

Pierre Poubeau

***RECHERCHES
SUR
LA DUALITÉ DE L'ESPACE-TEMPS***

Des contradictions dans les fondements de la physique

Une voie de recherches proposée

La clé de l'énigme de l'inséparabilité quantique

*Etat des recherches et des résultats
Avril 2014*

Essais antérieurs sur le même thème

DUALITÉ DE L'ESPACE-TEMPS, Nouvelle Interprétation de l'Électromagnétisme et de la Relativité, 1983.

LA RELATIVITÉ ET LES QUANTA, VERS LA COHÉRENCE, 1993.

LA DUALITÉ DE L'ESPACE-TEMPS, Une Nouvelle Approche des Fondements de la Physique, Electromagnétisme–Relativité-Quanta, 1996.

LA DUALITÉ DE L'ESPACE-TEMPS, Compléments et Synthèse, Le Couplage Electromagnétique et les Fondements de la Physique, 1997.

RECHERCHES SUR LA DUALITE DE L'ESPACE-TEMPS
Une nouvelle approche des Fondements de la Physique, 1999.

LA DUALITÉ DE L'ESPACE-TEMPS, Un nouveau fondement conceptuel pour la physique du XXI^e siècle, 2004 ; document actualisé en 2005

RECHERCHES SUR LA DUALITÉ DE L'ESPACE-TEMPS, Document de synthèse, Février 2008

RESEARCHES ON SPACE-TIME DUALITY Texte présenté dans le cadre du colloque France-Russie organisé par EADS et la Fondation Louis de Broglie, Mars 2010

RECHERCHES SUR LA DUALITÉ DE L'ESPACE-TEMPS, Document récapitulatif Décembre 2011

RECHERCHES SUR LA DUALITÉ DE L'ESPACE-TEMPS, Synthèse Mars 2013

Les principales étapes dans le déroulement de ces recherches sont présentées dans le site :
<http://dualite-espace-temps.pagesperso-orange.fr/>

Table des matières

Pages

Introduction.....	4
Chapitre I	
Contradictions dans les fondements de la physique.....	5
Chapitre II	
Retour sur relativité, les quanta et l'électromagnétisme.....	7
Chapitre III	
Retour sur la Théorie de Maxwell.....	12
Chapitre IV	
Vers de nouveaux fondements pour la physique du 21 ^{ème} siècle.....	16
Ouvrages cités.....	18

Introduction

Les recherches présentées ici ont leur origine dans le contenu des conférences de Louis de Broglie à l'Ecole Supérieure d'Electricité (Période 1944-1946 Section Radioélectricité). Plus précisément, il m'était apparu qu'une voie de travail procédait de la conclusion de sa thèse introduisant la mécanique ondulatoire, où il indiquait : « *Il faudrait d'abord constituer une théorie électromagnétique nouvelle, rendant compte de la structure discontinue de l'énergie radiante, laissant enfin à la Théorie de Maxwell-Lorentz un caractère d'approximation statistique qui expliquerait la légitimité de son emploi et l'exactitude de ses prévisions dans un très grand nombre de cas.* (1)» (Les chiffres entre parenthèses renvoient aux ouvrages cités, en fin de document.). Les recherches concernées ont été développées sur cette base, orientées vers la compréhension des différents aspects de la réalité physique profonde et en analysant comment cette réalité a été exprimée par les théories qui ont ouvert la voie de la physique actuelle.

En contrepartie de ses prodigieux succès, la physique est confrontée depuis trois quarts de siècle à une anomalie majeure : la théorie et l'expérience font apparaître des liens entre *particules intriquées* qui s'apparentent à des interactions instantanées concernant des éléments éloignés dans l'espace, en contradiction avec le principe de causalité relativiste. Malgré les efforts considérables déployés pour trouver la clé de cette énigme, à la fois dans la voie théorique et dans la voie expérimentale, la solution n'apparaît pas. La situation est caractérisée par les physiciens de la façon suivante : « *Nul ne peut dire aujourd'hui si les progrès viendront de nouvelles expériences, de percées théoriques ou de ruptures épistémologiques.* (2) » Or, au terme de sa vie, Albert Einstein a fait des commentaires sur son œuvre, incitant à ré-analyser certains fondements qu'il avait lui-même introduits. En 1949, il disait : « *Il n'y a pas un seul concept dont je sois convaincu qu'il demeurera et je ne suis pas sûr, en général, d'avoir été sur la bonne piste.* (3)» En 1954, il écrivait à Louis de Broglie : « *Je dois ressembler à une autruche qui sans cesse cache sa tête dans le sable relativiste pour n'avoir pas à regarder en face ces vilains quanta.* (4)» Les recherches rapportées ici avaient été engagées bien avant que ces ultimes prises de position ne fussent exprimées, mais celles-ci ont contribué à les justifier et à les réorienter.

Cette mise à jour du contenu du site correspond au terme actuel de ces recherches : elle reprend les éléments présentés antérieurement parmi les plus significatifs, tout en introduisant quelques apports complémentaires. Il s'agit aussi de faire en sorte que cette voie de travail soit connue et que les personnes qui voudraient l'approfondir puissent en exploiter les éléments. On pourra trouver, dans les rubriques antérieures du site, des développements concernant certains aspects seulement évoqués ici (en particulier dans les textes de février 2008, mars 2010 et décembre 2011). Les résultats de ces recherches conduisent à la conclusion suivante : non seulement la relativité, telle qu'elle a été développée par Albert Einstein, n'est pas incompatible avec les interactions instantanées au travers de l'espace, mais elle les implique dans le cas des interactions classiques de couplage. La contradiction entre l'inséparabilité quantique et la relativité est ainsi éliminée. On verra comment cette réalité s'est trouvée masquée et comment elle pourra être confirmée par l'expérience.

J'exprime ma profonde reconnaissance aux personnes qui ont apporté leur concours ou leur soutien à ces recherches.

Avril 2014

Pierre Poubeau

I Contradictions dans les fondements de la physique

La physique actuelle s'est développée, pour l'essentiel, à partir de quatre racines principales : la Théorie de Maxwell, la théorie des quanta, la théorie de la relativité, la quantification mathématique du champ électromagnétique dans ses diverses variantes. Lorsque la Théorie de Maxwell a été élaborée, l'électricité était considérée comme un fluide de nature continue caractérisé par des densités de charge et de courant ; la prise en compte de l'électron, après sa découverte, a conduit à la Théorie de Lorentz et, d'une façon générale, on se réfère actuellement à la Théorie de Maxwell-Lorentz. Ces deux théories ont été élaborées en l'absence de maillons (précisément les quanta et la relativité) dont la connaissance était indispensable pour aboutir à une formulation valable de la réalité physique et qui ne sont apparus qu'en conséquence des avancées itératives que les théories initiales ont permises. Pour progresser, il a donc fallu contourner des domaines d'ignorance en prenant appui sur des maillons provisoires, souvent inapparents, et n'exprimant pas nécessairement la réalité physique. Ainsi, les avancées ultérieures ont montré que la Théorie de Maxwell-Lorentz se heurtait à des difficultés pour l'interprétation de l'émission de la lumière (*catastrophe ultraviolette*, effet photoélectrique, invariance de la vitesse de la lumière), ce qui a entraîné l'introduction des quanta et de la relativité. Après que Max Planck eut introduit les quanta au niveau des échanges d'énergie matière-lumière et vice versa, Albert Einstein introduit les quanta-particules en précisant : « *la Théorie de Maxwell prévoit une énergie distribuée de façon continue sur un volume sans cesse croissant* » alors que « *la lumière est constituée de quanta d'énergie émis tout d'un bloc et se déplaçant sans se diviser.* (5) »

