

Pierre Poubeau

Ultime triomphe d'Albert Einstein

Relativité-Quanta : la cohérence retrouvée

Janvier 2016

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

RECHERCHES SUR LA DUALITÉ DE L'ESPACE-TEMPS, Mise à jour finale du site, Juin 2015

Les principales étapes dans le déroulement de ces recherches sont présentées, depuis 2004, dans le site : <http://dualite-espace-temps.pagesperso-orange.fr/>

Table des matières

	Pages
Avant-propos	4
I. De la Pile de Volta à la Théorie de Maxwell : le génie, fer de lance de la logique	6
II. Potentiels de Liénard et Wiechert : la réalité sous le génie	10
III. Quanta et Relativité : accords et contradictions	14
IV. Les racines de la relativité : au cœur du problème	18
V. La quantification de la Théorie de Maxwell-Lorentz : du génie à la logique	23
Conclusion	26
Bibliographie	27

« 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. »

(Dernière lettre d'Albert Einstein à Louis de Broglie
15 février 1954)

Avant-propos

Ce fascicule présente les résultats de recherches qui ont été initiées essentiellement à partir des idées et concepts développés par Louis de Broglie dans sa thèse introduisant la Mécanique Ondulatoire (1924) et dans les conférences qu'il a présentées à l'Ecole Supérieure d'Electricité (Section Radioélectricité, période 1944-1946) dont j'ai bénéficié. Ensuite, la philosophie scientifique de Louis de Broglie a orienté ce travail dans une voie différente (bien que complémentaire) des orientations orthodoxes de la physique ; celles-ci sont centrées sur la mise en œuvre de formalismes mathématiques d'une exceptionnelle efficacité, mais vis-à-vis desquels il exprimait des réserves. En 1958, il recommandait de « *s'appuyer sur des idées claires permettant de savoir exactement de quoi l'on parle.* (1) » (Les chiffres entre parenthèses renvoient aux ouvrages cités, en fin de document.) En 1962, face aux problèmes non résolus que la physique présentait aux chercheurs, il suggérait d'aller de l'avant « *en s'inspirant directement des données de l'expérience, en s'affranchissant des idées préconçues et en n'accordant pas une valeur trop exclusive aux formalismes mathématiques, même élégants et rigoureux, qui risquent parfois de masquer les réalités physiques profondes.* (2) » Mais son apport essentiel aux présentes recherches tient au fait qu'il a jugé utile de citer la remarque que lui a faite Albert Einstein, aux derniers moments de sa vie, dans une ultime correspondance référencée ci-dessus (3).

Albert Einstein exprimait ainsi la quintessence de réflexions qu'il avait commencé à faire connaître, dès 1949, en déclarant : « *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.*(4) »

Cette analyse critique est, pour une large part, la conséquence de la crise de la physique qui a résulté de la discordance entre les deux grandes disciplines scientifiques dont il avait été l'initiateur, les quanta et la relativité. Depuis les années 30, et malgré ses avancées, la physique est face à un problème qui reste sans solution. Au niveau théorique, Erwin Schrödinger est parvenu à la conclusion que des particules qui ont été en interaction restent liées sans que la distance qui les sépare intervienne par un délai de propagation : elles sont *inséparables*. Ce comportement semble contradictoire avec la relativité qui, dans son interprétation en vigueur, exclut toute forme d'interaction instantanée à distance. Les expériences réalisées dans ce contexte ont confirmé les prévisions théoriques, en particulier celles de l'Université de Genève qui font apparaître le problème sous une forme très simple. Un photon d'une énergie donnée est envoyé sur un cristal qui a la propriété de le scinder en deux photons dont l'énergie est la moitié de celle du photon initial. Ces photons *jumeaux* sont envoyés chacun sur une fibre optique, dans des directions différentes, et ils sont détectés lorsqu'ils se trouvent éloignés d'une dizaine de kilomètres. On observe alors qu'ils réagissent comme s'ils n'étaient pas séparés par la distance : le comportement de l'un dépend instantanément de celui de l'autre. Vis-à-vis de ce problème, la position de la communauté scientifique est généralement résumée de la façon suivante : « *Nul ne peut dire aujourd'hui si les progrès viendront de nouvelles expériences, de percées théoriques ou de ruptures épistémologiques.* (5) » Pourtant, des efforts considérables ont été déployés afin d'éliminer cette anomalie.

La prise de position d'Albert Einstein, en forme de testament scientifique, ouvre une voie de recherches qui n'a pas encore été explorée : quels éléments de la réalité physique sont susceptibles de se cacher derrière le fait qu'il ait privilégié la relativité par rapport aux quanta ? N'aurait-on pas là une orientation conduisant à la clé de l'énigme de cette discordance ? Une telle situation se trouve éclairée par le processus itératif de la découverte scientifique, décrit 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 (6). » L'intuition clairvoyante, 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 permettant, à une époque donnée ou dans les conditions concernées, de faire avancer les choses. A charge pour les détenteurs des *résultats valables* de remonter à leurs sources et de remettre en place des *prémisses exactes*. C'est dans cette voie, inévitablement iconoclaste, qu'ont été orientées les recherches dont les résultats sont présentés ici. Elles ont conduit à ré-explore, depuis leurs racines, les cheminements de la théorie de l'électromagnétisme qui ont conduit à la Théorie de Maxwell, aux quanta, à la relativité et à leurs prolongements.

La Théorie de Maxwell a prévu l'existence des ondes électromagnétiques et l'appartenance de la lumière à cette classe de phénomènes. L'interprétation des phénomènes concernés ne peut se faire valablement qu'en tenant compte de la structure de la matière et de l'électricité, mais aussi des quanta et de la relativité. Or, les avancées constituées par les quanta et la relativité sont la conséquence de l'apport de cette théorie. C'est le génie de James Clerk Maxwell qui a contourné cet immense domaine d'ignorance de l'époque pour faire avancer les choses en s'appuyant sur des *prémisses inexactes*. Les présentes recherches conduisent à la conclusion que certaines de ces prémisses inexactes sont encore actives dans la physique actuelle. En avançant dans cette voie, la discordance que semblait soulever l'inséparabilité quantique vis-à-vis de la relativité s'efface : la relativité, telle que l'a développée Albert Einstein, est totalement compatible avec l'instantanéité des interactions que l'inséparabilité quantique met en évidence.

J'exprime ma profonde reconnaissance aux personnes qui m'ont apporté leur concours ou leur soutien dans ce travail.

Janvier 2016

Pierre Poubeau

I. De la Pile de Volta à la Théorie de Maxwell : le génie, fer de lance de la logique

Si la Théorie de Maxwell a ouvert la voie au grand essor de la physique actuelle, elle est elle-même la conséquence des découvertes de Luigi Galvani et Alessandro Volta qui ont conduit à la pile électrique permettant de faire circuler un courant contrôlé dans un circuit.

Les avancées qui en ont découlé ont conduit à découvrir le champ magnétique des courants, les interactions entre courants électriques et aimants et entre courants, et finalement à la découverte de l'induction électromagnétique par Michael Faraday (1831). On aboutissait alors à un socle de connaissances conduisant aux générateurs et moteurs convertissant l'énergie mécanique en énergie électrique et vice-versa, aux transformateurs et aux diverses formes de couplage entre des circuits parcourus par des courants. C'était aussi la fin d'une ère de la physique : celle où les actions des éléments les uns sur les autres étaient supposées s'effectuer instantanément au travers de l'espace ; la Théorie de Maxwell a changé cela.

A l'époque où les Équations de MAXWELL ont été établies, on ignorait presque tout de la structure de la matière et l'électricité était considérée comme un fluide continu caractérisé par des densités de charge et de courant. C'est donc sur ces bases que James Clerk Maxwell a établi sa théorie. En introduction du chapitre concernant la *Théorie Electromagnétique de la Lumière* dans son *Traité d'Electricité et de Magnétisme*, il 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*. « Dans la théorie de l'émission, le transport effectif de l'énergie s'effectue par des particules de lumière. » Il précise ensuite, concernant la théorie qu'il va développer : « Dans la théorie des ondulations, il y a un milieu matériel qui remplit l'espace et c'est par l'action des parties contiguës de ce milieu que l'énergie se transmet de proche en proche. (7) ». Concernant l'éther, il précise avec circonspection : « s'il existe..... » Autrement dit, il s'appuie explicitement, mais prudemment, sur l'hypothèse d'un milieu support de la propagation et, s'il n'y a pas de milieu, il n'y a pas de propagation. Toute la théorie repose donc sur l'hypothèse de l'existence de l'éther, en lui imputant, vis-à-vis du champ électromagnétique, des propriétés comparables à celles des milieux matériels vis-à-vis des déformations élastiques et conduisant à des équations de propagation similaires. La découverte de l'électron (1897) conduit Hendrik Antoon Lorentz à reformuler la Théorie de Maxwell en tenant compte de cette nouvelle situation (Théorie de Maxwell-Lorentz) ; il reste néanmoins sur les mêmes fondements, en précisant certains aspects liés à l'existence supposée de l'éther. La Théorie de Lorentz met en avant l'analogie avec l'émission d'ondes sonores par une tige vibrant dans l'air et il précise : « Ce concept implique que toute perturbation introduite dans un système électromagnétique, initialement en état d'équilibre, se répercute dans l'espace avec un délai lié à la vitesse de propagation et à la distance ». Il arrive à la formulation suivante des phénomènes : « Sous l'action des forces élastiques, les électrons peuvent vibrer autour de leur position d'équilibre. Ainsi, et peut-être aussi en fonction de mouvements plus irréguliers, ils peuvent devenir les centres d'ondes qui voyagent dans l'éther environnant et peuvent être observées comme de la lumière si la fréquence est suffisamment élevée ; nous pouvons ainsi rendre compte de l'émission de lumière et de chaleur. (8) » Telles sont les bases de l'interprétation physique des phénomènes associée aux équations qui sont destinées à les exprimer et qui sont restées identiques à elles-mêmes au travers des analyses ultérieures. La démarche mathématique a été conservée jusqu'à maintenant dans sa structure initiale. Elle repose sur deux groupes d'équations rapportées ci-dessous, avec les formulations et unités actuellement utilisées.

Equations de MAXWELL - Groupe I

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1), \quad \operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2),$$

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (3), \quad \operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (4).$$

$$\Delta \vec{E} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \frac{1}{\epsilon_0} \operatorname{grad} \rho + \mu_0 \frac{\partial \vec{j}}{\partial t} \quad (5),$$

$$\Delta \vec{B} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = -\mu_0 \operatorname{rot} \vec{j} \quad (6).$$

Les équations 1 à 4 constituent 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*. Les équations 5 et 6 en découlent mathématiquement et permettent d'exprimer séparément les champs \vec{E} et \vec{B} en fonction des charges et des courants. 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.* »

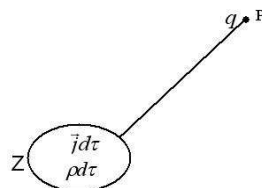
Equations de MAXWELL - Groupe II

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

Pour James Clerk Maxwell comme pour Hendrik Antoon Lorentz, l'analogie des équations 7 et 8 avec celles concernant les phénomènes de propagation des déformations élastiques dans les milieux matériels constitue un cadre dans lequel va se développer l'électromagnétisme : l'éther est supposé explicitement jouer un rôle similaire à celui des milieux matériels. 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 les Expériences de Hertz. Cette interprétation est restée en vigueur jusqu'à maintenant, en particulier pour l'enseignement des bases de l'électromagnétisme. Par exemple, la version française du traité d'*Electrodynamique Classique* de John David Jackson (9) précise : « *Les quatre équations de Maxwell fondent la totalité de l'électrodynamique classique. Combinées avec l'Equation de Lorentz et la deuxième loi de mouvement de Newton, elles fournissent une description complète de la dynamique classique des interactions entre particules chargées et champs électromagnétiques.* »

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 1 et en précisant les données du raisonnement.

