

Quelques remarques sur la transmission de l'énergie électromagnétique en champ proche

H. BONDAR et F. BASTIEN

Institut FEMTO-ST, département MN2S
32, avenue de l'observatoire
25044 Besançon cedex France

ABSTRACT. The interest for energy transmission toward mobile devices boosts the studies about near field non-radiant energy transmission. Some configurations in patents or papers refer to a longitudinal mode transmission. Scalar wave incompatible with Maxwell's equation are suggested.

The authors, after the proposal of a new taxonomy close to the one used in continuous media, show that devices and experiments could all be interpreted within the classical mathematical point of view.

Nevertheless the macroscopic near field seems to possess a mechanical dimension irreducible to the standard interpretation and to require an extension of the interaction concept according to the Mach's principle. Furthermore the local energy flux concept becomes ambiguous.

RÉSUMÉ. L'intérêt pour la transmission d'énergie vers des outils mobiles a relancé les études sur la transmission non radiative d'énergie en champ proche. Dans ce cadre, certaines configurations que l'on trouve dans des articles et brevets récents font état d'une transmission à distance selon un mode longitudinal. L'existence d'ondes scalaires incompatibles avec les équations de Maxwell est évoquée.

Après avoir proposé une nouvelle taxonomie similaire à celle utilisée pour l'étude des milieux matériels continus, les auteurs montrent que les dispositifs et expériences répertoriés ont un fonctionnement interprétable dans le cadre mathématique existant. Cependant le champ proche macroscopique semble posséder une dimension mécanique irréductible à une interprétation standard qui nécessite une globalisation du concept d'interaction en accord avec le principe de Mach. En outre la notion de flux local d'énergie devient ambiguë.

1 Préliminaire

Après avoir permis à l'homme de communiquer avec des appareils d'exploration distants de plusieurs millions de kilomètres, les champs électromagnétiques sont de plus en plus utilisés dans des applications dites de champs proches. En parallèle avec la transmission du signal qui se fait avec des rendements extrêmement faibles, il est souvent question de transmission simultanée de l'énergie afin de rendre les dispositifs distants actifs et autonomes malgré l'absence d'une unité de stockage [1]. Récemment un nouveau dispositif a été étudié au Etats-Unis afin de transférer à moyenne distance et avec un bon rendement de l'énergie dans un cadre non radiatif [2].

Pour ce faire ce dispositif et de nombreux autres utilisent de simples bobines ou des antennes plates de type spirales gravées qui sont souvent placées à courte distance sur le même axe. De tels dispositifs se comportent davantage, compte tenu des fréquences utilisées, comme des transformateurs à air que comme des dispositifs de type émetteurs-récepteurs radiofréquences.

Une confusion est ainsi trop souvent présente entre le fonctionnement en champ proche et le régime des ondes électromagnétiques. Pourtant nous allons montrer qu'il est possible de trouver entre ces deux modes autant de différences qu'il y en a entre un courant d'air et une onde acoustique.

A une expression du type « dispositif d'identification radio fréquence (RFID) en champ proche » il conviendrait plutôt de substituer l'expression « systèmes d'identification à couplage inductif faiblement rayonnant ». Cette confusion, qui laisse souvent sous-entendre que des ondes circulent entre les éléments, provient essentiellement d'une évolution d'un enseignement qui fait la part belle aux ondes tout en laissant de côté l'aspect plus délicat du champ proche.

Ce premier élan en faveur de l'interprétation ondulatoire des phénomènes observé a débuté lors de ce que l'on a appelé l'unification électromagnétique. Cet enseignement fut conforté depuis par l'élaboration du modèle standard appuyé par l'attitude de Richard Feynman qui pensait que tous les phénomènes électriques et magnétiques se ramènent, in fine, à un échange de photons.

En dehors de toute polémique, il convient de rappeler prosaïquement qu'unification ne signifie pas identité. Tout comme l'unification électrofaible, qui fait tenir dans un même cadre mathématique les phénomènes E.M. et l'interaction faible, n'a rien changé à notre manière de voir les phénomènes E.M., l'unification E.M. n'empêche en rien l'existence propre de phénomènes simplement électriques ou magnétiques. La combinaison de ces

deux types de phénomènes qui provoque, dans des cas particuliers, l'apparition d'ondes E.M., ne doit en toute rigueur être vue, dans une représentation unifiée, que comme une configuration spécifique plutôt que comme la règle générale.

La distinction champ proche/champ lointain est aussi source de confusion. Si ce concept peut prendre une signification mathématique claire dans le cas de l'analyse de dispositifs existants, il ne permet pas à lui seul de caractériser le type de dispositif que l'on considère. Il existe ainsi des dispositifs rayonnants ou essentiellement rayonnants et d'autres qui ne rayonnent pas ou très peu. Ces derniers sont habituellement décrits par des modèles théoriques appelés approximations des régimes quasi-stationnaires de manière souvent impropre car les solutions obtenues présentent un caractère dynamique et sont, au même titre que les ondes E.M., des solutions particulières approchées ou exactes de l'ensemble des équations de Maxwell [3].

Les discontinuités formelles entre les différents régimes électriques, magnétiques et électromagnétiques sont connues mais souvent éludées dans les cours de physique [4]. Pour sortir de la grande confusion qui règne dans le domaine et pouvoir aborder des situations pratiques comme la classification des effets biologiques des champs et des rayonnements ou des considérations théoriques comme l'existence d'ondes longitudinales et la complétude du modèle standard, il nous semble avant tout nécessaire de faire un effort de taxonomie et de choix d'un vocabulaire approprié.

Une expression compactée du type « moteur électrostatique » a de quoi faire grincer les dents n'est ce pas ? Inversement si l'on considère une situation similaire dans le domaine électromagnétique à celle de l'étude de l'écoulement autour d'une éolienne, nous sommes actuellement contraints, si nous voulons être suffisamment précis, à dire que nous étudions le champ proche d'un dispositif entrant dans le cadre d'une approximation d'un régime quasi-stationnaire.

