

Pierre Poubeau

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

Un nouveau fondement conceptuel pour la physique du XXI^e siècle ?

La solution du problème de l'inséparabilité quantique ?

Document de synthèse

La physique du XX^e siècle n'a pas réussi à résoudre un problème issu de ses avancées : l'inséparabilité quantique. Sur un point précis, la physique quantique prévoit des situations que la relativité considère comme exclues de la réalité physique. Par leur aboutissement, les recherches présentées dans ce fascicule proposent une solution à ce problème, ainsi que les expériences permettant de vérifier la validité de la solution proposée. Cette évolution se situe dans le cadre d'un remaniement des fondements de la physique, impliquant essentiellement de substituer un espace-temps de nature physique à l'Espace-Temps d'EINSTEIN-MINKOWSKI, de nature géométrique.

Pierre Poubeau est Ingénieur de l'École Supérieure d'Électricité. Après avoir commencé sa carrière au Commissariat à l'Énergie Atomique où il a développé des équipements de détection des rayonnements gamma, il a été amené à approfondir les problèmes concernés. Il a été ensuite en charge de la conception, des essais et de la mise en œuvre d'équipements hertziens, des ondes TBF aux micro-ondes. A partir de 1963, il a assumé des responsabilités majeures dans les programmes spatiaux français et internationaux. Depuis 1983, il s'est consacré à clarifier la situation résultant des anomalies qui ont été à l'origine des présentes recherches.

février 2008

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 DUALITÉ 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. Site Internet ouvert en 2004, actualisé en 2005 : <http://perso.orange.fr/dualite-espace-temps/>

Table des matières

AVANT-PROPOS.....	1
-------------------	---

CHAPITRE I

Une anomalie dans le socle de la physique	4
---	---

CHAPITRE II

Les implications de <i>la propagation</i>	6
II-1 L'interaction aimant-conducteur.....	6
II-2 Conséquences théoriques de <i>la propagation</i>	10
II-3 Conséquences expérimentales de <i>la propagation</i>	14

CHAPITRE III

Des Équations de MAXWELL à l'inséparabilité quantique	16
---	----

CHAPITRE IV

Retour sur les quanta et la relativité	24
--	----

CHAPITRE V

Des quanta à l'électrodynamique quantique.....	28
--	----

CHAPITRE VI

La réalité physique sous le formalisme mathématique ..	34
VI-1 Aspects généraux	34
VI-2 Les différentes facettes de la réalité physique.....	38
VI-3 Les interférences	40
VI-4 L'entraînement de la lumière.....	41

CHAPITRE VII

Vers la physique du XXI ^e siècle	43
---	----

Liste des ouvrages cités	45
--------------------------------	----

Annotations47
-------------------	------

AVANT-PROPOS

Les *Recherches sur la Dualité de l'Espace-Temps* sont issues de deux interrogations concernant :

- la réalité physique de *la propagation* dans les interactions de couplage,
- la réalité physique des quanta dans le rayonnement hertzien.

L'interaction d'un aimant en mouvement et d'un circuit conducteur est l'exemple caractéristique de la conversion d'énergie mécanique en énergie électrique et du transfert de cette énergie au travers de l'espace. Les conditions de mise en œuvre de cette interaction, qui est à la base du fonctionnement des générateurs électromécaniques de courant, conduisent à ce que les distances entre les éléments soient aussi faibles que possible ; de ce fait, on considère les temps de propagation, que la théorie électromagnétique fait intervenir dans l'interaction, comme négligeables et on interprète les phénomènes dans le cadre d'une interaction instantanée. Mais comment peut-on interpréter valablement la réalité physique lorsque, l'aimant étant déplacé entre deux positions de repos, la durée du déplacement est suffisamment brève pour que celui-ci soit terminé lorsque le champ du courant induit dans le circuit revient à l'aimant, après écoulement des temps de propagation aimant-circuit et circuit-aimant, prévus par la théorie électromagnétique ? Parce qu'il n'a pas eu de conséquences dans le développement de l'électrotechnique, ni de la physique en général, cet aspect des choses est resté sous-jacent, mais à lui seul, il met en doute la validité du concept d'interaction retardée dans son acception actuelle.

En 1905, Albert EINSTEIN introduit les quanta dans l'émission de la lumière, qu'il dissocie de la Théorie de MAXWELL. Dans une prodigieuse anticipation, il imagine, à ce niveau, le phénomène de création de particules qui ne va être découvert, dans sa généralité, qu'un quart de siècle plus tard. Cependant, il n'étend pas les quanta au rayonnement hertzien, alors que l'on avait déjà observé des rayonnements d'origine électrique dans la même bande de fréquences que les rayonnements infrarouges thermiques, en continuité avec la lumière. Il résulte de cette situation que l'infrarouge d'origine électrique, et l'ensemble du rayonnement hertzien vont continuer à être interprétés et enseignés sur la base de la propagation du champ électromagnétique, tandis que les rayonnements du spectre allant de l'infrarouge thermique aux rayons gamma sont interprétés dans le cadre du processus de création des particules que sont les quanta d'énergie. Les choses vont à nouveau évoluer, à la fin des années 20, avec la quantification mathématique de l'ensemble du champ électromagnétique (théorie quantique des champs, électrodynamique quantique) qui va tenter de faire disparaître cette dichotomie. C'est au prix d'une contradiction interne : la quantification mathématique part de l'hypothèse d'une structure continue de l'énergie associée au champ (Théorie de MAXWELL-LORENTZ) pour la faire apparaître mathématiquement comme une structure discontinue ; le problème subsiste en filigrane parce que la transformation d'une réalité physique supposée continue en une réalité discontinue, observée physiquement comme telle, ne s'inscrit pas dans la logique de l'instrument mathématique, même si le cheminement se révèle productif, au-delà de tout ce qui était initialement prévisible.

Simultanément, un problème de grande ampleur se dessine : bien que la théorie de la relativité restreinte et la mécanique quantique soient indissolublement complémentaires, une discordance apparaît entre ces deux disciplines. La mécanique quantique prévoit que des particules émises dans certaines conditions (particules intriquées) présentent une forme de couplage instantané entre elles, quelle que soit la distance qui les sépare (inséparabilité quantique), alors que la relativité exclut toute interaction instantanée au travers de l'espace; l'expérience vérifie cette caractéristique dans différentes configurations, en particulier sur des photons éloignés de plus d'une centaine de kilomètres. Ainsi, on retrouve une situation qui évoque celle sur laquelle butait la physique, il y a un siècle, avec l'invariance de la vitesse de la lumière, *la catastrophe ultraviolette* et l'effet photoélectrique.

Dans les dernières années de sa vie, Albert EINSTEIN pressentait que les racines de cette discordance se trouvaient au cœur des théories qu'il avait introduites. En 1949, il disait : « *Il n'y a pas un seul concept dont je sois convaincu qu'il demeurera et je ne suis pas sûr, en général, d'avoir été sur la bonne piste (1).* » En 1954, il écrivait à Louis de BROGLIE : « *Je dois ressembler à une autruche qui, sans cesse, cache sa tête dans le sable relativiste pour ne pas avoir à regarder en face ces vilains quanta (2).* »

Dès lors que le physicien qui a ouvert la voie des grandes avancées scientifiques du XX^e siècle suppose, au terme d'une vie consacrée à ces problèmes, qu'il y a une faille dans sa démarche, on ne lui ferait pas honneur en négligeant l'avertissement qu'il croit utile de lancer sous forme de testament scientifique, et ce ne serait pas aller dans le sens de l'efficacité. Cet avertissement a constitué une des motivations des présentes recherches et a contribué à les orienter.

Les deux interrogations évoquées ci-dessus, et celle que pose l'inséparabilité quantique se rejoignent. Il se trouve, en outre, qu'Albert EINSTEIN se réfère à l'interaction liée au mouvement relatif aimant-conducteur pour introduire la théorie de la relativité et que le concept de propagation, qui intervient dans le cas où l'aimant est en mouvement et le conducteur fixe, fait surgir une contradiction au cœur de la théorie, contradiction de même nature que celle mentionnée précédemment, aux racines de ces recherches.

Le présent travail établit un lien entre ces anomalies. Il aboutit à la conclusion qu'une faille s'est introduite dans l'interprétation des conséquences des Équations de MAXWELL : elles n'impliquent pas directement les équations de propagation du champ électromagnétique. On remonte ainsi aux racines des anomalies concernées : les ondes électromagnétiques ont été imputées à *la propagation du champ* alors qu'elles procèdent de la création et de l'émission des particules que sont les photons. La validité des prévisions obtenues à partir de la théorie classique basée sur *la propagation* a conduit à confondre la réalité physique des phénomènes avec leur aspect statistique.

En introduisant les quanta dans la structure de la lumière, Albert EINSTEIN a engagé la physique sur *une bonne piste*, mais en ne les étendant pas au

rayonnement hertzien, il l'a laissée se prolonger par une fausse piste sur laquelle la relativité restreinte, puis l'ensemble de la physique, se sont établies.

Etendre les quanta de la lumière au rayonnement hertzien, c'est renoncer au concept de propagation du champ électromagnétique dans son acception actuelle et, dans cette voie, c'est tout un ensemble de contradictions qui est éliminé, en particulier celle que constitue l'inséparabilité quantique. Mais, les présentes recherches conduisent aussi à la conclusion que, si Albert EINSTEIN avait pris conscience de cette réalité, il ne pouvait plus développer la relativité sous sa forme actuelle avec tout ce qu'elle comporte d'adéquation à l'expression de pans entiers de la réalité physique.

L'interaction entre un aimant en déplacement et un circuit conducteur a constitué le point d'ancrage à partir duquel la relativité restreinte a été développée. La cohérence de la théorie implique que cette interaction soit considérée comme instantanée alors qu'elle est considérée comme retardée. La vérification expérimentale de la nature des modalités spatio-temporelles d'une telle interaction est à la portée des laboratoires de physique actuels : toute la suite en dépend.

En anticipant que les résultats d'une expérimentation de cette nature vérifieront les hypothèses avancées ici, en particulier l'instantanéité des transferts d'énergie, de quantité de mouvement et de moment cinétique dans les interactions de couplage, il y aura lieu de prévoir un vaste programme expérimental pour faire apparaître les lois réelles d'établissement du champ électromagnétique dans l'espace, en fonction des conditions d'évolution de ses sources. Dès maintenant, on peut prévoir que le renoncement au concept de propagation conduira à actualiser l'électromagnétisme, la relativité restreinte, la relativité générale et l'Espace-Temps de MINKOWSKI, mais aussi les théories quantiques et l'ensemble des fondements de la physique. C'est dans ce contexte que l'on est amené à prévoir un espace-temps de **nature physique** présentant un caractère de dualité, puisqu'il sera, à la fois, le support des interactions instantanées de couplage et le support des interactions de rayonnement retardées par la propagation des photons.

Le contenu du présent document se limite à aborder quelques aspects de cette situation, parmi les plus significatifs. Il s'efforce de démêler l'écheveau d'une étrange itération épistémologique restée inapparente, dans laquelle les fausses pistes ont largement contribué à ouvrir les bonnes pistes, les unes et les autres étant profondément imbriquées. Il tente de réamorcer une démarche dans laquelle la mise en œuvre des formalismes mathématiques puisse être associée à la prise de conscience de ce qu'est la réalité physique.

J'exprime ma reconnaissance à toutes les personnes qui ont contribué à l'avancement de ce travail.

Pierre Poubeau
Février 2008

Chapitre I

Une anomalie dans le socle de la physique

Une contradiction interne à la relativité ressort du texte introduisant cette théorie et rapporté ici.

Sur l'électrodynamique des corps en mouvement

Par Albert EINSTEIN

(1905)

« Il est connu que l'électrodynamique de MAXWELL, telle que couramment comprise à l'époque actuelle, quand elle est appliquée à des corps en mouvement, conduit à des dissymétries qui n'apparaissent pas comme étant inhérentes aux phénomènes concernés. Prenons par exemple l'action électrodynamique réciproque d'un aimant et d'un conducteur. Là, le phénomène observable dépend uniquement du mouvement relatif du conducteur et de l'aimant, alors que les vues habituelles tracent une distinction nette entre les deux cas dans lesquels soit l'un soit l'autre de ces corps est en mouvement (3). »

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, qui n'est autre que la Transformation de LORENTZ, conserve la forme des relations entre le champ électrique et le champ magnétique, et il en conclut que « *la dissymétrie mentionnée disparaît ainsi.* » Autrement dit, il pense avoir 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. Or, lorsque l'aimant est déplacé, la théorie de l'électromagnétisme relativiste interprète le processus en cause comme une interaction retardée, le phénomène supposé de propagation du champ introduisant un retard entre la cause et l'effet, donc un retard dans le transfert d'énergie de l'aimant au conducteur, alors que, lorsque le conducteur est déplacé dans le même mouvement relatif, la même théorie conduit à considérer qu'il s'agit d'une interaction instantanée, sans intervention de la propagation, sans retard entre la cause et l'effet, le transfert d'énergie étant concomitant avec le mouvement du conducteur. Une contradiction apparaît donc entre l'hypothèse sur laquelle va s'appuyer le développement de la relativité restreinte et ce qui découle, par ailleurs, de la théorie de l'électromagnétisme maxwellien actualisée par la relativité.

Dans le cadre de la physique actuelle, cette situation n'est pas considérée comme une anomalie, mais comme se rattachant à l'impossibilité de parvenir à une interprétation de la réalité physique dans le cadre du sens commun, en dehors du

formalisme mathématique concerné, qu'il s'agisse des phénomènes relevant de la relativité et du formalisme quadri-dimensionnel, ou de ceux relevant de la dualité onde-corpuscule et du formalisme quantique. Or, s'il est vrai que la physique développée sur la mise en œuvre du formalisme mathématique de la mécanique quantique est allée de succès en succès, elle reste en échec sur le problème de l'inséparabilité quantique et la découverte de la solution passera nécessairement par l'exploration de voies qui n'ont pas encore été explorées ou insuffisamment explorées. Puisqu'une anomalie semble surgir autour de l'interaction aimant-conducteur introduisant la relativité, il y a une voie à explorer avec deux approches du problème : l'aspect relativiste, stricto sensu, et l'aspect électromagnétique qui sera analysé dans le chapitre suivant.

L'aspect relativiste donne déjà deux éclairages du problème. Considérons qu'un aimant est immobile : nous l'observons donc dans son référentiel propre et son champ est statique. Si nous observons cet aimant-là à partir d'un référentiel en mouvement rectiligne uniforme par rapport à son référentiel propre, nous allons considérer que l'aimant est en mouvement et les concepts en vigueur conduisent à admettre que son champ s'établit dans l'espace par propagation. Cela voudrait dire que le champ de l'aimant est statique ou en propagation selon le référentiel à partir duquel on l'observe, ce qui n'est pas envisageable. D'autre part, postuler la propagation du champ lorsqu'il y a mouvement de l'aimant, c'est supposer l'existence d'un état qui correspondrait au repos absolu, or cela est contradictoire avec l'une des racines de la démarche einsteinienne qui 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.* » Ces deux types de considérations se rejoignent : la propagation supposée du champ magnétique d'un aimant, parce qu'il est en mouvement, s'effectuerait à la vitesse de la lumière, ce qui implique qu'elle serait observée identiquement dans tous les référentiels d'inertie, y compris dans le référentiel propre de l'aimant : c'est encore contradictoire.

Les connaissances acquises au cours du siècle écoulé permettent de voir les choses sous un angle différent par le fait que nous avons une vision actualisée de l'espace extraterrestre et de ses lois depuis que l'homme s'y déplace et que ses véhicules s'enfoncent dans l'espace cosmique. Considérons que nous réalisons l'interaction entre un aimant et une spire conductrice en mouvement l'un par rapport à l'autre, dans l'espace circumterrestre. Il s'agit là d'une configuration tout à fait réalisable, à partir d'un véhicule spatial, dans laquelle il est strictement impossible de postuler que l'un des éléments est immobile et l'autre en mouvement. Le seul fait de considérer cette configuration spatiale montre à quel point il devient difficile d'imaginer que, *parce qu'il est en mouvement*, l'aimant est la source d'un champ qui se propage : *le phénomène observable dépend uniquement du mouvement relatif du conducteur et de l'aimant.....* Ce n'est pas parce que l'on transposera une telle expérience dans un laboratoire terrestre (la terre est, elle aussi, un satellite) que le raisonnement qui vient d'être fait cesserait d'être valable.