Figure 1



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 , excluant le cas où les sources des champs seraient entourées d'un liquide, d'un gaz, d'un plasma ou d'autres sources de champs. Le problème 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 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 la force (Force de Lorentz) à laquelle 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 (potentiels retardés en conséquence des équations de propagation) pour exprimer les champs en fonction de leurs sources.

Revenons à la configuration concernée où, autour de la zone Z contenant charges et courants, il n'y a que le vide dans lequel se trouve le point P et 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 l'avait pas prolongée par le raisonnement qui conduit à établir le groupe 2), on en serait resté 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 alors 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 temps t , au point P , dans le vide où il n'y a ni charge ni courant. 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 les équations du groupe II qui conduisent à formuler des relations différentes concernant les champs \vec{E} et \vec{B} sans que des sources de champs interviennent dans ces équations. (références 10, 11, 12, 13, 14). 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, on exclura que des champs puissent exister s'il n'ont pas de sources et s'il n'y en a jamais eu. Lorsqu'on postule que les Equations de Maxwell dans le vide (groupe II) s'écrivent en annulant ρ et \vec{j} dans les équations du groupe I, 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 elles sont, c'est-à-dire en Z où leur présence les implique dans les équations et où, effectivement, on les annule. Selon les hypothèses de départ, il n'y a de sources de champs 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 fondamentalement différentes de celles 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, face à ce problème, à présenter la situation sous la formulation suivante : « *...in the regions of space where there are no longer any charge or current* (15) ». Cette formulation rejoint ce qui précède : écrire des relations entre les champs, dans ces conditions, impose de supposer que ces champs existent à l'instant où on les prend en considération, mais qu'ils n'ont plus de lien avec les charges et les courants qui les ont engendrés : 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 mathématique 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* (ou un phénomène de nature équivalente) a été introduite subrepticement par le génie de l'auteur de cette opération, au niveau des hypothèses. Le problème se pose alors de savoir comment cette situation se répercute sur l'interprétation de la réalité physique des phénomènes impliqués et sur la validité de cette interprétation.

En résumé, la Théorie de Maxwell et son évolution en Théorie de Lorentz ont prévu l'émission d'ondes électromagnétiques en similitude avec ce qui se passe dans les milieux matériels. Cette interprétation des phénomènes a conduit Albert Einstein à constater qu'elle prévoit une *énergie distribuée de façon continue sur un volume sans cesse croissant*, alors que les analyses théoriques (*catastrophe ultraviolette*, considérations sur l'entropie) et les données expérimentales (effet photoélectrique) imposent de considérer que la lumière est constituée de *quanta d'énergie émis tout d'un bloc et se déplaçant sans se diviser*. Dans le concept maxwellien de la propagation dans un milieu, il n'y a pas de changement de la structure de ce milieu ; dans l'exemple de la Théorie de Lorentz de l'analogie avec l'émission d'ondes sonores par une tige vibrant dans l'air, l'énergie rayonnée passe des molécules de la tige aux molécules de l'air mais le nombre de molécules est inchangé. L'analyse d'Albert Einstein conduit à considérer, dans le cas de la lumière, que des corpuscules sont créés (processus de conversion de l'énergie, confirmé ultérieurement) qui viennent s'ajouter à ceux existant dans l'univers avant l'émission. Ce phénomène est étranger à la Théorie de Maxwell, dans sa formulation initiale. Il est apparu ensuite (Effet Compton, continuité laser-maser,

discontinuité de la détection de l'énergie radiante à très bas niveau de puissance) que le processus de création de particules est à la base du rayonnement électromagnétique depuis les rayons gamma jusqu'aux ondes à très basse fréquence, comme cela avait été anticipé, dès 1924, par Louis de Broglie dans sa thèse, précisément centrée sur les *Recherches sur la Théorie des Quanta* et introduisant la Mécanique Ondulatoire : « 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. (16) » Cette prise de position entre-ouvrait une voie qui n'allait se préciser que très lentement, et cela en conséquence de la façon dont les quanta, mais aussi la théorie de relativité, ont été introduits. Cette voie conduit à considérer que, dans tout le spectre, le rayonnement d'énergie est constitué des particules que sont les quanta, renommés les photons en 1926. Ces particules sont dotées aussi d'un caractère ondulatoire (comme toutes les particules) et, lorsqu'elles sont en très grand nombre, le phénomène physique prend l'apparence d'une onde qui se propage conformément à ce que prévoit la Théorie de Maxwell ; mais elles sont dotées aussi de la caractéristique intrinsèque de se déplacer dans le vide à 300 000 Km/s, dès leur création. Sur ces bases, les développements consécutifs à l'introduction des quanta conduisent à justifier l'analyse présentée ici : l'hypothèse de la propagation faite par James Clerk Maxwell pour développer la *Théorie Electromagnétique de la Lumière* a conduit à une théorie itérative relevant du génie (il n'était pas possible de faire plus et mieux avec les données disponibles à l'époque). Autrement dit, l'introduction des quanta a fait passer l'électromagnétisme du cheminement itératif impliquant des *prémises inexactes* à une interprétation reposant sur des fondements exprimant la réalité physique. Mais initialement, cette réorientation ayant concerné seulement la lumière, une partie de l'électromagnétisme et de la physique ne s'est libérée que progressivement et partiellement de ces *prémises inexactes* masquées par des *résultats valables*, avec les contradictions que cela implique : le travail d'actualisation doit donc se poursuivre.

II. Les Potentiels de Liénard et Wiechert : la réalité sous le génie

Au début du 20^{ème} siècle, les quanta ont constitué une évolution de la Théorie de Maxwell, imposée par les données théoriques et l'expérimentation ; il s'agissait, en la matière, de l'interprétation des processus concernant le rayonnement électromagnétique. A la fin du 19^{ème} siècle, une évolution concernant cette même théorie avait précédé celle des quanta : l'introduction des Potentiels de Liénard et Wiechert. Il s'agissait de la formulation du champ électrique et du champ magnétique des charges en mouvement.

Examinons la façon dont est traité, en particulier au niveau de base pour l'enseignement, l'expression du champ électrique et du champ magnétique d'une charge en mouvement dans le cadre de la Théorie de Maxwell-Lorentz qui considère que « la propagation intervient à partir de tout système qui n'est pas en état statique. » La charge électrique q parcourant la courbe C (figure 2), la théorie postule que le champ électromagnétique en P , à l'instant t lorsque la charge est en M , est entièrement déterminé par son passage

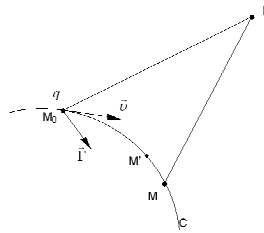


Figure 2

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{I} 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' ou au-delà, la théorie associant au champ de l'énergie et de la quantité de mouvement (voire du moment cinétique).

Lorsque les physiciens ont mené les recherches pré-relativistes dont certaines devaient conduire à la Transformation de Lorentz, ils ont considéré que les relations, issues des Equations de Maxwell, qui permettent de passer des paramètres d'une charge électrique 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 conduits à exprimer les potentiels à partir d'une valeur de la charge affectée d'un coefficient directionnel. Cette démarche a été analysée et détaillée en particulier par Richard Feynman (17). L'idée de base est la suivante : les choses se passent comme si les potentiels, qui permettent d'exprimer les champs lorsque l'on intègre les Equations de Maxwell à partir de charges en mouvement, étaient porteurs de l'information concernant les-dites charges. Lorsqu'une charge est en mouvement, la valeur qu'ils « observent » est différente de ce qu'elle serait pour la même charge au repos. Elle conduit à des expressions des potentiels différentes de celles qui découleraient directement des Equations de Maxwell ; ce sont les Potentiels de Liénard et Wiechert à partir desquels on exprime les champs, quelle que soit la vitesse de la source. Dans ce contexte, l'analyse du cas d'une charge en mouvement rectiligne à vitesse constante devient particulièrement significative. Pour une charge q animée de la vitesse constante v sur l'axe $x'x$, les champs \vec{E} et \vec{B} sont exprimés alors par les relations 9, 10, 11 dans les cas correspondant aux figures 3 et 4 :

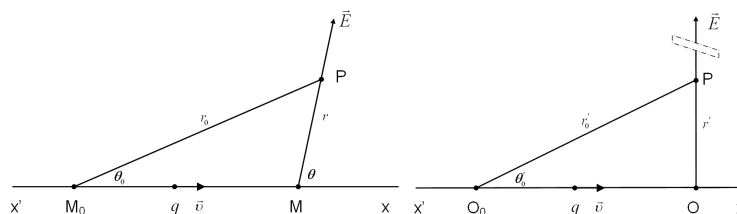


Figure 3

Figure 4

$$\vec{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{r}}{r^3} \frac{1-v^2/c^2}{(1-v^2/c^2 \sin^2 \theta)^{3/2}} \quad (9), \quad \vec{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{r}}{r^3} \frac{1}{(1-v^2/c^2)^{1/2}} \quad (10),$$

$$\vec{B} = \epsilon_0 \mu_0 \vec{v} \wedge \vec{E} \quad (11).$$

Les composantes \vec{E} et \vec{B} du champ (figure 3), pour une valeur donnée de q , sont déterminées par les paramètres liés à la position retardée M_0 : distance M_0P et angle θ_0 . Or, le résultat de la formulation de ces champs présente une particularité : le champ électrique est colinéaire avec la position instantanée de la charge, alors que la théorie le fait dépendre de la position retardée ; les champs \vec{E} et \vec{B} sont orientés comme si l'interaction était instantanée. Cette situation apparaît de façon particulièrement significative lorsque q est en O (figure 4) ; \vec{E} est exprimé par la relation 10, sachant que le lien de cause à effet charge-champ est supposé remonter au point O_0 défini par rapport à O comme M_0 par rapport à M. Le champ électrique est exprimé de la même façon que si la charge était statique en O mais avec un coefficient amplificateur qui est spécifique des effets relativistes.