2 Une classification claire dans un cadre abstrait

Le classement que nous allons proposer est similaire à celui existant en mécanique des fluides. Les équations de Maxwell, issues originellement de la concaténation de diverses expériences réalisées par le passé, sont réputées avoir une structure mathématique proche de celle permettant de décrire les milieux matériels continus ce qui permet d'établir de nombreuses similitudes entre ces deux domaines [5]. Comme celles de la mécanique des fluides, les équations de l'électromagnétisme admettent deux classes de solutions particulières aux propriétés physiques très différentes. Ce sont d'une part les ondes E.M. et d'autre part les champs locaux quasi-stationnaires. Les pre-

mières correspondent à des situations où l'on considère des phénomènes qui se propagent arbitrairement loin de la source qui leur a donné naissance et indépendamment du comportement ultérieur de cette dernière, selon l'esprit même du modèle particulaire standard, et dont le pendant est l'acoustique. Les secondes décrivent des effets présents seulement dans le voisinage des sources et qui sont rattachés mathématiquement à la notion de force ou de potentiels scalaires. Cette deuxième classe de phénomènes est le pendant des écoulements et plus généralement celui de la dynamique locale des milieux déformables, elle présente un aspect mécanique et son étude est rendue nécessairement globale par la présence de termes non linéaires¹.

Dans le modèle standard on regroupe les phénomènes qui entrent dans cette deuxième classe sous l'appellation générique d'interaction². L'interaction E.M. s'effectue dans le cadre des modèles quantiques par l'intermédiaire de photons. Le condensateur usuel serait dans l'interprétation standard selon Feynman une sorte de boîte à photon. Seulement contrairement à un gaz de particules matérielles ces derniers ne sont pas confinés dans un espace clos, il faut nécessairement qu'ils soient aussi à l'extérieur du condensateur, sinon comment expliquer que la force résultante, interprétée comme le résultat de l'impact desdits photons sur les électrodes, soit une force d'attraction. Bref il n'est absolument pas prouvé que l'Electrodynamique Quantique, dont l'objet d'étude est une interaction binaire extrêmement localisée dans l'espace et dans le temps entre un électron et un photon, puisse permettre de décrire correctement ce genre de situation. De plus cette dernière utilise pour modéliser le champ proche autour de l'électron le champ classique Coulombien, il serait étonnant qu'elle puisse décrire correctement ses propres bases. Cette difficulté et ses conséquences étaient déjà évoquées par Rosenfeld dès 1932 dans les toutes dernières lignes de son fameux article sur la théorie Quantique des champs [6] : « Mais rien

¹ En électromagnétisme la non-linéarité apparaît lorsque l'on introduit la force de Lorentz qui a un caractère quadratique. Plus fondamentalement la non-linéarité apparaît au niveau de l'interaction champs/matière. Au niveau macroscopique elle apparaît encore dans les dispositifs électromécaniques ou magnéto-mécaniques et plus généralement dans ce que l'on appelle conventionnellement les champs proches.

² Il y a cependant ici une difficulté fondamentale qui a peut-être été sous évaluée jusqu'à présent. Les interactions dont il est question dans le domaine des champs proches sont multiples, persistantes et s'exercent parfois au delà du mètre. Nous sommes bien loin de l'image de particules interagissant ponctuellement dans le temps à l'échelle nanométrique et se comportant de façon autonome et paisible le reste du temps.

ne nous autorise plus à penser que la même méthode soit susceptible de nous fournir une description adéquate des interactions entre particules matérielles, ou pour exprimer la même idée en d'autres termes, que le concept de photon (qui résulte immédiatement de la quantification du champ électromagnétique) puisse être légitimement appliqué à l'analyse d'autres champs que les champs de rayonnement pur ».

Il est plausible que les champs proches électriques et magnétiques ne soient pas une conséquence macroscopique résultant de multiples interactions E.M. ponctuelles conformes au modèle standard mais soient plutôt le reflet à grande échelle d'un mécanisme fondamental concernant une interaction électromécanique (entre les champs E.M. et la matière) qui n'entre, ni dans une forme de description quantique actuelle, ni même dans l'esprit du modèle standard !

Pour illustrer très simplement cette difficulté conceptuelle, considérons la situation où deux électrons initialement au repos sont seuls dans l'espace. Le modèle décrivant le mieux nos deux électrons est le champ Coulombien associé à la force du même nom. Il faut d'ailleurs préciser que tous les problèmes de champs proches nécessitent pour être fermés l'adjonction aux équations électriques ou magnétiques issues des équations de Maxwell de la force de Lorentz [7] associée à la notion de trajectoire ou un principe macroscopique équivalent tel que le frottement moyen du nuage de particules chargées sur les neutres. Ainsi les problèmes de champs proches sont soit électromécaniques soit magnéto-mécaniques. Mais revenons à nos deux électrons, est-il possible de définir simplement un critère de proximité voire de contact ? Nous savons que la notion de contact solide n'a pas réellement de sens au niveau particulaire, les électrons semblant ponctuels. Par ailleurs, le champ Coulombien ne présente pas de transition permettant de définir une proximité. Ainsi nos deux électrons sont en interaction Coulombienne quelle que soit la distance qui les sépare. Si l'on définit le contact solide comme la présence d'une force de répulsion d'origine électrostatique entre deux objets alors deux électrons au repos seuls dans le vide sont en contact solide même si la distance qui les sépare est arbitrairement grande !

Supposons que nous fassions maintenant osciller périodiquement l'un des deux électrons, à cette oscillation nous allons pouvoir maintenant associer une longueur, celle de la longueur d'onde. Maintenant il est possible de définir un critère de proximité pour le petit mouvement oscillant qui se superpose à la position originale de l'électron. On dira que, pour ce mouvement, le deuxième électron sera dans le domaine du champ proche si la distance entre les deux électrons est petite devant la longueur d'onde, dans le cas contraire nous pourrions dire que les deux électrons interagissent à dis-

tance par le biais d'une onde électromagnétique. Nous voyons là que la portée du champ proche est une notion très relative. Dans le domaine des très basses fréquences cette portée peut être extrêmement grande. C'est à un mécanisme global de ce genre transposé à la gravitation où se superposent plusieurs échelles de distance en fonction de la décomposition des mouvements que pensait Mach lorsque dans un principe resté célèbre il prétendait que ce sont les masses lointaines qui structurent notre espace proche.

