

Pierre Poubeau

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

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

La clé de l'énigme de l'inséparabilité quantique

*Document récapitulatif
Décembre 2011*

Essais antérieurs sur le même thème

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Table des matières

Pages

Introduction.....	3
Chapitre 1	
La relativité en contradiction avec elle-même.....	5
Chapitre 2	
La relativité privilégiée par rapport aux quanta.....	10
Chapitre 3	
La racine des divergences entre les Équations de MAXWELL et la réalité physique.....	14
Chapitre 4	
De la quantification einsteinienne à la quantification mathématique.....	18
Chapitre 5	
Eléments complémentaires.....	20
Conclusion... ..	22
Ouvrages cités.....	24

Introduction

La physique est confrontée depuis trois quarts de siècle à une anomalie majeure : la théorie et l'expérience font apparaître des liens entre *particules intriquées* qui s'apparentent à des interactions instantanées concernant des éléments éloignés dans l'espace, en contradiction avec le principe de causalité relativiste. Malgré les efforts considérables déployés dans la recherche de la clé de cette énigme, cette situation est caractérisée par les physiciens de la façon suivante.

« Nul ne peut dire aujourd'hui si les progrès viendront de nouvelles expériences, de percées théoriques ou de ruptures épistémologiques (1). »

(Les chiffres entre parenthèses renvoient aux ouvrages cités, en fin de document.)

Le présent document récapitule les résultats essentiels d'une recherche personnelle sur les fondements de la physique, recherche qui s'engage sur une voie inédite d'approche de cette anomalie. En fait, cette voie a été proposée par Albert Einstein lui-même sous la forme d'un testament scientifique qui n'a peut-être pas encore reçu toute la considération qu'il mérite.

En 1949, il déclarait : « 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 (2). » En 1954, dans une lettre à Louis de Broglie, il précisait : « Je dois ressembler à une autruche qui, sans cesse, cache sa tête dans le sable relativiste pour n'avoir pas à regarder en face ces vilains quanta (3). »

Les présentes recherches aboutissent à la conclusion suivante. Effectivement, Albert Einstein a privilégié la relativité vis à vis des quanta : en introduisant la relativité, il a exclu de l'onde hertzienne et de la radioélectricité naissante les quanta qu'il venait d'introduire dans la lumière. Or, les quanta einsteiniens (quanta physiques, les photons depuis 1926 **dans leur interprétation physique**) ont la même réalité dans l'ensemble du spectre électromagnétique (des rayons gamma aux ondes à très basse fréquence) que dans la lumière : le rayonnement d'énergie résulte du **processus physique** de création de particules ; il ne découle en aucune manière du processus de *propagation du champ électromagnétique* qui se détacherait de ses sources, associé à de l'énergie, à de la quantité de mouvement et à du moment cinétique. Le concept de propagation du champ électromagnétique, issu de la Théorie de Maxwell (sans oublier qu'il a aussi été introduit à la même époque par Ludwig Lorenz) a conduit à une représentation statistique des phénomènes et à une formulation prodigieusement utile sur laquelle la physique s'est développée, mais il a été interprété de façon tout à fait inexacte comme représentant la réalité physique profonde. Dans cette interprétation, il a conduit à un ensemble de contradictions entre la relativité et la théorie électromagnétique d'une part, entre la relativité et la réalité physique d'autre part.

Le phénomène supposé de propagation du champ électromagnétique, et des champs en général, ne correspond à aucune réalité physique.

Dans ce contexte, non seulement la relativité n'est pas incompatible avec les transferts instantanés d'énergie au travers de l'espace, mais elle les implique pour ce qui concerne les interactions de couplage. **Il n'y a plus de contradiction entre l'inséparabilité quantique et la**

relativité, mais un remaniement de cette même théorie de la relativité, de l'électromagnétisme et, plus généralement, des fondements de la physique s'impose.

Une expérience simple, concrétisant l'expérience de pensée à partir de laquelle Albert Einstein a introduit la relativité restreinte, permettra de vérifier la validité de cette approche.

Parmi les documents successifs établis au fur et à mesure de l'avancée de ces recherches, celui de 1996 a fait l'objet d'un rapport de l'Académie des Sciences qui constatait *certaines analyses pertinentes* tout en suggérant un élargissement du domaine exploré : c'est sur cette base élargie que les résultats actuels ont été obtenus. Le présent document constitue une ultime récapitulation de ces résultats, destinée à les rendre accessibles à toutes les personnes à qui ils pourraient être utiles.

J'exprime ma profonde gratitude aux personnes qui m'ont apporté leur concours ou leur soutien dans le déroulement de ce travail.

Pierre Poubeau
Décembre 2011

Chapitre 1. La relativité en contradiction avec elle-même

Les premières lignes du texte présentant la théorie de la relativité restreinte sont rapportées ici.

Sur l'Electrodynamique des Corps en Mouvement
Par Albert Einstein (1905) (4)

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

Après avoir présenté ainsi le point de départ de sa démarche vers la relativité, Albert Einstein réinterprète la notion de simultanéité, introduit la relativité des longueurs et des temps et montre qu'un changement de référentiel, 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 considère qu'il a démontré que le mouvement de l'aimant par rapport au conducteur est identique, dans la théorie comme dans la réalité physique, au mouvement du conducteur par rapport à l'aimant. Or, une contradiction subsiste.

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 à la vitesse c* introduisant un retard dans la conversion d'énergie mécanique en énergie électrique et dans le transfert de cette énergie de l'aimant au conducteur. Cette théorie se situe ainsi dans le prolongement de l'électromagnétisme maxwellien qui fait apparaître le champ électrique et le champ magnétique dans des équations de propagation. On verra plus loin que le lien entre ces équations et la réalité physique est plus subtil que cela a été initialement imaginé. 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, la conversion et le transfert d'énergie étant concomitant avec le mouvement du conducteur.

Face à cette situation, et dès lors que l'auteur de la relativité et des quanta a cru utile d'attirer l'attention sur une possible divergence de ses propres théories vis à vis de la réalité physique, il n'est pas possible d'ignorer une contradiction d'une telle ampleur : une clarification s'impose, en tout état de cause.

On va s'efforcer d'amorcer cette clarification en s'appuyant, au niveau expérimental, sur les interactions auxquelles il est fait référence. On considère deux expériences menées simultanément. Dans l'une, un circuit conducteur représenté sur le schéma de la figure 1 par une spire conductrice S_p est déplacé entre deux positions de repos P_1 , P_2 , en face d'un aimant immobile NS ; dans l'autre un aimant identique est déplacé entre les deux positions de repos Q_1 , Q_2 , en face d'une spire conductrice identique fixe, dans le même mouvement relatif que dans le cas précédent. On recrée ainsi, pour l'analyse, une situation qui correspond à celle introduisant la relativité restreinte : cette théorie laisse attendre que les forces électromotrices induites, et les

Figure 1

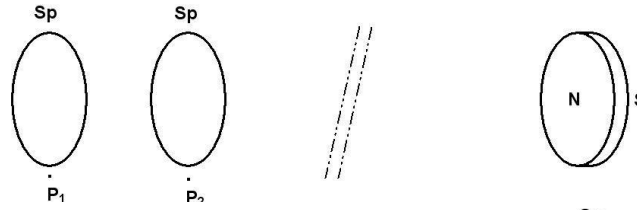
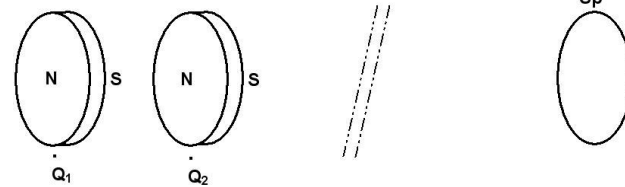


Figure 2



courants qui en résultent, soient identiques dans un cas comme dans l'autre, faute de quoi **le phénomène observable ne dépendrait pas uniquement du mouvement relatif du conducteur et de l'aimant**. Analysons, point par point, les processus selon lesquels la théorie électromagnétique interprète l'interaction concernée.

