



HAL
open science

Le vide est-il une substance?

Patrice Delon

► **To cite this version:**

| Patrice Delon. Le vide est-il une substance?. Librinova, 2020, 9791026271406. cea-03518323

HAL Id: cea-03518323

<https://cea.hal.science/cea-03518323>

Submitted on 9 Jan 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

LE VIDE EST-IL UNE SUBSTANCE ?

Les théories de la relativité et de la mécanique quantique impliquent-elles un vide substantiel et réel, et d'énergie nulle ?

« L'espace vide n'est autre que le volume occupé par l'énergie. Lorsque l'énergie, flux sans limite, est subtile au point de n'avoir pas de forme, les hommes voient l'espace vide mais pas l'énergie. Or, tout l'espace vide n'est qu'énergie : condensée, elle devient visible, et les hommes disent alors qu'il y a quelque chose ; dispersée, elle n'est plus visible, et les hommes pensent alors qu'il n'y a rien. »

Wang Fuzhi, dans « histoire de la pensée chinoise », Anne Cheng, éditions du seuil, 1997, p. 546

Table des matières

Introduction.....	7
1 Le rapport du vide à l'espace.....	11
L'espace en mécanique quantique, sa relation avec le vide quantique.....	11
L'espace selon la théorie de la relativité.....	16
Le vide comme espace.....	17
2 L'énergie du vide de la mécanique quantique.....	19
Le vide selon l'école de Copenhague.....	19
Les relations d'Heisenberg.....	20
Le statut des particules virtuelles.....	23
La création de paires particules – antiparticules, la mer de Dirac.....	25
Le décalage de Lamb, l'effet de la polarisation du vide.....	30
L'effet Unruh, les pseudos particules de Rindler, l'action de l'accélération.....	30
L'effet Casimir, le vide un milieu rempli d'ondes.....	32
L'énergie du vide de point zéro.....	34
Conclusion provisoire.....	36
3 L'énergie du vide de la théorie de la relativité.....	39
La relativité générale.....	39
4 Mise en regard des deux concepts de l'énergie du vide.....	51
L'énergie du vide de la mécanique quantique standard.....	51
L'énergie du vide de la relativité.....	53
Synthèse de la comparaison des deux approches du vide.....	54
5 Les bases d'un programme de recherche.....	57
Conclusion générale.....	59
Bibliographie.....	61
Annexes.....	65
Annexe 1 : Transformation et invariance de Lorentz.....	65
Annexe 2 : champ et boson de Higgs.....	69

Introduction

A la fin du 19^{ème} siècle les physiciens étaient confrontés à deux phénomènes qui leur posaient un problème conceptuel : la propagation de la lumière et la force de gravitation de Newton. Chacun de ces phénomènes, décrivant une action à distance, ne pouvait être expliqué que par la présence d'un milieu emplissant le vide entre les corpuscules élémentaires. Ce milieu, auquel on avait donné le nom d'éther, devait, pensait-on, nécessairement pouvoir être décrit par des lois mécaniques aptes à expliquer le transport des ondes et les actions à distance. Une première série de résultats empiriques faisant intervenir des effets de premier ordre, c'est-à-dire en v/c , furent obtenus mais sans succès, l'éther ne semblait avoir aucune interaction avec les objets de notre réalité. On étudia alors les effets de second ordre en v^2/c^2 ; l'expérience de Michelson qui devait produire un effet de ce type et permettre la détection d'un vent d'éther lié au mouvement de rotation de la Terre donna un résultat négatif contre toute attente. Ce résultat négatif fut expliqué d'abord par Lorentz qui fit l'hypothèse d'une contraction des longueurs des objets dans la direction du supposé vent d'éther. Si cette explication fournissait une explication possible au résultat négatif de cette expérience, et à toutes celles qui l'avaient précédé, il fermait la porte à une éventuelle mise en évidence empirique du mouvement d'un éther. Cette contraction des longueurs soulevait par ailleurs de nombreuses questions conceptuelles et plusieurs physiciens se sont opposés à cette idée : H. Poincaré déclara à ce sujet au congrès d'Art et de Sciences de St Louis aux États Unis sous le titre « l'état actuel et l'avenir de la physique mathématique »¹ :

« Prenons donc la théorie de Lorentz (...) au lieu de supposer que les corps en mouvement subissent une contraction dans le sens du mouvement et que cette contraction est la même quelles que soient la nature de ces corps et les forces auxquelles ils sont d'ailleurs soumis, ne pourrait-on pas faire une hypothèse plus simple et plus naturelle ? On pourrait imaginer, par exemple, que c'est l'éther qui se modifie quand il se trouve en mouvement relatif par rapport au milieu matériel qui le pénètre, que, quand il est ainsi modifié, il ne transmet plus les perturbations avec la même vitesse dans tous les sens. Il transmettrait plus rapidement celles qui se propageraient parallèlement au mouvement du milieu, soit dans le même sens soit dans le sens contraire, et moins rapidement celles qui se propageraient perpendiculairement. Les surfaces d'onde ne seraient plus des sphères, mais des ellipsoïdes et l'on pourrait se passer de cette extraordinaire contraction des corps ».

Cette hypothèse sur les propriétés mécaniques de l'éther va le conduire à soutenir l'idée selon laquelle il est impossible de mettre en évidence une vitesse relative de l'éther. Einstein, l'année suivante, posant comme hypothèse que la vitesse de la lumière dans le vide est d'une part constante et d'autre part donne le même résultat de mesure quel que soit le repère inertiel

1 Bulletin des sciences mathématiques de décembre 1904, p 302-324

dans lequel on la mesure, montra qu'alors tous les faits expérimentaux pouvaient être expliqués sans avoir besoin de supposer l'existence d'un milieu particulier. L'éther, milieu caractérisant le vide, devenait selon lui une hypothèse inutile.

Si la relativité restreinte rejette l'existence d'un milieu remplissant le vide, la relativité générale, qui englobe la relativité restreinte, en admet un mais ne lui reconnaît aucun rôle dans les équations régissant l'univers, notamment comme explication de la transmission des ondes lumineuses et des actions à distances tant gravitationnelles qu'électriques. Selon Einstein, il existe un éther, sans structure, mais distinct de la matière ordinaire et de la lumière. Ce sont des objets différents. Pour lui, la lumière est constituée de photons transportant leur propre énergie et qui peuvent être décrits comme des particules associées à une onde électromagnétique dont la fréquence ν est déterminée par l'énergie portée par chaque photon selon la relation $E=h\nu$, où h est la constante de Planck. Cet éther de la relativité générale ne devant pas perturber l'espace, il est posé par hypothèse d'énergie nulle. La relativité admet donc un vide réel et substantiel.

