constant would be precisely measured by Henry Cavendish more than a century later, in 1798. Cavendish used the same method developed by Charles Coulomb for measuring the attractive electrostatic force (see below), but the period of oscillations was on the order of ten minutes. The gravitational constant, denoted f or G, would not be explicitly introduced into a new expression for the gravitational force until 75 years later, in 1873.

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

It therefore took almost two centuries for the expression to be complete. In the meantime, the distances separating the planets from the sun had already been calculated, and then, thanks to this law, taking into account their mutual influences, their respective masses had been calculated.

In reality, due to Kepler's laws, Halley and Hooke had already accepted that the force of the sun's attraction on the planets is inversely proportional to the square of the distance between them, but they had neither demonstrated that the resulting orbit was an ellipse nor incorporated the necessary consideration of the respective masses of the bodies. The demonstration of the ellipse is due to Newton, and this consideration of masses stems from his earlier work establishing the fundamental principle of dynamics.

Despite this extraordinary advance, the cause of the phenomenon of attraction is not addressed: Newton writes in his complete work *« Philosophiæ naturalis principia mathematica »* (Mathematical Principles of Natural Philosophy) published three years later: *« I have so far explained the celestial phenomena and those of the sea by the force of gravitation, but I have nowhere assigned the cause of this gravitation. »*[4].

Newton refused to explain the origin of this gravitational force and, in the commentaries on his introduction to the "centripetal force," preferred to prove its existence with the following formulation: *« "...the force, whatever its nature, which at every moment removes the planets from rectilinear motion. »*. Thus, relying on the slingshot effect, he described with irrefutable logic the effects its absence would have to justify its existence on the scale of the universe. "Universal" gravitation was demonstrated through analysis.

It is important to remember that action at a distance was already known for magnetic and electrostatic phenomena and that gravitation on the surface of the earth is observed daily without us thinking about it, but before Newton no one had been able to establish, without doubt1, that this action at a distance could be applied to "celestial mechanics".

Progress in our spatial representation of actions at a distance will come from electromagnetism [5], but it will be a long process that will initially begin with a search for Newtonian laws applied to this field.

2. ELECTROMAGNETIC REMOTE ACTIONS

2.1. Year 1785

In 1785, Charles Coulomb established the law that gives the force of interaction between two charges. This is the first dimensional formulation of an electromechanical phenomenon; as with the force of gravity, it follows a law inversely proportional to the square of the distance, but unlike gravity, this electrostatic force can be either attractive, like gravity, or repulsive if the charges have the same sign. [6]:

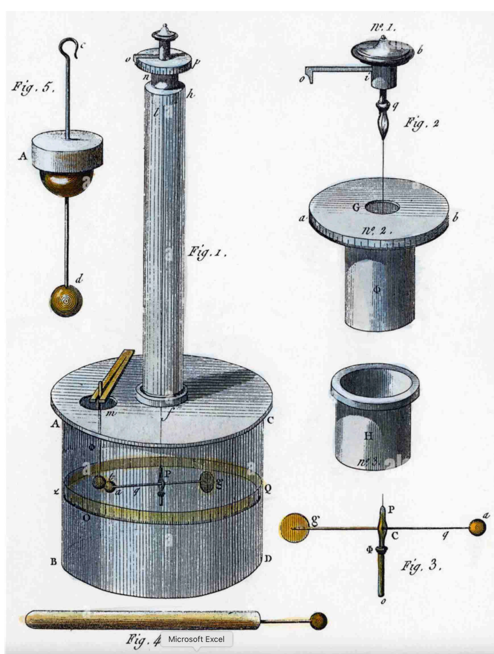

FIGURE 2. Coulomb balance for measuring the electrostatic repulsion force

To measure the electrostatic repulsive force, Coulomb used his "balance" with a torsion wire whose force was calibrated. He obtained a law inversely proportional to the square of the distance:

"The repulsive force between two small, electrified globes of the same type of electricity is inversely proportional to the square of the distance between the centers of the two globes"

To measure the force of attraction, a problem arose: the balance was unusable because the electrostatic force increased faster than the restoring force of the torsion wire as the distance decreased, causing the balls to stick together. Coulomb therefore devised a clever method to calculate the electrostatic force of attraction: ensuring a distance such that the charges could not make contact, he measured the period of oscillations around the equilibrium position (the force being proportional to the square of the frequency). This period, which varied according to the force, was on the order of a few seconds. This method was later adopted by Henry Cavendish in 1798 to measure the gravitational constant (see previously "Universal Law of Gravitation").