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

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

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

Les lois de conservation impliquent une autre facette de la réalité physique : la conservation de la quantité de mouvement qui passe par l'égalité de l'action et de la réaction. Dans les réflexions pré-relativistes, la référence terrestre a parfois suscité, inconsciemment, l'idée fautive d'un référentiel absolu. L'analyse des interactions dans l'espace extraterrestre peut aider à s'en affranchir. Lorsqu'un satellite est orienté dans l'espace par un volant d'inertie entraîné par un moteur (*ironless-brusless DC motor*), c'est une forme d'interaction aimant-conducteur qui est mise en œuvre. La réaction est couramment considérée comme concomitante avec l'action. Dans le principe, la théorie électromagnétique prévoit que la réaction est retardée vis à vis de l'action par un délai qui tend vers l'infini lorsque la distance entre les éléments tend vers l'infini. C'est l'autre facette de l'incompatibilité mentionnée au niveau de l'énergie dans le cas de l'aimant en mouvement ; l'incompatibilité de *la propagation* avec la réalité physique concerne la conservation de la quantité de mouvement et l'égalité action-réaction aussi bien dans le cas du circuit en mouvement que dans le cas de l'aimant en mouvement.

Considérons l'interaction aimant-conducteur dans l'espace extra-terrestre : l'une des racines de la démarche einsteinienne prévoit que « *les phénomènes de l'électrodynamique aussi bien que ceux de la mécanique ne possèdent aucune propriété correspondant à l'idée de repos absolu* : sauf à entrer dans une nouvelle contradiction, il devient impossible de considérer que l'aimant est *immobile* ou *en mouvement*, donc de considérer qu'il est la source d'un champ qui se propage *parce qu'il est en mouvement* ; transposer l'interaction dans un laboratoire terrestre ne change rien à cette réalité. Si on observe un aimant dans son référentiel propre (dans lequel il est au repos), son champ n'est pas supposé se propager ; le même aimant, s'il est observé à partir d'un autre référentiel en mouvement par rapport au premier, va apparaître en mouvement et, de ce seul fait, il serait la source d'un champ *en propagation*, porteur d'actions retardées ; autrement dit, il est supposé *émettre son champ* simplement parce qu'il est observé dans un référentiel différent de son référentiel propre : c'est encore un aspect, parmi d'autres, de la contradiction évoquée précédemment.

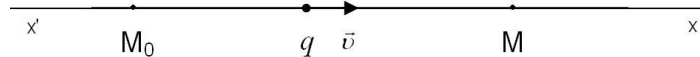
On est là en présence d'un faisceau d'indices qui, tous, orientent la réflexion dans la même direction : pour que le principe fondateur de la relativité einsteinienne soit respecté, la conversion d'énergie mécanique en énergie électrique et le transfert de cette énergie ne peuvent être qu'instantanés dans les deux cas. Telles sont les conclusions des présentes recherches qui conduisent à prévoir que l'établissement de la force électromotrice induite dans le circuit, et l'établissement du courant auquel elle donne naissance, sont concomitants avec le mouvement de l'aimant ; c'est à dire que le transfert d'énergie, au travers de l'espace, dans une interaction de couplage de cette nature, est instantané. La vérification expérimentale la plus significative et la plus décisive, en toute première étape, devrait porter précisément sur les modalités spatio-temporelles de l'interaction d'un aimant en mouvement et d'un circuit conducteur ; elle conduira à se placer dans des conditions qui permettront d'actualiser la relativité et le concept d'espace-temps sur une base expérimentale dont ils ne pouvaient pas disposer lors de leur élaboration.

Le concept de propagation, qui concerne le champ de l'aimant en déplacement et aussi le principe d'action et de réaction, n'est cohérent ni avec le postulat introduisant la relativité, ni avec la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement. Des expériences simples devraient permettre de confirmer cette analyse. Qu'il s'agisse de la recherche ou de l'enseignement, il n'est pas imaginable qu'une telle situation reste sans clarification.

Pour remonter aux racines de cette situation, il faut se reporter à la façon dont est interprétée la formulation du champ d'une charge électrique en mouvement rectiligne uniforme. La charge électrique q étant supposée parcourir la trajectoire rectiligne $x'x$ (figure 3) à vitesse constante, la théorie électromagnétique postule que son champ s'établit dans l'espace par *propagation* à partir de chacune de ses positions successives. Ainsi, le champ en P à l'instant t , lorsque la

• P

Figure 3



charge est en M, est supposé entièrement déterminé, par son passage à la position retardée M_0 , où elle était à l'instant $t_0 = t - M_0P/c$. Ce champ en P est associé à de l'énergie et de la quantité de mouvement (voire du moment cinétique) volumiques qui sont supposés avoir été émis avec lui. **La théorie impliquant les interactions retardées conduit à postuler qu'une charge à vitesse constante, donc à énergie constante, émet en permanence de l'énergie et de la quantité de mouvement qui se propagent jusqu'à l'infini de l'espace.** On retrouve ainsi, à la racine de l'électromagnétisme, une contradiction de même nature que celle qui est apparue dans le cas de l'aimant vis à vis des lois de conservation, c'est à dire une contradiction vis à vis de la réalité physique.

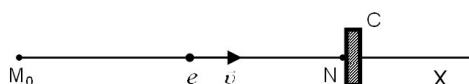
Cette situation peut être analysée sous l'angle relativiste en prenant en compte l'imbrication des coordonnées d'espace et de temps avec les phénomènes électromagnétiques, de façon similaire à ce qui a été fait pour l'aimant en mouvement. Lorsqu'on analyse les phénomènes associés au mouvement rectiligne uniforme d'une charge électrique, au travers de l'évolution de son champ, cela sous-entend que l'on observe la charge à partir d'un système de référence dans lequel elle apparaît avec ce mouvement. On peut aussi observer **la même charge en situation inchangée** à partir d'un autre référentiel en mouvement par rapport au précédent, dans lequel elle est immobile et dans lequel elle est uniquement la source de son champ statique, ce qui conduit à la conclusion suivante.

La théorie en vigueur, et les interactions retardées (hors rayonnement) qu'elle implique, conduisent à considérer qu'une charge électrique émet de l'énergie ou n'en émet pas selon le référentiel à partir duquel elle est observée : cette interprétation ne peut pas être cohérente vis à vis de la réalité physique des phénomènes.

Les situations qui viennent d'être évoquées peuvent être analysées dans une approche expérimentale 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 \bar{v} proche de celle de la lumière, dans la configuration de la figure 4. Un circuit conducteur (schématiquement représenté par une spire conductrice S) est



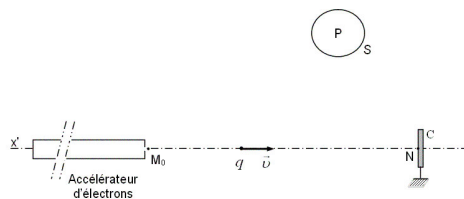
Figure 4



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. La théorie prévoit que le champ, lorsqu'il atteint la spire, y induise un courant, donc de l'énergie, alors qu'il n'est pas possible que l'électron soit à l'origine de celle-ci puisqu'il n'y a, à aucun moment, intervention de *l'action électrodynamique réciproque*. La théorie est, là encore, en contradiction avec elle-même.

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 récurrentes, des électrons par exemple, émanant d'un canon à électrons ou d'un accélérateur de particules (figure 5). On se place dans la configuration où ces charges électriques restent sous

Figure 5



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 (par exemple de l'ordre de $0,99c$). Ces charges peuvent être immobilisées dans une cible C et induire un courant dans un circuit conducteur schématisé par une spire S centrée sur le point P. Une telle expérience élargit celle prévue avec l'électron du rayonnement bêta, en introduisant la possibilité de faire intervenir et de maîtriser tous les paramètres. Sans entrer dans le détail de telles expériences, elles font apparaître, au plan électromagnétique, des contradictions ayant les mêmes racines que celles qui apparaissent au plan magnétique, dans le cas de l'interaction aimant-conducteur analysée précédemment.