Alors que l'introduction des quanta-particules dans la lumière (mai 1905) semblait démontrer l'inadéquation de la Théorie de Maxwell vis-à-vis de la réalité physique des phénomènes de rayonnement de l'énergie lumineuse, c'est à partir de cette même théorie, mais cette fois sans la remettre en cause, qu'Albert Einstein introduit la théorie de la relativité (juin 1905). Il considère, au contraire, que les difficultés d'interprétation qui apparaissent dans sa mise en œuvre tiennent à « *une considération insuffisante portée à la place que tiennent le choix et la nature des systèmes de coordonnées dans les processus électromagnétiques.*(6) » Il développe ainsi la relativité et le concept d'équivalence masse-énergie qui en découle, en symbiose avec « *les Equations de Maxwell-Hertz* ». Qui est plus étrange, ce développement est conduit sans une seule référence aux quanta qu'il vient d'introduire dans l'énergie lumineuse, comme si ces éléments pourtant décisifs n'avaient jamais effleuré son esprit : la lumière y est omniprésente et elle est considérée et traitée comme une onde, sans aucune différence avec les ondes hertziennes, celles de la radioélectricité naissante. Il précise : « *J'ai basé cette recherche sur les Equations de Maxwell-Hertz pour l'espace vide en même temps que sur l'expression maxwellienne de l'énergie électromagnétique de l'espace.* (7) » Tout se passe comme s'il ignorait l'incompatibilité qu'il venait d'établir entre la structure de l'énergie lumineuse et la structure prévue par la Théorie de Maxwell : il avait introduit les quanta comme si la relativité ne devait pas exister et il introduisait la relativité comme si les quanta n'existaient pas. Pourtant, les quanta et la relativité convergent sur un élément décisif dans sa démarche, le rejet de *l'éther luminifère* (8) : sans le milieu indispensable pour assurer le transfert de l'énergie de proche en proche, il n'y a pas de propagation de l'énergie, mais les particules que sont les quanta transportent l'énergie dans le vide à la vitesse de la lumière (puisque'ils en sont les éléments constitutifs).

En 1916, Albert Einstein prévoit l'émission stimulée d'où allait découler le maser puis le laser (à partir de 1954) avec une conséquence majeure sur le sujet concerné : la structure quantique de l'énergie radiante qui s'était déjà étendue de l'infrarouge et la lumière aux rayons gamma (l'Effet Compton a eu un rôle clarificateur et décisif) va s'étendre aussi à toute la gamme des ondes hertziennes. Il en résulte qu'il ne reste plus aucun domaine où cette énergie soit répartie dans l'espace comme le prévoit la Théorie de Maxwell-Lorentz, c'est-à-dire comme le prévoient les équations de propagation du champ électromagnétique. La compréhension de la nature quantique de l'ensemble du champ électromagnétique radiant est facilitée par l'interprétation de la continuité de la réalité physique des phénomènes en passant du domaine des hautes énergies unitaires à celui des basses énergies : le rayon gamma (bien que d'origine nucléaire et non directement d'origine électromagnétique) est l'image facilement interprétable du quantum *émis tout d'un bloc* : il

peut voyager tout au long des années-lumière en restant identique à lui-même. S'il vient du cosmos, il est détecté lorsque, immobilisé sur une cible, il engendre un électron et un positron. L'image interprétative peut être facilement transposée aux rayons X, lumineux, infrarouges : cette image correspond à celle d'un grain d'énergie, elle s'est spontanément imposée dans ces domaines. A l'inverse, les concepts fondamentaux et les images qui ont été associées aux ondes hertziennes ont fait que l'interprétation de leur émission s'est ancrée dans la Théorie de Maxwell-Lorentz, confortée dans cette voie par la façon dont la relativité restreinte a été développée. Comme indiqué précédemment, le texte de l'article introduisant les quanta se limitait à la lumière et au domaine proche allant de l'infrarouge du corps noir à l'ultraviolet. Après que le maser puis le laser eurent mis en évidence la continuité quantique dans l'ensemble du rayonnement électromagnétique d'énergie, des rayons gamma aux ondes radioélectriques à très basse fréquence, la situation n'a pas évolué de façon aussi claire et décisive que dans le cas initial de la lumière. Il peut être utile d'approfondir cette anomalie avec les éléments dont nous disposons maintenant. Si nous considérons deux rayons gamma émis simultanément, tels que nous les connaissons, nous savons qu'ils se propagent en restant identiques à eux-mêmes, indépendamment l'un de l'autre et, entre eux, il n'y a que le vide. S'ils étaient constitués d'une onde maxwellienne, leur énergie serait « *répartie de façon continue sur un volume sans cesse croissant.* » Cette image interprétative peut être facilement transposée aux rayons X, à la lumière, à l'infrarouge et, par la continuité laser-maser, elle doit aussi être étendue aux ondes radioélectriques dans toute la gamme, jusqu'aux ondes à très basse fréquence ; au lieu du grain d'énergie, il faut plutôt se référer à une bulle ou à un nuage d'énergie avec cette particularité que l'énergie unitaire est d'autant plus faible que la bulle est plus grosse ou le nuage plus étendu, en fonction de la longueur d'onde.

Le point essentiel à retenir est que, à partir d'une distance suffisamment grande de la zone d'émission, il n'y a que le vide entre les bulles ou les nuages d'énergie, comme dans le cas des rayons gamma ; *les quanta émis tout d'un bloc et se déplaçant sans se diviser* sont généralisés ainsi à l'ensemble de l'énergie radiante. On a vu qu'Albert Einstein a développé la relativité et l'équivalence masse-énergie en se référant aux *Equations de Maxwell-Hertz* et à *l'énergie maxwellienne de l'espace* : cela l'a conduit implicitement à ne pas introduire les *quanta émis tout d'un bloc* dans l'énergie radiante hertzienne et à s'écarter de l'interprétation qui précède. En continuité avec cette démarche einsteinienne relativiste, la quantification mathématique du champ électromagnétique a pris pour point de départ la Théorie de Maxwell-Lorentz ; cela a impliqué de considérer que l'énergie qui constitue le rayonnement hertzien est distribuée *de façon continue sur un volume croissant*, le formalisme mathématique conduisant à faire apparaître que ***tout se passe comme si elle était constituée de photons*** (9, 10,11) ; cela est fondamentalement différent de la démarche einsteinienne quantique généralisée adoptée ici, faisant apparaître que l'énergie concernée ***est physiquement constituée de photons***. Il y a là un ensemble de contradictions susceptibles d'apparaître sous de multiples formes auxquelles s'en ajoute une, déjà évoquée : alors que la Théorie de Maxwell et l'interprétation des équations de propagation sont fondées sur l'existence supposée d'un milieu susceptible de transmettre les actions électromagnétiques de proche en proche (comme le font les milieux matériels pour les déformations élastiques), la relativité élimine *l'éther luminifère*.