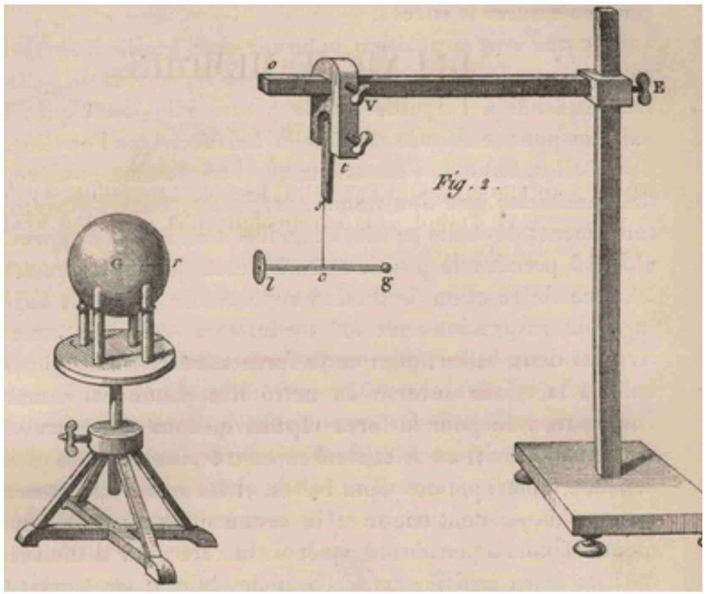

FIGURE 3. Measurement of the electrostatic attraction force by measuring the oscillation periods

Electrostatic force, whether attractive or repulsive, is expressed as follows:

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

But at that time, the coulomb, the unit of electric charge, did not yet exist, and this expression lacked the constant for adapting it to this unit, just as Newton's gravitational force lacked the gravitational constant. It would be a long process that would culminate in 1946 with the rationalized SI expression [7].

Charles Coulomb established equivalent laws of attraction and repulsion for magnetism, but these are more difficult to grasp due to the non-existence of magnetic monopoles, and are therefore less well-known. Action at a distance, evident in electromagnetism, unlike in celestial mechanics, is observed and measured at specific points, but still lacks a spatial mathematical formalism to describe it.

2.2. April 1820

In April 1820, Hans Christian ØERSTED observed that the direction of a compass is deflected in the presence of an electric current.

ØERSTED's observation reached the Paris Academy of Sciences the same year, and André-Marie AMPÈRE went on to develop his theory of electromagnetism.

The magnetic effects of electricity had been discovered as early as 1802 by Gian Domenico ROMAGNOSI and communicated to the Paris Academy of Sciences, which curiously ignored them.

Thus, a new form of action at a distance is observed, but this time between electricity and magnetism, two domains then considered to be separate.

2.3. September 1820

In September 1820, André-Marie Ampère observed that the direction in which a compass needle moves depends on the direction of the electric current flowing nearby, and from this he deduced the rule that became popularly known as ”Ampère man rule.” He then took a further step by observing the direct interactions between currents and attributed magnetism to the existence of electric currents, including within magnets; these phenomena were thus described as ”electrodynamic.” Electricity and magnetism were now united in a single phenomenon. [8]