Revenons sur le cas élémentaire de la charge électrique supposée en mouvement rectiligne uniforme, en considérant l'exemple sur lequel s'appuie Richard Feynman : les particules du rayonnement cosmique (figure 5). Comme indiqué précédemment, 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 ; quoi qu'il ait pu lui arriver après son passage en M_0 , le champ en P à l'instant t n'est pas supposé en subir la conséquence (par exemple immobilisation en M'). Cette situation était sous-jacente dans la Théorie de Maxwell mais elle a été explicitée dans la Théorie

· P

Figure 5



de Lorentz, à partir de l'exemple déjà cité de l'énergie qui passe d'une tige vibrante (en déplacement rectiligne uniforme) à l'air environnant ; si la tige est immobilisée à un instant donné, les actions qu'elle a produites sur l'air vont continuer à se propager en fonction des conditions dans lesquelles elles ont été émises. Connaître le champ électromagnétique en P, c'est connaître l'action que la charge q va exercer sur une charge q' en ce point. Cette action va se concrétiser par une force susceptible de communiquer une accélération à q' donc de lui transférer de l'énergie supposée prélevée sur l'énergie volumique que la théorie associe aux champs ($\epsilon_0 E^2/2$ et $B^2/2\mu_0$). D'où vient cette énergie ? La charge q est considérée comme étant à vitesse constante, elle n'est donc pas susceptible de céder, à l'espace, de l'énergie qui ne lui soit pas liée directement, ce qui serait une forme de rayonnement ; pour qu'une charge émette un rayonnement, il faut qu'elle subisse une accélération, ce qui n'est pas le cas. La charge q' n'émet pas, non plus, d'informations permettant à la charge q de savoir que q' existe. La charge q parvient en M' sans avoir eu la possibilité de céder à l'espace l'énergie que la théorie prévoit qu'elle va lui céder pour transférer à q' . On remarquera que le problème qui se présente pour l'énergie qui ira vers q' se pose aussi pour la quantité de mouvement et, en outre, il peut concerner un nombre illimité de charges telles que q' , réparties dans l'univers. Il apparaît une faille dans la cohérence entre la réalité physique et l'expression qu'en fournit la théorie en cause, telle que décrite ci-dessus.

Revenons au cas concret d'un l'électron dont la vitesse justifie la formulation du champ par les Potentiels de Liénard et Wiechert. Comme indiqué par Richard Feynman, considérons le cas d'un électron e_1 (figure 6),

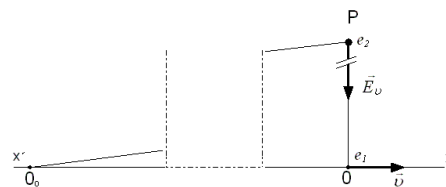


Figure 6

dont la vitesse est très proche de celle de la lumière (par exemple : 360 Gev, $v/c = 1-10^{-12}$). A l'instant où il passe en O, e_1 exerce sur un autre électron e_2 , en P à un kilomètre de O, une force lui communiquant une accélération de 20 g impliquant un transfert d'énergie. Selon la théorie, ce n'est pas le passage en O qui est la cause de cette action, mais le passage à la position retardée O_0 : or, pour les paramètres du cas envisagé, celle-ci est à 700 000 kilomètres en amont de O. Sur ces bases, 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 dans le cas précédent où il avait continué son mouvement l'amenant à passer en O.

Autrement dit, un tel électron immobilisé sur sa trajectoire, pourrait exercer l'action indiquée, à 700 000 kilomètres de son point d'immobilisation et environ deux secondes plus tard (on pourrait prendre d'autres exemples impliquant des milliards de kilomètres). On a pris l'exemple d'un électron e_2 en P, mais il peut y avoir, là encore, un nombre illimité de charges électriques auxquelles e_1 serait susceptible de céder de l'énergie dans des conditions similaires, ce qui apparaît totalement incompatible avec la réalité physique. Cette situation est la conséquence de la dérive (vis-à-vis de la logique) qui, au niveau des Equations de Maxwell, a conduit aux équations de propagation impliquant que les champs électrique et magnétique se détachent de leurs sources. Ultérieurement, les difficultés rencontrées autour de l'interprétation des phénomènes associés à la lumière allaient conduire à amorcer une remise en cause beaucoup plus radicale, avec les quanta, mais les développements qui ont conduit aux Potentiels de Liénard et Wiechert étaient une première conséquence de cette dérive. A l'époque où cette situation est apparue, elle a fortement intrigué les chercheurs : les caractéristiques du champ semblaient conduire vers des interactions instantanées alors que les données de départ impliquaient des interactions retardées par la propagation. L'hypothèse a été exprimée, sans être généralement retenue, que le terme correctif introduit sur la charge *avançait les potentiels*, compensant ainsi le retard supposé dû à la propagation introduit au niveau des fondements de la théorie. L'interprétation classique actuelle correspond à celle indiquée par Richard Feynman (18) en conclusion de son analyse de la démarche qui conduit aux Potentiels de Liénard et Wiechert : la correction sur la valeur de la charge est considérée comme exprimant la réalité physique des phénomènes. Cette démarche rejoint, selon l'interprétation en vigueur, la démarche relativiste : le potentiel scalaire et le potentiel vecteur sont, en fait, les éléments d'un quadri-vecteur et on parvient au même résultat en partant du champ statique de la charge dans le référentiel où elle est immobile et en faisant un changement de référentiel conformément à la Transformation de Lorentz pour exprimer les potentiels et les champs dans le référentiel où la charge est en déplacement. On aboutit ainsi à la conclusion systématiquement admise, selon laquelle les deux démarches expriment identiquement la même réalité physique.

La relativité contribue à apporter un autre cheminement de clarification sur cette situation 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, 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, par les interactions retardées qu'elle suppose, conduit à considérer qu'une charge électrique émet ou n'émet pas un champ tel que défini précédemment, associé à de l'énergie et de la quantité de mouvement selon le référentiel à partir duquel on l'observe. Une telle interprétation ne peut pas être cohérente avec la réalité physique des phénomènes.

Lorsque l'on tient compte, simultanément, du problème que pose la discordance entre la relativité et la théorie quantique (inséparabilité quantique), de l'avis d'Albert Einstein en forme de testament scientifique selon lequel il considère qu'il a privilégié la relativité par rapport aux quanta, et des situations inacceptables résultant de l'analyse autour des Potentiels de Liénard et Wiechert, on est conduit à éradiquer l'intervention de l'éther et de la propagation dans la totalité de l'électromagnétisme, qu'il s'agisse du rayonnement, du couplage ou du lien entre les sources de champs et leurs champs. Dans ce contexte, les Potentiels de Liénard et Wiechert donnent lieu à l'interprétation suivante. Le retard de propagation entre une charge électrique en mouvement et ses champs n'existe pas ; son introduction est la conséquence de l'action de génie qui a permis d'ouvrir la voie de *La Théorie Electromagnétique de la Lumière* alors que la voie de la logique ne le permettait pas. Il n'y a pas lieu d'introduire de correction sur la charge électrique en mouvement ; celle qui a été introduite relève d'une autre action de génie impliquant *l'intuition clairvoyante* qui a permis de compenser l'effet du retard de propagation (qui n'existe pas) et de parvenir là encore, via *des prémisses inexactes*, à des résultats parfaitement exacts.

Ce qui précède conduit à préciser le cheminement par lequel la science passe des prémisses inexactes à l'expression de la réalité physique. En l'occurrence, lorsque l'on a pensé que les Equations de Maxwell ne sont plus valables lorsque la vitesse des particules concernées n'est pas négligeable devant celle de la lumière, cette formulation était ambivalente : en fait les Equations de Maxwell restent pleinement valables mais la démarche s'écarte de la réalité physique dès lors que *les équations de propagation* conduisent à introduire les potentiels retardés. La dérive que recouvre cette démarche n'apparaît pas lorsque la vitesse en cause est faible, mais elle est présente. Les potentiels retardés ont conduit à un cheminement itératif vers l'expression du rayonnement, ils conduisent à s'écarter de l'expression de la réalité physique dans le cas du lien entre une source de champs et ses champs

La situation qui vient d'être évoquée, concernant le champ électromagnétique des charges électriques en mouvement rectiligne uniforme, peut conduire à des expériences clarificatrices décisives (expériences de

pensée et expériences réelles). Considérons la configuration concrète suivante. Une charge électrique quasi-ponctuelle, constituée d'un électron (rayonnement bêta), est émise en M_0 à une vitesse de $0,9c$ (figure 7). 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 supposé émis par la charge pour parcourir M_0P dans sa propagation serait égal au temps mis par la charge pour parcourir M_0N (M_0 est la position retardée). Ainsi,



Figure 7

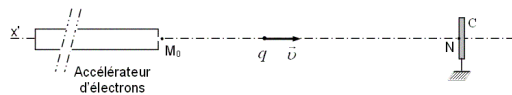


pour le chemin parcouru entre M_0 et N par la charge, son champ supposé émis pendant le parcours parviendrait au centre de la spire après son immobilisation. Or, la charge n'aurait pas cédé d'énergie au profit de la spire pendant ce trajet M_0N et elle ne peut plus en céder après son immobilisation. 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.

Cette configuration peut servir de base pour des expérimentations, qui seraient menées de façon plus souple et avec beaucoup plus de possibilités, en utilisant des charges électriques, des électrons par exemple, émanant d'un canon à électrons ou d'un accélérateur de particules (figure 8). On se place dans la configuration où ces charges électriques restent sous écran jusqu'au point de sortie M_0 à l'instant t_0 , en ne



Figure 8



créant, jusque-là, aucun champ électromagnétique à l'extérieur de l'écran. Ensuite, elles se déplacent dans le vide à une vitesse v proche de c . Ces charges induisent une force électromotrice et un courant dans un circuit conducteur schématisé par une spire S centrée sur le point P , avant d'être immobilisées dans une cible C . Une telle expérience élargit celle prévue avec l'électron du rayonnement bêta, en introduisant la possibilité de faire intervenir et de maîtriser tous les paramètres de l'interaction.

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 champs et ses champs : lien instantané ou retardé ? Les détecteurs de champs électrique et magnétique sont aussi pleinement appropriés en l'occurrence, pour l'expérimentation.

L'interaction évoquée dans les exemples précédents 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 (Albert Einstein), qui permet le prélèvement, sur le primaire, de l'énergie qui se retrouve au secondaire ; cette interaction ne peut pas intervenir dans les cas qui viennent d'être considérés si la propagation tient la place prévue par la théorie en vigueur. On notera aussi que ces expériences-pilotes ont été présentées comme des interactions 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 précisera, pour 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 de la circulation du champ électrique sur son contour.

III. Quanta et Relativité : accords et contradictions

Dans le premier chapitre, on a constaté que la théorie de Maxwell avait fait avancer la physique en s'appuyant sur des prémisses qui, à terme, ont été contredites par l'expérience ; ainsi, l'expérience confirme que la démarche qui conduit à la prévision des ondes électromagnétiques relève du génie et non de la logique. Cette démarche ne conduit pas cependant à un résultat inexact mais elle conduit à exprimer autre chose que ce que l'on attendait d'elle et qui est exact : elle exprime l'aspect statistique des phénomènes alors qu'elle a été considérée initialement comme exprimant leur réalité physique. L'éther, et la propagation qui lui est associée, ont constitué *les prémisses inexactes* conduisant à supposer que l'énergie radiante est distribuée de façon continue dans l'espace. La clarification recherchée ici conduit à analyser les différentes phases de l'évolution dans laquelle cette situation a été impliquée.

Face aux difficultés d'interprétation de l'émission de la lumière dans le cadre de la Théorie de Maxwell, Max Planck avait introduit le concept de quanta en 1900, mais sa quantification n'intervenait qu'au niveau de la conversion de l'énergie, essentiellement thermique (corps noir), en énergie lumineuse et plus généralement du rayonnement des atomes ionisés, et au niveau du phénomène inverse d'absorption de ces rayonnements.