CHAPITRE II

Les implications de *la propagation*

II-1 L'interaction aimant-conducteur

Le problème qui se pose au point de départ de la relativité restreinte n'est pas lié directement à la relativité elle-même, mais provient de la théorie électromagnétique qui a introduit le concept de propagation à ses racines, comme conséquence des Equations de MAXWELL. Examinons donc ce qu'apporte, dans le cadre de la théorie de l'électromagnétisme, l'analyse de l'interaction qu'Albert EINSTEIN prend comme point de départ pour l'élaboration de la théorie de la relativité.

Dans l'interaction concernée, les problèmes apparaissent plus nettement si on s'intéresse explicitement au cas d'un conducteur en circuit fermé, car il implique la présence d'un courant induit dans le conducteur avec les conséquences qui en découlent. C'est d'ailleurs la configuration à laquelle Albert EINSTEIN fait référence, mais **implicitement**, en évoquant *l'action électrodynamique réciproque d'un aimant et d'un conducteur*, impliquant l'action de l'aimant sur le conducteur et la réaction du courant induit dans le conducteur sur l'aimant.

Considérons que l'aimant présenté sur la figure II-1, en face de la spire S schématisant le circuit conducteur, et initialement immobile en position P1, est déplacé jusqu'à une nouvelle position de repos P2. Le déplacement va provoquer une force électromotrice dans la spire, donc un courant induit. Pour interpréter

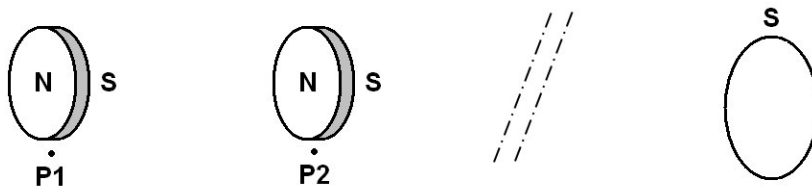


Figure II-1

cette interaction, les données habituelles de l'électrotechnique (aimant et conducteur aussi proches l'un de l'autre que possible) ont conduit à ne pas prendre en compte *les temps de propagation*, ce qui revient à se placer dans le cadre de la théorie prémaxwellienne. Ainsi, l'énergie présente dans la spire est supposée provenir instantanément, au travers de l'espace, soit de l'énergie cinétique de l'aimant qui, s'il est libre, décélère sous la réaction du champ du courant induit, soit du travail d'une force appliquée pendant son mouvement pour compenser la-dite réaction, si sa vitesse est maintenue constante. La théorie électromagnétique maxwellienne et relativiste implique de tenir compte de *la propagation* : lorsque

l'aimant quitte la position de repos P1, la variation du champ magnétique est supposée n'intervenir au niveau de la spire qu'après un temps de *propagation*. L'aimant ayant quitté la position de repos, le courant induit dans la spire s'établit postérieurement, à partir de l'instant où celle-ci est atteinte par la variation du champ mais, jusqu'à cet instant, l'aimant s'est déplacé et le champ est supposé s'être propagé comme si la spire n'existait pas. L'énergie liée au courant qui s'établit n'a pas de source jusqu'à l'instant où le champ du courant induit parvient, en retour, à l'aimant. Une configuration plus caractéristique correspond à un déplacement bref de l'aimant entre deux positions de repos suffisamment éloignées de la spire pour que le champ du courant induit ne parvienne à l'aimant, en retour, que postérieurement à son immobilisation. L'aimant effectue son déplacement comme si le circuit n'existait pas ; après son immobilisation, il ne reste plus aucune des possibilités de transfert d'énergie qui étaient prises en considération dans l'hypothèse de l'instantanéité des interactions, alors que la variation inéluctable du champ magnétique, au niveau du circuit, implique un tel transfert.

L'anomalie que fait surgir cette configuration n'a pas paru suffisamment significative pour renoncer au concept de propagation, dans le cadre de la physique actuelle, en raison du fait que, lorsque l'aimant est déplacé entre deux positions de repos, il y a nécessairement une accélération et une décélération qui pourraient impliquer un rayonnement permettant de retrouver une interprétation satisfaisante. La démarche menée ici conduit à une conclusion différente qui peut être précisée en analysant le cas suivant (en plus du fait que l'hypothèse de l'intervention de l'accélération n'a pas de support solide). L'aimant (figure II-2) est déplacé, comme dans le cas précédent, entre les positions de repos P1 et P2 (aimant revenu au repos quand le champ du courant induit lui parvient, en retour). Il est mis en mouvement (donc accélération) entre P1 et P'1, il est entraîné à vitesse rectiligne constante entre P'1 et P'2 (majeure partie du déplacement) et ramené au repos entre P'2 et P2 (décélération). On analyse les processus susceptibles d'intervenir

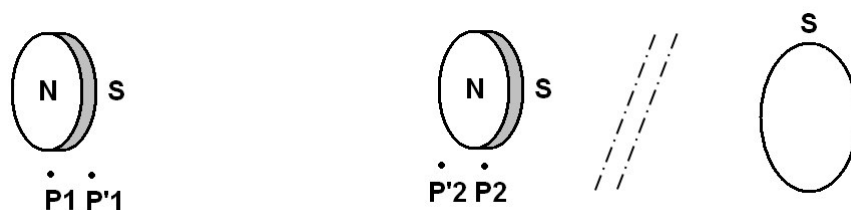


Figure II-2

en conséquence du déplacement entre P'1 et P'2. Dans cette phase, sans accélération ni décélération, le déplacement de l'aimant va provoquer une variation du champ au niveau de la spire, donc un courant et un transfert d'énergie : cela relève des données théoriques et expérimentales existantes ; la théorie de l'électromagnétisme maxwellien et relativiste implique que la variation du champ

magnétique soit retardée, par rapport au mouvement, par le délai de propagation du champ, donc la force électromotrice et le transfert d'énergie sont aussi retardés. Comme indiqué précédemment, il ne reste plus alors aucune possibilité de prélèvement d'énergie sur l'aimant et aucun phénomène de rayonnement n'intervient dans cette phase du mouvement. L'énergie inéluctablement présente dans la spire, en conséquence de cette phase du déplacement, n'a pas de source ; le champ du courant, qui aurait pris naissance dans ces conditions, peut bien faire retour à l'aimant, mais à un moment où celui-ci est revenu à une position de repos et il ne peut y avoir d'énergie cinétique, ou de travail d'une force appliquée, qui soit transférée à la spire. Dans le cadre de la théorie en vigueur, les modalités de ce transfert présentent une contradiction et, en outre, on doit remarquer que le processus de propagation qui, au plan théorique, introduit le retard à propos duquel surgit l'anomalie, n'a jamais fait l'objet de vérifications expérimentales directes, ni dans le cas concerné, ni dans le cas des interactions de couplage, en général.

Alors, faut-il remettre en cause le concept de propagation ? Qu'est-ce que cela impliquerait dans les cas envisagés précédemment ? Renoncer au concept de propagation, c'est revenir aux interactions instantanées associées à l'électromagnétisme prémaxwellien. Dans ce contexte, lorsqu'un aimant est déplacé en face d'un circuit conducteur, la force électromotrice induite est supposée s'établir de façon concomitante avec le mouvement, autrement dit, l'interaction est instantanée et le transfert d'énergie qui en résulte est également instantané : l'énergie cédée par l'aimant, dans un intervalle de temps donné (variation d'énergie cinétique ou travail d'une force appliquée), est captée par le circuit, dans le même intervalle de temps. Dans ces conditions, *le phénomène observable dépend uniquement du mouvement relatif du circuit conducteur et de l'aimant* ; les anomalies qui étaient apparues, à ce niveau, sur la base du concept des interactions retardées, se trouvent également éliminées. Si cela introduit de la cohérence entre les éléments d'entrée de la théorie de la relativité et la théorie elle-même, il n'en va pas de même pour les autres conséquences. Toute la suite de la démarche einsteinienne est imprégnée de la Théorie de MAXWELL-LORENTZ, en ce qui concerne la propagation, laquelle se trouve finalement entérinée par la relativité : d'où les contradictions mentionnées.

Examinons les conséquences qu'aurait eues, sur l'élaboration de la théorie de la relativité restreinte, le fait de s'appuyer effectivement sur le concept qui ne faisait dépendre l'interaction aimant-conducteur que du mouvement relatif de ces éléments. Cela signifie que, si on dispose des conducteurs à des positions différentes dans l'espace, les forces électromotrices induites sont simultanées. Si Albert EINSTEIN avait pris conscience de cela, il n'aurait plus eu aucune raison de remettre en cause la simultanéité classique, ni de prévoir la synchronisation de ses horloges par des signaux optiques ; il ne pouvait plus alors aboutir à la relativité telle qu'il l'a développée et à son extraordinaire fertilité liée à son adéquation à l'expression de pans entiers de la réalité physique. Le concept de propagation ayant exclu l'instantanéité dans les prémisses de la relativité einsteinienne, il est normal que l'instantanéité soit restée exclue de ce qu'implique la théorie, mais celle-ci a ancré encore plus profondément la propagation dans la physique, ses succès spectaculaires ayant pris valeur de confirmation expérimentale de la validité de ses fondements.

Cette interaction aimant-conducteur ne se situe pas dans un domaine permettant seulement des expériences de pensée, avec des résultats problématiques ; on est dans le domaine des relations de cause à effet de la physique classique, comme le montre l'expérience suivante réalisée dans le cadre des présentes recherches. Un aimant néodyme-fer-bore (35mmx35mmx51mm) est placé à 30 centimètres d'un circuit constitué de 3000 spires sur un support de diamètre 12 centimètres. Lorsque l'aimant est mis en mouvement par une impulsion brève, à la vitesse d'un mètre/seconde, le circuit est le siège d'une force électromotrice correspondant à une impulsion de 10 millivolts (ordres de grandeur). Cela montre, en extrapolant ces paramètres, que l'on ne peut pas se dispenser d'analyser la configuration où le déplacement de l'aimant est terminé lorsque le champ du courant induit revient à lui. Sans aller jusque là, l'expérience qui vient d'être indiquée, optimisée et réalisée en s'appuyant sur les équipements des laboratoires de physique actuels, permettrait d'obtenir un résultat équivalent en la matière : vérifier que l'établissement de la force électromotrice induite dans un circuit conducteur par le déplacement d'un aimant est concomitant avec la mise en mouvement de l'aimant. Cela revient à vérifier que, dans un premier circuit situé à proximité immédiate de l'aimant et dans un second circuit éloigné de trente centimètres du premier, les forces électromotrices sont synchrones ; c'est à dire que le retard d'une nanoseconde, que la théorie classique prévoit dans le second circuit par rapport au premier, n'existe pas. Un résultat positif d'une telle expérience mettra en évidence la nécessité de renoncer au concept de propagation et d'aborder une actualisation des fondements de la physique.

Les anomalies qui surgissent autour de l'ancrage de la relativité sur l'interaction aimant-conducteur créent une situation d'une telle ampleur qu'il est apparu nécessaire d'avancer pas à pas : d'où l'intérêt des expériences de cette nature qui reconstituent la configuration initiale. Il ne s'agit évidemment là que d'une étape : le problème qui émerge ainsi est celui du lien, dans sa forme la plus générale, entre les champs (électrique, magnétique, électromagnétique, mais aussi gravitationnel....) et leurs sources. Les avancées récentes, en particulier la magnéto-résistance géante, se trouvent en interface avec les lois d'évolution du champ magnétique vis à vis de ses sources et toutes les technologies qui permettent de faire avancer la question seront utilement mises en œuvre, bien au-delà de l'interaction entre un aimant et un circuit.

Dès lors que l'on renonce au concept de propagation, c'est tout un ensemble d'anomalies qui disparaît et le problème posé par l'inséparabilité quantique est résolu ipso facto, celle-ci entrant dans la même classe de phénomènes que les interactions instantanées de couplage.

II-2 Conséquences théoriques de la propagation

Aspects généraux

Le concept de *propagation du champ* et ses corollaires *d'interactions retardées* et de *champ libre* se sont introduits sur la base suivante pour ce qui concerne le lien entre une charge électrique en mouvement dans le vide et le champ dont elle est la source. La charge électrique q parcourant la courbe C (figure II-3), la théorie postule que le champ électromagnétique en P , à l'instant t , lorsque la charge est en M , est

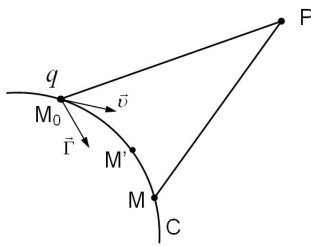


Figure II-3

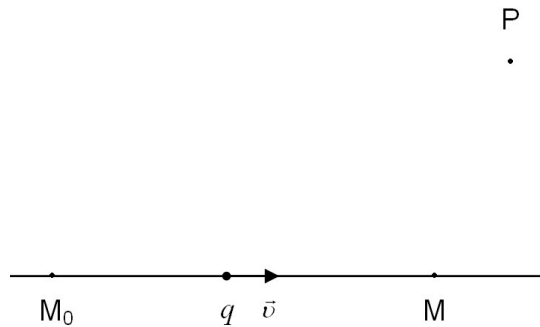


Figure II-4

entièrement déterminé par son passage à la position retardée M_0 , où elle était à l'instant $t_0 = t - M_0P/c$, et par les caractéristiques de vitesse \vec{v} et d'accélération \vec{r} à cet instant, quoi qu'il ait pu lui advenir postérieurement au passage en M_0 (par exemple immobilisation en M'). Le *champ libre* s'est propagé (selon la théorie) de M_0 à P pendant que la charge se déplaçait de M_0 à M ; la théorie attribue au champ la capacité de transférer de l'énergie et de la quantité de mouvement à des charges électriques, ce qui implique qu'il soit associé à de l'énergie et de la quantité de mouvement. Examinons le cas élémentaire de la charge électrique q supposée en mouvement rectiligne uniforme (figure II-4). Le champ en P , lorsque la charge est en M , est supposé avoir été *émis* lors du passage de la charge à la position retardée M_0 , la théorie postulant, comme dans le cas général, que, en chacun des points de sa trajectoire, la charge émet un champ associé à de l'énergie et de la quantité de mouvement. La charge restant à énergie constante, l'hypothèse concomitante selon laquelle elle émettrait, vers l'infini de l'espace et du temps, un champ associé à de l'énergie et de la quantité de mouvement, déconnecté de ses sources, ne peut pas être cohérente avec la réalité physique.

Les Potentiels de LIÉNARD et WIECHERT

A la fin du XIX^e siècle, lorsque les physiciens ont mené les études, dont certaines devaient conduire à la Transformation de LORENTZ, leurs réflexions pré-relativistes les ont amenés à considérer que les relations, issues des Equations de MAXWELL, qui permettent de passer des paramètres de la charge en mouvement à son champ

électromagnétique, ne sont valables que dans la mesure où la vitesse de la charge est faible devant celle de la lumière. Dans le cas contraire, elles les ont incités à exprimer les potentiels à partir d'une valeur de la charge affectée d'un coefficient directionnel. Cette démarche a été analysée et détaillée dans *The FEYNMAN's lectures on physics* (4). Elle conduit à des expressions des potentiels différentes de celles découlant directement des Équations de MAXWELL ; ce sont les Potentiels de LIÉNARD et WIECHERT à partir desquels on exprime les champs. 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 II-1, II-2 et II-3, dans les cas correspondant aux figures II-5 et II-6 :

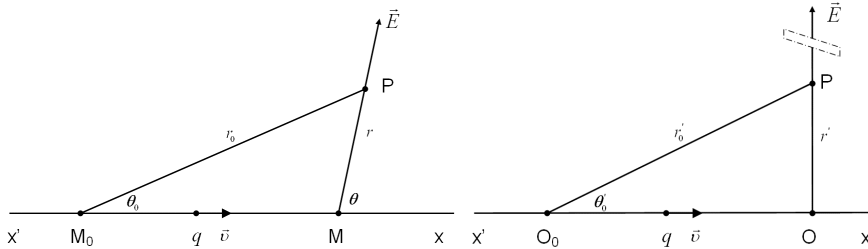


Figure II-5

Figure II-6

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

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

$$\vec{B} = \epsilon_0 \mu_0 \vec{v} \wedge \vec{E} \quad (\text{II-3}).$$

Les composantes \vec{E} et \vec{B} du champ (figure II-5), pour une valeur donnée de q , sont déterminées par les paramètres liés à M_0 : distance M_0P et angle θ_0 . Or, le résultat de la formulation des champs \vec{E} et \vec{B} 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 est encore plus caractéristique lorsque q est en O (figure II-6) ; \vec{E} est exprimé par la relation II-2, 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 le même que celui qui permet d'exprimer l'énergie interne d'un électron animé de la vitesse v par rapport à son énergie au repos, et qui est spécifique des effets relativistes.