**Il résulte du postulat introduisant la relativité restreinte que, non seulement la relativité n'est pas incompatible avec les interactions instantanées et les transferts instantanés d'énergie à distance, mais qu'elle les implique dans le cas considéré.
En conséquence, la contradiction qui semblait opposer l'inséparabilité quantique et la relativité restreinte est éliminée.**

Chapitre 2. La relativité privilégiée par rapport aux quanta

Au début du XX^e siècle, la Théorie de Maxwell est apparue, dans l'histoire des découvertes scientifiques, comme un triomphe de la physique mathématique naissante. Elle avait prévu théoriquement l'existence des ondes électromagnétiques en faisant dépendre l'ensemble des phénomènes concernés, dont la lumière, de *la propagation du champ électromagnétique*. En mai 1905, Albert Einstein dissocie l'émission de la lumière de la Théorie de Maxwell et en juin, il introduit la théorie de la relativité restreinte développée en symbiose totale avec cette théorie. Une rupture est ainsi introduite dans l'unicité que la Théorie de Maxwell avait fait prévaloir pour l'ensemble du rayonnement électromagnétique. Cette unicité sera retrouvée dans l'évolution de la physique, les photons s'étant étendus à toute l'énergie électromagnétique incluant l'énergie radiante allant des rayons gamma aux ondes à très basse fréquence de la radioélectricité. Un aspect des choses reste à clarifier : les quanta einsteiniens impliquent une structure physiquement discontinue de l'énergie dans l'espace alors que la Théorie de Maxwell implique une structure théoriquement continue de cette énergie. Puisque le testament scientifique d'Albert Einstein nous incite à rechercher une faille possible dans l'évolution de la physique, autour de la relativité et des quanta, examinons la possibilité d'une contradiction sous-jacente en reprenant l'exploration de ce domaine, à partir de ses racines.

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 ces densités ρ et \vec{j} aux champs \vec{E} et \vec{B} et les champs \vec{E} et \vec{B} entre eux. Elles s'écrivent, avec les formulations actuelles :

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

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

A l'époque, il a été considéré que, pour les domaines de l'espace totalement vide (sans charges ni courants) où $\rho = 0$ et $\vec{j} = 0$, ces relations conduisent à :

$$\square \vec{E} = 0 \quad (\text{V}), \quad \square \vec{B} = 0 \quad (\text{VI}),$$

La démarche concernée a été présentée par l'auteur lui-même dans le chapitre Théorie Electromagnétique de la Lumière de son Traité d'Électricité et de Magnétisme (5), avec le commentaire suivant : « *Sous cette forme, les équations V et VI sont similaires aux équations de la déformation dans un corps élastique.... A chaque instant, l'état de choses au point O dépend de l'état de choses qui existait à une distance Vt à un instant antérieur à t , c'est à dire qu'une perturbation se propage dans le milieu (l'éther) avec la vitesse V (qui est celle de la lumière).* »

A la fin du XIX^e siècle et au début du XX^e, Hendrik Antoon Lorentz dans sa Théorie Electronique de la Matière (6) avait fait évoluer la Théorie de Maxwell en introduisant la conception discontinue de l'électricité mais avec la même démarche conduisant aux équations de propagation du champ électrique et du champ magnétique. Il arrive à la formulation suivante des phénomènes : « *Sous l'action des forces élastiques, les électrons peuvent vibrer autour de leur position d'équilibre. Ainsi, et peut-être aussi en fonction de mouvements plus irréguliers, ils peuvent devenir les centres d'ondes qui voyagent dans l'éther environnant et peuvent être observées comme de la lumière si la fréquence est suffisamment élevée ; nous pouvons ainsi rendre compte de l'émission de lumière et de chaleur.* » Il apparaît de façon implicite, dans ce texte, que les mouvements irréguliers (agitation thermique ou ionisation des gaz) peuvent être la source de rayonnements thermiques et lumineux, les ondes étant émises de façon aléatoire sur un large spectre de fréquences alors que, lorsque l'électron vibrant appartient à un conducteur parcouru par un courant sinusoïdal, il se

trouve dans les conditions appropriées pour que des ondes soient émises en cohérence de phase et de polarisation sur la fréquence d'oscillation. Ces travaux théoriques confortaient la prévision maxwellienne initiale de l'unicité de nature de ces ondes dans l'ensemble du spectre ; cependant, dans le même temps, des difficultés apparaissaient pour rendre les lois du rayonnement d'origine thermique cohérentes avec la Théorie de Maxwell-Lorentz.

Face à ces difficultés, Max Planck avait introduit le concept de quanta en 1900, mais sa quantification n'intervenait qu'au niveau de la conversion de l'énergie thermique d'un corps chauffé en énergie lumineuse, avec l'objectif d'éliminer la discordance entre la loi de Rayleigh-Jeans et la Loi de Wien, en même temps que d'arriver à une théorie qui soit en accord avec l'expérience. C'est à partir de cette base qu'Albert Einstein a élaboré la théorie des quanta-corpules en prenant plus particulièrement en compte les conséquences découlant de l'effet photoélectrique.

L'article introduisant les quanta-corpules en mai 1905 est présenté sous le titre « Sur un Point de Vue Heuristique Concernant l'Emission et la Transformation de la Lumière. » En élargissant le concept des quanta développé par Max Planck, il dissocie l'interprétation de l'émission de lumière de la Théorie de Maxwell : il observe que cette théorie prévoit « *une énergie distribuée de façon continue sur un volume sans cesse croissant* », alors que les éléments théoriques et expérimentaux disponibles 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* (7).»

En fait, dans une prodigieuse anticipation, Albert Einstein introduit implicitement le processus de création de particules qui ne commencera à être identifié, interprété théoriquement et vérifié expérimentalement qu'un quart de siècle plus tard. Dans le texte concerné, il considère spécifiquement les rayonnements couvrant le domaine allant de l'infrarouge thermique à l'ultraviolet, tout en apportant la précision suivante: « *Les fondements dont nous sommes partis (il s'agit la Théorie de MAXWELL) sont d'autant plus appropriés que la densité d'énergie et la longueur d'onde sont plus grandes; ils sont complètement inopérants pour de faibles densités d'énergie et de petites longueurs d'onde* (8). » En même temps que cette remarque ouvre la voie des quanta vers les rayons X et gamma (l'Effet Compton illustrera et confirmera leur réalité corpusculaire) et vers l'infrarouge thermique lointain (rayonnement du corps noir), l'ensemble de la démarche les exclut implicitement du rayonnement hertzien ; on voit apparaître là, en filigrane, la pierre d'achoppement qui va s'insérer dans le développement de la théorie électromagnétique avec des conséquences sur toute la physique. Effectivement, la Théorie de Maxwell s'avère tellement *appropriée* pour formuler l'émission radioélectrique (où *les longueurs d'onde et les densités d'énergie usuelles sont plus grandes*) que les quanta einsteiniens ne vont pas s'y introduire alors qu'il apparaîtra ultérieurement qu'ils y ont la même place que dans la lumière, pour ce qui concerne la réalité physique.

En 1917, Albert Einstein imaginait le concept d'émission stimulée. En 1954, le premier maser développé sur ce concept entrainé en fonctionnement ; il mettait en évidence la structure quantique des rayonnements dans le domaine des radiofréquences, comme l'effet photoélectrique avait mis en évidence la structure quantique de la lumière, c'est à dire lorsque l'énergie unitaire des photons devient des millions ou des milliards de fois plus faible. Etrangement, il se trouve que c'est cette même année que le Père Fondateur de la relativité et des quanta s'est reproché d'avoir privilégié la première par rapport aux seconds. La continuité de la structure quantique du rayonnement électromagnétique apparaît d'ailleurs sous d'autres formes : continuité du processus d'émission maser-laser, continuité du rayonnement synchrotron depuis les rayons X jusqu'aux radiofréquences dans les accélérateurs de particules et dans l'espace (particules chargées accélérées dans un champ magnétique), détection de l'onde radioélectrique à faible niveau de puissance faisant apparaître la discontinuité quantique. Ainsi, les raisons qui avaient conduit à dissocier la lumière de la Théorie de Maxwell s'avèrent-elles tout aussi valables pour l'ensemble du spectre électromagnétique, des rayons gamma aux ondes radioélectriques à très basse fréquence. **La réalité physique fondamentale du rayonnement électromagnétique correspond aux quanta d'énergie dont la nature est à la fois électromagnétique, corpusculaire et ondulatoire et dont le comportement statistique de bosons conduit à ce que prévoit la Théorie de Maxwell.**

On peut élargir, à partir du vocabulaire actuel, la formulation einsteinienne : *dans l'ensemble du spectre électromagnétique, l'énergie radiante est constituée de photons émis ou absorbés tout d'un bloc et se déplaçant sans se diviser* (on remarquera que, concernant les quanta, Albert Einstein a utilisé le terme *se déplacer* et non *se propager*). Il ne reste plus aucun domaine pour lequel serait valable ce que prévoit la Théorie de Maxwell, c'est à dire le champ qui se détacherait directement de ses sources comme le laissent supposer les équations de propagation. La conséquence est :

Le phénomène supposé de propagation, selon lequel le champ électromagnétique se détacherait directement de ses sources, n'existe pas. La physique actuelle n'est pas arrivée à cette conclusion ; à ce titre elle est sur une fausse piste, il s'agit de comprendre pourquoi.