La mécanique quantique ne rejette pas non plus a priori l'idée d'un vide réel et substantiel mais pose également par hypothèse que l'énergie moyenne globale de ce dernier doit être nulle. Elle décrit un monde microscopique, constitué de particules de masse intrinsèquement nulle qui n'acquièrent cette caractéristique de masse que par interaction avec un champ scalaire, le champ de Higgs qui est en mécanique quantique une propriété du vide². Selon le sens commun, le vide est un espace d'où l'on a retiré toute matière, toutes particules, tout rayonnement électromagnétique et donc toute énergie. Mais si le vide est l'absence de tout, le concept d'espace peut poser problème ; ainsi pour Aristote, dans un univers vide, l'espace ne peut se comprendre :

*« Maintenant comment y aura-t-il un mouvement naturel quand il n'y a aucune différence : c'est le vide et l'infini ? Car dans l'infini il n'y a ni haut ni bas ni milieu ; dans le vide le haut ne diffère en rien du bas ; car du rien il n'y a aucune différence, de même du non être et le vide semble un non-être et une privation, or le transport naturel comporte des différences et les choses naturelles comportent des différences par nature ».*³

La mécanique quantique décrit le vide comme un espace d'énergie globale nulle, mais peuplé d'ondes et de particules, toutes virtuelles et décrites par la théorie quantique des champs (QFT). Le physicien et historien des sciences Le Noxaïc en donne une définition précise⁴ :

« On les qualifie de virtuelles car ce sont, à proprement parler, des images qui représentent de façon commode certains éléments mathématiques intervenant dans les calculs de la théorie des champs. Ces éléments reflètent certaines propriétés des quanta des champs, mais pas toutes : par exemple une particule virtuelle n'a pas nécessairement la même masse que la particule réelle correspondante, et cette masse est même variable. Néanmoins, les particules virtuelles sont d'utilisation tellement commode, et leur ressemblance mathématique avec les particules réelles est si grande, que la plupart des physiciens oublie qu'il s'agit d'artifices

2 Voir annexe 2

3 Aristote, Physique. Livre IV. 214 b.

4 Le Noxaïc. 2004, Les métamorphoses du vide. Belin.

mathématiques et se les imaginent-sans d'ailleurs que cela engendre de contradictions – comme si c'étaient de véritables objets physiques non observables. »

Les relations d'Heisenberg qui font partie du corpus fondamental de la mécanique quantique décrivent un vide pouvant être perturbé par des fluctuations d'énergie l'agitant sans toutefois contredire la valeur en moyenne nulle de son énergie. La relativité, elle, parle aussi d'un vide d'énergie nulle, sans matière ni ondes électromagnétiques, mais également sans particules virtuelles, sans fluctuations. Ce vide est assimilé à un espace-temps qui se réduit à une topologie quadridimensionnelle associant les trois dimensions des espaces euclidiens et le temps, espace-temps dont la déformation en présence de matière permet d'expliquer la gravitation.

Les différences sont donc importantes entre ces deux représentations du vide et laissent ouvertes un grand nombre de questions. Parmi celles-ci, quelques-unes sont particulièrement importantes pour la compréhension du vide :

- Si le vide est substantiel et réel, sa caractéristique d'énergie est-elle réellement nulle comme le suppose, par hypothèse, ces deux théories,
- La relativité et la mécanique quantique définissent le vide comme un espace, mais est-ce l'espace qui définit le vide ou l'espace qui est une conséquence du vide,
- Que représentent, pour la relativité, les ondes et particules virtuelles de la théorie de la mécanique quantique standard, définie par Dirac, et décrites aujourd'hui comme des objets mathématiques de la théorie quantique des champs,
- Quelle est la nature du lien entre la courbure de l'espace-temps de la relativité et la présence de masses ou d'énergie et comment le définir ; ce lien est-il causal et quelle est la différence entre vide et particule.

En abordant cette question du vide nous nous sommes vite rendu compte que l'étude devait se limiter aux seules interprétations standards de ces deux théories : la relativité restreinte et générale telle que décrites par Einstein, et la mécanique quantique dans l'interprétation de l'école de Copenhague, celle qui est enseignée actuellement dans tous les cursus universitaires sous le nom de mécanique quantique standard. Nous avons été ainsi contraints, à regret, de laisser momentanément de côté plusieurs développements intéressants de la relativité comme par exemple celui développé par Kaluza et Klein, la relativité d'échelle, la théorie quantique des champs pour décrire les particules et ondes virtuelles nous limitant à l'interprétation du modèle réaliste déduit des théories de Dirac, les interprétations alternatives de la mécanique quantique comme la mécanique de Bohm, les théories émergentes comme celle de la gravitation quantique et des supercordes pour ne citer que les plus importantes. Mais même avec cette contrainte, il est apparu que la réponse à ces quatre questions posées par la comparaison du vide dans le cadre des deux corpus théoriques dépassait encore largement le cadre d'un mémoire de M2. Nous avons finalement choisi de n'apporter une réponse qu'à la première, les autres pouvant constituer l'essentiel d'un programme de recherche pour un travail ultérieur.

L'objectif de ce mémoire est donc de tenter de répondre à la question suivante : les théories de la relativité et de la mécanique quantique impliquent-elles un vide substantiel et réel, et d'énergie nulle ?

La thèse que nous soutenons dans ce mémoire est la suivante : le vide, considéré du point de vue de la relativité ou de celui de la mécanique quantique standard, est réel et substantiel et doté d'une énergie localement et temporairement non nulle mais présente une valeur moyenne globale nulle.

Cette caractéristique commune au vide de la physique quantique et à celui de la relativité permet, selon nous, de définir un programme ultérieur d'étude visant à la refondation d'un concept commun de vide pour ces deux théories.

Le plan adopté comporte cinq chapitres. Dans le premier nous analysons le rapport du vide à l'espace selon ces deux théories. Nous montrons que, bien que défini différemment, le vide et l'espace peuvent être confondus en un même objet et que celui-ci doit avoir une réalité et être substantiel. Dans le second chapitre nous analysons le concept d'énergie du vide, selon la théorie de la mécanique quantique standard, que nous confrontons aux résultats de quelques expériences récentes. Ce rapprochement entre théorie et résultats empiriques nous permet de soutenir la thèse d'une énergie du vide localement et temporairement non nulle. Le troisième chapitre procède à la même analyse et établit la même conclusion, selon la théorie de la relativité, que nous confrontons également à des résultats empiriques récents. Le quatrième chapitre est consacré à la mise en regard de nos conclusions sur l'énergie du vide selon ces deux théories. Enfin, dans le dernier chapitre, nous tentons de formuler des questions pouvant servir de bases à un futur programme de recherche, qui permettraient, selon nous, une meilleure compréhension des concepts de vide et de matière et des relations qu'ils entretiennent.