L'article introduisant les quanta-corpuscules en mai 1905 est présenté sous le titre « *Sur un Point de Vue Heuristique Concernant l'Emission et la Transformation de la Lumière.* » En élargissant le concept des quanta développé par Max Planck, Albert Einstein dissocie, de la Théorie de Maxwell, l'interprétation de l'émission de lumière : comme cela a déjà été mentionné au premier chapitre, il observe que cette théorie prévoit « *une énergie distribuée de façon continue sur un volume sans cesse croissant* », alors que les éléments théoriques disponibles, confirmés par l'expérimentation, conduisent à considérer que la lumière est constituée de « *quanta d'énergie émis ou absorbés tout d'un bloc et se déplaçant sans se diviser.* » Il ajoute la précision suivante: « *Les fondements dont nous sommes partis (il s'agit la Théorie de Maxwell) sont d'autant plus appropriés que la densité d'énergie et la longueur d'onde sont plus grandes; ils sont complètement inopérants pour de faibles densités d'énergie et de petites longueurs d'onde.* » En même temps que cette remarque ouvre la voie des quanta vers les rayons X et gamma (l'Effet Compton illustrera et confirmera leur réalité corpusculaire), l'ensemble de la démarche les exclut implicitement du rayonnement hertzien. Effectivement, la Théorie de Maxwell s'avère tellement *appropriée* pour formuler l'émission radioélectrique (où *les longueurs d'onde et les densités d'énergie usuelles sont grandes*) que les quanta ne vont pas s'y introduire en même temps que dans la lumière ; ce n'est que beaucoup plus tard qu'il apparaîtra qu'ils y ont la même place, pour ce qui concerne la réalité physique des phénomènes. En fait, les quanta dans l'ensemble du spectre, c'est l'intervention d'un tout autre phénomène physique que celui de la *propagation dans l'éther*, c'est l'intervention du phénomène de création de particules imaginé par la prodigieuse capacité d'anticipation d'Albert Einstein, mais étrangère aux modes de pensée de l'époque. Il faudra attendre les avancées théoriques et expérimentales durant plus de deux décennies pour que le processus de création de particules soit vraiment intégré dans les concepts de la physique. Cette évolution correspond aussi à l'élimination des fondements de la Théorie de Maxwell et de ce qui l'a conduit au succès de la découverte des ondes électromagnétiques. Après l'introduction des quanta dans la lumière, il avait été supposé implicitement que la propagation restait le mode d'émission de l'énergie dans le domaine radioélectrique (le champ se détachant de ses sources). Cette situation posait des problèmes considérables qui sont restés dans le non-dit, tant ils étaient embarrassants pour la communauté scientifique : dans le prolongement des Expériences de Hertz, les expérimentations avaient vérifié la continuité des ondes produites de façon électrique depuis les longueurs d'onde kilométriques jusqu'aux longueurs d'onde micrométriques, mettant en évidence l'unicité de l'ensemble du domaine concerné avec l'infrarouge et la lumière. La limitation, à la lumière, des quanta einsteiniens laissait supposer que l'on pouvait trouver de l'énergie électromagnétique radiante sous deux formes différentes dans l'espace, l'une sous forme continue, l'autre sous forme discontinue. L'introduction de la théorie de la relativité, quelques semaines après celle des quanta, allait obscurcir encore davantage la situation.

Après avoir introduit la relativité en l'ancrant sur la Théorie de Maxwell dans une démarche qui sera analysée plus loin, Albert Einstein s'écarte aussitôt de cette théorie en considérant que *l'éther luminifère apparaît superflu*. Cela paraît totalement cohérent avec les quanta qu'il vient d'introduire, corpuscules dotés de la propriété intrinsèque de *se déplacer* dans le vide ou la matière transparente au lieu et place des ondes qui étaient supposées *se propager dans l'éther*. On a vu que la Théorie de Lorentz prévoyait qu'un électron en mouvement accéléré est *la source d'ondes qui peuvent appartenir au domaine de la lumière si la fréquence est suffisamment élevée* : à partir de cette interprétation, il y a peu de chemin à parcourir pour que l'électron devienne la source de quanta qui, en très grand nombre, produisent les mêmes effets qu'une onde. Mais, concernant l'élaboration de la relativité et du texte établissant l'équivalence masse-énergie,

Albert Einstein indique : «*J'ai basé cette recherche sur les Équations de Maxwell-Hertz pour l'espace vide ainsi que sur l'expression maxwellienne de l'énergie électromagnétique de l'espace.*» Ces références aux Equations de Maxwell-Hertz et à l'expression maxwellienne de l'énergie replonge l'électromagnétisme dans ce qui a servi de fondement à la Théorie de Maxwell : l'éther et la propagation. Dans le cheminement du texte relativiste, la lumière est omniprésente et intervient sous ses différents aspects, particulièrement par sa vitesse, mais elle est considérée exclusivement sous sa forme ondulatoire. Quelques semaines plus tôt, la lumière venait d'être dissociée de la Théorie de Maxwell, précisément parce qu'elle était incompatible avec cette théorie, au niveau de la distribution de l'énergie ; or, le texte introduisant la relativité est présenté sans aucune référence aux quanta, comme si ce concept n'avait jamais existé, ni même effleuré l'esprit de leur auteur. Une dizaine d'années plus tard, la position n'a pas changé : dans le texte introduisant la relativité générale, on observe le rapprochement entre «*le tenseur des composantes-énergie du champ électromagnétique* » et «*les expressions bien connues de Maxwell-Poynting dans la relativité restreinte.* » Ainsi, les quanta ont été élaborés comme si la relativité ne devait pas exister et la relativité a été élaborée comme si les quanta n'existaient pas. L'*éther luminifère* qui devient *superflu* symbolise la difficulté qui émerge : il n'y aurait pas d'éther intervenant dans l'interprétation de la lumière, mais il faudrait le conserver dans le domaine des ondes hertziennes..... ? C'était tout un ensemble de problèmes sous-jacents, mais difficiles à définir qui surgissait avec cette remise en cause du fondement de la théorie électromagnétique. La rupture de l'unicité de structure du rayonnement électromagnétique avait été mal vécue par la communauté scientifique de l'époque parce que le brillant ensemble conceptuel, auquel la physique était parvenue grâce à la Théorie de Maxwell, se fissurait : Max Planck lui-même considérait sa théorie comme *un acte de désespoir*, faute de mieux ; Albert Einstein ne s'engageait qu'avec circonspection dans la voie des quanta-corpuscules qu'il avait ouverte et, quatre ans après les avoir introduits, il affirmait sa conviction que «*l'on aboutira à une théorie de la lumière que l'on pourra interpréter comme une sorte de fusion de la théorie ondulatoire et de celle des corpuscules* (19). » En fait, la rupture de l'unicité du processus d'émission de l'énergie électromagnétique allait susciter diverses tentatives de réunification : initialement, la structure quantique, qui avait été introduite dans la lumière est apparue comme une anomalie, alors que, progressivement, elle allait devenir transposable à l'ensemble de l'électromagnétisme, tout en évoluant profondément. On a vu, précédemment, la prise de position de Louis de Broglie en faveur de la structure discontinue de l'énergie radiante et du caractère statistique de la Théorie de Maxwell.

En fait, on est là au cœur d'une situation de contradictions qui va marquer la suite du développement de la physique. On est aussi aux racines de la discordance qui oppose les quanta à la relativité, ce qui conduit à analyser tous les aspects de la situation, y compris ce qui peut se passer dans les processus intellectuels qui ont mené à cette évolution. La théorie des quanta-corpuscules et la théorie de la relativité ont été introduites à quelques semaines d'intervalle. Cela implique que l'élaboration des éléments de ces théories se soit faite simultanément, mais la nature des problèmes était très différente. La relativité a fait l'objet d'un très long mûrissement alors que les quanta-corpuscules relevaient plutôt de l'éclair de génie (anticipation du processus de création de particules autour de l'effet photoélectrique, par exemple). Albert Einstein a apporté la contribution juste nécessaire pour débloquer la situation (ce qui était déjà considérable) afin de pouvoir retourner ensuite à ses thèmes majeurs : la relativité restreinte, la relativité générale, la théorie unitaire. Cela peut expliquer le qualificatif *heuristique* qu'il a utilisé dans le titre de son article sur les quanta : il a ouvert la voie, laissant, aux autres acteurs, la charge de prendre la suite. En 1917, encore dans un éclair de génie, il imaginait le concept d'émission stimulée ; en 1954, le premier maser développé sur ce concept entraînait en fonctionnement et il allait être suivi par le développement du laser. La continuité des phénomènes laser-maser mettait en évidence la structure quantique des rayonnements dans le domaine des radiofréquences, comme l'effet photoélectrique avait mis en évidence la structure quantique de la lumière : c'est à dire lorsque l'énergie unitaire des photons devient des millions ou des milliards de fois plus faible. Cette continuité apparaît d'ailleurs sous d'autres formes : continuité du rayonnement synchrotron depuis les rayons X jusqu'aux radiofréquences dans les accélérateurs de particules et dans l'espace (particules électriquement chargées accélérées dans un champ magnétique), détection de l'énergie radioélectrique à faible niveau de puissance faisant apparaître la discontinuité quantique.

Ainsi, les raisons qui avaient conduit à dissocier la lumière de la Théorie de Maxwell s'avèrent-elles tout aussi valables pour l'ensemble du spectre électromagnétique, depuis les rayons gamma jusqu'aux ondes radioélectriques à très basse fréquence. Cette prise de conscience s'est faite très progressivement (et peut-être partiellement) ; de plus, la dérive vis-à-vis de la logique dans le processus physico-mathématique conduisant aux *équations de propagation du champ électromagnétique* ne semble pas avoir pas été perçue jusqu'à maintenant. La conséquence : la démarche maxwellienne conduisant au rayonnement d'énergie électromagnétique a continué à apparaître valable alors que la réalité physique des quanta exclut totalement la possibilité d'interpréter le rayonnement via la propagation du champ électromagnétique se détachant de ses sources, associé à de l'énergie, de la quantité de mouvement et du moment cinétique. De ce fait, certains aspects de la réalité physique des photons, essentiels à la compréhension des phénomènes, se sont trouvés masqués.

La continuité de la réalité quantique de l'énergie radiante s'étant trouvée établie, les manifestations physiques de la présence des photons vont évidemment être très différentes selon que l'énergie unitaire implique des milliers de Mev ou d'infimes fractions d'électron-volt. Un photon gamma d'énergie suffisante va être capable, après s'être déplacé dans l'immensité du cosmos *sans se diviser*, de créer un électron et un positron ; un photon ultraviolet va être capable d'arracher un électron d'un métal ; un photon unitaire d'une émission à très basse fréquence ne sera pas capable de déclencher une action observable dans les conditions classiques ; il faudra que les photons de cette nature soient en très grand nombre pour que leur action cumulée permette de les détecter sous l'apparence d'une onde maxwellienne. Mais il y a une caractéristique commune : lorsque les photons d'une émission à très basse fréquence se sont suffisamment éloignés de leur source et que la distance les a séparés les uns des autres, entre eux il n'y a que le vide et, sur ce point, leur caractère unitaire est identique à celui des rayons gamma. Or cela est en contradiction avec l'énergie *distribuée de façon continue sur un volume croissant*, telle que la Théorie de Maxwell (ou la Théorie de Maxwell-Lorentz) la prévoit dans le processus de rayonnement.