Lorsque ces résultats ont été obtenus, la similitude avec les caractéristiques d'une interaction instantanée a fortement intrigué les chercheurs et l'hypothèse a été formulée, sans être généralement retenue, que le terme correctif introduit sur la charge *avançait les potentiels*. L'analyse du processus physique qui a été invoqué alors pour parvenir à cette formulation du champ électromagnétique a été un des éléments qui ont contribué à faire avancer les présentes recherches, à partir de la description qui en a été faite par Richard FEYNMAN, d'où il ressort que la démarche relativiste conduit au même résultat en partant du champ statique de la charge et en faisant un changement de référentiel conformément à la Transformation de LORENTZ. On est arrivé, dans cette voie, à la conclusion systématiquement admise, selon laquelle les deux démarches expriment identiquement la même réalité physique : or, ce n'est pas le cas. La démarche qui introduit un terme correctif sur les potentiels de la charge en mouvement a ses racines dans celle qui conduit aux équations de propagation des champs \vec{E} et \vec{B} . On verra plus loin que cette démarche n'est pas théoriquement valable ; elle aboutit, en outre, à des prévisions qui sont en contradiction avec la réalité physique, comme le montre, entre autres, l'analyse suivante.

Prenons le cas d'un électron e_1 (figure II-7) de haute énergie, 360 Gev, dont la vitesse est très proche de celle de la lumière ($v/c = 1 - 10^{-12}$). A l'instant où il passe en O, e_1 exerce sur un autre électron e_2 , en P à un mètre de O, une force impliquant une accélération de 20 millions de g. La position O_0 est alors à 700 kilomètres en

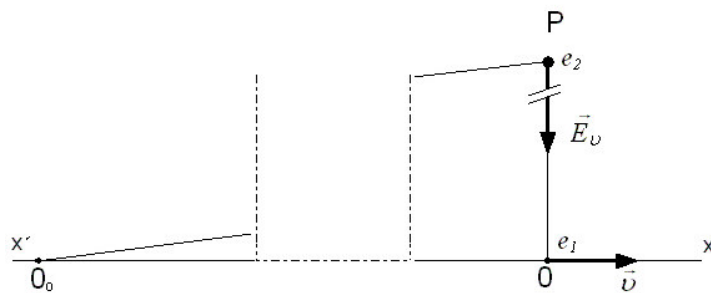


Figure II-7

amont de O et la théorie conduit à prévoir la situation suivante: l'électron qui serait immobilisé immédiatement après son passage en O_0 produirait la même action sur e_2 que s'il avait continué son mouvement l'amenant à passer en O. Si on prend pour OP une distance de un kilomètre, la position retardée d'où émanerait l'action sur e_2 quand e_1 est en O (accélération de 20g) serait à 700 000 kilomètres en amont de O. Autrement dit, un électron immobilisé sur sa trajectoire, pourrait exercer une action de cette nature à 700 000 kilomètres (sensiblement deux fois la distance terre-lune) de son point d'immobilisation et plus de deux secondes plus tard. La conclusion à laquelle on arrive ici est que la formulation des champs \vec{E} et \vec{B} , par les Potentiels de LIÉNARD et WIECHERT, a été un des exemples les plus caractéristiques mettant en évidence un cheminement intellectuel décrit par Banesh HOFFMANN 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 (5).* » En l'occurrence, les

résultats sont non seulement valables, mais mathématiquement exacts, en partant des prémisses qui ne pouvaient être qu'inexactes puisqu'il manquait deux maillons essentiels pour une interprétation des phénomènes qui fût cohérente avec la réalité physique : les quanta et la relativité. Ce mode de fonctionnement intellectuel s'avère avoir pris une place beaucoup plus importante que ne le laisse supposer la remarque qui précède. On verra dans ce qui suit que, non seulement l'intuition transcendante a compensé des prémisses inexactes, mais qu'elle a conduit à ouvrir des *fausses pistes* qui constituaient un passage nécessaire pour accéder aux *bonnes pistes*.

Comme cela a déjà été évoqué précédemment dans le cas de l'interaction aimant-conducteur, l'interaction d'une charge électrique et d'un circuit conducteur peut aider à remonter aux racines des réalités physiques. On va revoir cet aspect des choses, tant il est fondamental, et a peut-être été sous-estimé. Considérons le cas d'un électron en mouvement rectiligne uniforme, dans l'espace libre, en interaction avec une spire conductrice (figure II-8). Imaginer que l'électron est en mouvement ou au

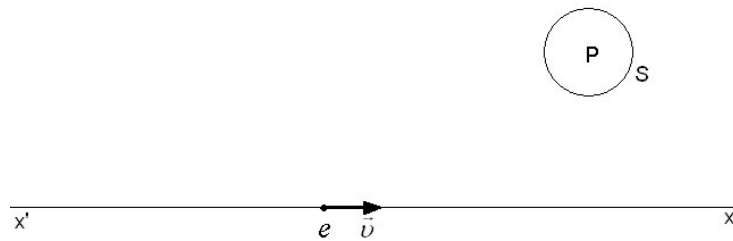


Figure II-8

repos, autrement que dans le mouvement relatif par rapport à la spire, ne peut plus apparaître cohérent avec la réalité physique, en quelque façon que ce soit ; que l'électron soit la source d'interactions retardées *parce qu'il est en mouvement*, n'a donc pas davantage de sens ni de réalité. La charge électrique (comme l'aimant) en interaction avec un circuit conducteur dans l'espace est sans doute l'un des exemples les plus susceptibles d'entraîner simplement et clairement l'assentiment vis à vis de l'urgente nécessité de renoncer au concept de propagation, dans son acception actuelle.

Simultanément, on perçoit les limites auxquelles conduisent les réflexions de cette nature. Le renoncement au concept de propagation ouvre la voie à une physique profondément différente de celle avec laquelle on travaille actuellement. Par exemple, l'analyse que l'on fait de l'interaction d'un aimant ou d'une charge et d'un circuit conducteur ne permet pas de préjuger de la façon dont s'établiront, dans l'espace et le temps, les champs (c'est à dire les capacités d'interaction) des particules d'une paire e^- , e^+ engendrées par un rayon gamma et qui s'éloignent l'une de l'autre. On reviendra plus loin sur cet aspect des choses.

II-3 Conséquences expérimentales de la propagation

Les situations qui viennent d'être évoquées peuvent être analysées dans une autre approche qui rejoint, au niveau du champ électrique, celle soulevée par l'interaction aimant-conducteur, au niveau du champ magnétique. Un électron du rayonnement bêta est émis en M_0 , dans le vide, sur l'axe M_0x , avec une vitesse \vec{v} proche de celle de la lumière, dans la configuration de la figure II-9 ; un circuit conducteur (schématiquement représenté par une spire conductrice S) est centré sur P, dans lequel le champ magnétique variable résultant du mouvement de l'électron est supposé induire un courant. L'électron est immobilisé en N, dans une cible C. La configuration est telle que, si le champ se propage conformément à la théorie électromagnétique, il n'atteindra la spire que postérieurement à l'immobilisation de l'électron dans la cible. Celui-ci effectue son parcours comme si la spire n'existait pas ; une fois immobilisé dans la cible, il dispose de l'énergie de toute particule au repos, soit m_0c^2 , et celle-ci ne peut subir de prélèvement au profit de la spire. Dans ces conditions, il y aurait de l'énergie sans origine dans la spire.

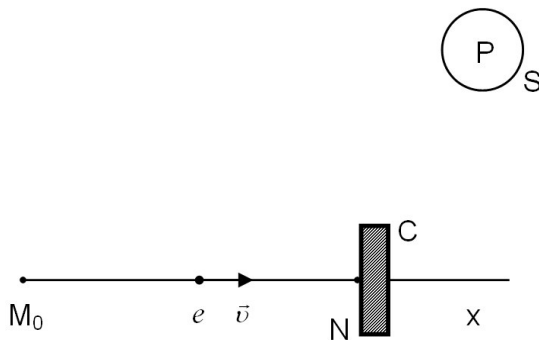


Figure II-9

L'analyse de cette expérience, physiquement réalisable, met en évidence, une fois de plus, l'anomalie qui découle de l'intervention du concept de propagation. On perçoit aussi le processus qui a empêché, de façon systématique, de prendre conscience de cette anomalie sous-jacente. Dès lors que la dualité onde-corpuscule de l'électron empêche de *comprendre* comment une particule peut se dissocier pour entrer en interférence avec elle-même, on a extrapolé l'impossibilité d'interprétation des phénomènes au cas concerné ici. En fait, quel que soit le comportement en onde ou en corpuscule de l'électron, cela ne dispense pas de chercher la solution des problèmes qui se posent : y a-t-il transfert d'énergie au circuit, et selon quelles modalités ?

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 émanant d'un canon à électrons ou d'un accélérateur de particules (figure II-10). Les charges électriques engendrées de cette façon restent

sous écran jusqu'au point de sortie M_0 à l'instant t_0 , en ne 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 peuvent induire un courant dans

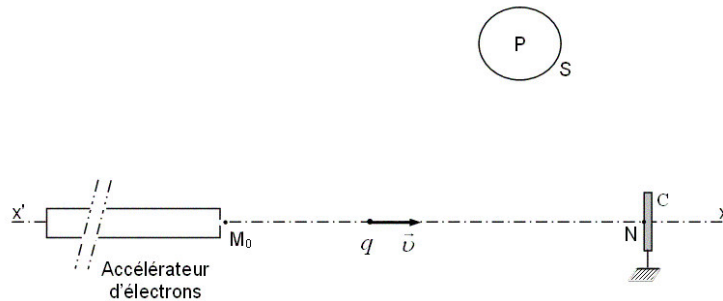


Figure II-10

un circuit conducteur S centré sur le point P et elles peuvent être immobilisées dans une cible C . Cette configuration permet un ensemble d'expériences cruciales en agissant sur tous les paramètres. Les expériences de cette nature présentent l'intérêt de ramener l'attention sur l'aspect concret du transfert d'une partie de l'énergie cinétique de la charge en mouvement au circuit, ce qui offre un support au raisonnement : à quel moment, dans quelles conditions, l'énergie est-elle transférée au circuit ?

On peut considérer que ces expériences n'abordent que l'aspect magnétique du champ électromagnétique. Si on prend en compte le fait que la force électromotrice induite dans le circuit s'exprime aussi bien par la dérivée du flux du champ magnétique sur sa surface que par la circulation du champ électrique sur son contour, on verra que l'aspect électrique et l'aspect magnétique expriment la même réalité physique. Par contre, si on cherche à transposer ces réflexions à une interaction entre charges électriques, le raisonnement ne dispose pas de points de repère exploitables concernant les échanges entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle, même à l'échelle macroscopique.

Les interactions qui peuvent servir de supports à des raisonnements clarificateurs et à des expériences de confirmation de ces raisonnements, sont plus proches des phénomènes élémentaires lorsqu'elles s'appuient sur l'interaction d'un électron du rayonnement bêta ou d'une charge électrique, que dans le cas d'un aimant. Cependant, il s'agit toujours d'interactions macroscopiques au sens de la physique actuelle. L'ensemble du présent travail est précisément basé sur l'aspect macroscopique des phénomènes ; il conduit à considérer que la physique s'est développée depuis plus d'un siècle sur une piste qui s'est révélée d'une exceptionnelle fécondité mais qui est *une fausse piste*. Il se limite à mettre en évidence la nécessité de s'orienter vers un remaniement des fondements de la physique et à apporter les éléments conduisant à des expériences décisives, en la matière. Au-delà, les actions qui seront menées seront d'une ampleur sans commune mesure avec ce qui est évoqué ici.

CHAPITRE III

Des Équations de MAXWELL à l'inséparabilité quantique

Lorsqu'on analyse les conséquences de la mise en œuvre du concept de propagation du champ électromagnétique, on arrive à des situations telles que celles décrites aux chapitres I et II et qui, pour le moins, impliquent une clarification. On va donc tenter de mettre en lumière le cheminement qui conduit à ces situations.

A l'époque où les Équations de MAXWELL ont été établies, on ignorait presque tout de la structure de la matière; l'électricité était considérée comme un fluide caractérisé par des densités de charge et de courant, et les équations en cause avaient pour objectif de relier les densités de charge ρ et de courant \vec{j} aux champs \vec{E} et \vec{B} et les champs \vec{E} et \vec{B} entre eux. Elles s'écrivent:

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

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

Pour les domaines de l'espace vide où $\rho = 0$ et $\vec{j} = 0$, ces relations conduisent à:

$$\square \vec{E} = 0 \quad (\text{III-5}), \quad \square \vec{B} = 0 \quad (\text{III-6}),$$

$$\square V = 0 \quad (\text{III-7}), \quad \square \vec{A} = 0 \quad (\text{III-8}).$$

Les équations III-5 à III-8 sont considérées comme exprimant *la propagation des potentiels et des champs*. C'est ainsi que les potentiels retardés s'introduisent (figure III-1) et sont exprimés par:

$$V(P, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iiint \frac{\rho(M, t-r/c)}{r} d\tau \quad (\text{III-9}),$$

$$\vec{A}(P, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint \frac{\vec{j}(M, t-r/c)}{r} d\tau \quad (\text{III-10}).$$

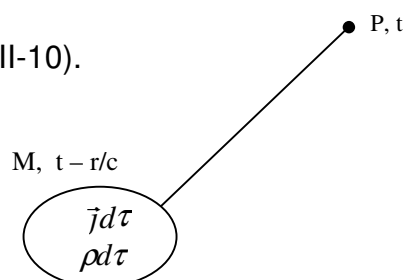


Figure III-1

C'est à partir de ces potentiels que les champs \vec{E} et \vec{B} s'expriment par les relations III-11 et III-12 préexistantes aux Équations de MAXWELL :

$$\vec{E} = -grad V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (\text{III-11}), \quad \vec{B} = rot \vec{A} \quad (\text{III-12}).$$

La détermination des champs doit permettre de calculer les forces que les charges et les courants, qui sont leurs sources, exercent sur d'autres charges et d'autres courants. Pour la mise en œuvre de ces équations, on est conduit à exprimer les forces qui interviennent lorsque ces champs et ces charges et/ou courants sont en interaction. On exprime alors la force sur une charge électrique q , animée de la vitesse \vec{v} , dans des champs \vec{E} , \vec{B} par la Relation de LORENTZ :

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B}) \quad (\text{III-13}).$$

Dès lors que l'on sait exprimer, par l'intermédiaire des champs, les forces qui s'exercent entre des charges et/ou des courants, et que l'on sait que les courants sont des charges en mouvement, on dispose, en principe, de tous les éléments pour résoudre l'essentiel des problèmes d'électromagnétisme macroscopique, dans l'espace vide. Ainsi, le lien des Équations de MAXWELL avec la réalité physique se ramène, à la base, au lien entre une charge électrique en mouvement quelconque et ses champs au travers des potentiels \vec{A} et V , le cas de la charge statique correspondant à celui où la vitesse et l'accélération sont nulles.