Albert Einstein lui-même prendra conscience de ces contradictions, dans les dernières années de sa vie comme indiqué précédemment. Dès lors que l'on détecte de telles situations dans les fondements de la physique, cela ouvre de nouvelles pistes vers la solution du problème que pose la discordance entre la théorie quantique et la relativité et projette un éclairage nouveau sur l'ensemble du déterminisme des avancées scientifiques. On reverra plus loin comment, à une époque où les données disponibles sont insuffisantes pour franchir des étapes décisives, les facultés transcendantes de l'esprit établissent des passerelles au-dessus des domaines d'ignorance, permettant ainsi d'aller de l'avant alors que tout s'y oppose.

II Retour sur la relativité, les quanta et l'électromagnétisme

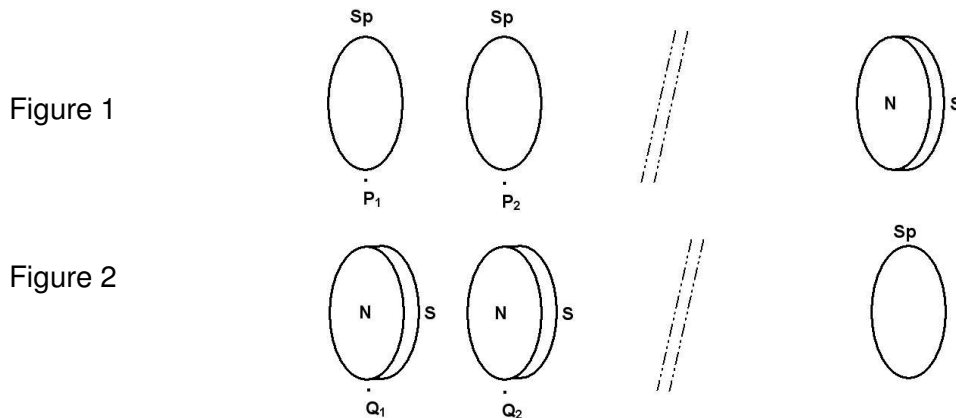
Le premier paragraphe du texte par lequel Albert Einstein introduit la relativité, est rapporté ci-après.

Sur l'électrodynamique des corps en mouvement

Par Albert Einstein
(Juin 1905)

« Il est connu que l'électrodynamique de Maxwell, telle que couramment comprise à l'époque actuelle, quand elle est appliquée à des corps en mouvement, conduit à des dissymétries qui n'apparaissent pas comme étant inhérentes aux phénomènes concernés. Prenons par exemple l'action électrodynamique réciproque d'un aimant et d'un conducteur. Là, le phénomène observable dépend uniquement du mouvement relatif du conducteur et de l'aimant, alors que les vues habituelles tracent une distinction nette entre les deux cas dans lesquels soit l'un soit l'autre de ces corps est en mouvement. (12) »

La situation ainsi décrite peut être précisée concrètement par deux expériences menées simultanément. Dans l'une, un circuit conducteur représenté sur le schéma de la figure 1 par une spire conductrice S_p est déplacé entre deux positions de repos P_1 , P_2 , en face d'un aimant immobile NS ; dans l'autre un aimant identique est déplacé entre les deux positions de repos Q_1 , Q_2 , en face d'une spire conductrice identique fixe, dans le même mouvement relatif que dans le cas précédent. On recrée ainsi, pour l'analyse, une situation expérimentale qui correspond ponctuellement à celle introduisant la relativité restreinte : cette théorie laisse attendre que les



forces électromotrices induites, et les courants qui en résultent, soient identiques dans un cas comme dans l'autre, faute de quoi le phénomène observable ne dépendrait pas uniquement du mouvement relatif du conducteur et de l'aimant.

Dans une interaction de cette nature, lorsque le conducteur est déplacé la théorie de l'électromagnétisme relativiste conduit à considérer qu'il s'agit d'une interaction instantanée, le transfert d'énergie étant concomitant avec le mouvement du conducteur. Lorsque l'aimant est déplacé, dans le même mouvement relatif, la même théorie interprète le processus en cause comme une interaction retardée, le phénomène supposé de propagation (à la vitesse de la lumière) du champ magnétique, à partir des positions successives de l'aimant, introduisant un retard dans le transfert d'énergie de l'aimant en mouvement au conducteur ; ce retard est proportionnel à la distance entre les deux éléments et tend vers l'infini avec cette distance. Une contradiction apparaît donc entre le postulat sur lequel va s'appuyer le développement de la relativité restreinte, d'une part, ce qui découle de la théorie de l'électromagnétisme maxwellien initial puis actualisé par la relativité, d'autre part : dans le premier cas il s'agit d'une interaction

instantanée, dans le second d'une interaction retardée. Il n'est donc pas possible, dans ces conditions, de considérer que l'interaction ne dépend que du mouvement relatif des éléments concernés. Or, toute la physique actuelle a vérifié les autres conséquences de la relativité, avec le succès que l'on sait, en particulier en ce qui concerne les mouvements relatifs : une des conséquences de la relativité (en même temps que sa raison d'être) est précisément de faire apparaître que les deux situations sont identiquement les mêmes, mais observées à partir de deux référentiels différents. D'autre part, on n'a jamais vérifié expérimentalement que le déplacement d'un aimant en face d'un circuit conducteur corresponde à une interaction retardée. Enfin l'examen des situations qui peuvent intervenir pendant les temps de propagation des champs magnétiques impliqués mettent en évidence que ce phénomène supposé est incompatible avec le respect des lois de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement (références : versions antérieures du site, en particulier *document récapitulatif de 2011*). La seule évolution théorique qui amène de la cohérence dans cette situation consiste à considérer que, contrairement au dogme qui veut que la relativité exclue l'instantanéité des interactions au travers de l'espace, non seulement elle ne les exclut pas mais elle les implique dans les cas d'interactions de couplage tels que ceux évoqués ; des expériences simples sur ces bases permettront de valider l'approche présentée ici. Il s'agit de vérifier que la force électromotrice prenant naissance dans un conducteur, comme dans le cas de la figure 2, s'établit de façon concomitante avec le mouvement de l'aimant et non avec le retard prévu par la théorie en vigueur.

La présence du circuit conducteur permet de raisonner sur le processus de transfert de l'énergie, mais il est clair que le problème de base est de savoir ce qui se passe au niveau du champ magnétique : évolution instantanée ou retardée par la propagation, par rapport au mouvement de la source de champ ?