La rupture de l'unicité de structure du rayonnement électromagnétique avait été mal vécue par la communauté scientifique de l'époque parce que le brillant ensemble conceptuel auquel la physique était parvenue se fissurait : Max Planck lui-même considérait sa théorie comme *un acte de désespoir*, faute de mieux. Albert Einstein ne s'engageait qu'avec circonspection dans la voie des quanta-corpuscules qu'il avait ouverte ; quatre ans après les avoir introduits, il affirmait sa conviction que « *l'on aboutira à une théorie de la lumière que l'on pourra interpréter comme une sorte de fusion de la théorie ondulatoire et de celle des corpuscules* (9). » En fait, la rupture de l'unicité du processus d'émission de l'énergie électromagnétique allait susciter diverses tentatives de réunification : initialement, la structure quantique, qui avait été introduite dans la lumière est apparue comme une anomalie, alors que, progressivement, elle devenait transposable à l'ensemble de l'électromagnétisme. La première prise de position décisive en la matière est venue de Louis de Broglie, dans la conclusion de sa thèse introduisant la mécanique ondulatoire en 1924 : « *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* (10). » Il élargissait ainsi à l'ensemble de l'électromagnétisme ce qu'Albert Einstein avait introduit dans la lumière : l'effet maser allait confirmer cette prévision, comme l'effet photoélectrique avait contribué à introduire les quanta. Dans le cas des grandes longueurs d'onde, une énergie détectable est constituée d'un très grand nombre de quanta et l'aspect statistique des phénomènes fait apparaître le champ électromagnétique, dont les sources sont les quanta, comme une onde pour laquelle la formulation maxwellienne est *appropriée*. Comme le mentionnait Louis de Broglie, la quantification de l'énergie radiante dans l'ensemble du spectre, c'est à dire en fait l'extension du domaine des quanta à la radioélectricité, implique une théorie électromagnétique nouvelle ; celle-ci doit s'écarter de l'interprétation classique du rayonnement d'énergie lié à *la propagation du champ des sources* pour lui substituer le processus de création de particules, impliquant de nouvelles sources, totalement extérieur à la Théorie de Maxwell. Dans ces conditions, le champ qui serait le support d'interactions retardées (hors rayonnement) en se détachant de ses sources, associé à de l'énergie et de la quantité de mouvement, perd toute validité de représentation de la réalité physique.

Quasi simultanément avec l'introduction des quanta, la relativité restreinte (juin 1905) et son complément qui établit l'équivalence masse-énergie (septembre 1905) imposent une révision drastique des fondements de la physique : dès l'introduction, dans le texte qui la présente, apparaît *le renoncement à l'éther luminifère*. Cela semble ouvrir la voie d'une synthèse porteuse de cohérence : *l'éther*, milieu support du phénomène de propagation, n'existe plus ; **en l'absence d'un tel milieu, il ne peut plus y avoir de propagation**, mais en contrepartie, le rayonnement apparaît comme résultant d'un transfert d'énergie aux photons assimilables à des projectiles : ceux-ci circulent d'autant mieux dans l'espace qu'ils n'ont en face d'eux que le vide absolu. Mais cette avancée présentait aussi d'autres facettes allant à contresens de ce qui précède. Concernant l'ensemble de ses deux contributions (relativité et équivalence masse-énergie), Albert Einstein précise :

« J'ai basé cette recherche sur les Équations de Maxwell-Hertz pour l'espace vide ainsi que sur l'expression maxwellienne de l'énergie électromagnétique de l'espace (11). »

Dans cette démarche, la lumière est omniprésente et intervient sous ses différents aspects, particulièrement par sa vitesse, mais elle est considérée exclusivement sous sa forme ondulatoire. Quelques semaines plus tôt, il venait de dissocier la lumière de la Théorie de Maxwell, précisément parce que cette théorie impliquait une distribution de l'énergie incompatible avec celle de la lumière ; or, le texte introduisant la relativité est présenté sans aucune référence aux quanta, comme si ce concept n'avait jamais existé, ni même effleuré son esprit. On notera que, une dizaine d'années plus tard, sa position n'a pas changé : dans le texte introduisant la relativité générale, il effectue le rapprochement entre « *le tenseur des composantes-énergie du champ électromagnétique* » et « *les expressions bien connues de Maxwell-Poynting dans la relativité restreinte* (12). » **Ainsi, les quanta ont été élaborés comme si la relativité ne devait pas exister et la relativité a été élaborée comme si les quanta n'existaient pas.**

On peut effectivement considérer qu'Albert Einstein a privilégié la relativité vis à vis des quanta en n'étendant pas au rayonnement hertzien la structure quantique de l'énergie qu'il avait introduite dans la lumière. Il peut sembler maintenant qu'il y avait peu de chemin à faire pour transposer l'image de *l'électron vibrant autour de sa position d'équilibre et émettant une onde*, au même électron *émettant des quanta*. Mais à l'époque tout ce que l'on sait maintenant était à découvrir ; plus précisément, cette voie conduit à renoncer à la propagation maxwellienne : or, c'est parce qu'il a cru que la propagation excluait les interactions instantanées qu'il a remis en cause la simultanéité classique, imaginé la synchronisation des horloges par des signaux lumineux et finalement développé la relativité restreinte, avec son adéquation à des pans entiers de la réalité physique..... ! Mais les racines de la théorie reposait sur une faille ou, à tout le moins, sur une contradiction : *la propagation* suppose un milieu et en éliminant *l'éther lumineux*, la relativité aurait dû éliminer *la propagation*. Le milieu a été éliminé et *la propagation* est restée sans support et sans réinterprétation. Il s'est trouvé que la Théorie de Maxwell et le concept *de propagation* qu'elle implique conduisent à **une formulation statistique indispensable du champ électromagnétique qui est cohérente avec les données expérimentales et l'apparence s'est substituée à la réalité**, mais la faille ne pouvait manquer de réapparaître.

L'analogie avec un milieu élastique a débordé du cadre du rayonnement et a eu une autre conséquence. Considérons un milieu comme l'air et un corps qui y est simplement déplacé. Ce déplacement ne va pas entraîner la propagation d'une vibration mais une redistribution des éléments du milieu dans l'espace, redistribution qui ne pourra s'établir à distance que par l'intermédiaire du phénomène de propagation. C'est ainsi que l'analogie de *la propagation* a conduit, dans le couplage, aux *interactions retardées*. Contrairement à ce qui s'est passé dans le rayonnement où la propagation a ouvert une voie itérative qui s'est avérée extraordinairement fertile pour faire avancer les choses, en dehors du rayonnement elle a conduit à une fausse piste et à un ensemble de contradictions. Une part importante de la réalité physique est restée masquée par *le concept de propagation* qui occupe encore actuellement une place inappropriée.

En n'étendant pas, aux ondes hertziennes et à la radioélectricité, les quanta introduits dans la lumière, Albert Einstein a effectivement privilégié la relativité vis à vis des quanta. Il s'agit maintenant de comprendre comment la Théorie de Maxwell a pu être à l'origine d'une telle itération au travers de la physique mathématique de l'époque et de ses développements ultérieurs, tout en constituant un socle essentiel sur lequel la physique a réalisé ses avancées.

Chapitre 3. La racine des divergences entre la Théorie de Maxwell et la réalité physique

En établissant sa théorie électromagnétique de la lumière, James Clerk Maxwell a pris soin de rappeler l'état des recherches effectuées antérieurement et qui avaient conduit à deux théories, l'une semblant alors exclusive de l'autre : l'évolution ultérieure de la physique devait conduire à une vision moins dichotomique. Il écrit, dans son introduction à la Théorie Electromagnétique de la Lumière (13) : « *Dans la théorie de l'émission, le transport effectif de l'énergie s'effectue par des particules de lumière.... Dans la théorie des ondulations, il y a un milieu matériel qui remplit l'espace et c'est par l'action des parties contiguës de ce milieu que l'énergie se transmet de proche en proche....* » Concernant l'éther, il croit utile de préciser avec circonspection : « *s'il existe.....* » Autrement dit, il s'appuie explicitement, mais prudemment, sur l'hypothèse d'un milieu support de la propagation et, s'il n'y a pas de milieu, il n'y a pas de propagation. C'est sur les mêmes fondements que Hendrik Antoon LORENTZ a actualisé la Théorie de Maxwell. Mais ce qui est plus décisif, c'est que, un demi-siècle plus tard, Richard Feynman suivra le même cheminement en établissant un parallèle entre les équations de l'électromagnétisme et celles concernant la propagation du son dans l'air (14) ; les principaux traités de la théorie électromagnétique relativiste du XX^e siècle ont présenté, plus ou moins explicitement, des analyses similaires tout en s'appuyant sur la relativité restreinte qui rejette *l'éther luminifère* et alors que la structure quantique domine tout l'électromagnétisme (15, 16, 17, 18, 19, 20).