Pratiquement pour éviter de produire un raisonnement conduisant à des incohérences nous ne pouvons nous appuyer que sur le contenu des équations de Maxwell et nous devons éviter soigneusement d'évoquer toute référence basée sur la propagation de quoi que ce soit entre les différentes parties d'un dispositif faisant appel à des champs décrivant une telle interaction de proximité. Après tout qui songerait à décrire un courant d'air comme la sommation d'une multitude d'ondes acoustiques !

3 Taxonomie et vocabulaire

Si le problème général de l'étude du champ proche reste assez délicat, il est admis que lorsque le dispositif entre dans le cadre de ce que l'on appelle usuellement les Approximations des Régimes Quasi-Stationnaires (ARQSE et ARQSM), des classes de solutions naturelles assez simples existent sans nécessiter le traitement de modèles électro-magnéto-mécaniques complexes³.

De tels régimes se caractérisent par le fait que l'un des deux termes de couplage présents dans les équations de Maxwell est nul ou peut être négligé. Cette simplification conduit à des systèmes réduits d'équations où il n'est plus possible de considérer une propagation des phénomènes. Plus précisément ces modèles reviennent à considérer que l'interaction entre tous les points du domaine vu comme un tout est instantanée⁴. Ainsi l'ARQSE permet l'étude dynamique de systèmes de type condensateurs et plus généralement comme nous allons le voir l'étude de dipôles électriques couplés en champ proche, alors que l'ARQSM permet l'étude dynamique de dipôles magnétiques couplés en champ proche (machines tournantes, transformateurs, etc.....). Dans les deux cas l'énergie, qu'elle soit électrique ou magnétique reste stockée au voisinage des sources sans se propager à distance. En mécanique des fluides cela correspond au domaine de l'hydrostatique et plus

³ C'est-à-dire sans avoir à résoudre l'ensemble des équations de Maxwell-Lorentz

⁴ On peut les obtenir aussi en faisant tendre la vitesse de la lumière vers l'infini.

généralement à celui des écoulements locaux. Ainsi il est possible de trouver une similitude troublante entre une charge électrique et un cyclone.

Nous proposons d'appeler respectivement « Influence » et « Induction » les domaines des régimes électriques et magnétiques et de garder l'expression « ondes E.M. » pour désigner des phénomènes qui vérifient une équation de propagation. Ainsi à courte distance d'une source de champ étendue il sera aussi bien possible de décrire la situation en termes d'ondes si la taille du dispositif est grande devant la longueur d'onde qu'en terme de régimes quasi-stationnaires dans le cas contraire, par contre à grande distance des sources, ne subsisteront nécessairement que les ondes⁵.

La taille du dispositif comparé aux longueurs d'ondes mises en œuvre est une caractéristique technique essentielle qui permet de définir le régime de fonctionnement du système considéré. Si un dispositif a une taille petite devant la longueur d'onde alors il va surtout s'entourer d'énergie potentielle et produire très peu de rayonnement alors que dans le cas contraire un tel dispositif s'entourera d'assez peu d'énergie potentielle et sera avant tout rayonnant. Nous proposons d'appeler les dispositifs du premier type : « dispositifs à Induction ou Influence » et ceux du second type : « dispositifs rayonnants ».

Ainsi en accord avec les habitudes de l'électrostatique (mot qu'il conviendrait d'oublier), on peut encore dire que les condensateurs usuels sont des dispositifs à influence totale alors que des dipôles couplés sont des dispositifs à influence partielle.

Dans le cadre de l'Induction, si l'on se rappelle que l'influence totale correspond à des situations où deux charges opposées échangent l'ensemble de leurs lignes de champ alors le dispositif magnétique équivalent est le dipôle magnétique isolé.

Dans les deux cas pour pouvoir transmettre de l'énergie à distance il faut associer à un dipôle générateur, un dipôle consommateur distant. Si de telles structures à couplage partiel sont courantes pour l'Induction et permettent de décrire le fonctionnement de nombre de machines usuelles ainsi que la réalisation de systèmes de transmission de l'énergie sans fils, ce n'est que très récemment que Bondar et Camurati [8] ont proposé un moyen similaire de transmission de l'énergie à distance utilisant l'influence partielle entre deux dipôles électriques couplés.

⁵ Car contrairement à la gravitation l'univers est électriquement neutre à grande échelle.

Bien qu'entrant dans le cadre des équations générales de l'électromagnétisme couplées à celles de la mécanique, Influence et Induction se caractérisent comme nous l'avons vu par des aspects déroutants si l'on essaie de les comprendre avec un regard inspiré par la mécanique ondulatoire classique. Ainsi même si il est encore possible de distinguer un dispositif générateur et un dispositif consommateur d'énergie, il n'est pas possible d'imaginer de l'énergie voyageant indépendamment de la source et de la destination. Ainsi le concept d'émission et de réception de l'énergie devient ambigu comme le montre le calcul développé dans l'annexe 1. Il faut lui substituer un concept de couplage global qui fait que seul le tout a un sens et n'est pas morcelable. Les mots : émetteur, récepteur, émission, réception sont alors à proscrire absolument. S'il est possible d'utiliser le mot transmission dans un sens mécanique, il nous semble préférable pour éviter toute confusion d'utiliser le mot transport. Le vide apparaît ainsi comme un milieu qui permet le transport de l'énergie d'une manière non ondulatoire. Ce dernier acquiert une consistance mécanique qui peut paraître gênante à certains car contraire à l'esprit du modèle standard. La différence conceptuelle entre le mécanisme ondulatoire et les domaines de l'Induction et de l'Influence se creuse encore lorsque l'on s'intéresse à des situations où le couplage est longitudinal. En effet dans la description ondulatoire un dipôle oscillant ne rayonne aucune énergie dans la direction correspondant à l'axe du dipôle car le vecteur de Poynting, qui représente la densité de flux d'énergie, y est nul, l'énergie étant essentiellement rayonnée de manière transverse. Par contre si l'on considère que de l'énergie est transportée grâce au travail d'une force, la difficulté disparaît totalement⁶.