James Clerk MAXWELL disposait des équations existant antérieurement et qui préfiguraient les équations III-1 à III-4 ci-dessus, mais sans le terme $\epsilon_0 \mu_0 \partial \vec{E} / \partial t$ dans l'équation III-3. Ses réflexions, d'inspiration mécaniste (engrenages, tourbillons....) l'ont conduit à imaginer que, dans les isolants et en régime variable, *un courant de déplacement* prolonge le courant de conduction et, de ce fait, à introduire ce terme dont la présence permet de passer des équations III-1 à III-4 aux équations III-5 à III-8 ; c'est en ce sens que les Équations de MAXWELL conduisent à prévoir la propagation du champ électromagnétique. Les interprétations ultérieures de la réalité physique ont été sensiblement différentes, et ont abouti à la Théorie de MAXWELL-LORENTZ. Celle-ci présente donc des différences, quant à ses racines conceptuelles, par rapport à la Théorie de MAXWELL, mais l'une et l'autre conduisent à prévoir la propagation des champs \vec{E} et \vec{B} par un cheminement que nous nous proposons de réexaminer.

Les équations III-1 à III-4 expriment, sous forme différentielle, la théorie électromagnétique prémaxwellienne bâtie sur les données expérimentales disponibles à l'époque, complétées avec l'introduction de l'hypothèse du courant de déplacement et les conséquences qui en résultait sur l'équation III-3. Ainsi, en prenant l'exemple du champ électrique dans le vide, on avait observé

l'action d'une charge q au point A sur une charge q' au point B à la distance r de A et on en avait déduit la loi de la force s'exerçant entre elles en fonction des valeurs de q , q' et r . On avait généralisé le problème **en supposant** que si q' n'est pas présente en B, il existe un champ électrique qui va se manifester en y amenant une charge, et on avait défini le champ électrique \vec{E} en B comme la force qui s'exerce sur cette charge ayant la valeur unité. Dans ce contexte, si la charge q prend une valeur nulle, à un instant donné, le champ est supposé s'annuler dans tout l'espace au même instant ; si la charge q passe d'une position à une autre, la modification du champ est supposée s'établir instantanément dans tout l'espace. On arrive à des situations similaires pour des aimants ou des courants engendrant un champ magnétique. Dans cette théorie électromagnétique, l'existence d'un champ en l'absence de charges ou de courants ne peut pas être envisagée.

L'introduction du terme $\epsilon_0\mu_0\partial\vec{E}/\partial t$ dans l'équation III-3 va faire évoluer l'interprétation des phénomènes par les conséquences qu'elle entraîne, au plan mathématique, sous la forme suivante. On part de l'équation III-1 :

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}.$$

En prenant le rotationnel des deux membres et, en tenant compte de l'identité mathématique,

$$\text{rot}(\text{rot } \vec{E}) = \text{grad}(\text{div } \vec{E}) - \Delta \vec{E},$$

on arrive à l'équation :

$$\Delta \vec{E} - \epsilon_0\mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \frac{1}{\epsilon_0} \text{grad } \rho + \mu_0 \frac{\partial \vec{j}}{\partial t} \quad (\text{III-14}).$$

De la même façon, on arrive pour le champ magnétique à :

$$\Delta \vec{B} - \epsilon_0\mu_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = -\mu_0 \text{rot } \vec{j} \quad (\text{III-15}).$$

A partir de ces résultats, on ne peut pas ne pas observer que, lorsque ces équations sont associées aux conditions $\rho = 0$, $\vec{j} = 0$, on retrouve les équations mentionnées en III-5 et III-6 :

$$\square \vec{E} = 0 \quad (\text{III-5}),$$

$$\square \vec{B} = 0. \quad (\text{III-6}).$$

Des opérations similaires conduisent, pour les potentiels \vec{A} et V , aux équations :

$$\square V = 0 \quad (\text{III-7}),$$

$$\square \vec{A} = 0 \quad (\text{III-8}).$$

C'est à dire que les champs \vec{E} et \vec{B} , et les potentiels \vec{A} et V , se trouvent insérés dans des équations de propagation, d'où la conclusion qui a semblé s'imposer que, dans l'espace vide, le champ électromagnétique se propage sous forme d'ondes à la vitesse c telle que $c^2 = 1/\epsilon_0\mu_0$.

La démarche qui vient d'être évoquée a conduit à passer de la physique pré-maxwellienne qui prévoyait *un lien rigide* entre le champ et ses sources à la physique post-maxwellienne dans laquelle le champ est supposé se désolidariser de ses sources ; or, cette démarche contient une faille.

Lorsque, partant de la physique prémaxwellienne, on écrit les équations III-14 et III-15, on reste dans le cadre des hypothèses qui ont conduit à établir ce faisceau d'équations, c'est à dire que l'on reste dans le contexte de l'existence de champs liés indissolublement à leurs sources caractérisées par ρ et \vec{j} . Lorsque l'on passe à la situation correspondant à l'annulation de ρ et \vec{j} dans les seconds membres de ces équations, en conservant les champs exprimés par leurs d'alembertiens dans les premiers membres, on postule **implicitement** que, à un instant donné, les champs existent en l'absence de sources ; non moins implicitement, on exclut cependant que les champs puissent exister à cet instant sans que des sources ne les aient engendrés antérieurement. Autrement dit, la démarche conduit à supposer que les champs se sont déconnectés de leurs sources et à faire, **a priori**, une hypothèse de même nature que celle de la propagation, grâce à quoi on aboutit ensuite aux équations de propagation : elles expriment mathématiquement, ce que l'on a présupposé. A ce point de la démarche, en faisant l'hypothèse que le champ électrique et le champ magnétique peuvent se déconnecter de leurs sources, on passe d'une interprétation de la réalité physique à une autre, profondément différente, sans support logique et sans support expérimental ; si cette hypothèse est inexacte les équations de propagation n'ont pas de sens. Pour rester dans un cadre logique, la démarche aurait dû conduire à vérifier la validité de l'hypothèse sur laquelle elle s'appuyait ; cela n'a pas été fait et c'était d'ailleurs totalement en dehors des possibilités expérimentales de l'époque.

Que le champ électromagnétique puisse se détacher de ses sources, cela correspond à une vision de la réalité physique que rien n'a validé par la suite. Plus tard, on a compris que le rayonnement (hormis le rayonnement d'origine nucléaire) implique que des charges soient accélérées, avec intervention d'un processus de création des particules que sont les photons (on les définit comme *les éléments d'excitation du champ*). Examinons ce à quoi conduit l'hypothèse de l'existence du champ en dehors de ses sources dans l'exemple d'un électron négatif et d'un électron positif arrivant au contact l'un de l'autre ; ils se dématérialisent (annulation des charges) en engendrant des rayons gamma : même actuellement, quelles conclusions en tirer ? Comment leurs champs et l'énergie associée (qui s'étendent dans l'infini de l'espace) peuvent-ils s'annuler, dans un nouvel équilibre qui s'établirait par *propagation* et impliquerait l'infini du temps ? Ces aspects des choses ne pouvaient pas être pris en compte lorsque les premiers pas ont été effectués sur la voie qui s'ouvrait vers le développement de l'électromagnétisme.

Lorsque les Expériences de HERTZ (1887-1888) mettent en évidence l'existence des ondes électromagnétiques, on redécouvre que le phénomène avait été prévu dans le cadre de la Théorie de MAXWELL, un quart de siècle plus tôt. C'est alors un véritable éblouissement intellectuel et, à partir de là, on réexamine les travaux qui

pouvaient avoir rapport avec cette situation. En 1857, Gustav KIRCHOFF analysant les propriétés du champ électromagnétique, avait établi les lois de la propagation d'un signal électrique sur une ligne conductrice (équation des télégraphistes). En 1867, indépendamment des travaux de James Clerk MAXWELL, Ludwig LORENZ avait, lui aussi, reformulé les équations de l'électromagnétisme en y introduisant les potentiels retardés ; il postulait, a priori, la propagation du champ, sans avoir à faire les hypothèses de l'éther et du *courant de déplacement*. Ainsi la Théorie de MAXWELL, qui avait soulevé beaucoup de réticences lors de son élaboration, peut s'imposer spontanément un quart de siècle plus tard. Mais aussi, entre-temps, les connaissances générales sur la matière et l'électricité progressent rapidement. En 1867, George STONEY évalue le nombre d'AVOGADRO et, à partir de 1874, il travaille sur le concept de charge élémentaire de l'électricité qu'il nomme *l'électron* en 1891. En 1876, Oliver Heaviside généralise les équations de propagation du champ électromagnétique sur une ligne conductrice et tout incite à penser que le champ se propage dans le vide en analogie avec ce qui se passe sur une telle ligne ; il semble approprié de refonder la théorie électromagnétique sur des bases actualisées, en continuant à considérer que les ondes hertziennes résultent de la propagation du champ du courant qui circule dans le circuit émetteur. C'est ce que fait Hendrick Antoon LORENTZ dans sa *théorie électronique de la matière*, après s'être livré à une analyse approfondie de la Théorie de MAXWELL et il obtient des résultats significatifs dans le domaine de la lumière. La Théorie de MAXWELL-LORENTZ amène ainsi la théorie électromagnétique à une forme quasi-définitive dans sa version pré-quantique et pré-relativiste. Cette théorie accompagne la radioélectricité classique dans ses développements et ses avancées. Elle s'affranchit de certains supports conceptuels de la Théorie de MAXWELL tels que l'éther, le courant de déplacement, les potentiels instantanés, mais de ce fait, elle exprime aussi une vision profondément différente des réalités physiques. Elle constitue le cadre dans lequel s'effectue le cheminement, indiqué ci-dessus, qui conduit des Équations de MAXWELL aux équations de propagation. On s'appuie sur la conclusion que ce qui découle des Expériences de HERTZ, prolongé par le développement de la radioélectricité, vérifie la Théorie de MAXWELL actualisée et confirme la validité du concept de *la propagation du champ électromagnétique*.

Cette démarche contient une faille qui ne pouvait pas apparaître à l'époque. Elle repose sur le postulat que les ondes radioélectriques résultent de la propagation du champ du courant circulant dans le circuit émetteur. Or, dans toute cette période, on ignore que la réalité physique est différente : le rayonnement électromagnétique, dans son ensemble, résulte de l'émission de quanta d'énergie, les photons, engendrés par un processus de création de particules ; le champ électromagnétique de l'émission hertzienne n'est pas le champ du courant qui circule dans l'antenne d'émission, il a pour sources des photons engendrés par les électrons de conduction (qui subissent un mouvement accéléré) à partir de l'énergie électrique injectée dans l'antenne. Lorsque ces photons sont en grand nombre (ce qui est le cas habituel correspondant à un signal d'amplitude détectable à la réception), le champ dont ils sont porteurs prend, par effet statistique, les caractéristiques du champ exprimé par les potentiels retardés ; le carré de la valeur du champ en un point de l'espace reflète

la probabilité de présence d'un photon en ce point et, d'une façon plus générale, le champ exprimé à partir des potentiels retardés représente l'enveloppe des phénomènes réels. Dans ces conditions, les ondes hertziennes ne constituent en rien la vérification expérimentale de la propagation du champ, telle qu'elle est supposée découler des équations III-5 et III-6, ni la validation de l'opération qui a conduit à ces équations en annulant ρ et \vec{j} dans les équations III-14 et III-15 : on a cru observer la propagation du champ d'un courant et on a observé le champ d'un flux de photons.

Les développements théoriques de l'électromagnétisme ont montré que le rayonnement d'énergie (au sens classique du terme) est lié au fait que des charges électriques sont accélérées, et avec un niveau d'accélération suffisant. Or, les équations de propagation des champs \vec{E} et \vec{B} ont été obtenues sans que ces paramètres soient pris en compte et, ainsi, elles impliquent un autre volet que celui qui correspond à l'interprétation des ondes radioélectriques : celui des interactions retardées et du champ libre. On revient au point de départ de l'analyse qui a été effectuée ici concernant l'annulation de ρ et \vec{j} dans les équations III-14 et III-15. En même temps que l'on considère (de façon inexacte) que les équations de propagation sont vérifiées par les ondes radioélectriques, on considère que l'hypothèse qui consiste à supposer que le champ électromagnétique peut se détacher de ses sources est validée ; en fait, il n'en est rien. Le moment semble donc venu d'engager une clarification sur le sujet. Cela implique de vérifier ce qui se passe quand une charge électrique est déplacée d'un point à un autre sans qu'intervienne un niveau suffisant d'accélération pour qu'il y ait rayonnement ; ce problème est de même nature que celui évoqué à l'introduction de la relativité, avec le cas concret de l'aimant en mouvement qui induit une force électromotrice dans un circuit conducteur. Le problème à résoudre pour clarifier la situation se pose très simplement et peut être schématisé de la façon suivante déjà évoquée : un aimant, initialement au repos, étant mis en mouvement, en face d'un circuit conducteur, la force électromotrice va-t-elle s'établir en concomitance avec le mouvement ou bien va-t-elle subir un retard de propagation proportionnel à la distance ?

Dans le cadre des présentes recherches, on anticipe que l'expérience mettra en évidence l'instantanéité de l'interaction et du transfert d'énergie qu'elle implique. Ainsi, la contradiction qui surgit au niveau de l'introduction de la relativité sera éliminée, et c'est tout l'ensemble des anomalies mentionnées, opposant la théorie électromagnétique à la réalité physique, qui sera aussi éliminé. Par sa simplicité, une telle expérience est la plus décisive pour amorcer la clarification de la situation, en même temps qu'elle revêt une signification épistémologique et pédagogique considérable, un siècle après avoir servi à présenter la relativité restreinte.

Toute l'analyse effectuée dans le cadre du présent travail conduit aux conclusions suivantes : les Équations de MAXWELL n'impliquent pas la propagation du champ électromagnétique, les Expériences de HERTZ et la radioélectricité ne vérifient pas cette propagation, les concepts de propagation, d'interactions retardées et de champ libre, dans leur acception actuelle, n'expriment pas la réalité physique. Dans cette voie, l'inséparabilité quantique et les interactions entre particules intriquées

entrent dans la même classe de phénomènes que les interactions instantanées de couplage, ce qui élimine l'anomalie qu'elles semblaient présenter. La propagation du champ électromagnétique, les interactions retardées, le champ libre, ont constitué des pistes d'une extraordinaire fertilité mais, mathématiquement et physiquement, il s'agit de pistes de substitution permettant d'avancer en l'attente de la vraie voie prenant en compte la réalité physique des phénomènes, c'est à dire la création de c-particules aux racines de la quantification de l'énergie radiante.

James Clerk MAXWELL et les physiciens qui lui ont succédé dans l'étude du champ électromagnétique, ne pouvaient parvenir à une expression valable de l'émission des ondes électromagnétiques sans être en contradiction avec la logique telle qu'elle apparaît aujourd'hui, parce qu'il leur manquait les maillons quantique et relativiste. On ne peut pas interpréter valablement le rayonnement électromagnétique tant que l'on n'a pas mis en évidence le processus physique de ce rayonnement, c'est à dire le processus d'émission du photon unitaire. En l'absence de ce maillon, il fallait un concept de substitution, pour exprimer le rayonnement : ce fut *la propagation du champ électromagnétique*. Il s'est trouvé que les équations basées sur ce concept ont exprimé, de façon globalement exacte, le phénomène physique observable dans le cas habituel où les photons sont en très grand nombre et reconstituent une onde dotée des mêmes caractéristiques que celles résultant des prévisions théoriques: le palliatif a pris les apparences de la réalité physique. Bien que la quantification mathématique du champ électromagnétique ait étendu le processus de quantification de la lumière au rayonnement hertzien, elle l'a fait sans s'affranchir de la propagation : la théorie s'est ainsi rapproché de la réalité physique sans en être l'expression exacte, ce qui a contribué, pour une part, aux difficultés de compréhension de la-dite théorie et de son formalisme mathématique.

Le courant de déplacement mérite aussi attention. Il a été introduit en considérant qu'il prolonge le courant de conduction dans les milieux isolants, en circuit ouvert et en régime variable, et qu'il produit les mêmes effets électromagnétiques que le courant de conduction. Quelle est la réalité physique du rayonnement hertzien? L'émetteur fournit de l'énergie aux électrons de conduction de l'antenne dont le mouvement constitue le courant. Le circuit est ouvert et l'énergie passe des v-particules que sont les électrons aux c-particules que sont les photons. Il est bien vrai que le flux des photons, dans le milieu isolant qu'est le vide, prolonge le flux des électrons dans le conducteur et engendre les mêmes effets électro-magnétiques. C'est d'ailleurs la raison principale pour laquelle s'est produite cette étrange imbrication de la réalité et des apparences: la force électromotrice dans un conducteur présente globalement les mêmes caractéristiques, qu'elle soit induite par couplage ou par rayonnement. Dans une étonnante alchimie procédant bien davantage du génie que de la logique, James Clerk MAXWELL associait les potentiels instantanés et le courant de déplacement : il en faisait ressortir la prévision des ondes électromagnétiques incluant la lumière, en établissant une prodigieuse passerelle au-dessus du vaste domaine d'ignorance qui n'allait être défriché que très progressivement.