Dans chaque chapitre et sous paragraphe où nous faisons appel à une théorie faisant partie du corpus de la mécanique quantique standard ou de la relativité restreinte et générale, nous en rappelons rapidement, en guise de préambule, les principes fondamentaux ainsi que les éléments qui la caractérisent. Les rappels concernant le principe d'invariance par la transformation de Lorentz et le concept de Boson de Higgs sont traités séparément dans deux annexes.

1 Le rapport du vide à l'espace

La question centrale de ce mémoire porte sur la réalité du vide et la caractérisation de son énergie. Mais pour l'aborder il faut au préalable clarifier le rapport du vide au concept d'espace en physique et notamment dans les deux théories qui s'affrontent actuellement : la mécanique quantique et la théorie de la relativité. Ces deux théories ne conçoivent pas l'espace de la même façon et cette différence fondamentale découle directement de la structure de chacune d'elles. Le vide du sens commun est un espace euclidien, à trois dimensions, dans lequel on a tout retiré ; qu'entend-on par tout : ce qui est détectable par nos sens ou leur prolongement, les appareils de mesure. Avec cette définition il faut retirer toute matière, toute onde de nature électromagnétique d'un espace limité pour parler de vide. Le vide ainsi défini serait l'absence de tout ce que nous connaissons dans un volume donné ; mais cette absence est dépendante de la capacité de nos sens ou de leur prolongement à détecter et mesurer tous les types d'objets présents dans un volume. La non détection n'est pas une condition suffisante pour qualifier le vide d'absence de tout objet, elle n'est que la condition nécessaire de cette absence, dans un volume donné, de particules et d'ondes électromagnétiques. Le vide n'est donc pas nécessairement le rien auquel s'opposait Aristote. Il est lié au concept d'espace dans le sens où pour le définir notre raison a besoin de concevoir un volume défini par des dimensions ; le vide emplit l'espace et l'on est ainsi naturellement amené à former l'hypothèse qu'ils peuvent être confondus en une même entité. L'espace sans matière ni ondes électromagnétiques est la définition du vide utilisé en physique quelle que soit le nombre de dimensions de celui-ci. Mais l'espace est-il une conséquence de l'existence du vide ?

Newton⁵ disait que l'espace était une sorte de conteneur :

« Although space may be empty of body, nevertheless it is not itself a void ; and something is there because spaces are there, though nothing more than that ».

Einstein n'hésite pas à changer d'opinion⁶ en affirmant peu de temps après la publication de la théorie de la relativité générale que l'éther existe et qu'il doit être confondu avec l'espace-temps, qu'il est l'espace-temps ; il ajoute que cet éther n'a pas de structure et aucune caractéristique nous permettant de l'appréhender directement par la mesure.

Mais la mécanique quantique standard et la théorie de la relativité n'utilisent pas la même définition d'espace, pour la première l'espace est tridimensionnel, euclidien, et pour l'autre il est quadridimensionnel, Minkowskien ou Riemannien selon que les particules présentes dans cet espace ont ou non une caractéristique de masse. Dans ce chapitre nous allons nous attacher à analyser les différences entre ces deux types d'espace et leur implication sur le concept de vide.

5 I. Newton, traité d'optique

6 Einstein, 1916

L'espace en mécanique quantique, sa relation avec le vide quantique

Commençons par brièvement rappeler les concepts fondamentaux de la mécanique quantique standard : La mécanique quantique repose en premier lieu sur la découverte de la quantification de l'énergie au niveau microscopique et ensuite sur le double aspect corpusculaire et ondulatoire des particules. Cette caractéristique ondulatoire de la matière a été historiquement déduite des travaux de Louis De Broglie : Il postule en 1924⁷, dans son travail doctoral, que toute particule, tout objet en général qu'il soit microscopique ou macroscopique, et en déplacement quelconque par rapport au repère de l'observateur, est accompagné d'une onde. Pour lui, autour de tout objet microscopique ou macroscopique en déplacement il ne peut y avoir de vide :

« L'idée fondamentale de ma thèse était la suivante : Le fait que, depuis l'introduction par Einstein des photons dans l'onde lumineuse, l'on savait que la lumière contient des particules qui sont des concentrations d'énergie incorporée dans l'onde, suggère que toute particule, comme l'électron, doit être transportée par une onde dans laquelle elle est incorporée [...] Mon idée essentielle était d'étendre à toutes les particules la coexistence des ondes et des corpuscules découverte par Einstein en 1905 dans le cas de la lumière et des photons. » « À toute particule matérielle de masse m et de vitesse v doit être « associée » une onde réelle ».

La longueur d'onde de De Broglie est reliée à la masse de la particule par la relation $\lambda=h/p$, où h est la constante de Planck et $p=mv$ l'impulsion de la particule mesurée dans le repère d'observation. La détection de cette onde est impossible directement, seuls les effets indirects le sont, par exemple par les figures d'interférences dessinées par l'impact de ces particules sur un écran. L'effet étant lié à l'impulsion mesurée, les caractéristiques de cet effet varient d'un observateur à un autre. On retrouve là un trait propre à la relativité d'Einstein.

De Broglie n'associe pas d'énergie à cette onde, car si cela était le cas, toute particule se déplaçant dans le vide avec une vitesse initiale \vec{v} , et ne subissant aucune interaction, devrait ralentir au rythme de la dispersion de cette énergie par l'onde associée, ce qui n'est pas observé empiriquement. De Broglie ne fournit aucune explication sur la nature de cette onde. Il admet cependant que celle-ci ne peut pas être de nature électromagnétique et n'est pas directement accessible, mais l'est seulement indirectement par les effets qu'elle engendre. L'existence de cette onde a été vérifiée pour la première fois en obtenant des interférences avec des jets de neutrons dans un dispositif de fentes d'Young ; elle l'a été récemment en répétant cette expérience mais, cette fois, avec des macromolécules de Fullerène⁸.