Ainsi avec l'Influence et l'Induction l'énergie est transportée longitudinalement entre deux dipôles proches de la même manière qu'elle est transportée par un fil électrique. Ceci est facile à concevoir si l'on se rappelle que la matière est essentiellement constituée de vide et que les électrons dans cette dernière agissent « mécaniquement » entre eux à distance par l'intermédiaire de la force Coulombienne.

⁶ Conceptuellement ce n'est pas tant le fait que la densité de flux d'énergie soit indéfinie localement qui pose problème, mais plutôt le fait que le déplacement de l'énergie ne soit pas associable à un flux défini de photons. En résumé si on accepte de revenir au concept traditionnel de force sans chercher à interpréter cette dernière conformément au modèle standard la difficulté s'évanouit mais le mystère reste d'une certaine manière entier !

4 Analyse critique des expériences, articles et brevets divers

Après les remarques précédentes nous allons pouvoir analyser les sujets polémiques et montrer qu'ils sont tous finalement compatibles avec les équations de Maxwell.

4.1-Tesla

Voici le dispositif réalisé par Tesla durant la période dite de Colorado Springs (1899).

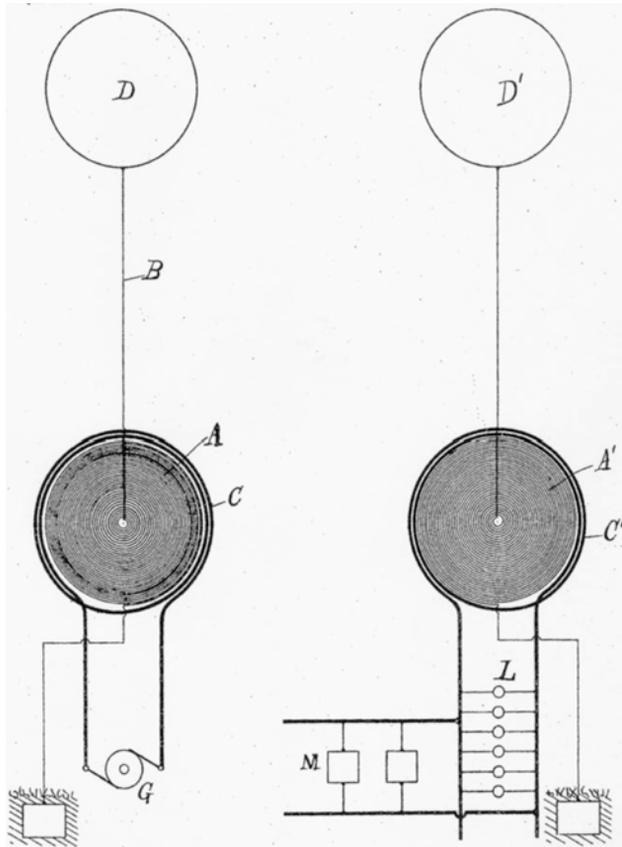


Fig.1 : Dispositif pour la transmission d'énergie à distance selon Tesla

Bien que Tesla cherchait ouvertement à transmettre de l'énergie à distance et que le dispositif précédent fut breveté dans cette idée et avec un titre on ne peut plus clair [9]. Tesla redéposera un brevet très peu de temps plus tard pratiquement identique au précédent mais revendiquant cette fois des ondes E.M., il faut dire qu'entre temps Tesla a probablement eu vent des travaux de Marconi.

La source G est constituée d'un condensateur de $4 \cdot 10^{-8}$ Farad chargé par un générateur alternatif de 5000 V et déchargé grâce à un interrupteur mécanique, 5000 fois par seconde dans la bobine C. Le circuit primaire a une fréquence d'oscillation f d'environ 240 KHz. Le circuit secondaire constitué par la bobine A et la sphère D correspond à un circuit oscillant de fréquence identique f . Il en est de même du circuit récepteur D' A'.

Bien que le dispositif précédent ne présente aucune difficulté d'interprétation⁷, il faut bien noter que les longueurs d'ondes étant kilométriques la taille des dipôles était de plusieurs ordres de grandeur inférieure à la longueur d'onde et ces derniers ne rayonnaient que très inefficacement. La transmission de l'énergie très faible sur des distances kilométriques pouvait devenir importante dans le domaine décamétrique. Sans le savoir Tesla se plaçait bien dans le domaine de l'Influence, il pouvait ainsi espérer transmettre de l'énergie avec des rendements appréciables. Par exemple la puissance primaire étant de l'ordre de 2500 watt obtenir quelques centaines de watt à une distance d'une cinquantaine de mètres pour des sphères D et D' de 5m de rayon.

4.2-Avramenko

Avramenko [10] pense avoir découvert des « ondes de densité », en fait il se place dans un régime d'influence et utilise sans le savoir la capacité intrinsèque du conducteur isolé. Il pense de manière erronée que ces ondes de densité vont se propager arbitrairement loin le long d'un fil permettant ainsi de transmettre de l'énergie de manière simplifiée.

4.3-Meyl, Monstein & Wesley, Tzontchev et al

En s'appuyant sur le brevet d'Avramenko, Meyl [11] a cru y voir une faille dans l'édifice de la physique et s'est lancé dans une interprétation libre vivement critiquée par Waser ayant lui-même proposé une extension des équations de Maxwell pour englober des ondes longitudinales [12].

⁷ Il y a clairement deux dipôles verticaux qui sont couplés de manière transverse

Les travaux de Monstein & Wesley [13], critiqués par Bray & Britton [14] et ceux de Tzontchev et al [15] interprétés d'une manière plus abstraite par Onoochin [16], entrent dans la même controverse.