La situation qui découle de ces éléments présente deux volets. Dans le premier, la démarche précédente semble faire apparaître une dérive dans la logique

de l'articulation de l'instrument mathématique et de la réalité physique. En l'état actuel des choses, il reste à obtenir la vérification expérimentale que la réalité physique est différente de ce à quoi avait conduit la démarche en cause : plus précisément, on anticipera ici que l'expérience cruciale entre un aimant en mouvement et un circuit conducteur va démontrer que l'interaction de couplage concernée est instantanée. Nous pouvons en conclure que la physique s'est trouvée engagée sur une fausse piste. Dans un deuxième volet, ce jugement ne peut pas être cependant *en tout ou rien*. Bien que l'hypothèse de la propagation du champ électromagnétique apparaisse inexacte dans sa formulation en vigueur, elle conduit à exprimer l'aspect statistique du rayonnement électromagnétique et l'enveloppe des phénomènes, et à ce titre, elle est irremplaçable : le fait de savoir que le rayonnement hertzien est constitué de *quanta d'énergie émis tout d'un bloc* et non d'une *énergie distribuée de façon continue sur un volume sans cesse croissant* ne permet pas de formuler directement le champ d'une émission radioélectrique en tous points de l'espace. D'autre part, le renoncement au concept de propagation semble enlever toute signification au champ libre ; or, c'est en quantifiant le champ libre que la théorie quantique des champs et l'électrodynamique quantique ont conduit à la formulation d'interactions fondamentales qui sont à la base de la physique, de la physico-chimie et de la chimie.

Lorsque les physiciens du XIX^e siècle ont commencé à élaborer les lois de l'électromagnétisme, il manquait des maillons dans la chaîne des connaissances pour que leur analyse fût exacte : ils ignoraient l'intervention du processus de création de particules dans le rayonnement d'énergie et ils ignoraient que la charge électrique qui est la source d'un champ électrique dans son propre référentiel dans lequel elle est immobile est la source d'un champ électrique et d'un champ magnétique, lorsqu'elle est observée à partir d'un référentiel en mouvement par rapport au précédent. En l'absence de ces maillons, indispensables pour une interprétation des phénomènes cohérente avec la réalité physique, il fallait des concepts de substitution pour faire avancer les choses ; la propagation des champs, les potentiels retardés, les Potentiels de LIÉNARD et WIECHERT ont rempli ce rôle. Les prémisses inexactes ont conduit à des résultats valables, mais cela impliquait que l'intuition clairvoyante fût amenée à agir à contre-courant de la logique. Le moment vient ensuite où les prémisses exactes peuvent être substituées aux prémisses inexactes, ouvrant la voie à de nouvelles avancées : en premier lieu, la solution du problème de l'inséparabilité quantique et l'épilogue de la crise de la physique amorcée dans les années 30 avec le Débat EINSTEIN-BOHR et le Paradoxe EINSTEIN-PODOLSKY-ROSEN.

On va donc examiner quelques aspects du cheminement de la physique, en s'efforçant de mettre en évidence, les dérives qui se sont introduites à partir de cette faille et les nouvelles orientations susceptibles d'en découler.

CHAPITRE IV

Retour sur les quanta et la relativité

Par son article de mai 1905 : *Sur un point de vue heuristique concernant l'émission et la transformation de la lumière*, Albert EINSTEIN introduit une rupture avec les théories maxwelliennes : il observe que celles-ci prévoient « *une énergie distribuée de façon continue sur un volume sans cesse croissant* », alors que les éléments théoriques et expérimentaux dont il dispose 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 (6).*»

Le titre de l'article qui introduit les quanta mentionne explicitement la lumière, et le contexte montre qu'il concerne les rayonnements couvrant le domaine allant de l'infrarouge thermique à l'ultraviolet, l'extension se faisant naturellement ensuite aux rayons X et gamma à partir de la remarque 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.* »

Cette remarque laisse supposer qu'il peut exister une ligne de séparation entre un domaine pour lequel l'interprétation maxwellienne est appropriée et un autre pour lequel elle ne l'est pas, les fondements étant alors quantiques ; dans cette séparation, la densité d'énergie et la longueurs d'onde sont imbriquées : c'est le début de la prise de conscience du processus par lequel les quanta, en très grand nombre pour une énergie donnée, reconstituent une onde d'apparence continue. Mais il y a un problème sous-jacent. Au moment de la découverte expérimentale des ondes radioélectriques, on avait observé des rayonnements hertziens jusque dans l'infrarouge submillimétrique, c'est à dire dans un domaine qui appartient aussi au rayonnement de type *corps noir*, et on en avait conclu qu'il y avait là la preuve expérimentale de l'unicité du domaine électromagnétique ; or, les quanta introduisaient une rupture de cette unicité, au niveau de la distribution de l'énergie dans l'espace : la lumière apparaissait comme ayant une structure physique différente de celle des ondes radioélectriques, et cela dans une même gamme de fréquences. Ce problème prendra une importance considérable, mais seulement une vingtaine d'années plus tard. Il faut remarquer que les avancées de Max PLANCK et Albert EINSTEIN avaient été réalisées sous la pression des anomalies qui apparaissaient dans les données théoriques et expérimentales concernant la lumière, mais rien de semblable n'intervenait dans le domaine des ondes hertziennes, la Théorie de MAXWELL-LORENTZ accompagnant, sans faille apparente, les évolutions de la radioélectricité vers les ondes de plus en plus courtes, ce qui constituait l'objectif scientifique de l'époque, en la matière. Ainsi, l'interprétation du rayonnement radioélectrique, dans le cadre de la Théorie de

MAXWELL-LORENTZ, était devenue un dogme, dans ce qu'il pouvait avoir de plus absolu. L'introduction des quanta par Max PLANCK en 1900 apparaît pour lui comme la seule solution aux problèmes qui se posent, mais à laquelle il se résigne dans une sorte de déchirement intellectuel : il limite le rôle des quanta aux processus d'émission et d'absorption, laissant aux Équations de MAXWELL-LORENTZ le soin de gérer la situation entre l'émission et l'absorption. Cinq ans plus tard Albert EINSTEIN franchit un nouveau pas en conférant aux quanta le statut de corpuscules à part entière, ayant leur existence propre dans l'espace, remettant en honneur l'intuition géniale d'Isaac NEWTON des *grains de lumière*. Mais il ne s'engage, lui aussi, qu'avec réticence dans cette voie, et encore quatre ans plus tard, il affirme 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 (7)*. » Pour toute la communauté scientifique de l'époque, les ondes hertziennes s'insèrent dans une théorie sans faille, basée sur *la propagation du champ électromagnétique*, et parfaitement vérifiée par l'expérience. Les phénomènes qui se rattachent à la lumière apparaissent comme constituant un domaine à part dans celui des ondes électromagnétiques.

Ainsi, la physique va se développer sur le postulat implicite qu'il y a deux modes de rayonnement de l'énergie électromagnétique :

- l'un concernant les rayonnements émis à partir d'un corps chauffé ou de l'ionisation des gaz dans le spectre visible et le spectre ultraviolet (étendus ensuite de l'infrarouge aux rayons X et gamma), procédant du phénomène de création de particules, *les quanta d'énergie émis tout d'un bloc...*(en 1926, Gilbert LEWIS introduira la dénomination de photons) ;
- l'autre concernant les rayonnements hertziens, supposés résulter de la propagation du champ du courant circulant dans un conducteur et qui impliquent *une énergie distribuée de façon continue...* ; c'est sur cette base que l'on enseignera la théorie de la radioélectricité, jusqu'à maintenant.

Toutefois, la coexistence de deux formes de distribution de l'énergie aussi différentes dans le rayonnement électromagnétique, dont l'unicité avait été si brillamment postulée par la Théorie de MAXWELL, suscite des doutes qui vont croissant. En 1924, Louis de BROGLIE attache suffisamment d'importance à ce problème pour lui consacrer un paragraphe en conclusion du texte par lequel il introduit la mécanique ondulatoire, en affirmant: « *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 (8)*. » Effectivement, une théorie électromagnétique nouvelle va être élaborée, mais dans une voie différente de celle prévue par Louis de BROGLIE ; comme on le verra plus loin, elle ne quantifie pas seulement l'énergie radiante (au sens classique du terme) mais l'ensemble du champ électromagnétique et l'énergie que la théorie lui associe.

Dans le mois suivant l'introduction des quanta dans la lumière, Albert EINSTEIN introduit la relativité restreinte par son article: *Vers l'électrodynamique des corps en*

mouvement. Il rattache le rayonnement hertzien aux Equations de MAXWELL-HERTZ, sans aucune référence aux quanta ; il considère que la Théorie de MAXWELL est *appropriée*, donc que ce rayonnement implique *une énergie distribuée de façon continue sur un volume sans cesse croissant*. En 1915, dans l'article par lequel il introduit la relativité générale, sa position est confirmée en faisant référence aux Equations de MAXWELL-POYNTING qui expriment, précisément dans la voie maxwellienne, le transfert de l'énergie injectée dans l'antenne à l'énergie rayonnée (au rendement près). On est là à un point qui va marquer la physique du XX^e siècle : toute la communauté de la physique va s'associer à cette position qui semble incontournable tant les succès de la relativité restreinte et de la relativité générale tendent à valider les prémisses auxquelles ces théories sont associées.

En fait, ce n'est pas la relativité qui s'oppose initialement aux interactions instantanées, c'est la Théorie de MAXWELL-LORENTZ, mais la relativité entérine les interactions retardées en tant que conséquence de la propagation du champ. Cela va aller encore plus loin au travers de l'Espace-Temps de MINKOWSKI ; la *symétrisation des variables d'espace et de temps* conduira à remplacer les Equations de POISSON par des Equations de D'ALEMBERT pour l'électrostatique et la gravitation, et la propagation apparaîtra ancrée dans l'espace-temps, dominant la gravitation comme elle domine déjà l'électromagnétisme. La physique est passée, presque subrepticement, des interactions instantanées prémaxwelliennes, aux interactions retardées généralisées. Dans son introduction de la théorie de la relativité générale (9), Albert EINSTEIN mentionne la nécessité d'étendre ce qu'il a appelé le *postulat de relativité* qui est à la racine de la relativité restreinte puis, ayant décrit les instruments mathématiques dont il va se servir, il arrive, avec les *Equations du champ de gravitation en l'absence de matière* (titre du paragraphe 14) pour le champ gravitationnel, à une situation analogue à celle qui s'est établie pour le champ électrique, dès lors que l'on a admis que les équations de propagation du champ expriment la réalité physique des phénomènes. Dans le cas de la gravitation, les équations le conduisent à formuler *la quantité de mouvement et l'énergie transférées par unité de temps du champ gravitationnel à la matière* (et vice versa) ; on se retrouve au cœur du problème, initié pour l'électromagnétisme, du champ qui est supposé se détacher de ses sources.

Dans le langage courant cela est exprimé sous la forme suivante par Lev LANDAU (1964) : « *L'expérience montre que les interactions instantanées n'existent pas dans la nature. Si l'un des corps interagissants subit une certaine modification, cela ne se reflétera sur l'autre corps qu'au bout d'un certain temps.... La vitesse de propagation des interactions étant finie, la théorie relativiste de la gravitation, tout comme l'électrodynamique, doit admettre la possibilité de l'existence d'un champ gravitationnel libre non lié à la présence du corps, qu'on désigne sous le nom d'ondes gravitationnelles* (10).»

Cette vision des choses est présentée d'une façon exprimant une interprétation similaire de la propagation par Richard FEYNMAN (1965) : « *Tout simplement, il se passe que si vous agitez une charge, une autre s'agitiera plus tard. Il y a entre les*

charges une interaction directe, quoique agissant avec un certain retard . La loi donnant la force liant le mouvement d'une charge à une autre devrait juste inclure ce retard ; agitez celle-ci, celle-là se mettra à bouger un peu plus tard. Un atome vibre dans le soleil, l'électron dans mon œil vibrera huit minutes plus tard à cause de l'interaction directe transmise entre eux (11).» Dans cette présentation, le champ de l'électron est considéré comme soumis à la propagation selon les mêmes modalités, aussi bien s'il correspond à l'émission d'un photon par un électron qui transite entre deux niveaux énergétiques d'un atome, que s'il s'agit du champ d'un électron qui est mis en mouvement en subissant une accélération de niveau insuffisant pour émettre un photon.

Ces deux affirmations mettent en évidence le lien avec la faille qui s'est établie à partir du passage des Équations de MAXWELL aux équations de propagation. Après que l'idée inexacte se fût introduite que le champ électromagnétique peut devenir un champ libre, c'est à dire se détacher de ses sources, cette idée s'est étendue au champ gravitationnel. Dans un cas comme dans l'autre, l'imbrication des variables d'espace et de temps a conduit à avoir recours au calcul tensoriel, particulièrement bien adapté pour traiter les problèmes dans leur généralité quadri-dimensionnelle, mais qui présente l'inconvénient de rendre plus inaccessible le lien de ce qu'il exprime avec la réalité physique, en cours de traitement du problème. Lorsqu'on est dans la configuration où l'on part de prémisses inexactes qui conduisent systématiquement à des résultats valables, la faille dans les prémisses devient très difficile à mettre en évidence et il faut un long détour pour y parvenir.

Dans les dernières années de sa vie, Albert EINSTEIN doutait d'avoir été sur *la bonne piste* en se reprochant d'avoir privilégié la relativité aux dépens des quanta. Son audace scientifique l'a sans doute conduit consciemment ou inconsciemment, à envisager l'extension des quanta au rayonnement hertzien. Mais deux verrous fermaient cette voie. D'abord, contrairement à la lumière, où apparaissaient des contradictions au niveau de la théorie et entre la théorie et l'expérience, rien de semblable n'intervenait dans le domaine de la radioélectricité où l'expérience semblait confirmer la validité de la théorie, avancée après avancée ; introduire les quanta, c'était remettre en cause la vérification expérimentale supposée de la propagation, c'était détruire l'édifice brillamment construit depuis une vingtaine d'années. Ensuite, on a vu que, en s'appuyant sur l'interprétation des phénomènes liés au mouvement relatif d'un aimant et d'un conducteur, Albert EINSTEIN effleurait la réalité de l'instantanéité des interactions de couplage ; si les quanta avaient évacué la propagation du champ, il se serait trouvé dans la situation évoquée au chapitre I dans laquelle il n'avait plus de raison de remettre en cause la simultanéité ni de réaliser la synchronisation des horloges par des signaux lumineux, l'élaboration de la théorie de la relativité devenait impossible. Il y a eu une extraordinaire imbrication des bonnes et des fausses pistes, les fausses pistes ayant largement contribué à ouvrir les bonnes pistes. Mais il est vrai que c'est à ce niveau qu'Albert EINSTEIN a introduit les germes de la discordance qui allait opposer la relativité et les quanta.

CHAPITRE V

Des quanta à l'électrodynamique quantique

En même temps qu'apparaissait la nécessité d'une théorie électromagnétique nouvelle conférant au rayonnement hertzien la même structure quantique que celle introduite dans le rayonnement lumineux, le domaine de l'électromagnétisme s'élargissait considérablement. La connaissance de la structure de l'atome avait montré que celui-ci est constitué d'un noyau de charge électrique positive et d'électrons dont les charges électriques négatives équilibrent celle du noyau. Ainsi, le comportement de l'atome vis à vis des rayonnements qu'il est susceptible d'émettre ou d'absorber, et vis à vis des interactions avec d'autres atomes, est-il régi par des lois gouvernant les interactions électromagnétiques. Cependant, il est apparu simultanément que ces lois s'écartent largement de celles qui régissent le comportement des charges électriques dans le vide ou dans les conducteurs. Le premier problème qui se posait était d'interpréter le rayonnement du *corps noir* ; après les succès et les insuffisances de la Théorie de l'Atome de BOHR, la mécanique ondulatoire introduite par Louis de BROGLIE, formulée par l'Equation de SCHRÖDINGER interprétée par Max BORN, et la mécanique des matrices de Werner HEISENBERG ont fait avancer les choses. Une étape complémentaire a été franchie avec la quantification mathématique du champ électromagnétique initiée d'abord par Pascual JORDAN, puis développée avec la participation de Werner HEISENBERG, de Max BORN et de physiciens de l'Université de GÖTTINGEN, en parallèle avec un travail de même orientation mené par Paul DIRAC. Ces recherches ont conduit à la théorie quantique des champs, à l'électrodynamique quantique et à leurs prolongements (mésodynamique quantique, chromodynamique quantique...), constituant un vaste ensemble conceptuel basé sur un formalisme mathématique très spécifique.