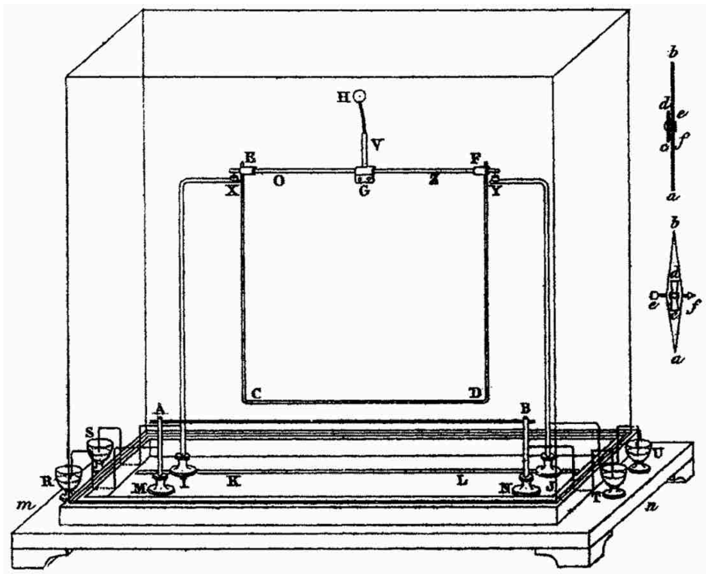

FIGURE 4. Figure of the device highlighting the force of interaction between conductors carrying currents.

2.4. Year 1826

In 1826, he published his ”Theory of Electrodynamic Phenomena,” which was mathematically formalized for the first time. In it, he expressed the forces of interaction between magnets and currents, and the mutual forces between currents. He laid the foundations of modern electrical terminology by distinguishing between ”voltage electricity” and ”current electricity.” [9]

The formulation of the electrodynamic force between currents is a fundamental work based on four qualitative experimental facts using the ”equilibrium case method”:

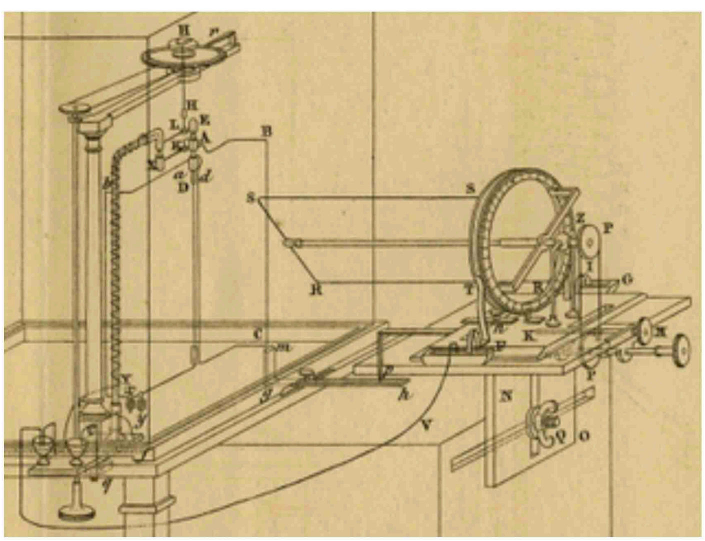

FIGURE 5. Device developed by Ampère to measure the electromagnetic force exerted on the vertical conductor BC from the magnetic field induced by the adjustable tilt conductor RS.

These four qualitative experiments allow us to develop the theoretical model:

AMPÈRE’s fundamental formula expresses the force exerted on each other by two infinitesimal current elements I.ds and I’ds’, placed at a distance r from each other and with relative orientations defined by the three angles α, β and γ.

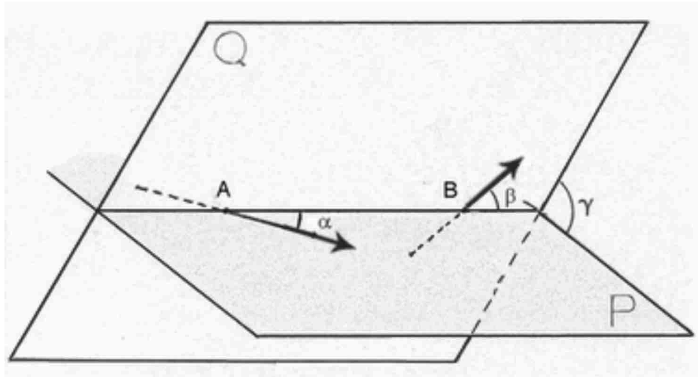

FIGURE 6. Figure showing the different angles of the formula

The current element I.ds in A is located in the plane P.
The current element I'.ds' in B is located in the plane Q.