Lorsque la Théorie de Maxwell a été établie, on pensait que les charges électriques et les courants étaient des fluides continus. Ultérieurement, il est apparu que, dans les cas concernés habituellement, les charges électriques élémentaires qui interviennent sont les électrons et les protons ; quand on fait tendre la charge vers zéro, on arrive à la charge élémentaire indivisible. Les Équations de Maxwell impliquent des relations différentielles entre les densités de charges et de courant d'une part, et les champs d'autre part, et des relations différentielles concernant les champs entre eux (équations I à IV, chapitre 2). Dans ces équations, lorsqu'on annule les densités de charge et de courant (cas du vide sans aucune source électrique), on aboutit aux équations de propagation du champ électrique et du champ magnétique. Or, les Équations de Maxwell ont été établies en considérant qu'il y a des champs **parce que** ils ont des sources qui sont les charges électriques (statiques ou en mouvement). Lorsque les sources sont réduites aux charges élémentaires, on reste encore dans le cadre de la démarche de base : les champs ont des sources. Si on garde les relations ainsi établies en annulant les densités de charge et de courant, on fait implicitement l'hypothèse que les champs existent en l'absence de sources, c'est un contexte physique totalement différent de celui correspondant aux hypothèses initiales sur lesquelles les Équations de Maxwell ont été établies. **On introduit, de façon implicite, une nouvelle hypothèse totalement différente des hypothèses initiales**, qui revient à admettre qu'il y a eu des sources dont les champs se sont détachés, c'est à dire à introduire, a priori, un concept inapparent qui anticipe celui qui semble sortir, a posteriori, des équations de propagation ; celles-ci n'ont plus d'ancrage dans la réalité physique telle qu'elle est exprimée par les équations fondamentales dont elles sont issues. C'est alors qu'intervient un processus décisif : **le génie de James Clerk Maxwell**, œuvrant à contre-courant de la logique, conduit à une piste extraordinairement fertile qui va accompagner les développements de l'électromagnétisme, mais qui n'est pas celle sur laquelle il est possible d'exprimer directement la réalité physique. Cette piste va constituer une passerelle au-dessus d'un vaste domaine d'ignorance de la réalité physique dans lequel la clarification n'interviendra que très progressivement. Un parcours reste à faire vers cette clarification.

L'étape qui reste à franchir, apparaît dans la présentation que fait Fritz Rohrlich, dans l'ouvrage *Classical Charged Particles* (21), en analysant le problème de la charge électrique et de son champ selon que la charge est accélérée et émet un champ de rayonnement (champ en $1/r$), ou qu'elle est en mouvement rectiligne uniforme (champ de couplage en $1/r^2$) : *"The radiation field detaches itself from the charge which is its source and leads an independent existence; it is*

endowed with energy, momentum and sometimes angular momentum...In contradistinction, the velocity fields are permanently attached to the charge and are carried along with it; they have neither energy nor momentum at large distances from their source.....The autonomous character of the radiation field finds its full expression in the quantum nature of radiation, i.e in the grainy structure of its momentum, energy, and angular momentum corresponding to a collection of photons."

Ces quelques lignes convergent partiellement avec ce qui a été débattu ici, en mettant en évidence le cheminement adopté dans le développement de la théorie électromagnétique. Au départ de cette analyse, il y a les Équations de Maxwell qui conduisent à faire apparaître le champ électrique et le champ magnétique dans des Équations de D'Alembert. **L'auteur en conclut que ces équations représentent des ondes (transverses) pour le champ électrique et le champ magnétique.** A partir de là, il introduit la formulation relativiste (covariante) de la façon suivante : *"The Maxwell-Lorentz equations are consistent with the Lorentz relativity of velocity. They are invariant under the Lorentz group of transformation.*

Dans ce texte, les quanta ne sont pas omis, mais ils n'ont pas la place qui leur revient avec *le champ de radiation qui trouve sa pleine expression dans la structure granulaire d'un ensemble de photons.* Si toute l'énergie radiante est constituée de photons, sous la forme initiale introduite par Albert Einstein élargie à l'ensemble de l'énergie radiante comme précisé par Louis de Broglie, et comme le montre l'effet maser-laser, alors les Équations de Maxwell ne doivent pas être interprétées comme impliquant *la propagation* du champ électrique et du champ magnétique mais comme fournissant l'enveloppe des phénomènes relevant de la création de particules, de leur *déplacement* dans l'espace et de leur aspect statistique. Dans ces conditions, *la propagation* n'existe pas en tant que réalité physique et on retrouve l'instantanéité dans les interactions classiques de couplage, qui constitue l'un des aboutissements des présentes recherches. Il est intéressant de remarquer que l'électromagnétisme maxwellien, tel qu'interprété par Fritz Rohrlich, conduit aussi à cette conclusion telle qu'elle apparaît dans le commentaire concernant le champ de la charge en mouvement rectiligne uniforme : **le champ reste attaché à la charge, il ne peut donc pas se propager dans l'espace pour devenir porteur d'interactions retardées et il en va de même dans le cas du champ magnétique d'un aimant.**

Dans le texte précité, comme dans tous ceux consacrés à l'exposé de la théorie électromagnétique (références ci-dessus), la propagation est considérée comme découlant de la présence du champ électrique et du champ magnétique en formulation vectorielle dans des Equations de D'Alembert associées **initialement** à l'hypothèse de l'existence de l'éther, support du phénomène de propagation. Lorsqu'on passe à *la forme co-variante des équations*, on entre dans la formulation relativiste de l'électromagnétisme : on passe de la représentation vectorielle des champs à leur représentation tensorielle dans l'espace-temps quadri-dimensionnel **en ne remettant en cause, d'aucune façon, l'hypothèse de la propagation.** Le milieu support de la propagation a disparu en même temps qu'est apparue la forme co-variante des équations. On est passé ainsi de la formulation pré-relativiste, basée sur l'hypothèse de *l'éther luminifère* supportant la propagation, à la formulation relativiste qui a éliminé *l'éther luminifère* tout en conservant la propagation. Les *c*-particules photons (champ d'accélération en $1/r$) créent un champ se comportant **statistiquement** comme le prévoit la Théorie de Maxwell-Lorentz ; par contre la propagation supposée du champ porteur d'interactions retardées (champ de vitesse en $1/r^2$) correspond à un concept erroné qui se trouve mis en évidence dans l'analyse de Fritz Rohrlich.

Le rayonnement électromagnétique implique le processus de création des particules que sont les photons, dans leur interprétation physique. Lorsque les photons sont en très grand nombre, ils reconstituent un phénomène qui présente l'apparence d'une onde ayant les caractéristiques de propagation prévues par la Théorie de Maxwell. En dehors de ce rayonnement, il n'existe pas de phénomène physique impliquant *la propagation du champ électromagnétique.*

Dans cette voie, on entre dans une physique profondément différente de celle qui a été développée jusqu'à maintenant, et cela au niveau de ses fondements les plus profonds. Un aspect de cette situation apparaît dans la formulation des 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 Équations de Maxwell, qui permettent de passer des paramètres de la charge en mouvement à son champ électromagnétique, ne sont valables que dans la mesure où la vitesse de la charge est faible devant celle de la lumière. Dans le cas contraire, elles les ont incités à exprimer les potentiels à partir d'une valeur de la charge affectée d'un coefficient directionnel. Les expressions des potentiels retardés diffèrent 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 VII, VIII, IX, dans les cas correspondant aux figures 6 et 7 :

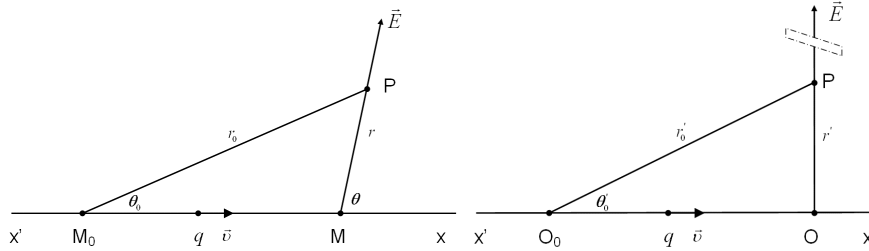


Figure 6

Figure 7

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

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

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

Les composantes \vec{E} et \vec{B} du champ (figure 6), 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 7) ; \vec{E} est exprimé par la relation VIII, 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 intervient aussi pour exprimer l'énergie d'un électron animé de la vitesse v par rapport à son énergie au repos, et qui est spécifique des effets relativistes. Le concept qui a été invoqué alors pour parvenir à cette formulation du champ électromagnétique 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 ainsi arrivé 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 les mêmes racines que celle évoquée concernant la propagation du champ d'un aimant ; elle procède du cheminement menant aux étapes qui ont jalonné les avancées scientifiques dans une voie itérative qui n'est pas cohérente avec la réalité physique comme le montre, entre autres, l'analyse suivante.