Les lois de la physique quantique, concernant le niveau microscopique des phénomènes, sous-tendent les lois de la physique macroscopique : physique classique d'aujourd'hui, physico-chimie et chimie. On considère généralement qu'aucune expérience n'est venue contredire les prévisions de la physique quantique. Il convient toutefois de prendre en compte le fait que l'inséparabilité quantique pose un problème majeur et que sa solution éventuelle, dans la voie du renoncement au concept de propagation, repose sur le résultat de l'expérience préliminaire de l'interaction aimant-conducteur. On a vu qu'un résultat positif de cette expérience se répercuterait directement sur l'interprétation de la relativité et de l'espace-temps, mais il se répercuterait aussi sur l'électromagnétisme classique et quantique. Renoncer au concept de propagation, c'est admettre que les ondes radioélectriques ne relèvent pas de la propagation du champ du courant qui circule dans le circuit émetteur, mais de la création physique des particules que sont les photons ; c'est étendre, au rayonnement hertzien, la quantification qu'Albert EINSTEIN avait introduite explicitement dans la lumière et qui s'était étendue, par la

nature des choses, des rayons gamma à l'infrarouge thermique. Cette quantification se trouve en interface avec la quantification mathématique (dont une des raisons d'être correspondait au fait que le rayonnement hertzien n'était pas quantifié), ce qui pose le problème de la cohérence des éléments émergeant de l'une et de l'autre de ces démarches, cohérence de ces éléments entre eux et avec la réalité physique.

Examinons d'abord, en ce qui concerne cet aspect des choses, le contenu de la quantification mathématique. On se reportera à l'ouvrage : Photons et atomes, Introduction à l'électrodynamique quantique de Claude COHEN-TANNOUJ, Jacques DUPONT-ROC, Gilbert GRINBERG (12). On y trouve conjointement l'interprétation classique (macroscopique) du rayonnement hertzien (champ du dipôle oscillant) et les principes de base de *la quantification de la théorie classique*. Il est d'abord rappelé comment la théorie classique formule le rayonnement du dipôle oscillant à partir de la Théorie de MAXWELL-LORENTZ, ce qui conduit à la conclusion : « *on retrouve les trois termes bien connus du rayonnement du dipôle, décroissant respectivement comme $1/r^3$, $1/r^2$, $1/r$.* » Le même problème est repris dans le cadre du processus de quantification, avec la conclusion : « *la moyenne du champ quantique est identique au champ classique.* » Entre ces deux étapes, *la théorie a été quantifiée*. Qu'est-ce que cela implique pour l'état du champ et de son énergie ? La réponse apparaît sous la forme suivante : « *Tout se passe comme si cet état représentait un ensemble de particules...(l'énergie et la quantité de mouvement de chacune étant proportionnelles à la constante de PLANCK et à une fréquence). Ces particules sont appelées des photons. Elles décrivent les excitations élémentaires des divers modes du champ électromagnétique quantifié.* »

Si on se limite à cet aspect de l'analyse, on peut avoir l'impression que la jonction est assurée avec les quanta einsteiniens, tels qu'ils ont été introduits dans la lumière. Par contre, les photons de la quantification mathématique (photons transverses, longitudinaux, scalaires) ne correspondent pas à la même représentation de la réalité physique que les quanta einsteiniens ou les photons initiaux, et ils peuvent intervenir dans des situations très différentes (émission et réabsorption virtuelles de photons, par exemple). La nature même du formalisme mathématique, et son caractère particulièrement abstrait, font qu'il est très difficile d'évoquer son contenu et de l'analyser avec des mots du langage courant ce qui conduit à prendre appui sur les points de repère disponibles. Lorsque la structure quantique de la lumière a été mise en évidence, incluant le rayonnement infrarouge du corps noir, le rayonnement hertzien est resté interprété dans le cadre de la propagation du champ électromagnétique, brisant l'unicité de nature des deux catégories de rayonnement. Le fait qu'il y ait, dans l'infrarouge, à la fois des rayonnements de source électrique et des rayonnements de source thermique crée *une situation sensible* en posant, comparativement, le problème de la structure de leur énergie. Aujourd'hui, avec l'apport de la quantification mathématique, peut-on considérer qu'il subsiste une différence entre un photon d'origine électrique, photon transverse libre de la quantification mathématique, et un photon einsteinien, d'origine thermique sur la même fréquence ? La réponse émanant du plus profond de la conviction des physiciens sera généralement: **il n'y en a pas !** Il est clair que la réponse à cette question, pour la bande infrarouge du rayonnement hertzien vaut pour l'ensemble de ce rayonnement.

La continuité de la nature physique des radiations en passant du rayonnement infrarouge thermique au rayonnement hertzien ressort aussi d'autres éléments théoriques et expérimentaux. Si le maser fonctionne (en continuité de principe avec le laser), c'est bien parce que l'onde électromagnétique est constituée de photons aussi bien dans la bande des fréquences lumineuses que dans la bande des radiofréquences. On observe, dans l'espace, des rayonnements synchrotron qui couvre une bande de fréquences allant des rayons X aux radiofréquences sans rupture de la structure quantique. Quand on détecte une onde hertzienne à bas niveau de puissance, on observe la discontinuité caractéristique de la structure quantique : si l'onde est détectée sous forme de quanta, il est difficile d'imaginer qu'elle ait été émise autrement que sous forme de quanta. La structure quantique de l'énergie hertzienne fait émerger une autre facette significative. Le champ maxwellien agit sur toutes les charges électriques, aussi bien s'il s'agit d'un électron lié à un atome que d'un électron libre. Des photons de basse énergie, tels que ceux des rayonnements lumineux et hertiens, ne peuvent déclencher une interaction avec un électron que si celle-ci est du type *choc inélastique*, dans laquelle ils sont totalement absorbés; si un choc de cette nature intervenait avec un électron libre, il ne pourrait y avoir simultanément conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement (contrairement à ce qui se passe avec les rayons X ou gamma qui impliquent des *chocs élastiques*). De ce fait, les photons hertiens n'interagissent pas avec un électron libre. Ce sont là des aspects spécifiquement quantiques qui émergent des théories qui quantifient le champ électromagnétique et qui sont recoupés par l'expérience. On constate, déjà à ce niveau, que l'apport de la démarche de quantification mathématique conduit à diverger par rapport à ses éléments d'entrée : la démarche mathématique est partie de la Théorie de MAXWELL-LORENTZ dont le champ est supposé agir sur toute charge électrique, et elle aboutit à la conclusion contraire.

Cette contradiction apparaît sous une autre forme. Considérons un élément linéaire de conducteur parcouru par un courant continu ou à basse fréquence (états stationnaires ou quasi-stationnaires). Le champ qu'il engendre est distribué de façon continue dans l'espace ; c'est ce que prévoit la théorie classique et que vérifie l'expérience. Lorsque l'élément de conducteur est parcouru par un courant à haute fréquence, il y a rayonnement et la théorie maxwellienne considère que ce champ s'affaiblit en $1/r$ avec la distance, mais elle lui confère aussi une distribution continue dans l'espace, similaire à celle du champ en $1/r^2$ de l'état stationnaire ou quasi-stationnaire et c'est sous cette forme qu'un tel champ parviendrait, par exemple, à la constellation Véga. Au niveau de son point de départ, la quantification mathématique s'appuie sur ce champ électromagnétique correspondant à la Théorie de MAXWELL-LORENTZ, donc sur cette distribution continue du champ et de l'énergie ; au terme de la démarche, elle aboutit à considérer que *tout se passe comme s'il était constitué de photons* ; mais d'autre part, elle traite le champ de rayonnement hertzien comme le champ de rayonnement lumineux dont on sait qu'il est physiquement incompatible avec la Théorie de MAXWELL-LORENTZ.

Les présentes recherches conduisent à considérer que la quantification mathématique a rejoint les quanta physiques de la quantification einsteinienne, rétablissant ainsi l'unicité de nature du rayonnement électromagnétique ; il faut alors admettre que la démarche mathématique s'est affranchie de ses racines en sortant de la chrysalide que constituait la Théorie de MAXWELL-LORENTZ, dans laquelle elle s'est développée. Elle correspond à une opération élargissant à l'ensemble du spectre du rayonnement électromagnétique celle amorcée par Albert EINSTEIN à partir de la lumière. L'aboutissement de la démarche implique de prendre conscience qu'elle conduit, pour le rayonnement hertzien, à des photons *émis tout d'un bloc*, et à admettre explicitement qu'il faut renoncer au champ impliquant *une énergie distribuée de façon continue*, c'est à dire renoncer à *la propagation*, dans son acception actuelle. On retrouve ainsi la faille que constitue ce concept et on doit vérifier qu'en l'éliminant, le cheminement reste cohérent dans son ensemble.

La quantification mathématique est effectuée à partir des Équations de MAXWELL, stricto sensu, (équations 1 à 4 du chapitre III) et des jauges (Jauge de COULOMB dans le cas de la quantification non covariante, Jauge de LORENTZ dans le cas de la quantification covariante). A ce niveau, la propagation ne concerne aucune des opérations impliquées : formulation lagrangienne/ hamiltonienne du champ et de l'énergie, Transformées de FOURIER, assimilation du champ à un ensemble d'oscillateurs harmoniques, substitution aux champs et aux potentiels d'opérateurs qui ne commutent pas, introduction de i et h dans les commutateurs, mise en œuvre d'opérateurs introduisant mathématiquement la fonction de création et d'annihilation de particules. Par contre, l'hypothèse initiale de la propagation se réintroduit au niveau des éléments de sortie de la démarche mathématique : les photons apparaissant comme *les excitations élémentaires du champ quantifié* sont considérés comme dotés des propriétés fondamentales du champ d'où ils sont extraits, donc de la propriété de propagation. Si on introduit, au niveau de la quantification mathématique, **la propriété intrinsèque de propagation** des c -particules que sont les photons, cette quantification peut s'appuyer sur le socle des Équations de MAXWELL dissociées des équations de propagation et de leurs conséquences.

Le renoncement au concept de propagation implique de réinterpréter le rayonnement hertzien pour qu'il apparaisse constitué physiquement de *quanta d'énergie émis tout d'un bloc*. La réalité physique apparaît plus facilement au niveau de la jonction entre l'infrarouge thermique et l'infrarouge hertzien. Dans un cas, c'est l'énergie thermique qui est convertie en photons, ceux-ci étant émis de façon aléatoire en phase et en polarisation dans un large spectre de fréquence ; dans l'autre, c'est l'énergie injectée sous forme électrique qui subit cette conversion, les photons étant émis en cohérence de phase et de polarisation sur la fréquence de l'émetteur ; dans les deux cas, il y a intervention d'un même **processus physique** de création des particules que sont les quanta-photons au niveau des électrons de surface du circuit rayonnant. Pour la même fréquence, un photon infrarouge thermique est **identique** à un photon infrarouge hertzien. Le processus d'émission des quanta einsteiniens est ainsi étendu à l'ensemble de l'énergie électromagnétique radiante qui retrouve l'unicité prévue par la Théorie de MAXWELL, le génie de son auteur ayant lancé une passerelle au-dessus du vaste domaine

d'ignorance de l'époque qui englobait, entre autres, le processus physique de création de particules. Quant au processus d'émission proprement dit, on peut l'imaginer de la façon suivante. Les électrons de conduction du conducteur d'antenne, dont les mouvements coordonnés (se superposant aux mouvements aléatoires) constituent le courant, sont animés longitudinalement et radialement de mouvements d'oscillation : pour une zone donnée de l'antenne, le courant crée des alternances dans lesquelles les électrons sont en excès ou en déficit par rapport aux protons, ils sont donc en pression alternativement positive et négative sur la barrière de potentiel : ils constituent des oscillateurs harmoniques. Toutes les conditions sont réunies pour qu'ils rayonnent en émettant des photons sur leur fréquence d'oscillation. Renoncer à la propagation implique d'admettre que le rayonnement hertzien procède du phénomène de création des particules que sont les photons, simplement parce qu'il ne reste plus d'autre interprétation possible. On n'est plus alors dans la configuration où *tout se passe comme si c'était un ensemble de particules....*, mais dans la configuration où ***c'est un ensemble de particules...*** En l'occurrence, la théorie a compensé spontanément la faille sur laquelle elle a été établie ; encore est-il indispensable d'en prendre conscience. Il y a bien continuité du processus quantique dans tout le rayonnement électromagnétique, et le rayonnement hertzien devient pleinement compatible avec les quanta einsteiniens.

Le renoncement au concept de propagation correspond à une mutation brusque de la physique. Les conséquences seront importantes mais difficilement prévisibles en l'état actuel des choses. Les fondements sur lesquels la physique quantique a été développée, étant ce qu'ils sont, les différentes branches de cette discipline se sont complétées pour résoudre les problèmes liés aux atomes et à leurs noyaux, au fur et à mesure qu'ils se sont posés. Il y a là un acquis considérable que rien ne peut remettre en cause ; d'ailleurs, on a vu, en ce qui concerne les Potentiels de LIÉNARD et WIECHERT, que le concept de propagation, aussi inadapté soit-il, a permis d'aboutir à une formulation exacte du champ électromagnétique, parce que les chercheurs avaient spontanément compensé la faille dont ils ignoraient l'existence. On peut dès à présent considérer qu'un processus intellectuel similaire s'est mis en œuvre pour que la quantification mathématique du champ électromagnétique, et la physique quantique en général, puissent aboutir à des résultats non seulement valables mais, qui plus est, d'un niveau d'exactitude dépassant l'imaginable, malgré des fondements conceptuels inexacts.

Les ondes hertziennes nous ouvrent un domaine d'interfaces entre la réalité physique du rayonnement électromagnétique, le faux concept de propagation du champ, les quanta einsteiniens et la quantification du champ électromagnétique. L'enjeu est immédiat : doit-on continuer à inclure la propagation du champ électromagnétique dans l'enseignement ? C'est parce que les Pères Fondateurs de la physique moderne ont été formés dans la fausse certitude de la validité du concept de propagation que le rayonnement hertzien est encore interprété sur la base de ce concept, alors qu'il relève du processus de création des particules-photons, dans le prolongement direct de ce qui a été élaboré pour la lumière. On a cherché à quantifier mathématiquement une énergie que l'on croyait physiquement continue ; en fait, on a exprimé mathématiquement la réalité de la quantification physique qui était initialement masquée.

Il est un autre domaine de contact intellectuel entre la quantification mathématique et la réalité physique : les interactions de couplage et en particulier l'interaction entre un aimant et un circuit conducteur en mouvement relatif qui constitue un élément-clé de ces recherches. Dans sa réalité élémentaire, une interaction de cette nature relève de processus similaires à ceux qui gouvernent l'interaction entre deux électrons ou entre un électron et un proton. L'interaction aimant-conducteur est une interaction macroscopique qui est la résultante et l'aspect statistique d'interactions se déroulant à l'échelle microscopique. Ces dernières, analysées dans le cadre de l'électrodynamique quantique, font intervenir des photons virtuels dans un processus théorique qui conduit à prévoir une interaction retardée : on se retrouve là au cœur de la faille qui s'est introduite à partir de la Théorie de MAXWELL, qui a atteint la relativité et l'espace-temps, et s'est propagée dans tout le socle de la physique. Une telle interaction doit être considérée comme instantanée, ce qui implique de repenser la théorie microscopique des interactions de couplage. Un acquis majeur demeurera : contrairement à ce que prévoit la théorie classique, une telle interaction est discontinue.