L'anomalie qui apparaît dans ce qui précède, intervient au niveau du champ magnétique ; on retrouve une anomalie similaire au niveau du champ électrique avec le concept de *propagation du champ* et ses corollaires *d'interactions retardées* et de *champ libre*. Ces concepts ont été introduits sur la base suivante pour ce qui concerne le lien entre une charge électrique en mouvement dans le vide et le champ électromagnétique dont elle est la source. La charge électrique q parcourant la courbe C (figure 3), la théorie postule que le champ électromagnétique en P , à l'instant t ,

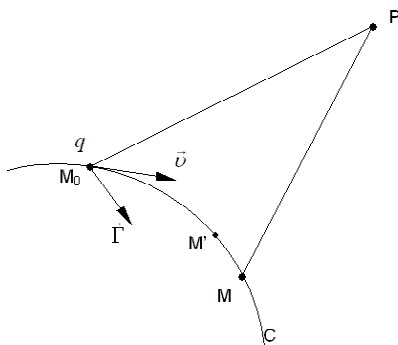


Figure 3

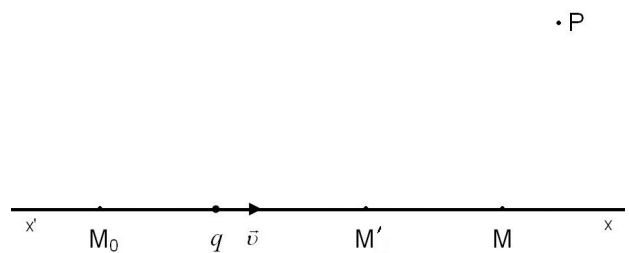


Figure 4

lorsque la charge est en M , est entièrement déterminé par son passage à la position retardée M_0 , où elle était à l'instant $t_0 = t - M_0P/c$, et par les caractéristiques de vitesse \vec{v} et d'accélération $\vec{\Gamma}$ à cet instant, quoi qu'il ait pu lui advenir postérieurement au passage en M_0 (par exemple immobilisation en M'). Le *champ libre* est supposé s'être propagé de M_0 à P pendant que la charge se déplaçait de M_0 à M ; la théorie associe au champ de l'énergie et de la quantité de mouvement (voire du moment cinétique). Examinons le cas de la charge électrique q supposée en mouvement rectiligne uniforme (figure 4). Le champ en P , lorsque la charge est en M , est supposé avoir été émis lors du passage de la charge à la position retardée M_0 ; comme précédemment, quoi qu'il ait pu arriver à la charge après son passage en M_0 (par exemple immobilisation en M') le champ en P à l'instant t n'est pas supposé en subir la conséquence. La charge restant à énergie constante (elle n'est soumise à aucune force), l'hypothèse selon laquelle elle émettrait, vers l'infini de l'espace et

du temps, de l'énergie et de la quantité de mouvement associées au champ en propagation ne peut pas être cohérente avec la réalité physique.

A la fin du 19^{ème} siècle, lorsque les physiciens ont mené des études, dont certaines devaient conduire à la Transformation de Lorentz, leurs réflexions pré-relativistes les ont amenés à considérer que les relations, issues des Équations de Maxwell, qui permettent de passer des paramètres de la charge en mouvement à son champ électromagnétique, ne sont valables que dans la mesure où la vitesse de la charge est faible devant celle de la lumière. Dans le cas contraire, elles les ont conduit à exprimer les potentiels à partir d'une valeur de la charge affectée d'un coefficient directionnel. Les expressions des potentiels retardés obtenues dans ces conditions diffèrent de celles découlant directement des Équations de Maxwell : ce sont les Potentiels de Liénard et Wiechert (13,14) à partir desquels on exprime les champs. Le concept qui a été invoqué alors pour parvenir à cette formulation du champ électromagnétique conduit au même résultat mathématique qu'en partant du champ statique de la charge et en faisant un changement de référentiel conformément à la Transformation de Lorentz (ce qui correspond à la démarche relativiste). On est ainsi arrivé à la conclusion, systématiquement admise, selon laquelle les deux démarches expriment la même réalité physique : or, ce n'est pas le cas. La démarche qui introduit un terme correctif sur la charge en mouvement a les mêmes racines que celle concernant la propagation des champs en général ; elle procède du cheminement menant aux étapes qui ont jalonné les avancées scientifiques dans une voie itérative qui n'est pas cohérente avec la réalité physique comme le montre, entre autres, l'analyse suivante.

Considérons le cas d'un électron e_1 (figure 5) de haute énergie, 360 Gev par exemple, dont la vitesse est très proche de celle de la lumière ($v/c = 1 - 10^{-12}$). A l'instant où il passe en O, e_1

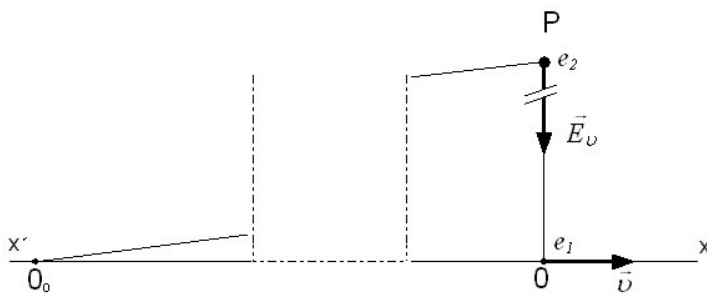


Figure 5

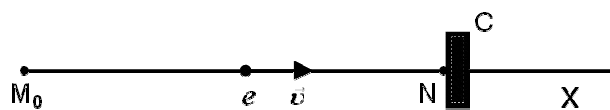
exerce sur un autre électron e_2 , en P à un kilomètre de O, une force impliquant une accélération de 20 g. La position retardée O_0 est alors à 700 000 kilomètres en amont de O et la théorie en vigueur conduit à prévoir la situation suivante : l'électron qui serait immobilisé immédiatement après son passage en O_0 produirait la même action sur e_2 que s'il avait continué son mouvement l'amenant à passer en O. Autrement dit, un électron immobilisé sur sa trajectoire, pourrait exercer une action de cette nature à 700 000 kilomètres de son point d'immobilisation et environ deux secondes plus tard. Cet exemple fait apparaître la contradiction entre le concept des interactions retardées (hors rayonnement) et la réalité physique.

La relativité a apporté une clarification sur cette situation en éliminant l'éther luminifère (qui est à la racine du concept des interactions retardées de cette nature, au niveau de la Théorie de Maxwell) et en réinterprétant la place que tiennent les systèmes de référence dans l'électromagnétisme. Lorsqu'on analyse les phénomènes associés au mouvement rectiligne uniforme d'une charge électrique, au travers de l'évolution de son champ, cela sous-entend que cette charge est observée à partir d'un système de référence dans lequel elle apparaît avec ce mouvement. On peut aussi observer la même charge, en situation inchangée, à partir d'un autre référentiel en mouvement par rapport au précédent, dans lequel elle est immobile et dans lequel elle est uniquement la source de son champ statique, ce qui conduit à l'analyse suivante : la théorie en vigueur, et les interactions retardées qu'elle implique, conduisent à considérer qu'une charge électrique émettrait ou n'émettrait pas un champ tel que défini précédemment, selon le référentiel à partir duquel on l'observe. Une telle interprétation ne peut pas être cohérente avec la réalité physique des phénomènes.