Si l'on tient compte du fait qu'ils sont parfois reliés à la terre, les dispositifs générateurs et récepteurs décrits sont tous assimilables à des dipôles, leur structure étant souvent très semblable à celle décrite par Tesla. Les dispositifs obtenus sont, compte tenu des fréquences utilisées, essentiellement rayonnants. Certains effets longitudinaux peuvent être observés en champ proche mais, compte tenu de la configuration globalement transverse des émetteurs⁸, ils cèdent la place à un mécanisme de propagation classique à distance.

Pour Monstein & Wesley, en dehors de l'omniprésente confusion champ/ondes, les modèles mathématiques sont évoqués sans grande rigueur. Ce n'est pas par exemple un potentiel retardé qui provoque l'apparition d'une équation de propagation comme ils le suggèrent mais une équation de propagation qui admet une solution sous forme de potentiels retardés. Par ailleurs pour obtenir une telle équation il faut se placer dans le cadre de la jauge de Lorenz mais alors on obtient simultanément une équation de propagation pour le potentiel vecteur et l'onde obtenue est alors une onde transverse classique. Les auteurs font alors l'erreur suivante, ils ne gardent que l'équation de propagation du potentiel scalaire en édulant le potentiel vecteur et en se plaçant par la suite dans le cadre de la jauge de Coulomb qui ne conduit pas du tout à une telle équation (voir l'annexe 2 pour plus de détails).

Pour Tzontchev et al, il s'agit de mettre en évidence une vitesse finie de propagation du potentiel Coulombien qu'ils pensent être en contradiction avec les équations de Maxwell. Onoochin notera qu'en régime dynamique le potentiel scalaire n'est pas directement lié au champ longitudinal et que l'expérience ne met pas en claire évidence une faille du modèle originel et à fortiori l'existence d'ondes scalaires. Il soulève par ailleurs d'une manière connexe un sujet intéressant bien qu'un peu éloigné de notre préoccupation actuelle et proche de celles de [5] à savoir l'importance des conditions initiales sur la pertinence et la signification physique de l'invariance de Jauge.

Sur le thème récurrent de l'instantanéité du champ proche Coulombien, on peut noter qu'un tel champ accompagne (voire constitue) la particule chargée en un tout spatialement étendu et aux compressions relativistes près,

⁸ Dans le cas Tzontchev, la situation est plus confuse puisque les dispositifs récepteurs sont placés à angle droit par rapport au dipôle générateur.

apparemment parfaitement rigide⁹. Le déplacement « mécanique » d'un tel champ ne peut se faire en vertu de la mécanique relativiste qu'à une vitesse longitudinale subluminaire. Pour mesurer la vitesse de propagation de ce champ, il faudrait déjà pouvoir réellement le moduler c'est-à-dire en pratique faire apparaître ou disparaître localement la charge électrique mais cela est pour l'instant exclu non seulement du cadre classique mais même de celui quantique.

Pour terminer ce paragraphe critique sur une note positive, il est possible de dire que certains auteurs ont cherché à attirer l'attention sur un aspect obscur qui apparaît dans les phénomènes électromagnétiques si l'on cherche absolument à les interpréter sous une forme ondulatoire. D'autres se sont introduits dans ce qu'ils pensaient être une brèche en utilisant des arguments peu rigoureux.

5 Peut-il malgré tout exister une incomplétude du modèle ?

Il est logique d'envisager, pour mettre en évidence un effet expérimental imprévu par le modèle des équations de Maxwell, d'utiliser un dispositif basé sur une symétrie sphérique ne pouvant en aucun cas se réduire à une structure rayonnante de type dipolaire et excluant de facto toute possibilité de rayonnement transverse. Le système le plus simple consiste à se rapprocher le plus possible de deux sphères équipotentielles concentriques auxquelles on applique une différence de potentiel variable (par exemple sinusoïdale). Le théorème de Gauss, qui reste vrai en régimes variables, prévoit un champ nul à l'extérieur des sphères (car la charge intérieure globale est nulle). La détection d'ondes longitudinales due à la propagation éventuelle à vitesse finie des potentiels, revient ainsi à démontrer une violation du théorème de Gauss et de la loi de Coulomb et incidemment l'existence d'une masse non nulle pour le photon [17].

De telles expériences ont été menées à de nombreuses reprises par le passé, la plus ancienne est celle des sphères de Cavendish [18], dans la plus récente les deux sphères sont excitées à hautes fréquences (4 Mhz). Ces expériences ont prouvé que les divergences avec le théorème de Gauss, si elles existent, sont infimes [19].

⁹ C'est cette propriété qui conduit à considérer que ce champ se propage instantanément. En fait il est constant et accompagne ou plus simplement constitue la particule étendue.

6 Conclusion

Loin des sources, les seules solutions des équations de Maxwell sont des ondes. Près des sources d'autres types de solutions apparaissent.

Bien quelles puissent correspondre à un transport d'énergie sans fil, ces solutions ne peuvent pas être décrites en termes d'ondes ni être liées au comportement classique de photons. De ce fait quelques chercheurs ont imaginé de nouveaux types d'ondes, nommées ondes électromagnétiques "scalaires" ou "longitudinales". Ces ondes étant incompatibles avec les équations de Maxwell, certains ont imaginé que les équations de Maxwell sont incomplètes.

Cependant des expériences très précises montrent que si ces ondes longitudinales existent elles sont si faibles qu'elles ne peuvent être détectées même avec des instruments extrêmement sensibles. Elles ne peuvent donc être utilisées pour expliquer le transport d'énergie en champ proche.

Le lecteur pourrait ne voir qu'un intérêt philosophique limité à toute cette approche en pensant que la distinction champ proche champ lointain ne concerne qu'un processus opératoire mathématique mais que les champs considérés qu'ils soient proches ou lointains sont de même nature, vérifient le même système d'équations, et décrivent in fine un seul objet unifié aux comportements multiples. Cet argument d'un tout unifié est recevable et nous le défendons par ailleurs. Il ne supprime pas l'intérêt de faire, en suivant la discontinuité mathématique formelle présente dans les équations, une séparation nette entre deux domaines aux comportements parfois antagonistes. Cette approche permet à la fois une modélisation mathématique et conceptuelle simplifiée, la réalisation de dispositifs industriels à travers une compréhension plus aisée de leur fonctionnement, et pour finir une meilleure visualisation des limites des théories physiques actuelles.