Prenons le cas d'un électron e_1 (figure 8) de haute énergie, 360 Gev par exemple, dont la vitesse est très proche de celle de la lumière ($v/c = 1 - 10^{-12}$). A l'instant où il passe en O, e_1

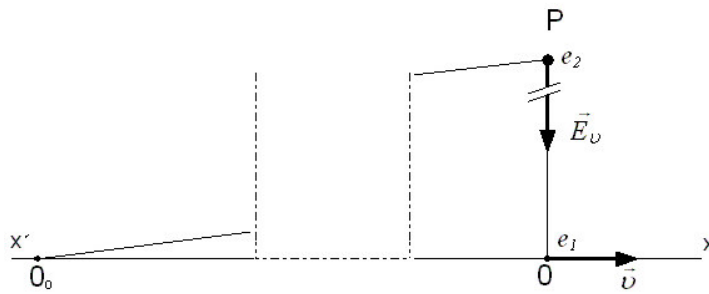


Figure 8

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 retardée O_0 est alors à 700 kilomètres en 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 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 plus loin dans lequel *des conclusions valables découlent de prémisses inexactes.*» 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.

Chapitre 4. De la quantification einsteinienne à la quantification mathématique

Au fur et à mesure que les quanta entraient dans les habitudes de pensée des physiciens, l'attachement à l'unicité de nature de l'ensemble du rayonnement électromagnétique évoluait et conduisait à passer de *la propagation* omniprésente aux quanta devenant de plus en plus incontournables, sous le terme de photons. La première prise de position nette en la matière est venue de Louis de Broglie, indiquée précédemment. Il élargissait ainsi à l'ensemble de l'électromagnétisme ce qu'Albert Einstein avait introduit dans la lumière : dans le cas des grandes longueurs d'onde, une énergie détectable est constituée d'un très grand nombre de photons et l'aspect statistique des phénomènes fait apparaître le champ électromagnétique comme une onde pour laquelle la formulation maxwellienne est *appropriée* alors que la réalité physique est quantique.

Dans la même période, Pascual Jordan imaginait de quantifier le champ électromagnétique en s'appuyant sur l'algèbre matricielle avec les développements ultérieurs que l'on sait. Cette convergence vers l'objectif de quantification du champ électromagnétique recouvre une divergence sous-jacente au niveau de l'interprétation de la réalité physique, divergence qui va prendre une place particulièrement importante tout en restant inapparente. En schématisant, on peut dire que la quantification proposée par Louis de Broglie étendait à l'ensemble du spectre électromagnétique, c'est à dire, en fait à la radioélectricité qui était restée maxwellienne, les quanta-corpuscules de nature physique ; la quantification proposée par Pascual Jordan considérait **implicitement** que la réalité physique correspondait à l'énergie maxwellienne distribuée de façon continue dans l'espace et sur cette base, **un formalisme mathématique introduisant la Constante de Planck était supposé quantifier l'énergie concernée.**

Lorsque le maser et la continuité maser-laser mirent en évidence la continuité de nature des phénomènes intervenant dans le domaine de la lumière et dans celui de la radioélectricité, la quantification mathématique avait largement progressé ; les succès qu'elle remportait déjà occultaient les autres approches, en même temps qu'elle introduisait la quantification dans l'ensemble de l'énergie électromagnétique (et non seulement dans l'énergie radiante). De plus, il se trouvait que les formalismes mathématiques qu'elle mettait en œuvre devenaient les supports quasi-exclusifs des avancées mais en impliquant, au départ, des liens extraordinairement subtils avec la réalité physique. L'ampleur des résultats obtenus dans cette voie conduisait à considérer comme valide l'ensemble de la démarche ainsi que les hypothèses initiales, généralement plus implicites et intuitives qu'explicites (donc relevant plus du génie que de la logique), sur lesquelles elle s'était développée.

La quantification mathématique (théorie quantique des champs, électrodynamique quantique) est effectuée à partir des Équations de Maxwell, stricto sensu, et des jauges impliquées par les formulations différentielles (en général : Jauge de Coulomb dans le cas des formulations non covariantes, Jauge de Lorentz dans le cas des formulations covariantes). A ce niveau, la propagation qui est l'aboutissement de la Théorie de Maxwell ne concerne aucune des opérations impliquées : formulation lagrangienne/hamiltonienne de l'énergie supposée associée au champ électromagnétique, 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 \hbar dans les commutateurs, mise en œuvre d'opérateurs introduisant mathématiquement la fonction de création et d'annihilation de particules. Dès lors que la démarche repose sur l'hypothèse de la validité de la Théorie de Maxwell, tout champ lié à des sources en état variable est supposé en propagation à la vitesse c : c'est dans ce champ en propagation que l'opérateur de création de particules fait émerger les photons qui se trouvent, ipso facto, dotés de la caractéristique de propagation du champ. La démarche conduit plus ou moins implicitement à la conclusion que les photons mathématiques sont identifiables aux quanta einsteiniens mais ce n'est pas le cas. Les quanta einsteiniens correspondent au **phénomène physique de création de particules** ; ils appartiennent à la même classe de phénomènes que la création d'une paire proton-antiproton à

partir de l'énergie cinétique d'un proton initial doté d'une vitesse suffisante (le photon est à la fois la particule et l'antiparticule) ; il s'agit aussi de la même classe de phénomènes que la dématérialisation d'un électron et d'un positron se convertissant en rayons gamma. Lorsque les quanta sont émis en très grand nombre, ils reconstituent un champ électromagnétique qui est représenté **statistiquement** par les Équations de Maxwell comme cela a déjà été indiqué ; à très grande distance de leur source, ils se comportent comme des corpuscules qui s'éloignent les uns des autres et entre eux il n'y a que le vide. La quantification mathématique conduit à prévoir une situation physique totalement différente puisque, au départ, elle s'appuie sur la théorie qui prévoit *une énergie distribuée de façon continue sur un volume sans cesse croissant*. **Il n'est pas au pouvoir d'un formalisme mathématique, si puissant soit-il, de convertir une énergie supposée physiquement continue en une énergie supposée physiquement discontinue, sauf à remettre en cause implicitement (ou mieux explicitement) telle ou telle hypothèse initiale. Précisément, ce qui intervient c'est un processus (on y reviendra plus loin) selon lequel le génie des chercheurs conduit à des résultats valables en partant de prémisses inexactes.** En fait, la quantification mathématique s'appuie, au départ, sur les Equations de Maxwell sans mettre en œuvre les équations de propagation et, dans la réalité physique, la particule engendrée, le photon, étant doté de **la propriété intrinsèque de déplacement à la vitesse c** , les c -particules que sont *les photons mathématiques* rejoignent la propagation en même temps que, dans leur comportement statistique, ils obéissent aux lois découlant de la Théorie de Maxwell. En schématisant et sans que cela soit clairement perçu, **la quantification mathématique est étayée sur les Équations de Maxwell mais pas sur la Théorie de Maxwell, qu'elle ne rejoint qu'in fine.** Dans ce contexte, l'obscur concept de *photon virtuel* sera amené à évoluer dans le cadre du caractère instantané des interactions de couplage auxquelles appartient l'interaction aimant-conducteur.

Cette remise en cause de la quantification de la Théorie de Maxwell-Lorentz peut apparaître critiquable eu égard à l'apport de ce volet de la physique et inappropriée puisqu'une critique discursive est opposée à des formalismes mathématiques validés systématiquement par l'expérience, avec une précision qui défie l'imaginable. Cet aspect des choses n'est en aucune façon ignoré ou négligé ici. Il y a deux réponses à cette argumentation.