La situation qui vient d'être évoquée, concernant le champ électromagnétique des charges électriques en mouvement, peut conduire à des expériences clarificatrices décisives. Considérons la configuration concrète suivante. Une charge électrique quasi-ponctuelle, constituée d'un électron (rayonnement bêta) ou de plusieurs électrons (émis par un accélérateur de particules), est émise en M_0 à une vitesse de $0,9c$ (figure 6). Elle parcourt la distance M_0N de 2,3 mètres avant d'arriver à une cible C dans laquelle elle perd son énergie cinétique. Une spire conductrice est centrée sur P à un mètre de N . Dans cette configuration, le temps qui serait mis par le champ électromagnétique de la charge pour parcourir M_0P dans sa propagation supposée serait égal au temps mis par la charge pour parcourir M_0N (M_0 est *la position retardée* de la charge parvenant en N). Pour le chemin parcouru entre M_0 et N par la charge, son champ supposé émis pendant le parcours parviendrait au centre de la spire après son immobilisation. Or, selon la théorie, la charge n'aurait pas cédé d'énergie au profit de la spire pendant son trajet M_0N et elle ne peut plus en



Figure 6



céder après son immobilisation. Une expérience basée sur ce principe devrait montrer que la force électromotrice qui prend naissance dans la spire est concomitante avec le mouvement de la charge.

Comme dans le cas de l'aimant, l'introduction d'un circuit conducteur permet d'étayer le raisonnement sur le transfert d'énergie résultant de l'interaction, mais il est évident que le point clé est de faire apparaître la nature du lien entre la source de champ et son champ : instantané ou retardé ? Cette configuration peut servir de base pour des expérimentations très simples qui pourraient être menées en utilisant des charges électriques émanant d'un accélérateur de particules.

L'interaction évoquée dans l'exemple précédent est une interaction de couplage ; elle est de même nature que celle qui intervient dans un transformateur, la charge électrique en mouvement correspondant au circuit primaire et la spire au circuit secondaire. Mais, dans un transformateur, le courant induit dans le secondaire crée un champ magnétique qui réagit sur le primaire et tend à s'opposer au courant qui y circule : c'est ainsi que s'exerce *l'action électrodynamique réciproque*, qui permet le prélèvement, sur le primaire, de l'énergie qui se retrouve au secondaire ; cette interaction ne peut pas intervenir dans le cas qui vient d'être considéré si la propagation tient la place prévue par la théorie en vigueur. On notera aussi que cette expérience pilote a été présentée comme une interaction faisant intervenir le champ magnétique : il est en effet assez habituel de considérer une charge en mouvement comme assimilable à un courant. Pour éviter toute ambiguïté, on signalera, dans le cas concerné, que le champ magnétique est l'une des facettes du champ électromagnétique de la charge en mouvement ; le courant susceptible de prendre naissance dans la spire S est la conséquence de la force électromotrice développée par le mouvement de la charge électrique. Cette force électromotrice peut être exprimée identiquement par la dérivée du flux du champ magnétique sur la surface de la spire ou par la formulation mathématique de *la circulation* du champ électrique sur son contour.

Le concept de propagation du champ électromagnétique a sa racine dans la Théorie de Maxwell, basée sur l'analogie supposée de *l'éther* avec les milieux matériels transmettant l'énergie de proche en proche. Un point essentiel fait la différence avec un milieu matériel : les actions liées aux ondes dans un tel milieu sont effectivement retardées par la propagation mais la source de ces ondes perd de l'énergie en les émettant par son déplacement ; au contraire, une charge électrique en mouvement dans le vide, et qui n'est soumise à aucune force, reste à vitesse et

énergie constantes. Si le vide est rempli d'un milieu, comme l'hypothèse en a parfois été faite (milieu sub-quantique de Paul Dirac, énergie du vide ...), ses propriétés seraient sans aucune commune mesure avec celles des milieux matériels classiques, avec toutes les conséquences qui en découlent pour l'interprétation des phénomènes électromagnétiques.

Lorsque Albert Einstein a introduit les quanta d'énergie dans la lumière, il anticipait largement le processus de création de particules découvert beaucoup plus tard théoriquement et expérimentalement (création particule-antiparticule, le photon étant à la fois la particule et l'antiparticule). Le quantum d'énergie électromagnétique, renommé photon (1926), correspond précisément à ce phénomène qui englobe les matérialisations-dématérialisations de particules : on est dans la même classe de phénomènes que le proton dont l'énergie cinétique (sous réserve qu'elle soit suffisante) engendre un autre proton et un antiproton. Certes, la théorie, au travers des opérateurs de création de particules, permet d'interpréter mathématiquement le phénomène, mais celui-ci correspond à une réalité physique bien concrète : avant l'interaction du proton et d'une cible, il y a un certain nombre de particules dans l'univers, après l'interaction il y a deux particules de plus qui ont une réalité physique. Il en va de même avec le photon : lorsqu'un photon est créé (on sait visionner l'émission d'un photon par un électron atomique), il y a, dans l'univers, une particule qui n'existait pas à l'instant précédent ; c'est une réalité physique concrète et on est là au cœur du processus d'émission de l'énergie électromagnétique radiante. Evidemment, James Clerk Maxwell ne pouvait pas imaginer cela puisque c'est en conséquence des avancées que sa théorie a permises que ces aspects de la réalité physique ont été découverts. Cela signifie que le rayonnement est émis selon un autre processus que celui que prévoient les équations de propagation du champ électrique et du champ magnétique : ces équations impliqueraient que le champ électromagnétique se détache de ses sources associé à de l'énergie et de la quantité de mouvement, d'où *l'énergie distribuée sur un volume sans cesse croissant* ; cela ne correspond pas à la réalité physique.

III Retour sur la Théorie de Maxwell

En introduction du chapitre concernant la *Théorie Electromagnétique de la Lumière* dans son *Traité d'Electricité et de Magnétisme*, James Clerk Maxwell indique d'abord les deux théories selon lesquelles la lumière passe d'un corps à un autre : *théorie de l'émission et théorie de l'ondulation*. Il précise ensuite : « Cette Théorie est en accord avec la théorie ondulatoire qui implique l'existence d'un milieu (l'éther) dans lequel l'énergie se transmet de proche en proche. » En conclusion, il rappelle : « Si nous admettons l'hypothèse de ce milieu, je crois qu'il doit tenir une place prédominante et que nous devons nous représenter tous les détails de son action. (15) »

On a vu que, en introduisant les quanta, Albert Einstein avait dissocié la lumière de la Théorie de Maxwell : celle-ci ne prévoit pas une répartition de l'énergie dans l'espace conforme à la réalité physique et il est apparu ensuite qu'il en est de même pour l'ensemble du spectre de l'énergie électromagnétique radiante. De plus, dès l'introduction de la théorie de la relativité, il fait découler du *Principe de Relativité* le renoncement à l'existence de « l'éther luminifère ». Ainsi, dans le contexte des connaissances de l'époque, le milieu transmettant l'énergie de proche en proche a été une hypothèse prodigieusement féconde mais inexacte vis-à-vis de la réalité physique des phénomènes, avec toutes les conséquences qui peuvent en résulter. On va donc réexaminer la démarche intellectuelle et mathématique qui a conduit à prévoir l'existence des ondes électromagnétiques. Cette démarche a été conservée jusqu'à maintenant dans sa structure initiale. Elle repose sur deux groupes d'équations rapportées ci-dessous, avec les formulations actuelles.