Pour illustrer ce propos nous nous sommes appuyés sur le cas similaire de la mécanique des fluides. Il ne vient à personne, dans ce domaine, l'idée de critiquer le fait qu'il soit possible et même particulièrement utile de faire, même si la physique sous jacente peut se décrire à l'aide de multiples interactions binaires, une claire distinction entre d'une part l'acoustique et ses particularités et d'autre part l'étude des écoulements et leurs aspects spécifiques. Nous avons surtout insisté sur les différences profondes qui existent dans les approches respectives de ces deux domaines. Dans un problème d'acoustique il est possible d'avoir une approche locale conforme au modèle standard (une onde peut se propager indépendamment de l'état de la source qui lui a donné naissance) alors que dans un problème d'écoulement l'approche est nécessairement globale (un obstacle en un point perturbe l'écoulement dans son ensemble). La même situation de globalité existe en

champ proche dans le domaine électromagnétique sans que n'existe une claire structure statistique sous-jacente.

Bien sur il est aussi possible de prendre la position pragmatique qui consiste à dire : la réalité nous échappe, contentons nous d'utiliser des équations qui marchent sans vouloir leur attribuer une signification particulière. Nous pensons que l'essence même de la physique est un aller retour entre une certaine perception qualitative du monde et sa traduction quantitative sous forme mathématique. Il nous semble que le changement de point de vue nécessaire à l'interprétation correcte du domaine du champ proche modifie très profondément la description standard du monde physique et que cela va bien au-delà du simple domaine de l'électromagnétisme

Selon Einstein lui-même, le concept d'éther n'est pas nécessaire pour expliquer la relativité restreinte. Cette remarque, techniquement exacte, a signé la mort d'un concept potentiellement fructueux.

Actuellement, la simple idée de réintroduire le concept d'un milieu sous-jacent est difficile à exprimer même par les théoriciens des cordes, qui bien que jouant avec de tels milieux, préfèrent leur donner des noms plus abstraits comme celui de variétés.

Nous pensons qu'au moins d'un point de vue pratique, de façon analogue à la mécanique des fluides, et quelle que soit la structure sous-jacente, une représentation des champs en termes de contraintes appliquées à un milieu continu est un outil très utile pour décrire le comportement et le transfert d'énergie en champ proche.

Références

- [1] K. Finkenzeller, RFID Handbook : Fundamentals and Applications on Contactless Smart Cards and Identification, Second Edition, John Wiley & Sons, (2003).
- [2] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffat, J-D. Joannopoulos, P. Fisher, M. Soljacic, Wireless Power Transfer Via Strongly Coupled Magnetic Resonance, Science express en ligne le 7 juin (2007).
- [3] J.C. Maxwell, On Physical lines of force (1861-2) & A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field (1865), W.D. Niven, ed., The Scientific Papers of James Clerk Maxwell, 2 Vol., tome 1, New York, (1890).
- [4] A. Doms, Remarques sur l'approximation des régimes quasi-stationnaires en électromagnétisme, Bulletin de l'Union des Physiciens, p.159-170, (février 2003).

- [5] G. Rousseaux & E. Guyon, A propos d'une analogie entre la mécanique des fluides et l'électromagnétisme, Bulletin de l'union des Physiciens, 841 (2), p.107-136, (février 2002).
- [6] L.Rosenfeld, La théorie quantique des champs, Annales de l'I.H.P, tome2, n°1, p.25-91,(1932).
- [7] H. A. Lorentz, Theory of electrons, 2nd edition (1915), reprint, Denver, New York, (1952).
- [8] H. Bondar & P. Camurati, Dispositif de transport de l'énergie par influence partielle à travers un milieu diélectrique, Brevet PCT/FR2006/000614, (2006).
- [9] N. Tesla, Apparatus for Transmission of Electrical Energy. US Patent No. 645,576. New York, (1900).
- [10] S. Avramenko, Apparatus and method for single line electrical transmission, European Patent EP0639301, (1997).
- [11] K. Meyl, Teslastrahlung – die drahtlose Übertragung von Skalarwellen“, INET-Congress aumenergie-Technologie 2000“, Bregenz, Austria, (15/16 April 2000).
- [12] K.J. van Vlaenderen and A. Waser, Generalisation of classical electrodynamics to admit a scalar field and longitudinal waves, Hadronic journal, **24**, p. 609-628, (2001).
- [13] C.Monstein and J.P.Wesley, Observation of scalar longitudinal electrodynamic waves, Europhys. Lett. **59** (4), p.514-520, (2002).
- [14] J. R. Bray and M. C. Britton, Comment on « Observation of scalar longitudinal electrodynamic waves », Europhy. Lett., **66** (1), p.153-154, (2004).
- [15] R. I. Tzontchev, A. E. Chubykalo and J. M. Rivera-Juarez, Coulomb interaction does not spread instantaneously, Hadronic Journal, **23**, p.401-24, (2000).
- [16] V. V. Onoochin, “On non-equivalence of Lorentz and Coulomb gauges within classical electrodynamics”, Ann. Fond. L. Broglie, **27**, p.163–183, (2002).
- [17] J.D. Jackson, Classical Electrodynamics, 3rd Edition, John Wiley & son, p. 5.
- [18] H. Cavendish, Electrical researches, ed. J.C. Maxwell, Cambridge University press, p.104-113, (1879).
- [19] E.R.William, J.E. Faller, and H.A.Hill, Phys. Rec. Lett. **26**, p. 721, (1971).
- [20] Labarthe J.-J., Electromagnétisme, cours DEUG S3 SMR, Université Paris-sud Orsay, <http://www.deugs3smr.u-psud.fr/DEUGS3SMR>
- [21] D. Royer et E. Dieulesaint, Ondes élastiques dans les solides. Tome I. Propagation libre et guidée, Masson XXIII. p. 331, (1996).