Le rayonnement d'énergie est constitué par les particules que sont les photons qui, d'un côté peuvent être très approximativement comparées à des projectiles, mais de l'autre, comportent une caractéristique ondulatoire. Cette caractéristique ondulatoire, comme l'a démontré Louis de Broglie, est commune à toutes les particules, mais elle est plus significative pour le photon et cela d'autant plus que l'énergie unitaire est plus faible, donc la longueur d'onde plus grande ; dans le domaine du spectre visible, les deux caractéristiques, ondulatoire et corpusculaire, apparaissent aussi nettement l'une que l'autre : le caractère corpusculaire avec l'effet photoélectrique, le caractère ondulatoire avec la sensibilité de la rétine aux couleurs. Lorsqu'ils sont en très grand nombre, et plus particulièrement quand ils sont émis en cohérence de phase et de polarisation, ces projectiles se comportent comme une onde dont l'énergie semble distribuée de façon continue dans l'espace.

Le présent travail a fait apparaître que le génie de James Clerk Maxwell a pris la place de la logique quand celle-ci ne pouvait pas faire avancer les choses. Hommage étant rendu au génie, la logique peut et doit reprendre sa place avec les conséquences qui en découlent. Le rayonnement d'énergie électromagnétique s'insère dans le cadre des phénomènes de matérialisation-dématérialisation : l'énergie se convertit en particules et vice versa. Pour bien caractériser le phénomène au niveau fondamental, on peut prendre l'exemple du proton qui, doté d'une énergie cinétique suffisante et intercepté sur une cible, donne naissance à une paire de particules, proton-antiproton ; dans le cas du photon, particule beaucoup plus subtile que le proton (il est à la fois la particule et l'antiparticule), il est créé (sauf rayons gamma) aux dépens de l'énergie d'une particule électriquement chargée lorsque celle-ci subit une accélération (positive ou négative) de niveau suffisant. L'introduction des quanta a conduit directement à des développements dont l'impact a été considérable : la Mécanique Ondulatoire de Louis de Broglie avec sa thèse *Recherches sur la Théorie des Quanta*, la Mécanique des Matrices de Werner Heisenberg, L'Equation de Schrödinger, exprimant et extrapolant le contenu de la Mécanique Ondulatoire et rejoignant la Mécanique des Matrices. Dans ces développements, le rayonnement d'énergie électromagnétique n'a rien de commun, en ce qui concerne la réalité physique des phénomènes, avec la propagation des déformations élastiques dans un milieu matériel ; par contre, on retrouve une similitude au niveau de l'aspect statistique des phénomènes. Dans cette voie de travail, où l'éther et la propagation sont éliminés, rien ne peut introduire de retard entre le mouvement d'une source de champs et ses champs : on a donc des interactions instantanées au travers de l'espace et la discordance entre la théorie quantique et la relativité est éliminée. En l'état actuel des choses, une telle affirmation est nécessairement iconoclaste, elle conduit à *une rupture épistémologique* et c'est la seule voie qui peut éliminer l'anomalie liée à l'inséparabilité quantique ; évidemment, elle implique la vérification expérimentale. Cela nous ramène aux Expériences de Hertz : à l'époque, on a considéré qu'elles vérifiaient la Théorie de Maxwell, en fait, elles vérifiaient la réalité du rayonnement d'énergie. Dès lors que le rayonnement d'énergie relève du processus de création de particules aux dépens de l'énergie électromagnétique, il restait à vérifier si la propagation intervient dans les interactions de couplage et cela n'a jamais été fait. Il apparaît maintenant que tel n'est pas le cas.

Pour ce qui relève de la radioélectricité, l'évolution de la théorie électromagnétique, au travers des contradictions qui viennent d'être évoquées, n'a pas conduit à une interprétation de la réalité physique aussi claire que celle qui a été associée à la lumière. Tout se passe comme si on s'était contenté de la Théorie de Maxwell, considérée comme vérifiée par les Expériences de Hertz, avec une évolution conduisant au processus qui relève de l'électrodynamique quantique, mais inaccessible à l'interprétation intellectuelle directe. L'interprétation suivante est proposée ici. 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 une pression alternativement positive et négative contre la barrière de potentiel. Dans ce mouvement oscillant, ils subissent une accélération alternative et ils émettent des photons (ils ne peuvent pas ne pas rayonner), en cohérence de phase et de

polarisation, sur la fréquence d'oscillation. Dans les cas classiques, le très grand nombre des photons émis a pour conséquence, comme indiqué précédemment, 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*.

Ce que l'on a vu dans les chapitres précédents nous oriente vers l'hypothèse que la propagation associée à l'éther n'a pas sa place en physique. Le champ électromagnétique porté par les photons n'a rien de commun avec la propagation, si ce n'est l'aspect statistique des phénomènes. Mais si les interactions de couplage ne passent pas par la propagation, on est conduit à l'hypothèse qu'elles deviennent instantanées. Or, c'est parce qu'il a cru que la propagation excluait les interactions instantanées qu'Albert Einstein a remis en cause la simultanéité classique, imaginé la synchronisation des horloges par des signaux lumineux et, finalement, développé la relativité restreinte telle que nous la connaissons, avec son adéquation à des pans entiers de la réalité physique : les prémisses inexactes ont conduit indirectement à des conséquences positives, décisives, considérables..... !

IV. Les racines de la relativité : au cœur du problème

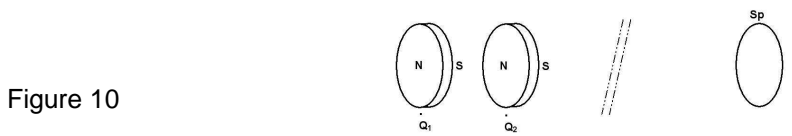
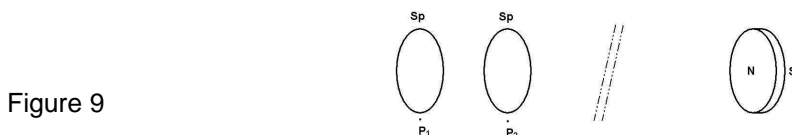
On se trouve ainsi confronté à un ensemble de situations ambivalentes qui suggèrent de retourner vers les racines profondes de la relativité restreinte telles qu'elles apparaissent dans les premières lignes du texte *Sur l'Electrodynamique des Corps en Mouvement* présentant cette théorie et rapportées ci-après.

« 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. »

Après avoir présenté ainsi le point de départ de sa démarche vers la relativité, Albert Einstein réinterprète la notion de simultanéité, introduit la relativité des longueurs et des temps et montre qu'un changement de référentiel, sur la base de la Transformation de Lorentz, conserve la forme des relations entre le champ électrique et le champ magnétique ; il en conclut que « *la dissymétrie mentionnée disparaît ainsi.* » Il considère qu'il a démontré que le mouvement de l'aimant par rapport au conducteur est identique, dans la théorie comme dans la réalité physique, au mouvement du conducteur par rapport à l'aimant. Autrement dit, dans la réalité physique, il y a un seul phénomène observable : pour un cas, dans un système de référence où l'aimant est immobile, pour l'autre cas, dans un système de référence où le conducteur est immobile.

Lorsque le circuit conducteur est déplacé, la théorie de l'électromagnétisme relativiste (Théorie de Maxwell-Lorentz réinterprétée dans le cadre de la relativité restreinte) conduit à considérer qu'il s'agit d'une interaction instantanée, la conversion et le transfert d'énergie étant concomitants avec le mouvement du conducteur ; la théorie se situe ainsi dans l'interprétation du phénomène de l'induction, telle qu'elle était lors de sa découverte. Lorsque l'aimant est déplacé, dans le même mouvement relatif, la même théorie actuelle de l'électromagnétisme relativiste interprète le processus en cause comme une interaction retardée, le phénomène supposé de *propagation du champ à la vitesse c* introduisant un retard dans le transfert de l'énergie de l'aimant au conducteur et, ipso facto, dans la conversion d'énergie mécanique en énergie électrique. Cette théorie se situe ainsi dans le prolongement de l'électromagnétisme maxwellien qui fait apparaître le champ électrique et le champ magnétique dans des équations de propagation.

Face à cette situation, et dès lors que l'auteur de la relativité et des quanta a cru utile d'attirer l'attention sur une possible divergence de ses propres théories vis à vis de la réalité physique, il n'est pas possible d'ignorer une contradiction d'une telle ampleur : une clarification s'impose, en tout état de cause. On va s'efforcer d'amorcer cette clarification en s'appuyant, au niveau expérimental, sur les interactions auxquelles il est fait référence. On considère deux expériences menées simultanément. Dans l'une, un circuit conducteur représenté sur le schéma de la figure 9 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 qui correspond 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.* Analysons, point par point, les processus selon lesquels la théorie électromagnétique interprète l'interaction concernée.

Cas du mouvement du circuit. Dès que celui-ci subit un changement de position, il y a variation de la distance circuit-aimant, variation du flux du champ magnétique au travers du circuit, donc force électromotrice et courant induits. L'énergie présente dans la spire est prélevée sur le travail de la force appliquée pour la déplacer (ou sur son énergie cinétique, ou sur l'un et sur l'autre) ; il y a simplement conversion de l'énergie d'origine mécanique en énergie électrique, sans que cette énergie transite au travers de l'espace puisqu'elle est liée à la spire : la théorie prévoit donc que la conversion de l'énergie et son transfert à la spire sont concomitants avec son mouvement, quelle que soit la distance entre les deux éléments et même si cette distance tend vers l'infini. De façon similaire, à l'instant où la spire est immobilisée, la force électromotrice s'annule.

Cas du mouvement de l'aimant. Le champ magnétique au niveau de la spire (figure 10) évolue en fonction de la variation de la distance aimant-spire et il en résulte une force électromotrice, donc un courant dans la spire ; mais, selon la théorie (aussi bien dans le cadre maxwellien que dans le cadre relativiste), la variation du champ magnétique au niveau de la spire n'intervient qu'après sa propagation supposée. L'énergie correspondant au courant induit ne peut être prélevée que sur le travail de la force appliquée à l'aimant pour le déplacer ; l'énergie mécanique est convertie en énergie électrique en même temps qu'elle est transférée de l'aimant à la spire au travers de l'espace. On impute généralement à la relativité l'impossibilité d'interactions instantanées, la vitesse de la lumière étant considérée comme une vitesse limite qui s'appliquerait en l'occurrence au transfert de l'énergie de l'aimant à la spire. En réalité, la racine du caractère supposé retardé de cette interaction remonte à la Théorie de Maxwell qui a fait apparaître le champ électrique et le champ magnétique dans des *équations de propagation*. Ce concept s'est trouvé enraciné dans la physique par la relativité restreinte développée en symbiose avec la Théorie de Maxwell. C'est sur cette base que la théorie électromagnétique actuelle interprète les phénomènes liés à l'action d'un aimant en mouvement sur un circuit conducteur, ce qui est le cas de la présente analyse. A partir de l'instant où l'aimant quitte la position de repos, l'évolution du champ magnétique dans l'espace est supposée retardée par un délai *de propagation*, à la vitesse c , de ce champ jusqu'à la spire ; l'établissement de la force électromotrice dans la spire se trouve donc retardé par ce délai par rapport à l'instant de mise en mouvement de l'aimant (par exemple pour une distance de 30 centimètres, le retard serait de une nanoseconde). Un délai *de propagation* est supposé intervenir, de façon similaire, pour le champ du courant induit en retour vers l'aimant. C'est seulement alors que *l'action électrodynamique réciproque* pourrait intervenir pour provoquer le prélèvement d'énergie au niveau de l'aimant ; mais selon la même théorie, l'énergie prélevée ainsi ne peut être transférée au circuit qu'avec un nouveau délai *de propagation*. **Ces trois retards successifs (chacun tendant vers l'infini avec la distance), font percevoir, dans le cas concerné, la dissymétrie résultant de la propagation, entre le cas du mouvement du circuit et celui du mouvement de l'aimant.**

L'analyse précédente peut être utilement étendue à l'anomalie que la théorie en vigueur fait surgir entre *la propagation* et *les lois de conservation*. L'aimant étant mis en mouvement à un instant donné de façon à faire varier la distance aimant-circuit, la variation du champ magnétique est supposée atteindre le circuit après le délai *de propagation* comme indiqué précédemment : elle y induit un courant donc de l'énergie qui n'a pas de source avant la fin de l'ensemble des phases *de propagation des champs et de l'énergie*, puisque *l'action électrodynamique réciproque* ne peut pas intervenir avant cet instant. Plaçons-nous, par exemple, dans la configuration où, lorsque le champ du courant induit parviendrait, en retour, à l'aimant, celui-ci serait *revenu* à l'état de repos, ou serait démagnétisé, ou serait détruit : l'énergie développée dans le circuit (qui, en tout état de cause, aurait subi une variation du champ magnétique, selon la théorie) ne pourrait plus jamais avoir de source.