De Broglie ne s'exprimera de façon claire sur le sujet des caractéristiques de ce vide que longtemps après ses travaux sur l'onde de matière⁹ :

« Ces constatations ont amené la Physique quantique contemporaine à devenir de plus en plus consciente du fait que ce que nous nommons le vide n'est pas du tout un milieu dénué de propriétés physiques, mais bien plutôt une sorte d'immense réservoir (d'énergie, a-t-il écrit

7 Louis de Broglie, 1924

8 Le fullerène est une macromolécule comportant un groupement sphérique de 60 atomes de carbones

9 L. De Broglie, 1957-1958

puis barré sur son manuscrit) d'où peuvent émerger au niveau microphysique des unités ou des paires corpusculaires et où aussi ces unités et ces paires disparaissant du niveau microphysique peuvent s'engloutir. Si cette conception est exacte (et il semble bien aujourd'hui qu'elle le soit) il y aurait trois niveaux de la réalité physique :

- *le niveau macrophysique des phénomènes macroscopiques directement observables à notre échelle qui est le domaine propre de la Physique dite "classique"*
- *le niveau microphysique ou quantique qui est celui des molécules, des atomes, des noyaux ou plus généralement des particules élémentaires, qui est le domaine propre de la Physique quantique*
- *enfin le niveau le plus profond, hypomicrophysique ou subquantique pourrait-on dire, constitué par ce "vide" réservoir immense d'énergie sous-jacente dont nous ignorons encore presque tout.*

Les mots nous trahissent pour désigner ce niveau profond de la réalité : le mot vide ne convient pas du tout car rien ne serait plus plein que ce vide. L'expression "substratum universel" (ou une autre de ce genre) serait meilleure. J'emploierai cependant habituellement le mot vide couramment usité, mais vous devez imaginer qu'il doit être mis entre guillemets ("le vide"). Nous ne savons pas si, quand un boson apparaît au niveau microphysique sortant du "vide", il existait déjà dans ce substratum à l'état préformé, ou s'il est "créé" au moment de son apparition. Nous ne savons pas davantage si, quand un boson disparaît du niveau microphysique pour s'engloutir dans le "vide", il subsiste dans ce substratum dans un état indécélable ou s'il est "détruit" au moment de sa disparition ».

Ce qui semble majoritairement accepté par la communauté scientifique est que cette onde existe en tant que propriété associée à chaque particule ou objet et est la cause des figures d'interférences formées par les jets de macromolécules, comme le fullerène, passant au travers d'un système de doubles fentes. Cette caractéristique propre à chaque particule ou objet macroscopique, cette onde, permet le transport d'une information suffisante pour expliquer la formation de figures d'interférences par ces objets matériels. Si, comme le pensent les physiciens aujourd'hui, cette onde est un objet purement mathématique attaché à tout objet en mouvement et représentant sa probabilité de présence¹⁰ en chaque point de l'espace, cela définit un champ scalaire. Mais un espace vide, au sens de l'absence de tout objet, ne peut contenir de champ scalaire ou vectoriel porteur d'information ou d'énergie. Le sens commun nous pousse naturellement vers une substance, un éther, qui par un moyen approprié assure ce transport. C'est la position de De Broglie qui parle d'une hypomicrophysique décrivant le vide comme un réservoir d'énergie mais qui ne reconnaît pas explicitement de transport d'énergie par cette onde de matière.

Cette caractéristique de double nature que possède chaque particule de pouvoir être décrite à chaque instant et selon le système étudié soit par un volume de matière soit par des ondes, plus précisément un paquet d'ondes, a conduit les physiciens à remplacer chaque particule par une représentation mathématique, une fonction d'onde, lui faisant perdre l'attribution de l'une de ses caractéristiques les plus fondamentales, sa masse. Toutes les caractéristiques des

10 J. L. Basdevant, 2006, p32

grandeurs mesurables de cette particule, de ce paquet d'ondes, sont inscrites dans sa fonction d'onde, celle-ci obéissant à une relation mathématique : l'équation de Schrödinger.

Cette représentation d'une particule par un paquet d'ondes a des implications importantes et n'est pas sans poser quelques problèmes conceptuels : une onde monochromatique est modélisable par une fonction mathématique, qui se caractérise par une existence sur l'axe temporelle depuis et jusqu'à un temps infini ; par ailleurs elle est également définie pour toute position spatiale sur l'axe des distances représentant sa direction de propagation. Ainsi, définir une particule, objet local selon le sens commun, par un paquet d'ondes, une somme d'ondes monochromatiques, est équivalent à attribuer à cette particule une probabilité très petite mais non nulle, de se trouver en n'importe quel point de l'espace et une existence depuis un temps infini ce qui est contradiction notamment avec le modèle cosmologique standard. Cette représentation mathématique d'une particule par un paquet d'ondes ne doit donc pas être considérée comme une totale équivalence, une réalité, mais plutôt comme une simple approximation facilitant les calculs, un simple modèle.

Dire qu'une particule est représentée par un paquet d'ondes implique que cette particule n'est pas localisable mais est diffuse dans un volume donné. Sa présence en chaque point est représentée par une probabilité calculée à partir des solutions de l'équation de Schrödinger et égale au module au carré de la fonction d'onde $\Psi(r,t)$. Cette affirmation a été contestée par nombre de personnes, en particulier par Einstein qui aurait dit :

« Est-ce que la lune disparaît si personne ne l'observe »

et par Schlick qui écrit¹¹ :

« ...la signification de l'existence du monde extérieur est claire, et il serait parfaitement absurde de la nier. Il va de soi qu'indépendamment de nous, il y a des nuages, des maisons, des montagnes. »

Une telle négation d'existence matérielle est de fait difficile à soutenir, notre intuition s'opposant à cette idée. La « localisation » en un endroit précis d'un objet lors de son observation, ce que l'on appelle la réduction de la fonction d'onde, implique l'acte d'observation ou de mesure comme cause. Si le principe de matérialisation d'une particule et plus généralement d'un objet lors de son observation, ou d'une mesure, est si important pour les physiciens de la mécanique quantique, c'est qu'il doit être la conséquence de l'effondrement de la fonction d'onde solution de l'équation de Schrödinger. Nier ce principe c'est renoncer au caractère ondulatoire de la matière, l'accepter c'est, d'une certaine manière, reconnaître qu'en l'absence de mesure l'énergie d'une particule puisse se trouver dispersée, conférant à l'espace dans lequel se fait cette dispersion une réalité et un caractère substantiel. Mais plus important, accepter ce caractère ondulatoire c'est reconnaître que l'espace n'est qu'une conséquence de l'interaction des particules entre elles : la fonction d'onde est vis-à-vis de l'espace l'équivalent d'un champ ; elle décrit les interactions possibles entre objets. La géométrie de l'espace décrit par l'espace euclidien tridimensionnel est suffisante pour décrire

11 M. Schlick, 1934, p. 42

les phénomènes quantiques, elle n'a pas de rôle conceptuel comme dans la théorie de la relativité.