Annexe 1 : Indétermination des densités et des flux d'énergie

A partir des équations de Maxwell (1) et d'un théorème sur la divergence d'un produit vectoriel (2)

$$\left. \begin{array}{l} \operatorname{div} \mathbf{D} = \rho \qquad \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \qquad \operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \end{array} \right\} \quad (1)$$

$$\operatorname{div}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}) = \mathbf{H} \cdot \operatorname{rot} \mathbf{E} - \mathbf{E} \cdot \operatorname{rot} \mathbf{H} \quad (2)$$

on peut établir la relation :

$$\mathbf{E} \cdot \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{H} \cdot \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \operatorname{div}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}) = -\mathbf{j} \cdot \mathbf{E} \quad (3)$$

On pose usuellement :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \mathbf{E} \cdot \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{H} \cdot \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (4)$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (5)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\mathbf{j} \cdot \mathbf{E} \quad (6)$$

Et l'on obtient :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{P} = \frac{\partial w}{\partial t} \quad (3 \text{ bis})$$

La relation (3 bis) s'interprète comme la relation locale de conservation de l'énergie.

u représente la densité locale d'énergie électromagnétique.

\mathbf{P} est appelé : « vecteur de Poynting » il représente la densité de flux d'énergie rayonnée.

w représente la densité d'énergie dissipée ou fournie par le milieu matériel.

Mais cette description est un peu sommaire et mérite d'être explicitée davantage.

Remarquons tout d'abord en suivant par exemple Labarthe [20] que si on note $\mathbf{T}(\mathbf{r},t)$ un champ de vecteur arbitraire, les grandeurs suivantes :

$$u_1 = u - \text{div}\mathbf{T} \quad \text{et} \quad \mathbf{P}_1 = \mathbf{P} + \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial t},$$

satisfont également l'équation de conservation (3 bis). Même si l'on fixe les valeurs des deux termes de gauche de l'expression (3 bis), l'énergie n'est définie qu'à une constante près et le flux d'énergie à un rotationnel près.

Il n'y a pas dans l'établissement de l'équation de conservation de l'énergie la démonstration de la pertinence du choix du vecteur de Poynting (5) et de l'expression (4) pour représenter les densités locales de flux d'énergie et d'énergie potentielle.

Il n'y a pas non plus de mesure directe de la densité de flux d'énergie dans les régimes de champ proche. Les choix précédents sont par contre facilement justifiables dans les régimes couverts par l'approximation ondulatoire car le vecteur de Poynting indique clairement la direction de la propagation.

Montrons maintenant que dans le cas de l'approximation électrostatique la situation est plus confuse. Considérons pour cela la décharge d'un condensateur placé dans le vide. Selon la vision classique l'espace inter électrodes n'est traversé par aucun courant matériel ($\mathbf{j}=\mathbf{0}$) mais par un courant de

déplacement $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ de nature inconnue qui se substitue au courant matériel

lorsque l'on sort de la matière des électrodes pour atteindre le vide. La dernière équation de Maxwell permet de démontrer la loi de conservation du courant total :

$$\text{div}\left(\mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}\right) = 0 \tag{7}$$

Le vide apparaît par ailleurs chargé d'une densité d'énergie $u = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 + Cte$ (8).

Si la décharge est suffisamment lente on montre que les variations du champ magnétique sont négligeables et de (3) l'on tire :

$$\operatorname{div}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}) = -\mathbf{E} \cdot \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

Par [7] ailleurs :

$$\operatorname{div}\left(V \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}\right) = V \operatorname{div} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot \operatorname{grad} V = -\mathbf{E} \cdot \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

Il y a ainsi au moins deux façons d'exprimer le flux qui correspondent au même bilan mais pas à la même densité locale de flux d'énergie. D'une manière plus étonnante encore ces deux flux sont orthogonaux, $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ est perpendiculaire à \mathbf{E} alors que $V \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ lui est parallèle. Selon la description classique le flux d'énergie quitterait le condensateur de manière latérale ce qui paraît pour le moins surprenant. Le flux décrit par l'expression $V \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ traverse les électrodes et choque moins notre intuition. Le flux total d'énergie $V \cdot i$ est obtenu avec l'expression classique en calculant le flux du vecteur de Poynting sortant latéralement par la surface cylindrique s'appuyant sur les extrémités latérales des électrodes, les champs y étant constants et valant respectivement $E = \frac{V}{h}$ et $H = \frac{i}{2\pi r}$. On obtient le même résultat en intégrant $V \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ sur la surface d'une électrode (en choisissant le potentiel nul sur l'autre électrode) et en utilisant la loi de conservation du courant total (7).

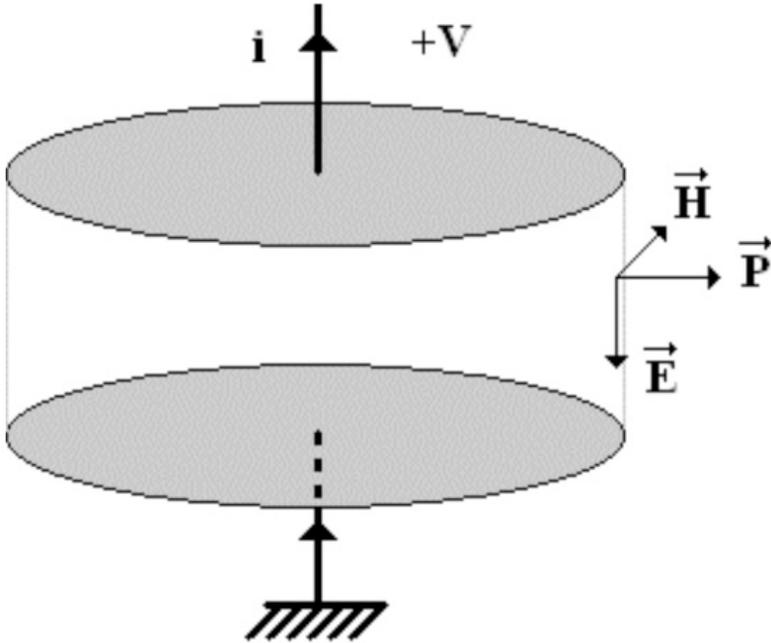


Fig. 2 Indétermination des densités et des flux d'énergie.

