

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
Licence: CC BY 4.0 †

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] :

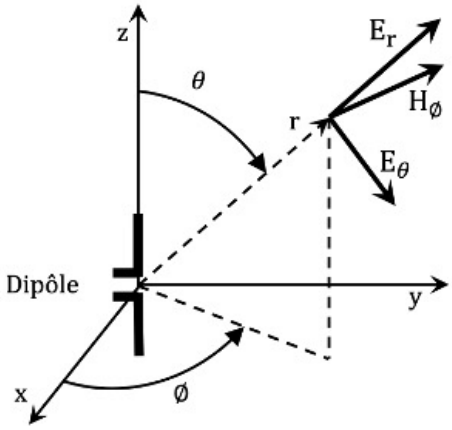


FIGURE 1. Composantes produites par un dipôle court

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 :

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

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 :

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

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 :

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

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 :

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

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.

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

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 :

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

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

4.1.3. 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, "Les unites electriques et leur unification," Histoire de l'électricité et du magnetisme, 2008, https://ampere-archives.fr/histoire-electricite/parcours-historique/unites-electriques/unification.

[11] ——, "Le coulomb, l'ampere, le volt, le watt, l'ohm," Histoire de l'électricité et du magnetisme, 2008, https://ampere-archives.fr/histoire-electricite/parcours-historique/unites-electriques/histoire.

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