Il est possible de résumer les principes de base de la mécanique quantique standard, celle défendue par les physiciens adoptant la représentation du monde selon l'école de Copenhague, par les propositions suivantes :

- Toute énergie est nécessairement quantifiée, la valeur élémentaire de cette quantification est le quanta d'action défini par la constante de Planck h .
- Chaque système est dans un état quantique choisi dans la liste de ceux possibles selon une loi de probabilité et peut être défini par un vecteur d'état. Ce vecteur d'état décrit le système entier et contient l'ensemble des valeurs possibles pour chaque grandeur mesurable.
- Principe de correspondance : à toute propriété observable correspond un opérateur hermitien linéaire agissant sur le vecteur d'état et auquel correspond un ensemble de valeurs propres représentant les résultats possibles de la mesure ; l'espace quantique est donc un espace euclidien dont les grandeurs observables sont représentées par des opérateurs agissant sur le vecteur d'état représentant le système global. C'est donc un espace Hilbertien.
- Principe de superposition : la combinaison linéaire de deux vecteurs d'états normés accessibles à la mesure est un vecteur d'état également accessible ; un vecteur d'état est défini à une phase près, comme l'est une onde dont on ne précise pas l'instant de démarrage des oscillations ; seuls les écarts de phase relatifs entre deux vecteurs d'état étant déterminables. Un vecteur d'état n'est pas un observable au sens de la mécanique quantique d'une quantité mesurable.
- Résultat d'une mesure : les valeurs possibles d'une grandeur mesurable sont données par les valeurs propres de l'opérateur associé à l'action de mesure considérée.
- Postulat de Born : le module au carré de la fonction d'onde associée à une particule représente la probabilité de trouver la particule dans un état donné, à un instant donné au point M de mesure.
- Réduction du paquet d'ondes : à chaque mesure la fonction d'onde est réduite pour donner une valeur certaine au résultat conséquence de l'opération de mesure. Suite à cette mesure la fonction « repart » avec une forme différente qui tient compte de l'événement et du résultat de mesure comme nouvelle condition initiale.
- Une particule n'a ni dimension ni masse ; elle est modélisée de façon probabiliste par un paquet d'ondes, un champ, qui s'élargit en fonction du temps si aucune mesure de position n'est réalisée ; la particule en dehors de toute mesure évolue vers une description de moins en moins précise.
- La masse d'une particule est la résultante de l'action sur celle-ci d'un champ scalaire défini en tout point de l'espace, le champ de Higgs.
- Évolution temporelle de la fonction d'onde ; l'évolution temporelle d'une particule est décrite par l'équation de Schrödinger :

$$i\hbar \frac{\partial \Psi(t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(t)}{\partial r^2} + V\Psi(t).$$

La mécanique quantique est positiviste, il n'y a pas de sens à parler de propriétés pour une particule en l'absence de mesure, antiréaliste, en l'absence de mesure il n'est pas possible de parler de position pour une particule, operationaliste, c'est l'observation, la mesure qui crée ce que l'on observe, indéterministe, la mesure ne nous donne qu'une probabilité de résultat.

L'espace de la mécanique quantique est donc décrit par l'espace euclidien du sens commun, celui dans lequel nous évoluons et avec lequel nous pensons être en relation par nos sens. La mécanique quantique obtient le résultat de la mesure d'une grandeur observable par application d'un opérateur sur le vecteur d'état. L'espace de la mécanique quantique est Hilbertien. Ceci revient à dire que l'ensemble des objets constituant un système sont décrits par des fonctions d'ondes intégrées dans un vecteur d'état global. L'espace quantique peuplé ou non de particules est décrit, lui, en termes de champs quantifiés. Mais un champ, scalaire ou vectoriel, consiste en l'attribution en chaque point de l'espace d'une valeur ou d'un vecteur d'amplitude donné. Définir un isomorphisme entre un ensemble numérique et les points de l'espace est une condition suffisante pour conclure que même si nous avons enlevé toutes matières et toutes ondes électromagnétiques, il reste quelque chose dans cet espace et que le vide qui le remplit n'est pas dépourvu de toute caractéristique. La structure de la mécanique quantique standard implique une caractéristique substantielle et une réalité à l'espace sans matière, donc au vide. Ainsi l'étude de cette théorie et de ses implications devrait nous permettre de caractériser plus précisément ce vide.

L'espace selon la théorie de la relativité

L'abandon du concept d'éther par Einstein est une conséquence des hypothèses qu'il est amené à formuler pour répondre à la question de la synchronicité des événements se déroulant en des lieux différents, et qui vont le conduire à l'élaboration de la relativité restreinte. Les arguments avancés pour cet abandon sont de type déductif. Einstein, alors ingénieur à l'office des brevets de Berne était confronté à une question que se posaient les chemins de fer Suisse : comment garantir une parfaite synchronicité des horloges dans toutes les gares de la fédération afin de pouvoir prévoir précisément les heures de départ et d'arrivée des trains. Il avait corrélé ce problème à celui vécu tout au long de ses promenades, des cloches de villages sonnantes les heures et dont les sons lui parvenaient avec des décalages temporels faibles mais perceptibles. En écrivant les relations mathématiques liant ces événements, en intégrant la constance de la vitesse du son dans l'air pour le problème des cloches de village et, par analogie, en posant que la vitesse de la lumière est également constante dans le vide quel que soit l'observateur, il va en déduire un ensemble de relations, les lois de transformation des grandeurs entre deux référentiels inertiels.

La relativité restreinte, publiée en 1905 par Einstein, repose sur deux nouvelles hypothèses par rapport à la mécanique Newtonienne : la constance de la vitesse de la lumière dans le vide quelle que soit la vitesse du repère d'inertie d'observation utilisé et la définition d'un espace-temps à quatre dimensions, le temps multiplié par la vitesse de la lumière représentant le quatrième axe de cet espace-temps. Les lois de la relativité restreinte peuvent se comprendre comme les transformations subies par les grandeurs dynamiques mesurables, distances, temps et vitesse, dans un changement de repère inertiel d'observation en admettant une vitesse

constante de la propagation des informations, celle de la lumière dans le vide. C'est ainsi qu'il obtient des relations simples entre les mêmes coordonnées mesurées dans deux repères inertiels différents en translation uniforme l'un par rapport à l'autre avec une vitesse v :

De la même façon il va établir les lois de la propagation d'une onde électromagnétique dans le vide (nous ne rappellerons pas ici les relations correspondantes qui se trouvent dans tous les manuels universitaires¹²). L'établissement de ces lois ne nécessitant aucune autre hypothèse, Einstein va en conclure que puisque sa mécanique relativiste décrit correctement tous les phénomènes connus ainsi que la propagation des ondes électromagnétiques, il peut se passer du concept d'éther et ne conserver que le concept mathématique d'espace-temps :

« Cela veut dire que l'on ne peut arriver à quelque chose de satisfaisant que si l'on renonce à l'idée d'éther, le champ électromagnétique constituant la lumière n'apparaissant plus comme l'état d'un milieu hypothétique, mais comme une construction sui generis, sortant de la source, et analogue à une émission »¹³.