Equations de MAXWELL - Groupe I

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & (1), & \operatorname{div} \vec{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} & (2), \\ \operatorname{rot} \vec{B} &= \mu_0 \vec{j} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} & (3), & \operatorname{div} \vec{B} &= 0 & (4), \\ \Delta \vec{E} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} &= \frac{1}{\epsilon_0} \operatorname{grad} \rho + \mu_0 \frac{\partial \vec{j}}{\partial t} & (5), \\ \Delta \vec{B} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} &= -\mu_0 \operatorname{rot} \vec{j} & (6). \end{aligned}$$

Ce premier groupe d'équations constitue les *Equations de Maxwell* qui impliquent la modification de l'équation 3 par rapport à ce qui existait antérieurement, suite aux réflexions de l'auteur concernant *le courant de déplacement*. Dans le prolongement de ce qu'a établi James Clerk Maxwell reformulé par Hendrik Antoon Lorentz, les traités d'électromagnétisme ont présenté systématiquement jusqu'à maintenant la démarche de la façon suivante : « dans les régions du vide où il n'y a ni charge ni courant, les Equations de Maxwell s'écrivent en annulant ρ et \vec{j} dans les équations du groupe I, ce qui conduit aux équations du groupe II .»

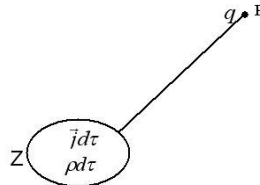
Equations de MAXWELL - Groupe II

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & (1'), & \operatorname{div} \vec{E} &= 0 & (2'), \\ \operatorname{rot} \vec{B} &= \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} & (3'), & \operatorname{div} \vec{B} &= 0 & (4'), \\ \Delta \vec{B} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} &= 0 & (7), \\ \Delta \vec{E} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} &= 0 & (8). \end{aligned}$$

Les équations 7 et 8 sont alors considérées comme exprimant la propagation des champs \vec{E} et \vec{B} et, en conséquence, la propagation des ondes électromagnétiques incluant la lumière à la vitesse c telle que $c^2 = 1/\epsilon_0\mu_0$, conclusions qui sont apparues comme étant vérifiées par l'expérience.

Revenons sur l'ensemble de la démarche concernée en analysant précisément ce qu'elle implique vis-à-vis de la réalité physique, à partir du schéma de la figure 7 et en précisant les données du raisonnement.

Figure 7



Une zone Z de l'espace contient des charges et des courants de densités ρ et \vec{j} . On considère ici la version la plus élémentaire et la plus fondamentale des équations concernées : on se place dans les conditions où, autour des charges et des courants de la zone Z (sachant que les courants sont des charges en mouvement), il n'y a que le vide, donc aucun autre élément électrique, magnétique ou matériel. On est conduit ainsi aux Equations de Maxwell *pour le vide* (celles rapportées ci-dessus) impliquant les paramètres ϵ_0 et μ_0 , par opposition au cas où les charges et les courants seraient entourés d'un liquide, d'un gaz, d'un plasma... Le problème initial qui se pose alors (et qui est le problème de base de la théorie électromagnétique) est le suivant : en un point P quelconque de l'espace vide, qui peut être situé aussi bien à une distance très faible de Z qu'à des milliards de kilomètres, il s'agit d'exprimer le champ électrique et le champ magnétique, sachant que la connaissance de ces champs permet de déterminer les forces (ou la force résultante) auxquelles est soumise une charge q éventuellement introduite en ce point. Au niveau des données de base, s'il n'y a pas de charge ni de courant dans Z (ni ailleurs), il n'y a pas de champ en P (ni ailleurs). Si la charge q est éliminée, le champ électrique et le champ magnétique, qui sont considérés comme étant les causes des forces auxquelles elle est soumise, sont supposés subsister. Les relations fondamentales étant exprimées sous forme d'équations différentielles, les relations exprimant les champs en fonction des charges et des courants s'obtiennent en intégrant ces équations. Cette démarche conduit à passer par l'intermédiaire des potentiels pour exprimer les champs en fonction de leurs sources.

Revenons à la configuration où autour de la zone Z contenant charges et courants, il n'y a que le vide dans lequel se trouve le point P. Examinons alors à quelle interprétation de la réalité physique conduit la démarche maxwellienne. Si cette démarche s'était arrêtée aux équations du groupe 1 (c'est-à-dire si on ne s'était pas posé la question qui conduit à établir le groupe 2), on serait parvenu à des relations instantanées de cause à effet entre les charges et les courants de la zone Z, d'une part, les champs \vec{E} et \vec{B} en P, d'autre part ; les champs auraient été exprimés en fonction de potentiels instantanés. Ces relations entre les sources de la zone Z et les champs en P vont devenir des relations supposées *retardées par la propagation* en raison des équations du groupe II ; examinons comment. Les équations du groupe I conduisent (par intégration) à exprimer les champs \vec{E} et \vec{B} au point P dans le vide, à un instant donné t. Mais, dans la même situation, au même instant t, au même point P *parce qu'il est dans le vide où il n'y a ni charge ni courant*, on introduit des équations qui conduisent à formuler des relations différentes concernant les champs \vec{E} et \vec{B} sans que leurs sources interviennent dans ces équations. (références 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22). Ainsi, pour une même situation, au même point, au même instant, on est en présence de deux groupes d'équations différentes. Qu'est-ce que cela implique ou sous-entend ?

En l'état actuel des choses et au point où en est la démarche physico-mathématique, on exclura que des champs puissent exister s'il n'y a pas de sources et s'il n'y en a jamais eu. Lorsqu'on postule que les Equations de Maxwell dans le vide s'écrivent en annulant ρ et \vec{j} , il ne s'agit pas