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

Reduced to the case where planes P and Q coincide ($\gamma = 0$) and angles α and β are right angles, the force is expressed as:

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

The elements ds and ds' are infinitesimal, it is not the expression of a force with macroscopic lengths

Ampère succeeded in giving a Newtonian form to the force, using "point currents" and a force inversely proportional to the square of the distance. However, this expression is a mathematical deduction based on four experiments and cannot be used directly because a current is practically never a point current. Physicists will prefer the macroscopic form, corresponding to technical constraints, as soon as advances in vector mathematics allow for a formulation of the forces acting on conductors. Thus, Ampère's electromagnetic force is a force per unit length, which, for two parallel conductors separated by a distance r, carrying direct currents I and I', is expressed as follows:

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

As with Coulomb's force, the unit of electric current, the ampere, did not yet exist, and this expression lacked the constant for adapting it to this unit. As with the electrostatic constant, it would be a long process that would culminate in 1946 with the rationalized SI expression.

At the beginning of the 19th century, the laws governing action at a distance were, with the exception of constants, all established, but in a local manner, as if it were a matter of mutual communication between two objects. The mathematical formalism for the spatial description of their influence on the environment, which seems familiar to us today, did not yet exist.

3. LINES OF FORCE AND THE BIRTH OF THE CONCEPT OF VECTOR FIELD

3.1. Year 1831

In 1831, Michael Faraday discovered magnetic induction ("converting magnetism into electricity") and began to bring forth the notion of field but without using the word.

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

Lenz-Faraday Law (stated by Emil Lenz based on Faraday's work): The electromotive force (induced voltage) is proportional to the number of turns N and the rate of change of the magnetic flux in the circuit. The minus sign indicates that the induced electromotive force opposes the cause that produced it.

Faraday, despite the effectiveness of Newton's, Coulomb's, and Ampère's laws, had doubts about the concept of action at a distance. He found it difficult to accept that distant bodies could exert a force on each other without an intermediary. But after his discovery of the phenomenon of induction, he was convinced that electric currents could not be created at a distance without something acting in the space separating them.

3.2. Year 1852

In 1852, Faraday published his article *« On the physical character of the line of magnetic force »* in which he developed the idea that magnetic lines of force, demonstrated with iron filings, should be regarded as the expression of a real physical state of the space surrounding magnets and electric currents.

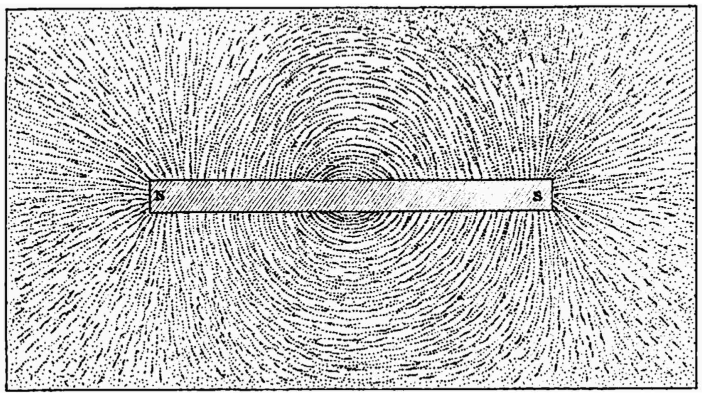

FIGURE 7. Figure described by DESCARTES in 1664 ("magnetic spectrum") and reproduced here by Faraday, of the distribution of iron filings in the environment of a magnet.

Faraday thus rejected the notion of action at a distance, asserting that magnetic phenomena were not due to direct action between separate bodies, but to a physical state of the intervening space. This was a major conceptual break with the Newtonian tradition. Faraday insisted that lines of force existed independently of the test bodies (metal filings) and carried the physical effects (forces, induction). Faraday then named the space crisscrossed by the lines of force "field", [10] probably by analogy to a plowed field.