L'inutilité du concept d'éther est interprétée, à l'époque, par la majorité des physiciens comme la preuve de son inexistence. Ainsi, pour eux, le vide redevient l'absence de toutes choses, le rien, ce qui n'apporte aucune réponse à la question des actions à distance sans support. Mais Einstein n'a pas dit que l'éther n'existait pas, il a simplement montré que son existence n'apportait ou n'enlevait rien à sa nouvelle mécanique. Selon lui, l'éther, même s'il existe n'établit aucun lien de causalité empiriquement vérifiable entre lui et le monde que nous percevons, constitué d'agencements de particules et d'ondes électromagnétiques, dans le sens où il n'y a aucun échange prouvé de grandeur conservé entre lui et cette matière ou bien les ondes électromagnétiques qui sont les seuls objets pris en compte par la mécanique relativiste. Il n'existe en effet aucune loi de cette mécanique de la relativité restreinte assurant un quelconque lien entre le vide (l'espace-temps de la relativité, sans particules ni ondes électromagnétiques) et les objets réels manipulables. Les relations entre les longueurs et intervalles de temps mesurés dans deux référentiels en mouvement relatif avec une vitesse constante ne sont que l'illusion donnée à un observateur de l'un des référentiels, illusion ayant pour cause la vitesse finie de propagation de la lumière et son égale valeur dans les deux référentiels. Cette absence de causalité soutenue par Einstein n'est valable que dans le cadre de la relativité restreinte où les objets sont sans masse et où l'espace-temps est décrit par la métrique de Minkowski.

La théorie de la relativité, à l'opposé de la mécanique quantique est réaliste, les objets ont des propriétés qui existent indépendamment de l'acte de mesure, déterministe, le résultat d'une mesure n'est pas probabiliste sa valeur est déterminée entièrement par le système et ses conditions initiales.

12 Par exemple le cours de l'université de Berkeley, tome II sur l'électromagnétisme, édition A. Colin

13 Albert Einstein, 1972

Le vide comme espace

Bien que tout oppose ces deux représentations du monde, il existe deux points sur lesquels elles sont en accord :

- l'espace et le vide peuvent être assimilés à un seul et même objet, même si dans un cas l'espace est tridimensionnel et quadridimensionnel dans l'autre.
- Le vide ainsi défini est un objet réel et substantiel : ces deux propriétés du vide sont attestées par la présence en tout point du vide quantique d'un champ de Higgs, et par une métrique quadridimensionnelle, celle de la relativité générale, se déformant sous l'action causale de masse, ou de façon plus générale d'énergie.

Ainsi nous sommes amenés de façon naturelle à attribuer une réalité au vide sans pour cela revenir à la conception Newtonienne d'un espace vide comme repère absolu. Selon ces deux théories, l'espace peut se définir comme le contenant d'un agencement d'objets, la distance entre chacun d'eux n'étant qu'une conséquence de leur interaction. Le vide se trouve être alors comme ce qu'il y a entre ces objets et qui en assure le lien. Nous sommes ramenés à la question toujours ouverte de la relation entre objets et vide, entre matière et vide ; nous n'aborderons pas cette question ici qui fait partie du programme de recherche que nous développerons un peu plus précisément dans le dernier chapitre.

Mais si le vide est le lien entre différents objets, il doit assurer le transport d'une information, d'une énergie permettant d'expliquer l'enchaînement logique des événements. Si une première particule se déplace avec une vitesse uniforme et est déviée par une seconde, immobile dans le même repère inertiel, sous l'action gravitationnelle, que se passe-t-il réellement ? Quelles quantités sont échangées entre ces deux objets ? Un pur échange d'informations sans échange d'énergie ne suffirait pas à expliquer l'ensemble des phénomènes empiriquement observés. Si de l'énergie est échangée, cela implique qu'il est possible d'attribuer au vide une densité d'énergie non nulle, au moins de façon locale et transitoire ; si cette proposition est fautive, comment alors expliquer les interactions entre objets distants, comment expliquer la stabilité de la structure atomique, de celle des galaxies. Mais si cette proposition est vraie, alors qu'est-ce que le vide, quelle est sa nature et est-il la cause de la matière et des distances dont nos sens semblent nous prouver l'existence ? On voit ici toute l'importance de la réponse à la question sur une énergie du vide non nulle. Pour tenter d'apporter une réponse à cette question nous allons dans les deux chapitres suivants nous intéresser au concept d'énergie du vide selon la mécanique quantique standard et selon la théorie de la relativité générale.

2 L'énergie du vide de la mécanique quantique

Nous allons, dans ce paragraphe, analyser les implications sur le concept d'énergie du vide des relations d'Heisenberg et de la théorie des antiparticules développée par Dirac dont nous rappellerons également rapidement les éléments. Ensuite, en nous appuyant sur quelques résultats empiriques récents et les interprétations qui en sont faites au regard de la mécanique quantique standard, nous analyserons et discuterons la question de la densité d'énergie du vide quantique qu'ils impliquent.

Le vide selon l'école de Copenhague

Selon l'école de Copenhague, un système peut se décrire par un vecteur d'état qui permet de calculer la probabilité de réponse à l'éventuelle question de la valeur d'une observable posée par un appareil de mesure extérieur à ce système. Ce vecteur d'état décrit entièrement les caractéristiques du système, celles que nous connaissons ; les physiciens ne forment aucune hypothèse quant à de nouvelles caractéristiques du système qui, dans le futur, pourraient être découvertes de façon empirique ou suggérées par de nouvelles théories. Après chaque mesure, la fonction d'onde est telle que le vecteur d'état du système représente de façon certaine le système correspondant au résultat de la mesure effectuée ; on dit que la fonction d'onde a été réduite. Si l'on cherche à connaître l'évolution ultérieure du système après cette mesure, l'équation de Schrödinger pourra fournir une réponse à cette question à la condition que l'on sache décrire de façon suffisamment précise la fonction d'onde du système. A cette description du monde, il faut ajouter l'influence des fluctuations du vide qui peuvent générer des couples de particules et antiparticules dites virtuelles, n'excédant pas un intervalle de temps de vie déterminé par les relations d'Heisenberg, et qui peuvent interférer avec cette fonction d'onde. C'est la mer de Dirac, saturée de couples de particules et d'antiparticules virtuelles, sur laquelle nous reviendrons plus loin.