La première réponse consiste à reprendre la présentation de Fritz Rohrlich indiquée dans le chapitre 3 qui évoque *le caractère autonome du rayonnement qui trouve sa pleine expression dans la structure granulaire de l'énergie*, étant entendu que cela conduit à faire apparaître *cette structure discontinue* dans *la structure continue* de l'onde qui *se détache de sa source* (par exemple le champ en $1/r$ d'une charge accélérée) et qui encore une fois correspond à la distribution maxwellienne de l'énergie radiante, *continue dans l'espace* : c'est là mission impossible sur le plan physique.

La deuxième réponse consiste à considérer qu'il s'agit d'un débat dont l'issue apparaîtra spontanément lorsque l'expérience vérifiant les modalités de l'interaction aimant-conducteur aura conduit à l'incontournable refondation de la physique.

Chapitre 5 Eléments complémentaires

Les différentes facettes de la réalité physique

On observera, à partir des analyses faites ici, à quel point des formulations et interprétations qui semblent se rattacher de façons différentes à la réalité physique, conduisent à des résultats équivalents et peuvent conduire, ou sembler conduire, aux validations expérimentales. Cet aspect des choses est au cœur du présent travail et l'analyse qu'en fait Richard Feynman peut aider à ce qu'il soit pris en compte en évitant que soit rejetée, a priori, une tentative de clarification dans des situations où les apparences et les réalités sont profondément imbriquées. « *Je voudrais faire une remarque. Que l'électrodynamique puisse s'écrire de tant de façons différentes, les équations différentielles de Maxwell, divers principes extrémaux avec des champs, des principes extrémaux sans champs, etc..., ça, je le savais déjà mais je ne l'ai toujours pas compris. Il me semble toujours étrange que les lois de la physique, quand on les découvre, se présentent sous tant de formes différentes, qui n'ont pas dès l'abord l'air équivalentes, mais dont on peut démontrer ensuite qu'elles le sont en faisant jouer les mathématiques. Un exemple en est l'équivalence de l'équation de Schrödinger et de la formulation matricielle de Heisenberg de la mécanique quantique. Je n'en comprends pas le pourquoi, cela reste pour moi un mystère, mais c'est quelque chose que l'expérience m'a enseigné. Il y a toujours une façon d'exprimer la même chose mais sous une forme qui ne ressemble absolument pas à ce que vous disiez auparavant (22).* »

Ce qu'exprime Richard Feynman, c'est la subtilité des mécanismes mis en œuvre dans la nature, subtilité qui peut conduire à des pistes itératives qui font avancer les choses sans refléter exactement la réalité physique. Ainsi en a-t-il été lorsqu'on est passé de l'interprétation de l'Atome de Bohr, avec ce qui apparaissait comme des vérifications expérimentales décisives (contributions d'Arnold Sommerfeld en particulier), à l'interprétation par l'Equation de Schrödinger ou à l'interprétation matricielle. Dès lors que l'on est confronté à une anomalie de l'ampleur de celle de l'inséparabilité/relativité, ce n'est qu'en explorant le plus finement possible les situations admises comme des postulats que l'on peut espérer franchir une étape significative.

La relativité générale

Sans entrer dans l'analyse du contenu de la relativité générale, il n'est pas possible d'imaginer que *la propagation* n'ait pas de réalité en électromagnétisme et que la relativité générale ne se trouve pas, elle aussi, remise en cause sur le même aspect des choses. Les multiples réflexions que l'on peut faire en la matière n'apporteraient rien de plus au problème abordé ici et dont la solution dépendra de la réalisation de l'expérience cruciale aimant-conducteur proposée (ou équivalente) et de son résultat. Un résultat positif impliquera une refondation de l'ensemble de la physique et la relativité générale sera évidemment partie prenante de cette refondation.

On prendra en compte l'évolution de la position d'Albert Einstein qui, dans la relativité restreinte, avait affirmé l'inutilité de recourir à *un éther lumineux* et qui, dans le développement de la relativité générale, a été amené « *à revenir de façon radicale sur ses conceptions de 1905, ainsi qu'il l'explique dans la célèbre conférence, L'éther et la Théorie de la Relativité Générale, qu'il prononça à l'université de Leyde, le 5 mai 1920 (Wikipédia)* ». La relativité générale, dans le prolongement de la relativité restreinte, est consubstantielle à *la propagation*. Il faut revenir sur ce qui a été dit précédemment : la racine de la propagation dans l'électromagnétisme se situe au niveau de la Théorie de Maxwell qui prévoit explicitement qu'*elle implique un milieu et que c'est par l'action des parties contiguës de ce milieu que l'énergie se transmet de proche en proche*. Le problème de l'interprétation de la propagation, en l'absence de milieu qui en soit le support, réapparaît avec la relativité générale parce que le problème a été masqué, dans le cas de l'électromagnétisme, par le fait suivant : *lorsque les longueurs d'onde et les densités d'énergie sont grandes la formulation maxwellienne (c'est à dire la propagation) est appropriée pour exprimer les phénomènes observables ; il n'y a pas l'équivalent pour la relativité générale*. En fait,

on n'a pas apporté une considération suffisante à la place occupée par *la propagation* en l'absence du milieu qui était supposé en être le support.

Les limites des présentes recherches

Il est plus facile de raisonner sur le champ magnétique des aimants que sur le champ des charges électriques parce que les aimants interviennent beaucoup plus largement dans la pratique courante que les charges électriques en tant que telles. Il n'est pas possible de faire avec des charges électriques des expériences aussi simples et significatives que ce que l'on peut faire entre un aimant en mouvement dans les conditions classiques et un circuit conducteur. Il n'en reste pas moins que le problème se pose de façon similaire pour l'évolution du champ électrique (et des champs en général) en fonction de l'évolution de ses sources.

Un point mérite une attention particulière. Le présent travail de recherche est mené avec la conviction que l'expérience de l'interaction aimant-conducteur mettra en évidence l'instantanéité de cette interaction. Revenons sur les conclusions qu'il est possible de tirer d'un tel résultat en progressant par étapes. 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 (électroaimant) ; on va prévoir que la théorie et l'expérience conduiront au même résultat que dans le cas de l'aimant. Mais plaçons-nous dans le cas où l'on choisirait de créer un champ magnétique variable au niveau du circuit induit en établissant un courant dans le circuit inducteur à un instant donné : rien, dans le présent travail, ne permet de présupposer ce qui se passera dans le circuit induit en fonction du temps par rapport à ce qui se passera dans le circuit inducteur. Dans le premier cas, on agit sur une source dont le champ est établi dans l'espace, dans le second, on crée un champ en créant sa source.

Aux racines de ce problème, on trouve **le processus de création physique** 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 de son antiparticule, que deviendront le champ et l'énergie qui sont supposés en train de se propager ? Le même raisonnement peut intervenir à partir d'une paire proton-antiproton engendrée à partir d'un proton initial doté d'une énergie cinétique suffisante et immobilisé dans une cible : qu'elle est l'évolution dans le temps et dans l'espace du champ électromagnétique et du champ gravitationnel de chaque particule qui vient d'être créée ?

La vérification expérimentale de l'instantanéité de l'interaction aimant-conducteur, dans le cas de l'aimant mobile, ne permettra pas de préjuger des modalités spatio-temporelles des autres interactions possibles, ni de la façon dont le champ s'établit dans l'espace, pour les différentes configurations envisageables concernant ses sources. Un vaste programme expérimental sera nécessaire. L'expérience initiale se limitera à débloquer une situation ponctuellement figée et noyée dans un océan de succès.

Conclusion

La physique s'est développée, pour une large part, sur la base du concept de propagation des champs (électrique, magnétique, électromagnétique et par généralisation gravitationnel), or le phénomène supposé correspondant à ce concept n'existe pas dans son interprétation actuelle.

Dans l'action électrodynamique réciproque d'un aimant et d'un conducteur, le phénomène observable dépend uniquement du mouvement relatif de ces deux éléments. L'évolution de la physique a montré que l'on est là au cœur de l'apport de la relativité en cohérence totale avec la réalité physique

Cependant, la théorie électromagnétique issue de la Théorie de Maxwell-Lorentz, actualisée par la relativité trace une distinction nette entre les deux cas dans lesquels soit l'un soit l'autre de ces corps est en mouvement. Selon cette théorie, l'interaction est instantanée dans le cas du mouvement du conducteur alors qu'elle est retardée par la propagation dans le cas du mouvement de l'aimant.