Les lois de conservation impliquent une autre facette de la réalité physique : la conservation de la quantité de mouvement qui passe par l'égalité de l'action et de la réaction. Dans les réflexions pré-relativistes, la référence terrestre a parfois suscité, inconsciemment, l'idée fautive d'un référentiel absolu. L'analyse des interactions dans l'espace extraterrestre peut aider à s'en affranchir. Dans le principe, la théorie électromagnétique prévoit que la réaction est retardée vis à vis de l'action par un délai qui tend vers l'infini lorsque la distance entre les éléments tend vers l'infini. C'est l'autre facette de l'incompatibilité mentionnée au niveau de l'énergie dans le cas de l'aimant en mouvement ; l'incompatibilité de *la propagation* avec la réalité physique concerne la conservation de la quantité de mouvement et l'égalité action-réaction aussi bien dans le cas du circuit en mouvement que dans le cas de l'aimant en mouvement.

Considérons l'interaction aimant-conducteur dans l'espace extra-terrestre : l'une des racines de la démarche einsteinienne prévoit que « *les phénomènes de l'électrodynamique aussi bien que ceux de la mécanique ne possèdent aucune propriété correspondant à l'idée de repos absolu* : sauf à entrer dans une nouvelle contradiction, il devient impossible de considérer que l'aimant est *immobile* ou *en mouvement*, donc de considérer qu'il est la source d'un champ qui se propage *parce qu'il est en mouvement* ; transposer

l'interaction dans un laboratoire terrestre ne change rien à cette réalité. Si on observe un aimant dans son référentiel propre (dans lequel il est au repos), son champ n'est pas supposé se propager ; le même aimant, dans les mêmes conditions, s'il est observé à partir d'un autre référentiel en mouvement par rapport au premier, va apparaître en mouvement et, de ce seul fait, il serait la source d'un champ *en propagation*, porteur d'actions retardées ; autrement dit, il est supposé *émettre son champ* simplement parce qu'il est observé dans un référentiel différent de son référentiel propre : c'est encore un aspect, parmi d'autres, de la contradiction évoquée précédemment.

On est là en présence d'un faisceau d'indices qui, tous, orientent la réflexion dans la même direction : pour que le principe fondateur de la relativité einsteinienne soit respecté, la conversion d'énergie mécanique en énergie électrique et le transfert de cette énergie ne peuvent être qu'instantanés dans les deux cas. Telles sont les conclusions des présentes recherches qui conduisent à prévoir que l'établissement de la force électromotrice induite dans le circuit, et l'établissement du courant auquel elle donne naissance, sont concomitants avec le mouvement de l'aimant ; c'est à dire que le transfert d'énergie, au travers de l'espace, dans une interaction de couplage de cette nature, est instantané. La vérification expérimentale la plus significative et la plus décisive, en toute première étape, pourrait porter précisément sur les modalités spatio-temporelles de l'interaction d'un aimant en mouvement et d'un circuit conducteur ; elle conduira à se placer dans des conditions qui permettront d'actualiser la relativité et le concept d'espace-temps sur une base expérimentale dont ils ne pouvaient pas disposer lors de leur élaboration. En réalité, on retrouve là un autre aspect du sujet qui a été évoqué avec le cas de la charge en mouvement rectiligne uniforme. Le problème de base est celui de la façon dont les champs, électrique, magnétique, gravitationnel sont liés à leurs sources : lien instantané ou lien retardé par la propagation. Pour résumer, dans le cadre des présentes recherches, une charge accélérée avec un niveau suffisant d'accélération émet un champ électromagnétique constitué de photons dotés de la propriété intrinsèque de se déplacer à 300 000 Km/s dans le vide, c'est le champ de rayonnement. Indépendamment de ce rayonnement et/ou lorsque les conditions ne sont pas réunies pour qu'il y ait rayonnement, les champs des charges, des courants, des aimants sont solidaires, instantanément, de leurs sources.

Le concept de propagation, qui concerne le champ de l'aimant en déplacement et aussi le principe d'action et de réaction, n'est cohérent ni avec l'expérience introduisant la relativité, ni avec la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement. Des expériences simples devraient permettre de confirmer cette analyse. Qu'il s'agisse de la recherche ou de l'enseignement, il n'est pas imaginable qu'une telle situation reste sans clarification alors que le problème de la discordance entre la relativité et la théorie quantique reste à résoudre et que la voie présentée ici semble susceptible de l'éliminer : **non seulement la relativité cesse d'être incompatible avec l'instantanéité des interactions au travers de l'espace, mais elle l'implique dans le cas des interactions de couplage. L'élimination du concept de propagation, liée en fait à l'élimination de l'éther, conduit à une réinterprétation de l'espace-temps : il doit être associé à une structure physique (et non seulement géométrique) présentant un caractère de dualité.**

Il est surprenant que des anomalies aussi considérables n'aient pas contribué plutôt à ouvrir une voie de recherches, alors même que la discordance relativité-quanta suscite l'éventuelle nécessité d'une rupture épistémologique. Il y a deux raisons à cela. La première : les avancées liées à la relativité et à la théorie quantique (dans ses différentes composantes) ont imposé de se détacher des modes de raisonnement habituels où la réflexion, le bon sens, les images évocatrices constituaient des socles utiles ; ces modes de raisonnement ne sont plus systématiquement valables : ils vont souvent à contre-courant de la réalité physique, alors que les formalismes mathématiques, subtils et abstraits, deviennent les vraies sources de l'efficacité de la recherche. La seconde : les succès extraordinaires remportés précisément par la mise en œuvre de ces formalismes ont conduit à apporter une confiance exclusive dans les hypothèses de départ. Dans un tel contexte, on ne peut pas exclure la nécessité de remises en cause conduisant à des *ruptures épistémologiques* comme ce fut le cas, il y a un siècle, après l'éblouissement dû à la Théorie de Maxwell, supposée *vérifiée* par les Expérience de Hertz.

La discordance entre les phénomènes relevant de l'inséparabilité quantique et la relativité est entourée d'une part d'incertitude : ces phénomènes semblent manifester une forme d'instantanéité de l'interaction à distance, mais il n'y a pas de transfert d'énergie, ce qui laisse la possibilité d'un doute concernant l'incompatibilité avec la relativité. Par contre, on dispose d'expériences où un problème similaire surgit et où le déplacement instantané d'énergie au travers de l'espace semble devoir être pris en compte inéluctablement ; c'est le cas des interférences, en particulier lorsqu'elles sont réalisées photon par photon, en utilisant l'Interféromètre de Michelson.

Considérons le montage interférentiel de la figure 11 et récapitulons sommairement ce qui se passe en commençant par le cas d'un faisceau lumineux constitué d'un très grand nombre de photons émanant de la

source S. Ce faisceau est séparé sur la lame semi-transparente L1 en deux composantes F1, F2 qui convergent sur la lame L2. Celle-ci effectue une nouvelle séparation vers les détecteurs D1 et D2. A partir de la séparation des faisceaux sur L1, on peut introduire un retard de phase entre eux à l'arrivée sur L2. et

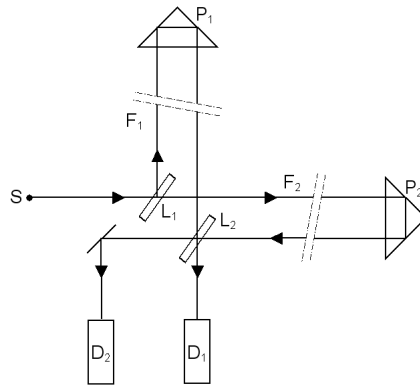


Figure 11

on peut faire en sorte que, s'ils sont en phase sur D1, ils soient en opposition de phase sur D2 et vice-versa.

...Dans ces conditions, en faisceau lumineux classique, on détecte la lumière sur le détecteur où il y a concordance de phase et rien sur l'autre. Si on réduit l'intensité du flux pour avoir une émission unitaire de photons, sans changer les parcours F1 et F2, les photons arrivent un par un, sur le même détecteur que précédemment, celui sur lequel les durées des trajets sur chaque voie font que les ondes sont en phase ; il n'arrive rien sur celui où les ondes seraient en opposition de phase si elles y parvenaient. Si on fait varier progressivement le déphasage, le nombre des détections, dans un temps donné, va décroître jusqu'à zéro sur l'un des détecteurs pendant qu'il va croître jusqu'au maximum sur l'autre.

L'interprétation des phénomènes conduit à l'analyse suivante. La mise en convergence des deux voies montre que le photon unitaire a bien été séparé en deux composantes puisque l'interférence dépend, des durées des trajets sur l'une et sur l'autre voie, l'énergie du photon se trouvant également séparée en deux parties associées à chaque composante ; il doit être entendu que le sens que l'on peut donner aux termes séparation et composantes est à considérer avec circonspection, mais il n'est pas possible de clarifier sans utiliser les modes de raisonnement dont on dispose. Cela étant, si on intercepte les faisceaux F1 et F2, en cours de trajet, c'est le photon dans son intégralité qui est détecté en cédant la totalité de son énergie et de sa quantité de mouvement sur un seul détecteur, en un seul point et en un seul instant ; les deux moitiés de l'énergie ont donc traversé instantanément l'espace qui les séparait. Ce comportement du photon a été mentionné par Alfred Kastler comme un des éléments qui l'ont incité à donner, à l'ouvrage où il présente cette expérience, le titre : *Cette Étrange Matière* (20). Richard Feynman aussi a mentionné le caractère hors norme du phénomène des interférences vis-à-vis des connaissances acquises.

Si, jusqu'à présent, les situations qui ont été évoquées dans les chapitres précédents n'ont pas été considérées comme des anomalies, celles relevant des interférences ont soulevé des interrogations multiples.