Lorsqu'un électron et un proton sont en mouvement libre l'un vers l'autre, à grande distance, il y a transfert de l'énergie potentielle à l'énergie cinétique des deux particules ; ce transfert s'effectue de façon discontinue, comme s'il y avait intervention de photons qui aient une vitesse infinie. Les photons étant étymologiquement liés à la lumière, il n'est pas souhaitable de les impliquer dans des interactions instantanées. Il ne s'agit pas d'amorcer l'analyse de ce problème, ici, mais de mentionner qu'il se pose.

Tout ce qui précède conduit à mettre en évidence la nécessité d'un remaniement des fondements sur lesquels la physique actuelle a bâti ses avancées. Il peut paraître étrange que de telles avancées aient pu être obtenues sur une faille aussi profonde que celle imputée au concept de propagation : les Équations de MAXWELL, les quanta, la relativité ont suscité initialement des réticences de même nature et les Diagrammes de FEYNMAN, lors de leur élaboration, ont subi des critiques injustifiées.

Comme l'a mentionné Banesh HOFMMANN, cité précédemment, ce que recouvre *l'intuition clairvoyante*, autrement dit le génie des chercheurs, est considérable : elle conduit à ouvrir de fausses pistes, parce que c'est la seule possibilité, à un moment donné, d'accéder aux bonnes pistes. On n'a peut-être pas encore pris complètement conscience du fait que, si le génie intervient, c'est pour compenser les carences de la logique, en agissant temporairement à contre-courant de celle-ci. C'est, tout simplement, la mise en œuvre du processus itératif par lequel l'être humain progresse depuis ses origines, au niveau individuel comme au niveau collectif.

Chapitre VI

La réalité physique sous le formalisme mathématique

VI-1 Aspects généraux

Les présentes recherches ont eu, à leurs racines, deux convictions :

- le concept de propagation est incompatible avec une interprétation valable des interactions de couplage,
- les quanta einsteiniens ont la même réalité physique dans les ondes radio-électriques que dans la lumière.

Ces deux visions de la réalité physique se rejoignent : introduire les quanta à la base du rayonnement hertzien, c'est renoncer à postuler et enseigner que ce rayonnement relève de la propagation du champ électromagnétique, c'est retirer à ce concept la seule vérification expérimentale qui lui a procuré la place qu'il occupe en physique et c'est, en fait, amorcer son élimination.

Lorsque Isaac NEWTON a introduit l'image des *grains de lumière*, il lançait une idée qui avait deux siècles d'avance sur la physique de son époque, mais elle n'est nullement devenue obsolète. Il exprimait ainsi, sous forme très synthétique, ce qu'Albert EINSTEIN allait préciser avec *les quanta émis tout d'un bloc et se déplaçant sans se diviser*. Mais aujourd'hui, de telles images, relevant de *l'intuition clairvoyante* peuvent-elles encore être utiles ?

Le mode de fonctionnement des processus intellectuels mis en œuvre jusqu'au début du XX^e siècle a subi deux coups d'arrêt avec la relativité puis avec la dualité onde-particule. Il a d'abord fallu accepter que l'on observe la même vitesse de la lumière lorsqu'on se rapproche ou qu'on s'éloigne de sa source, et ensuite admettre qu'une particule puisse *passer par deux trous à la fois* parce qu'elle est aussi une onde ! Les analogies empruntées au domaine de la mécanique sont devenues inopérantes, les faits ne correspondant plus aux images mentales que l'on peut élaborer classiquement ; les formalismes mathématiques, développés dans ces contextes, se sont substitués aux modes de réflexion utilisés antérieurement. Il n'est pas impossible que l'on soit allé plus loin qu'il n'était nécessaire dans cette voie et qu'il soit profitable de revenir, au moins en partie, aux formes antérieures de raisonnement.

Pour introduire les quanta dans la lumière, Albert EINSTEIN ne disposait, comme données expérimentales, que de l'effet photoélectrique sur les métaux et de données très partielles sur l'ionisation des gaz. Les avancées ultérieures ont conforté ses hypothèses, avec d'abord l'Effet COMPTON qui a mis en évidence, de façon quasi-tangible, le comportement corpusculaire du photon. Ensuite les clichés

de Chambres de WILSON, puis de chambres à bulles, ont montré la création de particules e^+ , e^- par un rayon gamma venant des profondeurs de l'espace cosmique. On a disposé ainsi d'une remarquable illustration du *quantum émis tout d'un bloc et se déplaçant sans se diviser*, pendant des années-lumière. Ces éléments permettent de suivre l'évolution du photon quand on passe de l'énergie nécessaire pour créer une paire de particules matérielles à celle qui déclenche l'Effet COMPTON, puis à celle qui permet encore d'arracher un électron à un Atome RYDBERG et ensuite à celle qui est très insuffisante pour de telles actions. Cela aide à comprendre que l'évolution du photon se poursuit vers les grandes longueurs d'onde sans pouvoir se manifester autrement qu'en communiquant son énergie à un électron d'une antenne radioélectrique, le signal n'étant détectable que si un grand nombre de photons est concerné simultanément. On est ainsi amené à étendre à toute l'énergie électromagnétique radiante la structure caractérisée par les *grains d'énergie*. C'est un des aspects du cheminement qui a été mis en oeuvre dans les présentes recherches en s'efforçant de s'appuyer sur la réalité physique.

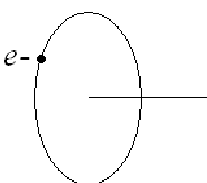
Si la réalité physique correspond à ce qui précède, on élargit le domaine de la quantification einsteinienne et on rejoint la quantification mathématique du champ de rayonnement, tout en mettant en évidence une anomalie : le grain d'énergie (ou la bulle, ou le nuage d'énergie pour les grandes longueurs d'onde) n'est pas compatible avec la structure continue de l'énergie prévue par la Théorie de MAXWELL-LORENTZ ; c'est pour cela que Albert EINSTEIN a dissocié l'émission de lumière de cette théorie et on retrouve ce qui a été dit au chapitre précédent en insistant simplement ici sur l'intérêt de ne pas se priver des images évocatrices de la réalité physique.

La mécanique ondulatoire venant après l'introduction des quanta dans la lumière entraînait une profonde mutation de la physique : les corpuscules se trouvaient associés aux ondes et les ondes aux corpuscules. Mais pour l'essentiel, la mutation s'est concrétisée au travers des formalismes mathématiques et dans le fait que le lien perceptible existant antérieurement entre la réalité physique des phénomènes et leur formulation mathématique a été très largement distendu. Il faut cependant remarquer que la découverte de la mécanique ondulatoire a procédé d'une démarche classique et Louis de BROGLIE indique qu'il recherchait « *une véritable synthèse des notions d'onde et de corpuscules en conservant les images précises de réalité physique que l'on avait toujours attribué à ces deux notions (13).* ». C'est là un exemple très caractéristique de la démarche engagée sur des données concrètes mais qui a été orientée ensuite vers les formalismes mathématiques avec l'Equation de SCHRÖDINGER et l'interprétation probabiliste de la fonction d'onde. Il s'est avéré que l'expression des phénomènes par l'Equation de SCHRÖDINGER était équivalente à celle issue de la mécanique des matrices et à ce sujet Werner HEISENBERG écrit : « *SCHRÖDINGER a réussi à montrer que, du point de vue mathématique, sa mécanique ondulatoire était équivalente à la mécanique quantique, de sorte qu'il s'agissait de deux formulations mathématiques différentes du même état de choses. Par ailleurs, la méthode de SCHRÖDINGER permettait d'effectuer de nombreux calculs qui auraient été extrêmement compliqués avec les procédés de la mécanique quantique (14).* » Toutefois, Werner HEISENBERG aborde le problème sur une base beaucoup plus fondamentalement mathématique

qui va marquer un tournant dans l'approche théorique de la réalité physique, en précisant « *qu'une description visuelle dans l'espace et le temps des processus se déroulant à l'intérieur de l'atome est impossible... qu'il ne faut pas rechercher les orbites des électrons... que, dans une physique de ce genre, seules les grandeurs observables doivent jouer un rôle.* » Tout en constatant que les deux voies ont été complémentaires et fertiles, on remarquera que la voie s'appuyant sur les images de la réalité physique, suivie par Louis de BROGLIE, a d'emblée permis de prévoir les phénomènes d'interférences déclenchés par des particules, alors que le formalisme mathématique de la mécanique des matrices ne conduit pas directement à une telle prévision. Puisque la voie du formalisme mathématique n'a pas apporté la solution du problème posé par l'inséparabilité quantique, on peut espérer que la voie complémentaire *des images précises de la réalité physique* sera plus fructueuse : élargir l'image des grains de lumière au rayonnement hertzien, c'est exclure le concept de propagation et résoudre le problème de l'inséparabilité quantique.

Le présent travail conduit ainsi à rechercher les situations sensibles dans lesquelles la réalité physique du rayonnement électromagnétique peut converger avec le formalisme mathématique. Dans cette voie, les expériences de pensée peuvent encore jouer un rôle utile. De même que l'interaction aimant-conducteur a servi de support pour introduire la relativité restreinte, il peut être utile de s'appuyer sur un exemple concret pour aborder la clarification du problème de la structure du rayonnement hertzien et, à tout le moins, pour disposer d'un thème de réflexion.

On analyse la configuration suivante qui s'inspire à la fois des Expériences de MILLIKAN pour la détermination de la charge de l'électron, et du Disque de ROWLAND, imaginé pour mettre en évidence le lien entre le mouvement des charges électriques et le champ magnétique. On introduit une charge électrique, qui peut être constituée d'un ou plusieurs électrons, en un point de la périphérie d'un disque isolant que l'on met en rotation pour créer un champ électromagnétique variable dans l'espace. Considérons d'abord que la charge électrique est constituée d'un électron sur un disque d'un centimètre de rayon, tournant à 10 000 tours/seconde (Figure VI-1). Ces paramètres sont choisis parce qu'ils restent dans le

$$P = \frac{2}{3} \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 c^3} \gamma^2 \quad (\text{VI-1})$$


The diagram shows a horizontal line representing the axis of rotation of a disk. A vertical ellipse represents the disk's cross-section. A small black dot on the left edge of the ellipse is labeled 'e-', representing an electron. A horizontal line extends from the center of the disk to the right.

Figure VI-1

domaine (même si c'est à la limite) de ce qui est électriquement et mécaniquement réalisable et la fréquence adoptée reste dans le domaine concerné par l'énergie radiante des ondes à Très Basse Fréquence (propagation en surface de la terre et pénétration sous l'eau) ; il en résulte un champ électromagnétique variable dans

l'espace. Si on s'appuie sur les théories maxwelliennes, la formulation mathématique fait apparaître un champ électromagnétique qui présente une composante en $1/r$ en fonction de la distance, exprimant le rayonnement d'énergie. Compte tenu du fait que la charge est soumise à une accélération dans son mouvement de rotation (accélération qui est la cause du rayonnement d'énergie), la théorie relie cette accélération à la puissance rayonnée par la relation VI-1. Cette puissance est de l'ordre de 10^{-38} watt. En restant dans l'interprétation du phénomène telle qu'elle résulte des théories maxwelliennes, l'énergie est distribuée de façon continue sur un volume sans cesse croissant. Si on étend à cette configuration le concept de la quantification einsteinienne, l'énergie rayonnée va être constituée de quanta émis sur la fréquence correspondant au nombre N de tours par seconde selon la relation $w = hN$, h étant la Constante de PLANCK, soit : $6,6 \cdot 10^{-30}$ joule. Cela montre que, si le rayonnement est quantifié, l'énergie rayonnée correspondrait statistiquement à un photon tous les vingt trois ans. En fait le problème est plus complexe car l'énergie radiante ne peut avoir sa source que dans l'énergie cinétique du disque ; encore faut-il que le bilan de quantité de mouvement soit respecté entre la quantité de mouvement w/c du quantum et la quantité correspondante cédée par le disque (variation du moment cinétique). Dans le cas général, une telle émission ne pourra se faire que par groupes de photons (bouffées de photons) dont la somme des quantités de mouvement correspondre à la variation de quantité de mouvement du disque. De ce fait, les émissions de photons seront encore beaucoup plus espacées dans le temps. Si l'émission s'effectue conformément aux théories maxwelliennes, le disque va subir une décélération permanente, certes très faible mais non nulle ; si l'émission se fait par quanta, le disque restera à vitesse de rotation constante entre des décélérations brusques au moment de l'émission des photons. Si on augmente la charge électrique, on peut passer du cas limite où deux groupes de photons sont très espacés dans le temps (pratiquement inexistantes), à l'autre cas limite où le très grand nombre de photons conduit à l'apparence d'une onde continue dans le temps et dans les zones de l'espace proches du lieu d'émission. Considérons que nous avons une charge électrique (nombre d'électrons) telle que, si l'émission est quantique, on ait un groupe de photons toutes les dix secondes (statistiquement), à titre d'exemple : comment va-t-on interpréter les phénomènes qui interviennent dans ce cas ?

Tout ce que l'on sait aujourd'hui (voir chapitre précédent) conduit à considérer que l'énergie rayonnée ne peut être que constituée de quanta tels qu'Albert EINSTEIN les a définis, c'est à dire *émis ou absorbés tout d'un bloc et se déplaçant sans se diviser*. Avec une anomalie : les quanta einsteiniens n'ayant pas été introduits dans le rayonnement hertzien, les photons n'y apparaissent qu'au travers de la quantification mathématique de l'électrodynamique quantique (les photons se déplaçant à la vitesse c , ils ne peuvent être pris en compte valablement que dans le cadre d'une théorie covariante). Or, l'électrodynamique quantique prend comme base la Théorie de MAXWELL-LORENTZ impliquant la propagation du champ électromagnétique et l'énergie distribuée de façon continue...

Ce concept d'émetteur radioélectrique Très-Basse-Fréquence/Très-Basse-Puissance peut être imaginé dans différentes variantes. En mettant des charges électriques égales diamétralement opposées, on réalise physiquement un

quasi-dipôle oscillant. Sans doute ne saura-t-on pas, et pour très longtemps, détecter les photons émis, unitairement et aléatoirement, avec des énergies aussi faibles. Mais l'intérêt est ailleurs : dès lors que l'on sait concevoir de tels dispositifs, on doit savoir interpréter et enseigner les phénomènes physiques impliqués sur des bases cohérentes entre elles. Il ne sera-t-il pas inutile que la physique du XXI^e siècle prenne en compte les problèmes sous-jacents dans de telles situations.

VI-2 Les différentes facettes de la réalité physique

L'électromagnétisme prémaxwellien avait introduit les champs comme intermédiaires mathématiques permettant d'exprimer les relations entre les charges, les courants et les aimants. Les conséquences convergentes de la Théorie de MAXWELL et des Expériences de HERTZ ont conduit à considérer que le champ pouvait se détacher de ses sources et à lui attribuer une réalité physique propre en l'associant à de l'énergie (plus tard, il a été doté de quantité de mouvement, puis de moment cinétique). Le rayonnement hertzien a été interprété sur ces bases.

La quantification mathématique du champ électromagnétique a introduit les photons dans le rayonnement hertzien mais ils émergent d'opérateurs de création et d'annihilation de particules, dans le cadre de la Théorie de MAXWELL-LORENTZ, c'est à dire dans le contexte de la propagation. On arrive ici à la conclusion que le rayonnement hertzien relève d'une réalité différente : l'intervention du processus physique de création des particules-photons. La propagation du champ dont les photons sont les sources résulte de la propriété intrinsèque de ceux-ci de se déplacer dans le vide et les milieux isolants, dès leur création.