De cette description empirique du monde matérielle, les physiciens¹⁴ déduisent une conception du vide quantique reposant principalement sur une première hypothèse de l'existence de particules virtuelles sans réalité, donc dépourvues d'énergie, et sur une seconde d'un vide d'énergie moyenne globale nulle afin de satisfaire à la condition d'invariance de Lorentz :

- Le vide est peuplé de particules et d'antiparticules virtuelles de charge et d'énergie nulle, non observables, de champs scalaires comme par exemple celui de Higgs décrit par le modèle standard conduisant à l'attribution de masse aux particules, ou de champs vectoriels comme le champ électromagnétique résultant des fluctuations du vide ; ces champs ne sont pas directement observables, seules leurs interactions avec les particules réelles le sont. Ces champs sont postulés par la mécanique quantique standard et son extension la théorie quantique des champs¹⁵. La

14 C. Aslangul, 2008, T2 pp 888 - 890

15 J. P. Derendinger, 2008, pp. 47-55

discussion du concept de champ en théorie quantique ne sera pas abordée ici comme cela a été expliqué dans l'introduction.

- Les particules générées par les fluctuations du vide sont elles aussi qualifiées de « virtuelles » car non observables directement ; la mer de Dirac est constituée de particules ainsi qualifiées de « virtuelles » sans énergie ni charge ou spin donc sans effets physiques mesurables sur la structure de l'espace. Il faut un apport d'énergie extérieur suffisant pour donner une réalité aux particules virtuelles, les rendre observables ; la virtualité de ces particules permet au vide de satisfaire la condition de l'invariance de Lorentz. Les caractéristiques de charge et d'énergie nulle sont posées par hypothèse afin de satisfaire notamment à la conservation de l'énergie globale qui est nulle juste avant la création de ces particules virtuelles et qui le reste.
- Les règles de remplissage de ce vide par les particules virtuelles n'obéissent qu'au principe d'exclusion de Pauli¹⁶ ; les particules n'étant pas localisées mais réparties selon des lois probabilistes.
- Les relations d'incomplétude d'Heisenberg, et la non commutativité des opérateurs de création et d'annihilation de particules dans la théorie de la mécanique quantique, sont à l'origine de ces fluctuations quantiques du vide.
- La mécanique quantique ne permet que des mesures relatives – seuls les écarts d'énergie sont mesurables.

Cette description du vide laisse d'une part, de côté la question de la nullité en valeur moyenne de l'énergie du vide, et d'autre part ne précise pas ce que sont ces particules virtuelles ni la nature de la mer de Dirac. Il est également remarquable qu'aucune des hypothèses de la mécanique quantique n'impose que l'énergie globale du vide soit nulle. Et si le vide a une énergie moyenne globale nulle, de quoi extrait-on, même de façon temporaire, de l'énergie.

Les relations d'Heisenberg

Les relations définies par Heisenberg, connues comme « les relations d'incomplétude », et non les relations d'incertitude comme cela est trop souvent écrit même dans les manuels universitaires, précisent la vision du monde selon la mécanique quantique. Elles introduisent le concept d'incomplétude dans les grandeurs mesurables qui ne peuvent être connues que de façon probabiliste donnant ainsi une représentation du vide en permanente agitation, un vide chaotique, en mouvement. Mais si le vide est en agitation qu'est ce qui s'agite ? Que reste-t-il dans le vide si nous en retirons tout, ce qui est matière ou ondes électromagnétiques, champs électriques, charges électriques et autres champs magnétiques. Les physiciens parlent de fluctuations quantiques du vide¹⁷, fluctuations d'énergie ; mais où est localisée cette énergie si l'on a tout enlevé. Comment un espace vide de tout ce qui compose notre univers peut-il être la cause de fluctuations d'énergie ? Cette question est sans solution si l'on n'admet pas l'existence de quelque chose qui reste lorsque l'on pense avoir tout enlevé. En dépit de cet argument, certains ont tenté de défendre une création à partir de rien ; Heinz Pagels écrit à ce sujet :

16 Deux particules identiques ne peuvent pas se trouver dans le même état d'énergie
17 C. Aslangul, 2008, Tome2 p 898

« Aucune loi de la physique n'empêche une création de l'univers ex nihilo »¹⁸

On peut répondre à cette affirmation, qu'un néant qui se transforme en plénitude d'existence est en contradiction avec la loi de conservation de l'énergie. Mais alors, une seconde question se pose : comment l'énergie globale moyenne de cette substance peut-elle être nulle et produire des fluctuations chaotiques d'énergie ? Pour prendre une image, la mer de Dirac pourrait-elle être comparée à un océan animé de vagues qui seraient les fluctuations quantiques. Nous soutenons que deux solutions peuvent répondre à ce problème : une substance complexe composée, par exemple de deux quantités d'égale énergie mais de signes opposés, ou bien une seule d'énergie non nulle dont nous considérons le niveau global moyen comme la valeur zéro d'énergie par définition, procédant ainsi à une opération de renormalisation de la fonction représentant le vide. C'est cette seconde solution que nous adoptons dans ce mémoire.

Les deux principales relations qui conduisent à cette conclusion sont bien connues et ne sont rappelées ici que brièvement :

- Une relation sur les dimensions spatiales $[Q_i, P_j] = i\hbar\delta_{ij}$, où Q_i et P_j représentent respectivement les opérateurs position et impulsion d'une particule pour chacune de ces coordonnées de rang i ou j , et δ_{ij} la fonction de Kronecker qui est égale à un si les indices sont égaux et zéro dans les autres cas
- Une relation similaire reliant l'énergie au temps $[E, t] = i\hbar$

Il est important de noter que ces relations sont définies dans le corps C des nombres complexes nous privant de toute possibilité de repère par une représentation mentale à l'aide d'images ou de schémas intégrables par nos sens. Il est possible de faire la même remarque pour les vecteurs d'état qui sont définis également dans ce même corps des complexes.

Ces relations nous décrivent un monde où la connaissance précise et simultanée de toutes les grandeurs mesurables est impossible, où nos chances de progresser dans la connaissance d'une réalité absolue par la mesure sont limitées. La première relation va brouiller l'image de la connaissance simultanée de la position de la particule et de sa vitesse à un instant donné ; plus la précision sur la position est grande plus floue sera notre connaissance de la vitesse : le produit de l'imprécision de mesure sur l'une des grandeurs mesurées par l'imprécision de la seconde doit rester au moins égal au quanta d'action \hbar . Par exemple si l'on cherche à connaître la vitesse d'une particule avec une très grande précision, sa position sera brouillée et nous ne pourrons plus déterminer l'endroit précis où elle se trouve.