L'amorce de l'évolution intellectuelle qui va amener Albert Einstein à douter de la validité des pistes qu'il a suivies apparaît lors de sa conférence de Leyde en 1920. Il s'est trouvé confronté au problème suivant : dans la théorie de la relativité générale, le champ gravitationnel est supposé se propager (comme tous les autres champs) pour tout changement d'état des sources. Or, dans le texte sur la relativité restreinte, il a exclu l'éther luminifère (avec l'ambivalence qui en résultait pour les domaines hors lumière) alors que le concept de propagation n'a de sens qu'associé au concept de milieu dont les déformations, concernant une zone puis la suivante, constituent la propagation : la question sous-jacente était dans tous les esprits, où s'arrête la lumière : quid au-delà de l'ultraviolet et de l'infrarouge ? Jusqu'où va l'éther luminifère ? Il est alors conduit à préciser « *Selon la théorie de la relativité générale, un espace sans éther est inconcevable.* » Mais le plus important est sa conclusion où il amorce un changement d'orientation : « *Nous ne devons pas, en outre, en pensant au proche avenir de la physique théorique, écarter, sans autre façon, la possibilité que les faits accumulés par la théorie des quanta pourraient dresser, devant la théorie du champ, des limites infranchissables.* » Nous y sommes. En 1920, on était encore très loin de ce qu'allait nous apprendre l'Effet Compton et la continuité laser-maser, mais le doute s'installait dans son esprit sur la compatibilité de ce qu'impliquaient, d'une part, la théorie du champ en son état et, d'autre part, la théorie des quanta.

Si les quanta éliminent un tel milieu pour le champ électromagnétique, il est difficile d'imaginer valablement qu'il en soit différemment pour le champ gravitationnel, même si les quanta n'y ont pas leur place. On arrive ainsi à la constatation suivante. Si la prodigieuse capacité d'anticipation d'Albert Einstein s'était fixée un peu plus sur les quanta, il les aurait directement étendu à l'ensemble du rayonnement électromagnétique ; il serait parvenu alors à la conclusion énoncée par Louis de Broglie indiquée précédemment et cela aurait été confirmé ultérieurement par l'expérience. C'est sans doute le caractère incomplet de sa démarche, au delà de la lumière, qu'il a perçu au terme de sa vie et l'a conduit à considérer qu'il avait privilégié la relativité par rapport aux quanta. Si toute l'énergie radiante est constituée de quanta, il n'y a plus lieu de faire intervenir *l'éther luminifère, ni l'éther dans sa généralité*. Mais l'éther était associé à la propagation depuis *La Théorie Electromagnétique de la Lumière* de James Clerk Maxwell, d'où, encore une fois, la question : la propagation garde-t-elle une réalité si l'éther (ou milieu équivalent) est éliminé ? La réponse à cette question n'exclut pas d'attribuer d'autres caractéristiques au vide. L'intervention supposée de l'éther dans la propagation du champ gravitationnel a été une extension plus ou moins implicite de l'existence supposée de l'éther de l'électromagnétisme ; il devrait en être de même pour son élimination. En toile de fond, il y a le fait que l'on a eu tendance à éliminer ce milieu, tout en conservant le concept de propagation, avec la contradiction que cela implique. C'est cette contradiction qui s'est manifestée dans les situations analysées précédemment, au niveau des Potentiels de Liénard et Wiechert ; elle réapparaît au niveau du phénomène d'induction qui a été un des points de départ de la Théorie de Maxwell. Les succès ininterrompus de la relativité ont contribué à maintenir actif le concept de *l'expression maxwellienne de l'énergie électromagnétique de l'espace* avec la propagation qui lui est associée ; le moment est peut-être venu de renoncer complètement à des prémisses indispensables pour le cheminement itératif de la physique, mais inexactes. Avec une conséquence immédiate, quitte à être répétitif tant cet aspect est important : peut-on éliminer l'éther et conserver le concept de propagation tel qu'il est mis en œuvre dans les interactions autres que le rayonnement, c'est-à-dire dans les interactions de couplage. On revient à l'interrogation qui pèse sur la validité du lien impliquant la propagation qui a été conservé entre les sources de champs et les champs ?

V. La quantification de la Théorie de Maxwell-Lorentz : du génie à la logique

Tous les éléments rassemblés dans les chapitres précédents convergent vers une même conclusion : le phénomène supposé de propagation du champ électromagnétique n'existe pas. Il n'intervient pas dans le rayonnement électromagnétique d'énergie qui relève du processus de création de particules et il n'intervient pas dans le lien entre les sources de champs et leurs champs, ce qui élimine le retard qu'il introduit dans les interactions de couplage. Dans ce contexte, tout un ensemble d'anomalies est éliminé, en particulier la discordance entre la relativité et la théorie quantique. Mais il se trouve que les avancées décisives les plus récentes ont été effectuées dans la voie de la quantification du Champ de Maxwell qui est aussi la voie définie comme la *Quantification de la Théorie de Maxwell-Lorentz*. Or, cette voie apparaît comme étant en contradiction avec celle que l'on tente d'ouvrir ici ; il s'agit donc, là encore, de clarifier la situation.

Dans les années qui ont suivi l'introduction des quanta-corpuscules dans la lumière il ne semblait pas possible de les étendre aux ondes hertziennes pour lesquelles Albert Einstein considérait que la Théorie de Maxwell était *appropriée*. De plus, la façon dont la relativité a été introduite et s'est développée en symbiose avec la Théorie de Maxwell a contribué à renforcer cette conviction. Cette situation, et certainement aussi d'autres motivations, ont fait émerger l'idée d'introduire la quantification sous forme mathématique à partir de la Théorie de Maxwell ou de la Théorie de Maxwell-Lorentz ; la démarche s'appuyait, ipso facto, sur le concept de propagation considéré, à cette époque, comme représentant la réalité physique dans le domaine concerné (donc impliquant *l'énergie distribuée de façon continue sur un volume croissant, dans un milieu support de la propagation*). Après les tâtonnements initiaux (Pascual Jordan 1920), les avancées décisives dans cette voie ont été celle de Paul Dirac (*The Quantum Theory of the Emission and Absorption of Radiation*, 1927) suivie en 1930 d'un document considérable de Werner Heisenberg et Wolfgang Pauli, puis de contributions multiples et décisives. Dès la présentation de *la seconde quantification*, cette voie s'est avérée extrêmement féconde, ce qui a dynamisé les efforts ultérieurs avec, comme aboutissement, la Théorie Quantique des Champs, l'Electrodynamique Quantique, et les théories qui en sont issues. Pour caractériser l'apport de la quantification du champ électromagnétique dans le cadre de l'électrodynamique quantique, on peut se référer à ce qu'a évoqué Richard Feynman, dès 1985 : « *L'électrodynamique quantique permet d'interpréter tous les phénomènes du monde physique, à l'exclusion des effets gravitationnels* » ; pour définir la cohérence entre les résultats obtenus à partir de la théorie et les données expérimentales, il cite le cas du « *moment magnétique de l'électron obtenu avec une précision du même ordre de grandeur que celle que l'on obtiendrait en mesurant la distance Los Angeles - New York à l'épaisseur d'un cheveu près. (21)* » Depuis cette époque, les applications concrètes des théories concernées se sont multipliés, systématiquement couronnées de succès (applications multiples en particulier dans la physique des matériaux). Avec une conséquence : lorsqu'une théorie conduit à des résultats aussi exceptionnels confirmés par l'expérience, elle tend à faire apparaître comme intangibles toutes les bases sur lesquelles elle a été établie, en l'occurrence les Théories de Maxwell et de Lorentz, avec ce qu'elles impliquent : en particulier le fait que l'énergie radiante reste supposée distribuée physiquement de façon continue dans l'espace ; cela apparaît contradictoire avec le rôle joué par *les quanta émis tout d'un bloc* et c'est donc aussi contradictoire avec la démarche présentée ici. C'est cet aspect des choses qu'il faut analyser maintenant.

On va se référer à l'examen des ouvrages suivants : *Photons et Atomes - Introduction à l'électrodynamique quantique* de Claude Cohen-Tannoudji, Jacques Dupont-Roc et Gilbert Grinberg (22) et *Electrodynamique Quantique* de Lev Landau et Evguéni Lifchitz (23). Le premier de ces ouvrages fait d'abord une présentation détaillée de la Théorie de Maxwell-Lorentz dans sa version classique et précise : « *Après ce rapide survol de l'électrodynamique classique se pose maintenant le problème de la quantification d'une telle théorie.....La quantification canonique du système est effectuée alors en associant, à chaque couple formé par une coordonnée généralisée et son moment canoniquement conjugué, deux opérateurs dont le commutateur vaut ih .* » On trouve, dans le deuxième ouvrage, une formulation qui rejoint la précédente : « *La description du champ considéré comme un ensemble de photons est la seule à être en parfait accord avec le sens physique qu'on donne au champ électromagnétique en théorie quantique. Dans l'appareil mathématique de la description quantique, les intensités de champ interviennent comme des opérateurs de seconde quantification.* » Mais en outre, l'introduction contient l'avertissement suivant concernant le cheminement suivi pour parvenir aux résultats présentés : « *Ces procédés conservent, dans une large mesure, le caractère de recette semi-empirique et notre certitude que les résultats obtenus par cette voie sont corrects est basée en dernier ressort sur leur excellent accord avec l'expérience plutôt que sur l'harmonie logique des principes fondamentaux de la théorie.* »

Ce qui apparaît dans ces descriptions conduit à réexaminer leur lien avec la Théorie de Maxwell. Selon l'expression de Fritz Rohrlich (24) cette théorie est à *deux niveaux*. Les quatre Equations de Maxwell constituent en elles-mêmes une théorie de l'électromagnétisme classique (premier niveau). C'est à partir de

là que James Clerk Maxwell a établi ce qu'il a appelé *La Théorie Electromagnétique de la Lumière* qui constitue un deuxième niveau de la théorie, lequel rassemble les équations du premier niveau avec les équations de propagation conduisant aux résultats que l'on sait. Depuis les Expériences de Hertz, c'est l'ensemble qui est considéré comme la Théorie de Maxwell. Lorsque l'on se rapporte à la quantification de cette théorie, on est conduit à préciser ce dont il s'agit. Dans ce qui est énoncé dans les deux exemples cités, la méthode de quantification porte exclusivement sur les Equations de Maxwell : l'introduction de *deux opérateurs dont le commutateur vaut ih* n'implique pas de supposer que l'énergie électromagnétique se propagera dans un milieu tel que l'éther ou qu'elle se déplacera par quanta. Mais le contexte dans lequel la Théorie Quantique des Champs a commencé à se développer a fait qu'elle a pris ses racines à contre-courant des quanta einsteiniens en postulant la validité de la propagation avec tout ce que *l'intuition clairvoyante* a pu apporter d'adaptations complémentaires (renormalisation, photon virtuel...). Autrement dit, imaginons que le cheminement des découvertes en physique ait conduit au rayonnement électromagnétique incluant la lumière, en restant sur l'hypothèse des grains de lumière d'Isaac Newton : on en serait arrivé aux Equations de Maxwell et le génie qui a conduit à *la propagation* dans une voie itérative aurait pu conduire à la création de particules, dans la voie directe et logique. Dès lors que l'on part de la Théorie de Maxwell ou de la Théorie de Maxwell-Lorentz à leur niveau 2 (incluant les équations de propagation), la démarche implique de supposer l'énergie distribuée de façon continue et exclut la discontinuité quantique, pour ce qui concerne l'interprétation de la réalité physique des phénomènes ; elle conduit à postuler (ou à admettre implicitement) que tout passe par la propagation. Partons maintenant des mêmes équations au niveau 1 (sans hypothèse préalable sur la distribution de l'énergie). L'introduction de la Constante de Planck, associée aux opérateurs de champs et de création/annihilation de particules, au travers de l'algèbre matricielle, ouvre une nouvelle voie dans la formulation des Equations de Maxwell: ce cheminement ne conduit pas à considérer que **tout se passe comme si l'état concerné était constitué d'un ensemble de particules** mais à considérer que **cet état est constitué d'un ensemble de particules**. On retrouve les quanta einsteiniens, les photons. On rejoint aussi la philosophie de Heinrich Hertz : « *Nos formules mathématiques en savent plus que nous, elles en savent même plus que ceux qui les ont établies.* »

La démarche qui conduit à cette conclusion est le prolongement de celle qui met en évidence la nature itérative de *La Théorie Electromagnétique de la Lumière* de James Clerk Maxwell. Tout ce qui se rattache à l'éther (milieu support de la propagation) et à la propagation conduit à une piste qui s'écarte de la réalité physique. Mais encore une fois, comme cela a conduit à l'aspect statistique des phénomènes, la réalité physique et les apparences se sont trouvées inextricablement emmêlées. C'est dans ce contexte que la quantification de la Théorie de Maxwell ou de Maxwell-Lorentz a conduit à un formalisme mathématique totalement valable (puisque en accord systématique avec l'expérience). D'autres avancées sont possibles en éliminant ce qui reste de *prémises inexactes* : c'est ainsi que la discordance entre la relativité et la théorie quantique est éliminée.