d'annuler ρ et \vec{j} en P ou autour de P, puisque c'est une région où il n'y a ni charge ni courant ; on ne peut annuler des ρ et \vec{j} que là où il y en a. Dans la démarche en cours, il n'y en a, selon les hypothèses de départ, que dans la zone Z et si on les annule il n'y a plus de champ. Donc, s'il existe des champs sans qu'ils soient liés à des sources (cas des équations du groupe II), c'est qu'ils ont eu antérieurement des sources et qu'ils s'en sont détachés : on est alors sur des bases différentes de celles de départ de la démarche qui a conduit à établir les équations concernées. A ce niveau, on est en contradiction avec la physique mathématique naissante de l'époque comme avec celle d'aujourd'hui. C'est d'ailleurs ce qui a conduit Richard Feynman, prenant conscience du problème, à présenter la situation sous une formulation différente, en écrivant : «dans les régions de l'espace où il n'y a plus ni charge ni courant. » (“ *in the regions of space where there are no longer any charge or current. (23)*”). Cette formulation rejoint ce qui précède : écrire des relations entre les champs, dans ces conditions, impose de supposer que ces champs existent mais qu'ils n'ont plus de lien avec des charges ou des courants : cela implique donc qu'ils se soient détachés de leurs sources, et à introduire implicitement, au niveau des hypothèses, ce qui apparaît habituellement comme la conséquence des équations de propagation des champs. En fait, l'action mathématique ainsi décrite ne correspond à aucun élément de la réalité physique considérée initialement : on sort alors de la pure logique qui a semblé jusqu'à maintenant se trouver associée à la démarche maxwellienne. Autrement dit, la démarche aboutit à des équations de propagation parce que la propagation a été introduite inconsciemment et implicitement au niveau des hypothèses. Le problème se pose alors de savoir si, de ce fait, une telle démarche reste cohérente avec la réalité physique, sans négliger l'apport considérable qui lui est dû : la Théorie de Maxwell a été à la racine des principales avancées de la physique moderne, les Expériences de Hertz, les quanta, la relativité, la quantification mathématique du champ électromagnétique avec les prodigieux succès que l'on sait. Mais lorsque cette théorie a été établie, il manquait des éléments indispensables pour qu'elle fût l'expression exacte de la réalité physique, éléments qui n'ont été découverts que grâce aux avancées qu'elle a rendu possibles.

A ce sujet René Taton écrit: « *La théorie de tout phénomène physique ne progresse le plus souvent que par approximations successives (24)* ». Il s'agit là d'une démarche itérative inhérente à l'activité humaine et précisée en la matière par Banesh Hoffmann, collaborateur, ami et biographe d'Albert Einstein, sous la forme suivante : « *Le talent qu'a le théoricien scientifique d'aboutir à des conclusions valables en partant de prémisses reconnues plus tard inexactes n'est pas le moindre de ses dons, car il est doué d'une intuition clairvoyante (25)*. » L'intuition clairvoyante, face à des problèmes de cette ampleur, c'est **le génie** qui présente la particularité de pouvoir œuvrer à contre-courant de la logique ou de court-circuiter celle-ci lorsqu'elle ne dispose pas des éléments appropriés. Les facultés *clairvoyantes* de l'esprit sont alors capables de se substituer à elle et d'établir des passerelles au-dessus des domaines d'ignorance du moment, permettant ainsi de faire avancer les choses. Ce mode de fonctionnement des mécanismes intellectuels peut rester très longtemps inapparent. Si une anomalie ou une contradiction surgit dans la mise en œuvre d'une théorie, ou encore si une contradiction apparaît entre la théorie et l'expérience, il devient indispensable de rechercher la possible présence de ces *prémisses inexactes* pour les remplacer par des fondements exacts. Les présentes recherches conduisent à considérer que le génie des chercheurs scientifiques a eu recours, autant que nécessaire, à des prémisses inexactes. Il a ainsi ouvert la voie à des résultats dépassant largement les limites les plus optimistes de ce qui était espéré ; il a été en action tout au long des avancées de la physique depuis la Théorie de Maxwell. Le moment est sans doute venu de profiter des avancées ainsi acquises, tout en rendant à la logique la place qui lui revient.

A ce stade de l'analyse, on est amené à conclure qu'il y a effectivement une faille dans la structure mathématique de la Théorie de Maxwell et dans la logique qui la sous-tend. Elle conduit à une distribution dans l'espace du champ électromagnétique, et de l'énergie que la théorie lui associe, qui n'est pas conforme à la réalité physique. Dans cette voie, la Théorie de Maxwell en ressort toutefois non moins brillamment car elle représente alors l'aspect statistique des phénomènes comme l'avait prévu Louis de Broglie. Cela rejoint aussi ce qu'a écrit Albert Einstein dans son article introduisant les quanta : « *La théorie ondulatoire de la lumière opérant avec des fonctions d'espace continues s'est avérée parfaite.... Il ne faut cependant pas perdre de vue que*

les observations optiques portent sur des valeurs moyennes dans le temps, et pas sur des valeurs instantanées (26). » On arrive ainsi à cette situation surprenante : la Théorie de Maxwell conduit à des résultats à la fois contradictoires et complémentaires qui ont été les uns et les autres prodigieusement utiles, mais la réalité physique est unique et il est indispensable de savoir dans quel cadre théorique et interprétatif elle est valablement représentée. Ce qui a été rapporté ici tente d'amorcer une réponse à cette question, via le programme d'expérimentation concernant l'évolution du champ magnétique et du champ électrique en fonction de l'évolution de leurs sources.

IV Vers de nouveaux fondements pour la physique du 21^{ème} siècle

Dans une ultime réflexion confiée à Louis de Broglie et mentionnée précédemment, Albert Einstein a considéré qu'il s'était engagé sur une fausse piste en se refusant à *regarder en face ces vilains quanta* pour privilégier *le sable relativiste*. De quoi s'agissait-il ? En même temps qu'il introduisait les quanta dans la lumière, il les excluait implicitement mais totalement des ondes hertziennes, c'est-à-dire de la radioélectricité naissante alors qu'ils y tiennent la même place que dans la lumière et dans l'ensemble de l'énergie électromagnétique radiante. Cette fausse piste a été aussi physiquement inexacte que prodigieusement utile, avec deux conséquences :

- elle a ancré dans les esprits la conviction erronée que les équations de propagation de la Théorie de Maxwell concernant le champ électrique et le champ magnétique expriment valablement la réalité physique de l'émission radioélectrique ;
- de ce fait, elle a conduit à concevoir et développer la quantification mathématique du champ électromagnétique (théorie quantique des champs, électrodynamique quantique....) avec les avancées décisives qui en ont résulté.

Les recherches rapportées ici conduisent à la conclusion qu'Albert Einstein a ainsi ouvert, pour la physique d'aujourd'hui, une voie nouvelle qui reste à explorer. Les ondes radioélectriques, comme la lumière, *sont constituées de quanta d'énergie émis tout d'un bloc et se déplaçant sans se diviser*, et en aucune manière, elles ne sont constituées d'une énergie distribuée de façon continue sur un volume sans cesse croissant comme le prévoit la Théorie de Maxwell. Le concept de champ électromagnétique qui se détache de ses sources, associé à de l'énergie, de la quantité de mouvement et du moment cinétique ne correspond à aucune réalité physique. Celle-ci est tout à fait différente : elle correspond au phénomène **physique** de création de particules vis-à-vis duquel la Théorie de Maxwell exprime valablement l'aspect statistique. Lorsque les quanta (les photons), sont en très grand nombre, à un instant donné et dans un volume donné, ils se comportent, par aspect statistique, comme des ondes ayant l'apparence d'une réalité physique continue ; lorsqu'ils sont en petit nombre, le carré de la valeur du champ électrique en un point (formulée à partir de la Théorie de Maxwell) exprime la probabilité de présence d'un photon au point concerné. Tout cela constitue une part considérable de l'acquis de la physique actuelle. Par contre, l'interprétation du rayonnement radioélectrique, restée ancrée sur l'interprétation maxwellienne, doit évoluer.