3.3. James Clerk MAXWELL

In 1855, James Clerk MAXWELL developed in his series of articles *« On Faraday's Lines of Force »*, a mathematical theory inspired by Faraday's lines of force, with mechanical analogies. [11]

In 1865, in *« A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field »*, Maxwell mathematically formalized the field to define an electromagnetic entity with dynamic properties and capable of representing the energy and propagation of waves. At each point in this space, Maxwell associates a "quaternion" that designates the direction and local value of the field. [10]

Quaternions : Quaternions are an extension of complex numbers, adapted to three-dimensional Euclidean space. They are "hyper-complex" numbers defined as linear combinations with real coefficients of unity and the symbols i, j, k such that:

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

Thus Maxwell associates differential equations with this state of space, he shows that this field has its own dynamics, energy and wave propagation capacity.

3.4. Year 1884

In 1884, Oliver HEAVISIDE reduced Maxwell's equations based on quaternions to four vector equations. Although highly gifted in mathematics, he sought, like Faraday before him and against the grain of their time, to minimize the omnipresence of mathematics in physics. He summarized this choice as follows: *"Should I forgo my dinner on the pretext that I do not fully understand the process of digestion?"*. Thus, Heaviside had little appreciation for quaternions, which he considered an unnecessarily erudite notation; this is why he chose to reformulate Maxwell's equations in terms of local vector fields with the differential operators: divergence and curl. [10]

Heaviside, along with Willard Gibbs, is one of the founders of vector analysis based on quaternions.

With Heaviside the field takes the modern mathematical form of a local vector.

4. MECHANICAL EFFECT FIELDS AND EXCITATION FIELDS

Before continuing with the historical aspects, it is necessary to clarify an important distinction concerning fields in electromagnetism.

4.1. Mechanical effect field

We have just arrived at the modern description of the local vector field, starting from action at a distance. It is therefore essential to note that these are fields of mechanical effect, since these fields are the vectors of action at a distance. This clarification is irrelevant to gravitation, which is not concerned, but it is fundamental to electromagnetism, where considerable confusion reigns in the vocabulary associated with the E, B, D, and H fields, two of which are even often contradictorily referred to as ”induction vectors” in both electricity and magnetism. [12]

The historical fields discussed so far are fields of mechanical effect, representative of action at a distance that is observable and measurable; they are:

- For electricity, this is the E field.
- For magnetism, this is the B field.

These two fields are those that produce a mechanical effect expressed in the Lorentz force exerted on a charge q moving at velocity $\vec{v}$:

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

The E and B fields depend on the medium, which modifies the effectiveness of their effects relative to the vacuum, either by attenuating them (this is the case for electricity except in plasmas and it is also the case in magnetism when a material is diamagnetic), or by amplifying them (this is the case for magnetism when a material is paramagnetic or ferromagnetic).

Expression of the magnitude of the electric field of mechanical effect, E, at a distance r from a charge Q in a medium of dielectric permittivity ε :

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

Expression of the magnitude of the magnetic field of mechanical effect, B, at a distance r from a straight current I in a medium of magnetic permeability μ :

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

4.2. Excitation field

Associated with these two mechanical effect fields are the excitation fields. These latter fields are purely mathematical and describe only the geometric configuration of the sources [13]:

The excitation fields are:

- For electricity: the D field.
- For magnetism: the H field.

Expression of the magnitude of the electric excitation field, D, at a distance r from a charge Q, regardless of the medium:

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

Expression of the magnitude of the magnetic excitation field, H, at a distance r from a straight current I, regardless of the medium:

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

These two fields therefore depend solely on the geometric configuration of the sources, independently of the medium and the mode of action of the phenomenon, representing only the excitation of the latter. Lacking any observable physical manifestation, they are conceptual tools that, chronologically, were developed after the concepts of mechanical effect fields. Because of the influence of the medium on these phenomena, it was necessary to distinguish what was independent of the medium and solely attributable to the sources.