La théorie électromagnétique apparaît ainsi en contradiction avec la relativité. L'analyse faite ici conduit à la conclusion que le phénomène supposé de propagation (le champ se détachant directement de ses sources) n'est pas cohérent avec la réalité physique.

L'objectif du présent travail est de conduire à la vérification expérimentale de l'instantanéité de l'interaction d'un aimant en mouvement en face d'un circuit conducteur, c'est à dire à la vérification que, effectivement, l'interaction aimant-conducteur ne dépend que du mouvement relatif des deux éléments. Dans ce nouveau contexte, non seulement la relativité n'est pas incompatible avec les interactions instantanées mais elle les implique, au moins dans la configuration qui sert à l'introduire. Cela ouvre la voie d'une nouvelle physique sans la propagation, avec en première étape, la nécessité d'un vaste programme expérimental pour redéfinir les liens entre les sources de champs et les champs dans les différentes configurations.

La conséquence de ce qui précède est que la théorie électromagnétique, la relativité restreinte, l'Espace-Temps de Minkowski, la relativité générale, et en fait l'ensemble de la physique doivent être refondés à partir de leurs racines. L'espace-temps est à la fois le support des interactions instantanées de couplage telles que celles qui viennent d'être décrites et le support des interactions de rayonnement véhiculées par les photons **se déplaçant** à la vitesse c . Au risque d'être répétitif, il doit être bien clair que ce qui est présenté **ne peut avoir qu'une portée extrêmement limitée** vis à vis de la nécessaire refondation de la physique sur des bases nouvelles. La conviction (indispensable pour faire bouger les choses) qui conduit aux hypothèses avancées ici n'exclut pas la plus grande réserve dans l'attente des données de l'expérimentation.

Il n'est plus possible d'affecter à l'espace-temps une structure purement géométrique, il doit être doté d'une structure physique présentant un caractère de dualité.

Les fondements de la physique, dans leur ensemble, sont à ré-explorer, avec des conséquences d'une ampleur sans commune mesure avec les aspects préliminaires de l'analyse présentée ici.

Dans la voie de la nécessaire refondation de la physique, un obstacle reste à franchir : il faut que les arguments avancés apparaissent suffisamment crédibles pour déclencher

l'expérimentation clarificatrice ; c'est l'objectif du présent document récapitulatif, en le précisant, le contenu de ceux qui l'ont précédé. La Théorie de Maxwell et son évolution quadri-dimensionnelle, la relativité restreinte, la relativité générale, les théories quantiques ont été les supports des avancées de la physique, avec l'ampleur que l'on sait. Tout cela tend à créer un attachement aux fondements qui ont conduit à de tels résultats et à faire que les auteurs de ces résultats se sentent solidaires de leurs outils de travail. Un risque en découle : les voies classiques n'ayant pas apporté de solution à un problème posé pendant trois quarts de siècle, chacun se dit prêt à se tourner vers toute solution iconoclaste puis, quand une telle solution apparaît, elle est rejetée parce qu'étant iconoclaste. Quelques avis, de valeur incontestable, peuvent contribuer à surmonter cet obstacle.

Les avancées résultant de l'activité intellectuelle humaine sont obtenues par des processus itératifs décrits par Banesh Hoffmann, collaborateur, ami et biographe d'Albert Einstein, sous la forme suivante : « *Le talent qu'a le théoricien scientifique d'aboutir à des conclusions valables en partant de prémisses reconnues plus tard inexactes n'est pas le moindre de ses dons, car il est doué d'une intuition clairvoyante* (23). » L'intuition clairvoyante, c'est **le génie** qui présente la particularité de pouvoir œuvrer à contre-courant de la logique ou de court-circuiter celle-ci lorsqu'elle ne dispose pas des éléments permettant, à l'époque concernée, de faire avancer les choses. A charge pour les détenteurs des *résultats valables* de remonter aux sources et de remettre en place des *prémisses exactes*.

Quant à la nécessité de ne pas rejeter des approches qui pourraient sembler trop iconoclastes, le même auteur précise : « *La Mécanique des Quanta doit partager son autorité avec la Relativité, cette autre rebelle, et bien que de concert ces deux théories aient conduit à nos plus pénétrantes avancées dans la quête du savoir, elles doivent pour le moment rester ennemies. Leur désaccord fondamental ne sera résolu que le jour où une théorie, plus puissante encore les pliera toutes les deux sous son joug et balayera les illusions péniblement conquises que sont nos idées sur l'espace et le temps, la matière et la radiation, la causalité.* »

Dans la même ligne de pensée, Paul Adrien Dirac apporte un avis convergent: «*La modification conduisant de la mécanique quantique actuelle à la mécanique relativiste du futur sera tout aussi radicale que celle qui a mené de la théorie orbitale de Bohr à la mécanique quantique actuelle. Bien sûr, quand nous accomplissons des changements aussi dramatiques, nos idées sur les interprétations physiques de la théorie, avec ses calculs statistiques, pourraient bien se trouver modifiées* (24). »

Si, comme on en a la conviction ici, les recherches menées sur le chemin ouvert par le testament scientifique d'Albert Einstein conduisent à l'élimination de l'anomalie que constitue la contradiction entre l'inséparabilité quantique et la relativité, il sera peut-être utile de savoir qu'elles ont été menées dans la voie suggérée par Louis de Broglie: « *Ce qui m'apparaît comme essentiellement désirable, c'est le retour à des images spatio-temporelles précises permettant de comprendre clairement de quoi l'on parle* (25). » A partir de là, il s'agit d'aller de l'avant « *en s'inspirant directement des données de l'expérience, en s'affranchissant des idées préconçues et en n'accordant pas une valeur trop exclusive aux formalismes mathématiques, même élégants et rigoureux, qui risquent parfois de masquer les réalités physiques profondes* (26).»

Ouvrages cités

1. Collectif d'auteurs : Demain la Physique, Odile Jacob Sciences.
2. Citation de: Banesh Hoffmann, Albert Einstein, Créateur et Rebelle, Éditions du Seuil, 1972-1975.
3. Citation de: Louis de Broglie, Nouvelles perspectives en microphysique, Albin Michel, 1956.
4. Albert Einstein, On the Electrodynamics of Moving Bodies in: The Principle of Relativity, Dover Publications, Inc New-York, 1923-1952
5. James Clerk Maxwell, (Traduction française) Traité d'Electricité et de Magnétisme, Editions Jacques Gabay, 1989
6. Hendrik-Antoon Lorentz, The Theory of Electrons and its Applications to the Phenomena of Light and Radiant Heat, Ed Jacques Gabay, 1992
7. Dans : José Leite-Lopes & Bruno Escoubès, Sources et Evolution de la Physique Quantique, Masson, 1994
8. d°7
9. Dans : Émilio Segré, Les physiciens modernes et leurs découvertes, Fayard, 1984
10. Louis de Broglie, ré-édition de la thèse de 1924 : Recherche sur la Théorie des Quanta Masson, 1963
11. Albert Einstein, Does the Inertia of a Body Depend Upon its Energy-Content, Dover Publications, Inc New-York, 1923-1952
12. Albert Einstein The Foundation of the General Theory of Relativity, in The Principle of Relativity, Dover Publications, Inc New-York, 1923-1952
13. d°5
14. Richard Feynman, Lectures on Physics Tome II, Electromagnetism-1, InterEditions, 1970
15. J.D. Jackson, Classical Electrodynamics, John Wiley, 1974
16. Lev Landau & E Lifchitz, Théorie des Champs, Mir, 1974
17. Panofsky & Phillips, Classical Electricity and Magnetism, Addison Wesley 1962
18. F. Rohrlich, Classical Charged Particles, Addison Wesley, 1990
19. Lev Landau & E Lifchitz, Electrodynamique quantique, Ed. Mir/Librairie du Globe 1973
20. Albert Messiah, Mécanique Quantique, Tome 2, Dunod, réédition 1995.
21. d°18
22. Dans d°7
23. Banesh Hoffmann, Michel Paty, L'étrange histoire des quanta, Editions du Seuil, 1981

24. Dans d'9

25. Louis de Broglie, Nouvelles perspectives en microphysique, Albin Michel, 1956.

26. Louis de Broglie, ré-édition de la thèse de 1924 : Recherche sur la Théorie des Quanta
Masson, 1963