Les considérations précédentes ne concernent pas simplement le cas d'école évoqué, elles se retrouvent dans d'autres circonstances pratiques. Dans le cas de l'étude des ondes dans les matériaux piézoélectriques, selon D. Royer et E. Dieulesaint [21], si on néglige l'énergie magnétique pour ces ondes qui correspondent alors à un couplage électromécanique, le vecteur

densité de flux d'énergie obtenu est : $P_j = -T_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial t} + V \frac{\partial D_i}{\partial t}$ (9) avec

T_{ij} le tenseur des contraintes et u_i le vecteur déplacement mécanique. Dans ce cas le problème de la direction du vecteur D se pose en terme différent car D ne dépend pas seulement de E mais aussi du tenseur des contraintes ce qui conduit à envisager des cas difficiles à interpréter où l'énergie ainsi décrite ne se propage pas parallèlement au vecteur d'onde.

La position des auteurs de cet article face à ce problème formel est de dire que la notion de flux d'énergie n'est pas pertinente en champ proche et doit être remplacée par une vision plus globale.

Remarquons enfin que les termes de gauche de l'équation de conservation de l'énergie ne concernent que les champs alors que celui de droite implique aussi les particules chargées. En effet si l'on considère une charge particulière sa contribution à l'énergie s'écrit :

$$dw = \mathbf{j} \cdot \mathbf{E} dt = q \mathbf{v} \cdot \mathbf{E} dt = q \mathbf{E} \cdot d\mathbf{x} \quad (10)$$

Ce qui s'interprète comme le travail de la force électrique qui s'exerce à distance sur la particule.

L'équation (3) nous indique ainsi de manière subtile que l'interaction entre deux charges proches placées dans le vide ne se résume pas à l'échange d'un rayonnement mais présente aussi un aspect électromécanique.

Annexe 2 :

Incompatibilité des ondes scalaires et des équations de Maxwell

Les équations de Maxwell s'écrivent dans le vide :

$$\varepsilon_0 \operatorname{div} \mathbf{E} = \rho \quad (11) \quad \operatorname{rot} \vec{\mathbf{E}} = -\frac{\partial \vec{\mathbf{B}}}{\partial t} \quad (12)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (13) \quad \frac{1}{\mu_0} \operatorname{rot} \mathbf{B} = \mathbf{j} + \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (14)$$

Ces équations sont partiellement redondantes car il y a 8 équations scalaires pour seulement 6 inconnues (si l'on connaît les répartitions des charges et des courants).

Si l'on utilise les potentiels définis par :

$$\mathbf{E} = \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \operatorname{grad} V \quad (15)$$

$$\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A} \quad (16)$$

Alors nous obtenons un système mieux défini de 4 équations pour 4 inconnues (une équation scalaire et une équation vectorielle les deux autres étant automatiquement vérifiées). Il reste cependant une difficulté fondamentale : pour les champs observés réellement \mathbf{E} et \mathbf{B} , la description en termes de potentiels n'est pas unique.

Soit $f(r,t)$ un champ scalaire arbitraire, les grandeurs : $\mathbf{A}_1 = \mathbf{A} + \operatorname{grad} f$ et : $V_1 = V - \frac{\partial f}{\partial t}$ laissent les champs observés inchangés, autrement dit pour une situation donnée il est possible de choisir des points de vues différents ¹⁰. Ces changements de points de vue

¹⁰ Il est aussi possible de se demander si les potentiels ne seraient pas aussi réels que les champs, ce qui revient à postuler que le problème posséderait une dimension cachée non accessible par la mesure des seuls champs décrits par les équations de Maxwell.

s'appellent des jauges. Choisir une jauge revient à imposer une contrainte supplémentaire, à priori artificielle¹¹. Les deux jauges couramment utilisées sont la jauge de Coulomb : $\text{div } \mathbf{A} = 0$ (17) et la jauge de Lorenz :

$$\text{div } \mathbf{A} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial V}{\partial t} = 0 \quad (18).$$

La jauge de Coulomb permet d'obtenir une équation simplifiée pour le potentiel scalaire :

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (19)$$

mais donne à l'équation vectorielle une allure complexe. Elle est cependant utile pour l'étude du champ proche de l'électron.

La jauge de Lorenz permet d'obtenir deux équations de propagations pour les potentiels :

$$\nabla^2 V - \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (20)$$

$$\nabla^2 \mathbf{A} - \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} = \mu_0 \mathbf{j} \quad (21)$$

Ces derniers restent intrinsèquement couplés par la relation de jauge (18) ce qui conduit à une propagation transverse.

Le choix de la jauge de Coulomb revient à observer la situation en se déplaçant avec la charge alors que celle de Lorenz revient à observer la situa-

¹¹ A noter le point de vue intéressant de Rousseaux [5] qui suggère que le choix de la jauge pourrait avoir un sens physique (pour l'instant inaccessible) et correspondre dans le cas du choix de la jauge de Coulomb à une approximation d'un régime incompressible caché.

tion en privilégiant l'onde. De ce point de vue un changement de jauge est similaire à un changement de référentiel.

Pour tenter de démontrer l'existence d'ondes longitudinales compatibles avec les équations de Maxwell, Monstein et Wesley [13] prennent, sans le dire clairement, l'équation de propagation du potentiel scalaire obtenue uniquement dans le cadre de la jauge de Lorenz mais disent se placer dans le cadre de la jauge de Coulomb (qui ne donne pas une telle équation). Il s'agit d'un raisonnement erroné basé sur une sorte d'illusion d'optique obtenue en regardant la situation simultanément de deux points de vue incompatibles.

(Manuscrit reçu le 24 juillet 2007, révisé le 9 octobre 2008)