The electric field of mechanical effect, E depends on the excitation field and the response of the medium:

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

The magnetic field of mechanical effect, B, depends on the excitation field and the response of the medium:

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

Some theoretical electromagnetism textbooks neglect to mention these excitation fields. This is a deliberate choice that prevents them from addressing all the issues. Indeed, the response of materials is not as linear as the preceding relationships would suggest, for two reasons easily illustrated in the case of magnetic phenomena:

- The first relates to the fact that the value of the field of effect, B, reaches a limit (saturation) once a certain level of excitation H is reached.
- The second is that some materials "remember" the induction (retentivity) once the excitation has been removed. These are the materials from which we make magnets.

These materials, which are classified as ferromagnetic, describe the curves B=f(H) which show the hysteresis phenomenon corresponding to these two remarks when the excitation is variable:

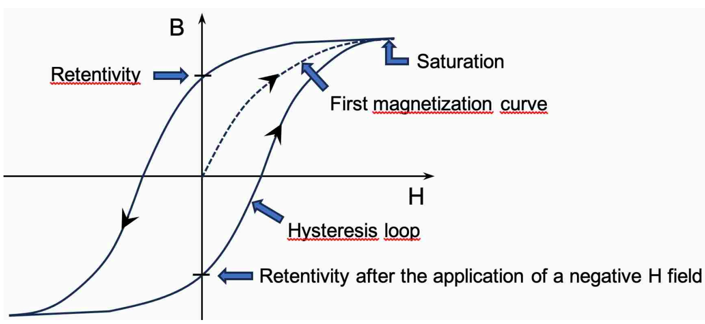

FIGURE 8. hysteresis of a ferromagnetic material

4.3. The beginnings of excitation fields

In 1862, in his series of articles *"On Physical Lines of Force"*, Maxwell identified a quantity which he called "magnetic force", related proportionally to the electric current. This is the original introduction of the magnetic excitation field, but he does not yet name it H. For the mechanical effect field, he uses the term "magnetic induction" which he does not yet call B but which he defines as dependent on the medium by the "coefficient of magnetic induction" which he denotes μ. [14]

In the same paper, Maxwell demonstrates, based on Faraday's work on dielectrics, that currents are not limited to the existence of free charges. Indeed, dielectrics are insulators, yet momentary currents are observed in them when an electromotive force is applied. There is therefore a "displacement" of charges that is quickly interrupted. The electrical excitation field D is not yet fully identified, but the term "displacement," which will give it its symbol, is already being defined. At this stage, it uses the lowercase letter "h" and expresses the displacement current with the lowercase letter "r":

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

4.4. The H field

In 1873, Maxwell, in his seminal work, *« A Treatise on Electricity and Magnetism »* finally designated the magnetic excitation field with the letter H and established its associated relationships. [15]

Maxwell uses the Gothic/script font of the 19th century, employing the terms "magnetic induction" with the letter B, "magnetic force" H for the magnetic excitation field, "magnetization intensity" I for magnetization (which we now denote M), and "induced magnetization coefficient" chi for magnetic susceptibility. He establishes the following relationships:

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

Note: I should not be confused with current. The expression is given in CGS UEM units, so the permeability of free space is 1. The factor 4π has since been absorbed in the reorganization of constants and units with the adoption of the rationalized SI. We can also note that the expression "induced magnetization coefficient" was more explicit than "magnetic susceptibility".

The same relationships in the modern notation of the rationalized SI are:

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

These relationships are particularly interesting because they explicitly show that Maxwell already distinguished between what represents the mechanical effect field B, the excitation field H, and the magnetization induced by this excitation. Thanks to this effective approach from the outset, the acceptance of the field H as an electrical cause independent of the medium has never posed any real problems.