En complément de ce qui précède, on mentionnera un aspect évoqué dans l'ouvrage *Quantum Field Theory* de Franz Mandl et Graham Shaw (25). Il aborde le sujet de la quantification très précisément de la même façon que le premier des deux ouvrages cités précédemment, sous la forme suivante : « *Classical electromagnetic theory is summed up in Maxwell's equations..... In order to quantize this theory, we shall want to introduce canonically conjugate coordinates and subject these to commutation relations.*» Mais l'ouvrage fait apparaître un aspect des choses qui rejoint ce qui a été évoqué ici concernant les Potentiels de Liénard et Wiechert. Dans le chapitre *The electromagnetic field in the Presence of Charges* (théorie classique), il évoque « *the energy of the instantaneous electrostatic interaction between the charges* » Dans l'ensemble de l'ouvrage, il mentionne douze fois *the instantaneous Coulomb interaction*.

Le problème de l'instantanéité du Champ de Coulomb est aussi évoqué dans le premier ouvrage cité précédemment sous la forme suivante. « *L'interaction coulombienne est instantanée puisqu'elle dépend de la position des particules à l'instant t . Il est clair cependant que l'interaction réelle s'effectue avec un retard lié à la propagation du champ à la vitesse c . En fait, le caractère retardé des interactions électromagnétiques résulte d'une compensation exacte entre les deux parties instantanées venant du champ coulombien et du champ transverse.* »

En fait, les présentes recherches conduisent à retrouver, dans ces démarches, le problème qui s'est posé aux physiciens dont le travail a conduit aux Potentiels de Liénard et Wiechert et les doutes qui en ont résulté sous la forme suivante : l'instantanéité est-elle réellement exclue de la réalité physique dans les cas tels que ceux envisagés ou, au contraire, n'est-elle pas en train de réapparaître sous forme d'un collectif d'évidences étrangement masquées dans les formalismes mathématiques ? La question posée ci-dessus est sous-jacente et omniprésente. La démarche intellectuelle des chercheurs, dans un va et vient permanent entre la pensée rationnelle et l'intuition clairvoyante, frôle en permanence le tâtonnement entre la propagation et l'instantanéité (l'instantanéité éliminant la contradiction qu'implique la propagation sans milieu, dès lors que l'on a renoncé à l'éther). On retrouve ce questionnement avec Fritz Rohrlich, déjà cité, sous la forme

suivante, dans l'analyse du problème de la charge électrique et de son champ selon que la charge est accélérée et émet un champ de rayonnement (champ en $1/r$), ou qu'elle est en mouvement rectiligne uniforme (champ en $1/r^2$) : *"The radiation field detaches itself from the charge which is its source and leads an independent existence; it is endowed with energy, momentum and sometimes angular momentum... In contradistinction, the velocity fields are permanently attached to the charge and are carried along with it; they have neither energy nor momentum at large distances from their source.....The autonomous character of the radiation field finds its full expression in the quantum nature of radiation, i.e in the grainy structure of its momentum, energy, and angular momentum corresponding to a collection of photons."* Le fait que le champ de couplage reste attaché à sa source est contradictoire avec la propagation qui conduit aux *actions retardées*. Celles-ci sont supposées être associées à toutes les caractéristiques du champ qui se détache de la charge, quelle que soit la distance, jusqu'à l'infini de l'espace. Cela rejoint l'autre aspect évoqué : il est vrai que le caractère autonome du rayonnement trouve sa pleine expression dans sa nature quantique, mais dans quelle configuration :

- les quanta/photons einsteiniens constituant des grains ou des bulles d'énergie entre lesquels il n'y a que le vide lorsque la distance les a séparés.... ?

- ou bien les photons mathématiques qui font que *tout se passe comme si...* mais l'énergie restant distribuée de façon continue dans l'espace... ?

On se place ici dans le contexte de la première hypothèse

Cela nous réoriente vers la plus élémentaire des interactions électriques qu'il est possible de transposer en expérience de pensée, voire en expérience réelle. Considérons l'exemple concret de deux charges électriques en position statique (donc sur des supports mécaniques) séparées par une distance de 3 mètres. A l'instant t_0 , nous déplaçons l'une des charges sur l'axe qui les relie. La question se pose : l'autre charge va-t-elle subir la variation de la force à l'instant t_0 ou à l'instant t_0+10 nanosecondes ? Le raisonnement peut prendre une autre forme. Considérons un électron et un positron créés par un rayon gamma. Le champ électrostatique de chacun va-t-il s'établir instantanément dans l'espace (avec l'énergie, la quantité de mouvement et le moment cinétique que la théorie électromagnétique leur associe) ou par propagation à la vitesse c , ce qui va prendre l'infini du temps pour l'infini de la distance ? Lorsque le positron va se dématérialiser au contact d'un électron, que deviendra l'énergie supposée en propagation vers l'infini de l'espace ?

D'autres thèmes de réflexions peuvent contribuer à analyser les mystères qui subsistent dans la théorie de l'électromagnétisme vue sous différents angles. Dans cette voie, on n'oubliera pas que si la lumière s'est trouvée associée aux réflexions concernant l'évolution des charges et des courants électriques par le génie de James Clerk Maxwell, elle se présente aussi à nous dans les phénomènes de bioluminescence et de chimioluminescence. On y retrouve les quanta einsteiniens à *l'état pur*, avec les thèmes de réflexion qu'ils proposent.

L'apport considérable de la quantification mathématique de la Théorie de Maxwell met encore davantage en évidence la contribution du génie œuvrant contre la logique. Non seulement, au niveau initial, le génie a compensé l'absence d'éléments essentiels à l'interprétation du rayonnement, non seulement il a introduit directement, sans le savoir, son interprétation statistique mais, complété par la Constante de Planck et les outils appropriés de l'algèbre matricielle, il a conduit à exprimer la réalité physique des interactions de la matière et du rayonnement à partir des quatre équations fondamentales de l'électromagnétisme. D'où l'incalculable valeur du contenu des Equations de Maxwell et des cheminements ultérieurs auxquels elles ont donné naissance. Que des *prémisses inexactes* restent encore à évacuer, c'est dans l'ordre naturel des choses.

La réponse aux questions soulevées n'est pas dans l'argumentation présentée ici mais dans le résultat attendu des expériences proposées et en premier lieu (ne serait-ce que pour les aspects épistémologiques et pédagogiques) de celle qui introduit la relativité restreinte avec un aimant en mouvement face à un circuit conducteur.

CONCLUSION

En proposant les quanta-corpules pour l'interprétation de l'émission de la lumière, Albert Einstein anticipait largement le processus de création de particules. Ultérieurement, il s'est avéré que non seulement la lumière mais aussi l'ensemble de l'énergie électromagnétique radiante, procèdent du phénomène de création des particules que sont les quanta/photons. *Le concept de propagation* a conduit à l'expérimentation qui a mis en évidence l'existence du rayonnement électromagnétique d'énergie ; il a constitué une voie itérative, géniale et fructueuse mais inexacte, dans l'interprétation de cette classe de phénomènes. Il a conduit à une fausse piste en ce qui concerne le lien entre les sources de champs et leurs champs en y introduisant *un retard de propagation* qui n'existe pas dans la réalité physique.

Dans ce contexte, non seulement la relativité n'est pas incompatible avec les interactions instantanées au travers de l'espace, mais elle les implique et ne présente plus de discordance avec la théorie quantique.

Evidemment, la démarche aboutissant à ce résultat présente, comme toute recherche, un caractère hypothétique : elle conduira à l'expression de la réalité physique lorsque les expériences prévues, réalisables avec les équipements classiques des laboratoires actuels, auront vérifié les conclusions avancées : les champs sont solidaires de l'évolution de leurs sources, instantanément et jusqu'à l'infini de l'espace.

En faisant savoir qu'il avait privilégié la relativité vis-à-vis des quanta, Albert Einstein a ouvert, une nouvelle fois, une piste iconoclaste mais féconde vers **l'approfondissement de la vérité scientifique.**

Bibliographie

1. Cité par Louis de Broglie: Nouvelles perspectives en microphysique, Allbiin Michel, 1956.
2. Louis de Broglie: Réédition de la thèse de 1924, Recherches sur la Théorie des Quanta, MASSON, 1963.
3. d° 1
4. Citation de: Banesh Hoffmann, Albert Einstein, Créateur et Rebelle, Éditions du Seuil, 1972-5.
5. Collectif d'auteurs : Demain la Physique, Odile Jacob Sciences.
6. d° 4
7. James Clerk Maxwell, (Traduction française) Traité d'Electricité et de Magnétisme, Editions Jacques Gabay, 1989
8. Hendrik-Antoon Lorentz, The Theory of Electrons and its Applications to the Phenomena of Light and Radiant Heat, Ed. Jacques Gabay, 1992
9. John David Jackson (Traduction française) Electrodynamique Classique Dunod 2001
10. Richard Feynman (Traduction Française Cours de physique, Tome II, Électromagnétisme-1, Interéditions, 1970-1978
11. Lev Landau et Evguéni Lifchitz: Physique théorique, Théorie des champs, Éditions MIR 1964 - 1989.
12. Panofsky & Phillips, Classical Electricity and Magnetism, Addison Wesley 1962
13. . F. Rohrlich, Classical Charged Particles, Addison Wesley, 1990
14. Edward M. Purcell - Berkeley: (Traduction française Cours de Physique Volume 2 Electricité et Magnétisme 1963
15. d° 10
16. d° 2
17. d° 10
18. Richard Feynman, Lectures on Physics Tome II, Electromagnetism-2, InterEditions, 1970-1978
19. Cité par Emilio Segré: Les physiciens modernes et leurs découvertes, Fayard, 1984.
- 20 Alfred Kastler : Cette Étrange Matière, Stock 1976
21. Richard Feynman: (traduction Française) Lumière et Matière, Interéditions 1985-
22. Claude Cohen-Tannoudji, Jacques Dupont-Roc, Gilbert Grynberg: Photons et atomes, Introduction à l'électrodynamique quantique, InterÉditions/ Éditions du CNRS, 1987.

23. L. Landau et E. Lifchitz. Electrodynamique quantique . Ed. du Globe Editions Mir 1973-1989

24. d° 13

25. F. Mandl, G. Shaw. Quantum Field Theory. John Wiley and Sons. 1984 - 1985