Le fait d'être amené, en fonction de ce qui précède, à prévoir une mutation aussi drastique de fondements qui ont assuré à la physique tant d'avancées, présente un caractère étrange. S'il ne fait aucun doute qu'il faut regarder de très près les conséquences des équations de propagation anormalement déduites des Équations de MAXWELL, les conséquences sont à analyser avec beaucoup de circonspection. Il ne s'agit pas ici de proposer de remplacer la propagation par l'instantanéité dans toutes les interactions de couplage. L'interaction entre un aimant et un circuit conducteur évoquée ici peut être modifiée en utilisant un circuit parcouru par un courant continu à la place de l'aimant ; on en conclura que la théorie et l'expérience laissent attendre le même résultat que dans le cas de l'aimant. Mais plaçons-nous dans le cas où l'on choisirait de créer le champ magnétique variable au niveau du circuit induit en établissant un courant dans le circuit inducteur à un instant donné : rien ne permet de présupposer ce qui se passera dans le circuit induit en fonction du temps. Aux racines de ce problème, on trouve le processus de création de particules et celui de leur dématérialisation. Prenons le cas d'une paire e^+ , e^- engendrée par un rayon gamma sur une cible ; la théorie de l'électromagnétisme relativiste prévoit que le champ s'établit dans l'espace par propagation, ce qui implique l'infini du temps et l'infini de l'espace pour l'état d'équilibre du champ et de l'énergie supposée lui être associée. Si à un instant donné l'une de ces particules se dématérialise au contact d'une antiparticule, que va-t-il se passer, que deviendront le champ et l'énergie

qui sont supposés en train de se propager ? On retrouve, sous un autre aspect, le problème déjà évoqué au chapitre III. Pour avancer dans cette voie, et en étape tout à fait préliminaire, l'expérience suivante a été réalisée.

La sphère S_1 (figure VI-2) est initialement en équilibre électrique ainsi que le conducteur qui la relie à l'interrupteur I (un circuit électronique, en fait), celui-ci étant ouvert. Quand on le ferme, la source U modifie la répartition des électrons de conduction entre les sphères S_0 et S_1 .

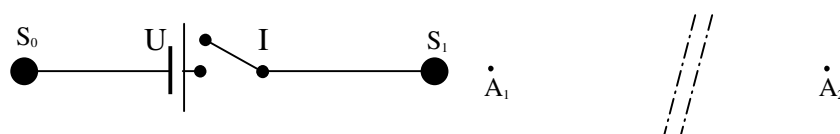


Figure VI-2

Dans la configuration de la figure, partant d'un état d'équilibre protons-électrons dont les champs s'annulent dans l'espace, la fermeture de l'interrupteur déclenche le mouvement d'un certain nombre d'électrons de conduction de la sphère S_1 vers la sphère S_0 et le champ des protons de la matière n'est plus totalement compensé par le champ d'un nombre équivalent d'électrons. L'état électrique de l'espace au point A_1 étant modifié à l'instant t_1 , l'observation de la modification de l'état électrique en A_2 à la distance r de A_1 , doit montrer si celle-ci intervient à l'instant t_1 ou à l'instant $t_1 + r/c$. Le retard de propagation, s'il existe, est de 3,3 nanosecondes pour une distance de un mètre entre A_1 et A_2 . Comme cette expérience implique des impulsions de tension suffisamment brèves, le circuit rayonne mais le champ de rayonnement est soumis à la propagation. Il devrait donc être possible de vérifier si le Champ de COULOMB résultant des charges qui ne sont plus équilibrées par des charges de signes contraires échappe à ce temps de propagation. Or, cette expérience, tout à fait préliminaire, semble montrer que la variation du champ qui intervient en A_2 est retardée de r/c par rapport à celle qui intervient en A_1 . Cela expliquerait aussi que l'on n'ait jamais observé de champ s'établissant instantanément dans l'espace.

Autant les présentes recherches conduisent à considérer comme inéluctable la nécessité de renoncer au concept de propagation dans son acception actuelle, autant il apparaît impossible de lui substituer simplement des hypothèses solides. On considère ici que le couplage électromagnétique et les interactions entre particules corrélées appartiennent à la même classe de phénomènes ; or, des particules peuvent être couplées par une interaction électrique (par exemple), sans être, pour autant *intriquées*. Le phénomène élémentaire, dans son aspect fondamental, peut être perçu au niveau de l'interaction caractérisée par la figure II-9 (chapitre II). Alors que l'hypothèse de la propagation du champ de l'électron, associé à de l'énergie et de la quantité de mouvement, paraît inacceptable, il n'est pas à exclure qu'un retard en r/c s'introduise avant que le couplage impliquant le transfert instantané d'énergie et de quantité de mouvement n'intervienne. De telles interprétations présentent un caractère préliminaire, partiel, hypothétique : dans ce qui découle de la remise en cause de la propagation presque tout reste à découvrir.

Les expériences, qui ont été décrites très schématiquement dans leurs principes au chapitre II, pourraient constituer les toutes premières étapes dans cette voie, étant entendu que le problème fondamental consiste à redéfinir les liens entre les champs et leurs sources.

VI-3 Les interférences

Le retour vers la réalité physique des transferts instantanés d'énergie permet d'analyser sous un jour nouveau le phénomène des interférences, plus précisément dans leurs manifestations particule par particule. On se place dans le cas de l'Interféromètre de MICHELSON dans lequel on sépare un faisceau lumineux en deux branches. Considérons le montage interférentiel de la figure VI-3 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

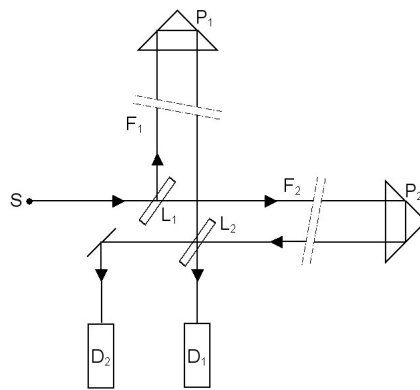


Figure VI-3

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. Mais si on fait en sorte qu'ils soient en phase sur D1, ils seront 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 pendant qu'il va croître jusqu'au maximum sur l'autre.

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, étant entendu que le sens que l'on peut donner au terme composantes est très flou. Cela étant, si on intercepte les faisceaux F1 et F2, en cours de trajet, au niveau des prismes P1 ou P2, par exemple, 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 instant. Ce comportement du photon a été mentionné par Alfred KASTLER comme un des éléments qui l'ont incité à donner, à son ouvrage, le titre : Cette Étrange Matière (15). Concernant les possibilités d'interprétation des phénomènes en cause, la situation devient très différente dès lors qu'il apparaît que l'énergie peut transiter instantanément d'un point à l'autre de l'espace, contrairement à ce que laissent prévoir les concepts relativistes en vigueur.

VI-4 L'entraînement de la lumière

Lorsque la Théorie de la Relativité Restreinte a été établie, on a considéré qu'elle permettait d'interpréter les phénomènes intervenant dans l'Expérience de FIZEAU concernant l'entraînement de la lumière dans un corps transparent en mouvement et que, réciproquement, l'expérience constituait un élément de confirmation de validité de la théorie.

L'interaction des photons avec la matière transparente a été décrite par Richard FEYNMAN dans le cadre de la théorie des interactions lumière-matière (16) : sur sa trajectoire, au milieu des atomes séparés par le vide, un photon est absorbé un grand nombre de fois par les électrons de la matière, puis ré-émis après un certain délai, avec les mêmes caractéristiques et dans la même direction. On a ainsi une relation de cause à effet bien définie entre le parcours dans le vide, le temps de rétention du photon à chaque absorption-émission et le rapport entre la vitesse dans le vide et celle dans le milieu transparent, rapport qui correspond à l'indice de réfraction n . La connaissance de ces phénomènes (sous leur aspect statistique) dans le corps au repos permet de prévoir comment la vitesse de la lumière évolue lorsque le milieu transparent est en mouvement et de comparer ces prévisions aux données de l'expérience.

Considérons le parcours d'un photon sur un cycle de base (milieu transparent immobile). Ce photon est absorbé par l'électron e_1 en A où il reste capté pendant un temps T_0 , après quoi il est ré-émis, puis absorbé par l'électron e_2 en B ayant parcouru la distance l_0 (figure VI-4), le même cycle recommençant à partir de là. Ce parcours, sur un cycle entrecoupé d'un arrêt, correspond statistiquement à une vitesse moyenne qui est c/n .

Passons au cas où le corps transparent est en mouvement rectiligne uniforme. Soit A le point où l'électron e_1 absorbe un photon (figure VI-5). Pendant le temps de rétention du photon, le déplacement du corps à la vitesse v a amené l'électron associé à un atome de matière de A en A'. Après sa ré-émission en A', le photon

parcourt la distance l_0' jusqu'au moment où il est absorbé en B' par un électron e_2 qui s'est déplacé à la vitesse v pendant que le photon se déplaçait à la vitesse c vers lui. La longueur l_0' est supérieure à l_0 si la vitesse du milieu transparent

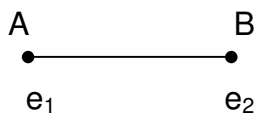


figure VI-4,

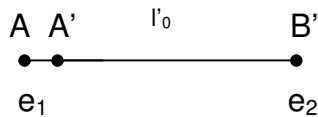


figure VI-5,

est dans le même sens que celle de la lumière (v positive), inférieure dans le cas contraire (v négative). A partir du moment où l'on pose la relation entre l_0 et le temps T_0 de rétention qui conduit à une vitesse moyenne égale à c/n dans le corps immobile, on peut calculer la vitesse moyenne c' du photon dans le corps en mouvement par rapport au référentiel du laboratoire. On trouve :

$$c' = \frac{c^2 + (c - v)(n - 1)v}{nc - (n - 1)v}.$$

Pour les valeurs usuelles de v faibles devant c , et au second ordre près, ce résultat est équivalent à la relation expérimentale obtenue par Hippolyte FIZEAU, qui n'est d'ailleurs qu'une relation approchée, seulement valable lorsque v est faible devant c :

$$c' = \frac{c}{n} + \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)v.$$

A l'époque de la découverte de la relativité, le problème a été traité selon le processus de composition relativiste des vitesses, comme s'il s'agissait du cas d'un corps en mouvement dans un premier référentiel lui-même en mouvement par rapport à un second référentiel considéré comme fixe ; le résultat obtenu dans cette voie conduit aussi à la Relation de FIZEAU. Lorsque l'on s'efforce de rapprocher les formulations mathématiques de la réalité physique, on doit considérer que l'on est là sur *une fausse piste*, le processus physique décrit par Richard FEYNAMN montrant que la réalité physique est différente. On remarquera cependant qu'un des aspects de la relativité intervient directement : lorsque le photon capté par un électron est ré-émis, la vitesse de ré-émission est c , dans tous les cas, que le corps transparent soit en mouvement ou qu'il soit immobile dans le laboratoire. Cette approche du problème ne doit pas être considérée comme une analyse des phénomènes à l'échelle microscopique, mais comme une voie de travail mettant en évidence que la composition relativiste des vitesses n'exprime pas la réalité physique microscopique, dans le cas concerné.

CHAPITRE VII

Vers la physique du XXI^e siècle

A partir des Expériences de HERTZ, la physique s'est développée sur l'idée que les Équations de MAXWELL impliquaient la propagation du champ électromagnétique. Il en découlait que, dans certaines circonstances (mouvement ou accélération d'une charge électrique par exemple), le champ pouvait se détacher de ses sources, associé à de l'énergie, de la quantité de mouvement et du moment cinétique. Les présentes recherches conduisent à la conclusion que cette interprétation ne correspond pas à la réalité des phénomènes et a conduit la physique à se développer sur une faille dans ses fondements conceptuels.

Cette faille est à la racine de l'anomalie que semble constituer l'inséparabilité quantique, laquelle disparaît dès lors que l'on renonce au concept de propagation ; l'inséparabilité appartient alors à la même classe de phénomènes que les interactions de couplage dans lesquelles les transferts d'énergie sont instantanés, contrairement à ce qui découle de la Théorie de MAXWELL-LORENTZ.

Les résultats des présentes recherches conduisent à introduire un nouveau fondement conceptuel : *la dualité de l'espace-temps*. Dans l'une de ses facettes, cet espace-temps de **nature physique** présente les caractéristiques correspondant à ce que prévoit la relativité en son état actuel, hormis ce qui concerne les interactions retardées; dans l'autre, il assure la compatibilité avec l'instantanéité des interactions de couplage qui conduit à retrouver la simultanéité dans des référentiels différents sans, pour autant, remettre en cause l'impossibilité de percevoir un mouvement absolu. Ce qui serait incohérent dans le cadre d'un espace-temps de nature strictement géométrique (l'instantanéité et la simultanéité sont alors incompatibles avec un temps qui est fonction du référentiel) devient cohérent dans le cadre d'un espace-temps de nature physique qui présente une réponse différente envers les transferts énergétiques directs par couplage, d'une part, envers ceux véhiculés par les corpuscules-photons, d'autre part. Il devient ainsi compréhensible que la théorie ait exprimé des pans entiers de la réalité physique de façon aussi satisfaisante en laissant subsister des anomalies aussi considérables, parmi lesquelles la difficile compatibilité entre la relativité et les quanta.

Les idées rassemblées dans le présent document ne font qu'effleurer le vaste remaniement qu'impliquera le renoncement au concept de propagation. Le véritable aboutissement de ces recherches pourrait comporter deux étapes. La première consistera à préciser l'hypothèse fondamentale sur laquelle s'appuie Albert EINSTEIN pour introduire la relativité restreinte : lorsqu'un aimant est déplacé en face d'un circuit conducteur, la force électromotrice induite prend naissance exactement dans les mêmes conditions que lorsque le circuit est déplacé en face de l'aimant, dans le même mouvement relatif : cette force électromotrice, est

concomitante avec le déplacement ; il en va de même pour l'énergie : l'énergie prélevée au niveau de l'aimant, sous forme mécanique, est convertie et transférée instantanément au circuit, au travers de l'espace, sous forme électrique. Le résultat d'une expérience simple de cette nature, et de ses variantes, aura un pouvoir de conviction sans commune mesure avec d'éventuels développements de l'argumentation présentée ici. La seconde étape, de très grande ampleur, pourra être abordée alors en pleine connaissance de cause. Elle consistera à tirer les conséquences de cette situation inédite dans les fondements conceptuels de la physique ; elle pourrait s'appuyer sur un vaste programme d'expérimentation permettant de mettre en évidence de nouvelles lois exprimant l'établissement du champ électromagnétique en fonction de l'état de ses sources et de leur évolution. Le problème qui apparaît ainsi pour le champ électromagnétique concerne évidemment tous les champs susceptibles d'exprimer des interactions, dans l'univers.

Liste des ouvrages cités

1. Cité par Banesh HOFFMANN: Albert EINSTEIN, Créateur et Rebelle, Éditions du Seuil, 1972-1975.
2. Cité par Louis de BROGLIE: Nouvelles perspectives en microphysique, ALBIN MICHEL, 1956.
3. Albert EINSTEIN: Traduction française de : On the Electrodynamics of moving bodies, traduction anglaise de la communication de juin 1905 dans: THE PRINCIPLE OF RELATIVITY, Dover Publications, Inc New-York 1923 - 1952.
4. Richard FEYNMAN: Cours de physique, Tome II, Électromagnétisme-1, INTERÉDITIONS, 1970-1978
5. Banesh HOFFMANN, Michel PATY: L'étrange histoire des quanta, Éditions du Seuil, 1947 - 1981.
6. Albert EINSTEIN: Un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière (traduction française de la communication de mai 1905), dans: Sources et évolution de la physique quantique, José LEITE LOPES et Bruno ESCOUBÈS, MASSON, 1995
7. Cité par Emilio SEGRÉ: Les physiciens modernes et leurs découvertes, Fayard, 1984.
8. Louis de BROGLIE: Thèse de 1924, RECHERCHES SUR LA THÉORIE DES QUANTA, Réédition, MASSON, 1963.
9. Albert EINSTEIN : Traduction française de The foundations of general theory of relativity, traduction anglaise de la communication de 1916, d° 3.
10. Lev LANDAU et Evguéni LIFCHITZ: Physique théorique, Théorie des champs, Éditions MIR 1964 - 1989.
11. Richard FEYNMAN : cité dans Sources et évolution de la physique quantique, d° 6.
12. Claude COHEN-TANNOUDJI, Jacques DUPONT-ROC, Gilbert GRYNBERG: Photons et atomes, Introduction à l'électrodynamique quantique, InterÉditions/Éditions du CNRS, 1987.
13. Louis de BROGLIE: Préface de la réédition de la thèse de 1924, d° 8.

14. Werner HEISENBERG: La partie et le tout, FLAMMARION, 1990

15. Alfred KASTLER : Cette Étrange Matière, STOCK 1976

16. Richard FEYNMAN : Lumière et Matière (traduction Française), INTERÉDITIONS, 1985-1987.

Annotations

Annotations