Lorsqu'un conducteur (une antenne en l'occurrence) est parcouru par un courant à haute fréquence, le champ électromagnétique ne se détache pas de ses sources. Les électrons de surface du conducteur (effet de peau) subissent un mouvement oscillant donc une accélération alternative et ils émettent des photons, en cohérence de phase et de polarisation, sur la fréquence d'oscillation. Dans les cas classiques, le très grand nombre des photons émis fait, comme indiqué ci-dessus, que **tout se passe comme si** le champ électromagnétique s'était détaché de ses sources (conformément aux prévisions de la Théorie de Maxwell), mais c'est une apparence ; la réalité est celle des particules de nature physique, les photons, *émis tout d'un bloc et se déplaçant sans se diviser*. Les expériences de Hertz ont prouvé l'existence des ondes électromagnétiques, elles n'ont pas prouvé que ces ondes résultaient de *la propagation du champ électromagnétique* du courant circulant dans le circuit émetteur.

Cette analyse remet de la cohérence au niveau des fondements de la relativité einsteinienne. Dès lors que le concept de champ électromagnétique se détachant de ses sources est éliminé, il n'y a plus d'interactions retardées hors rayonnement. Cela impose de réinterpréter les fondements de l'électromagnétisme et conduit à éliminer la contradiction mentionnée au niveau de l'introduction de la relativité. Non seulement la relativité, en son état actuel, n'exclut pas l'instantanéité dans les interactions de couplage mais elle l'implique, ce qui doit être évidemment confirmé par l'expérience (interaction aimant-conducteur, entre autres). La discordance entre la théorie quantique et la relativité se trouve ipso-facto éliminée.

La situation est étrange au plan heuristique et épistémologique. En même temps qu'il confortait la Théorie de Maxwell en établissant la relativité, Albert Einstein posait les jalons qui allaient la condamner dans sa version initiale et la faire évoluer vers son interprétation statistique :

- en éliminant *l'éther luminifer*, il éliminait le milieu transmettant l'énergie de proche en proche, donc *la propagation* du champ électromagnétique ;
- en s'appuyant sur l'interaction aimant-conducteur, il préparait l'analyse et l'évolution amorcées ici ;
- en introduisant le concept d'émission stimulée, il préparait la conception du laser et du maser et l'extension des quanta physiques, tels qu'il les avait imaginés, à l'ensemble du spectre de l'énergie électromagnétique radiante ;
- en émettant des doutes sur la validité de son cheminement scientifique, il ouvrait la voie à des tentatives, telles que celle présentée ici, pour ré-orienter les recherches vers plus de cohérence entre les théories et la réalité physique.

On remarquera aussi que c'est en considérant, à tort, que toute interaction instantanée au travers de l'espace était exclue, qu'il a misé sur *la synchronisation des horloges* par des signaux optiques et développé la relativité telle qu'elle est, avec son adéquation parfaite à des pans entiers de la réalité physique.

Pour lui, comme pour James Clerk Maxwell, il y a une extraordinaire imbrication de la logique et du génie dans les processus de la découverte, pour aboutir à l'établissement de la connaissance scientifique ; l'inévitable cheminement itératif ne minimise en aucune façon leur mérite ni l'exceptionnel hommage qui leur est dû, ainsi qu'aux chercheurs qui ont fait fructifier leur action.

En l'état actuel des présentes recherches, l'Espace-Temps de Minkovski doit être réinterprété. Il est cohérent avec la formulation quadri-dimensionnelle de l'électromagnétisme, mais il n'est pas compatible avec les interactions instantanées de couplage. Il faut pour cela lui intégrer un caractère de dualité dans une structure de nature physique excluant une structure exclusivement mathématique.

Une nécessaire ré-exploration des fondements de la physique résulte de ces considérations. Elle dépend, en première étape, des expérimentations mettant en évidence le lien instantané entre le déplacement d'un aimant et l'évolution de son champ magnétique parce que c'est le point de départ de la relativité einsteinienne ; un problème similaire se pose pour le champ électrique impliquant les actions expérimentales qui en découlent. Les premières phrases par lesquelles Albert Einstein a introduit la relativité, complétées par son ultime remise en cause de sa propre action, redeviennent ainsi les bases d'une actualisation décisive de la physique. Cette actualisation devrait résulter des actions qui seront menées aussi bien au niveau expérimental qu'au niveau théorique, en conséquence de cette situation nouvelle, pour redéfinir les liens entre les sources de champs et leurs champs ; son ampleur sera sans commune mesure avec les quelques éléments initiaux présentés ici pour l'amorcer.

Ouvrages cités

1. Louis de Broglie, ré-édition de la thèse de 1924 : Recherche sur la Théorie des Quanta Masson, 1963
2. Collectif d'auteurs : Demain la Physique, Odile Jacob Sciences.
3. Citation de: Banesh Hoffmann, Albert Einstein, Créateur et Rebelle, Éditions du Seuil, 1972
4. Citation de Louis de Broglie, Nouvelles perspectives en microphysique, Albin Michel, 1956.
5. Dans : José Leite-Lopes & Bruno Escoubès, Sources et Evolution de la Physique Quantique, Masson, 1994
6. Albert Einstein, On the Electrodynamics of Moving Bodies in: The Principle of Relativity, Dover Publications, Inc New-York, 1923-1952
7. Albert Einstein, Does the Inertia of a Body Depend Upon its Energy-Content, d° 6
8. d° 6
9. Claude Cohen-Tannoudji, Jacques Dupont-Roc, Gilbert Grinberg, Photons et atomes. Introduction à l'électrodynamique quantique. Editions du CNRS, 1987.
10. L. Landau et E. Lifchitz. Electrodynamique quantique . Ed. du Globe EDITIONS MIR 1973-1989
11. F. Mandl, G. Shaw. Quantum Field Theory. John Wiley and Sons. 1984 - 1985
12. d° 6
13. Richard Feynman, Lectures on Physics Tome II, Electromagnetism-1, InterEditions, 1970
14. d° 13, Electromagnetism-2
15. James Clerk Maxwell, (Traduction française) Traité d'Electricité et de Magnétisme, Editions Jacques Gabay, 1989
16. Hendrik-Antoon Lorentz, The Theory of Electrons and its Applications to the Phenomena of Light and Radiant Heat, Ed. Jacques Gabay, 1992
17. J.D. Jackson, Classical Electrodynamics, John Wiley, 1974
18. Lev Landau & E Lifchitz, Théorie des Champs, Mir, 1974
19. Panofsky & Phillips, Classical Electricity and Magnetism, Addison Wesley 1962
20. F. Rohrlich, Classical Charged Particles, Addison Wesley, 1990
21. Edward M. Purcell - Berkeley: Cours de Physique Volume 2 Electricité et Magnétisme 1963 – 1965. Armand Colin 1973
22. Eyvind H. Wichmann - Berkeley Cours de Physique Volume 4 Physique quantique 1967 – 1971, Armand Colin 1974
23. d° 13

24. René Taton. Causalités et accidents de la découverte scientifique. Masson et Cie Editeurs 1955.
25. Banesh Hoffmann, Michel Paty, L'étrange histoire des quanta, Editions du Seuil, 1981
26. d° 5