4.5. The D field

For electrostatics, it's more complicated: Maxwell initially makes a line of reasoning based on the "displacement" of particles in the dielectric medium, which leads to the notion of "displacement current" illustrated by Oliver Lodge's model three years later:

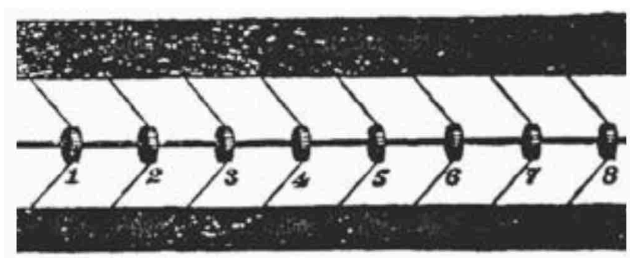

FIGURE 9. Modèle mécanique de Lodge

In Lodge's mechanical model, under the application of a force, the beads move and are then held. Under the application of an opposing force, they move in the opposite direction, and so on. Thus, under the action of an alternating force, there is an alternating displacement of the beads; this model is a mechanical analogy to the phenomenon of polarization. Thus, Maxwell confirms his new concept of "displacement current" due to the time derivative of "displacement," to which he now assigns the symbol D:

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

Maxwell applied this to a vacuum, which may seem odd since he justified the concept by the limited movement of charges in dielectrics. Indeed, without the introduction of this displacement current into Maxwell's law, the principle of conservation of charge would be violated. Its application to a vacuum allowed him to conceptualize electromagnetic waves.

Note: This initial description of the D field as a limited displacement of charges within dielectrics made it difficult to separate it from this historical representation that associates it with media, even though this model has no meaning for a vacuum. Furthermore, E and D shared the same CGS units, which did not facilitate interpretation. This use of common units was just as inappropriate as using cubic meters to express mass under the pretext that mass is related to volume for a given density.

As we saw at 3.4, it is with Heaviside that we arrive at the modern names and notation for field vectors and the equations of electromagnetism. The relationship linking the field D, the field E, and the polarization P obtains its current form in the SI, but this expression does not sufficiently account for the cause and effect, and we should not hesitate to invert it:

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

The D-field depends on the charges independently of the medium, while the E field is dependent on its reaction. This can be verified with expressions 1 and 2 for the E and D fields given above. This is also verified with the Maxwell-Gauss equation with D, independent of permittivity, or with E, which depends on it; ρ_f is the free charge density:

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

Relation 3 is the equivalent for electricity of the following relation for magnetism:

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

The + and – signs in relations 3 and 4, come from the fact that the polarization P attenuates the effects of the field E relative to the vacuum while the magnetization M generally amplifies the effects of the field B except in the special case of diamagnetic materials where the magnetization is negative.

4.6. Terminology that needs reviewing

Curiously enough, both B and D fields are sometimes referred to as "induction fields," even though the former is a mechanical effect field and the latter is an excitation field. This contradiction only adds to the confusion surrounding their interpretation.

The D field was conceptualized by Maxwell when he introduced the "displacement current" $\partial\vec{D}/\partial t$, which was the missing link in electromagnetism. The obsolete term "displacement," the origin of the symbol D, is therefore sometimes still used to refer to the electrical excitation field D, which does not simplify the learning process for students.

Adding to the confusion, the magnetic field with mechanical effect B is sometimes referred to as "magnetic flux density," which is strictly accurate but does not further clarify its nature any more than describing the velocity of a liquid as "volumetric flux density".

To complete the description of this confusing terminology, it's worth noting that both B and H fields are often referred to interchangeably as "magnetic fields." The IEC specifies that this term should be reserved for the H field, but since it's an excitation field, this contradicts the term "electric field," which is reserved for the E field, a field of mechanical effect

Beyond these heterogeneous names, we should therefore only keep in mind their roles as a mechanical effect field (E and B) or an excitation field (D and H) and it would be desirable for the scientific community to study the possibility of a terminology based on this logic.

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. http://www.ampere.cnrs.fr/parcourspedagogique/zoom/coulomb/fortification/memoires_coulomb.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, "Cnrs : Ampere et l'histoire de l'electricite. les unites electriques et leur unification," 2008," http://www.ampere.cnrs.fr/histoire/parcours-historique/lois-courants/ampere-electrodynamique.

[9] Borvon, G. and C. Blondel, "Cnrs : A la recherche d'une loi newtonienne pour l'electrodynamique," 2008," http://www.ampere.cnrs.fr/histoire/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.

LA PHYSIQUE REVISITÉE