La seconde, plus subtile, traduit l'existence des fluctuations du vide selon un mode chaotique et la possibilité de violer, pendant un intervalle de temps limité, le principe de conservation de l'énergie. Par exemple, il est possible, selon cette relation, d'extraire à partir du vide un couple de particule – antiparticule, disons un électron et sa particule image un positron, pendant un intervalle de temps en raison inverse de l'énergie empruntée au vide. Si l'apport d'énergie est fourni, de façon temporaire, par une fluctuation du vide, le couple de particule – antiparticule produit est qualifié de virtuel. Par contre si l'apport d'énergie provient, disons, d'un couple de photons incidents, le couple particule-antiparticule sera réel et pourra perdurer

18 H. Pagels, 1985

sans limitation théorique de durée. Mais la virtualité de ces particules signifie-t-elle qu'elles n'ont pas d'existence réelle et de ce fait ne représentent pas une forme d'énergie en contradiction avec l'équivalence masse-énergie postulée par Einstein ; la mécanique quantique répond sur ce point que ces particules obéissent bien à cette équivalence de la masse avec l'énergie mais que leur existence étant limitée par la relation d'Heisenberg il faut plutôt considérer que cette énergie est un prêt fait par le vide pour une durée maximum donnée. Pendant toute la procédure de « prêt » suivie de son remboursement par l'annihilation du couple particule – antiparticule, le vide conserve une énergie moyenne nulle. Toutefois, pendant son existence, le couple particule-antiparticule va pouvoir perturber un système présent localement de façon suffisante pour induire des effets mesurables comme nous allons l'expliquer plus loin.

Selon les relations d'Heisenberg, rien ne s'oppose à ce que ces variations d'énergie soient aussi importantes que l'on le souhaite pourvu que celles-ci se fassent dans un intervalle de temps conforme à ces relations d'incomplétude. Cette question de la densité d'énergie absolue du vide trouve son origine en partie dans le modèle de Dirac qui a permis de prédire l'existence de l'antimatière donc de ces couples de particules-antiparticules.

Le vide, est par hypothèse défini en mécanique quantique par une énergie moyenne nulle. Mais les relations d'incomplétude d'Heisenberg décrivent un vide présentant une certaine analogie avec un réservoir d'énergie capable de générer un nombre quasi illimité de couples de particules – antiparticules, donc ayant une valeur globale moyenne non nulle. Cette capacité qu'a l'énergie du vide de fluctuer est une condition suffisante à l'existence d'une quantité d'énergie non nulle. Ces fluctuations, si elles permettent l'attribution au vide d'une énergie non nulle, semblent par conséquent en contradiction avec l'hypothèse d'une énergie du vide globalement nulle en moyenne.

Selon la mécanique quantique standard, par hypothèse, le vide se voit attribuer une densité moyenne d'énergie nulle lui permettant néanmoins la génération des particules, de façon temporaire même s'il n'y a aucun apport extérieur d'énergie. Mais nous venons de montrer que l'existence de ces fluctuations induit une densité d'énergie du vide non nulle. Nous devons faire un choix : ou bien l'énergie du vide n'est pas globalement nulle et alors il faut modifier les hypothèses de base de la mécanique quantique standard, ou elle l'est et alors nous devons accepter soit que le vide est de nature complexe, composée d'au moins deux parties, dont la somme présente une énergie globale moyenne nulle, soit que les particules virtuelles n'ont pas d'existence réelle avant que des fluctuations du vide ou un apport externe viennent leur apporter l'énergie nécessaire à leur substantialisation. Si l'énergie du vide est non nulle en moyenne, la condition d'invariance de Lorentz n'est plus vérifiée et cette densité d'énergie supplémentaire implique des effets de courbure d'univers qui ne semblent pas observés notamment dans l'étude du fond cosmologique. Cette objection ne tient plus si nous admettons qu'en dehors d'un très court intervalle de temps d'existence, les couples de particules-antiparticules n'ont pas d'existence physique au sens où elles sont privées de tous les attributs liés à ces particules. L'hypothèse d'un vide complexe présente, lui, plusieurs difficultés : en fonction de quelle loi de la nature deux composantes du vide d'énergie égales et opposées en signe pourraient demeurer dans un état de cohabitation stable, et que

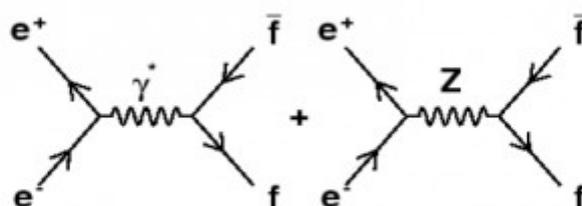
représenterai chacune des deux parties, quel lien entretiennent-elles avec les particules composant notre univers. Pour ces raisons nous rejetons cette seconde hypothèse. Seule la première hypothèse, celle admettant un statut de potentialité des particules virtuelles avant leur matérialisation ne soulève pas de questions de compatibilité avec les hypothèses fondamentales de la mécanique quantique standard et celles de la relativité puisqu'elle attribue aux particules virtuelles non matérialisées une énergie nulle, bien que le vide étant l'objet de fluctuations quantiques d'énergie doit être considéré dans un certain sens comme un réceptacle d'énergie.

Le statut des particules virtuelles

Une particule est un objet ayant une certaine permanence, que nous nous la représentons par le modèle d'un paquet d'ondes ou celui d'un volume de matière, un corpuscule. Une position spatiale probabiliste peut lui être attribuée, position qui va évoluer avec le temps selon l'équation de Schrödinger ; cette particule possède des caractéristiques qui se conservent au cours du temps comme la masse au repos, la charge, le spin, etc....Mais le temps, lui, est déterminé soit à partir d'horloges qui sont des objets macroscopiques en mouvement soit en utilisant des particules en mouvement comme les photons. Il en est de même pour les distances qui sont déterminées à partir de règles ou de rayons lumineux tous deux constitués d'un assemblage de particules. Ainsi les concepts d'espace, de temps et de particules sont intimement liés et ne sont pas séparables.

Les particules qui apparaissent et disparaissent au gré des fluctuations quantiques du vide ont une durée de vie très brève très en deçà des capacités de mesure des physiciens. Elles ne sont donc pas observables directement et les physiciens les qualifient pour cette raison, et non pour leur très courte durée d'existences en tant que particules, de particules virtuelles.

Leur présence peut néanmoins être suggérée par des effets indirects qu'elles induisent sur des systèmes présents pendant ce très bref intervalle de temps. Feynman¹⁹ donne des particules virtuelles une définition qui découle directement de ses diagrammes : les particules qui rentrent ou sortent du diagramme sont réelles par hypothèse, puisqu'elles sont détectables et de caractéristiques mesurables ; celles qui n'interviennent que de façon fugace lors de l'interaction, et qui ainsi ne sont pas directement mesurables, leurs effets indirects seulement pouvant l'être, sont qualifiées de virtuelles. Une conséquence importante de cette définition, modifiant celle de Dirac, est que bien que dénommées virtuelles, les particules ont tous les attributs d'une particule appartenant à l'univers réel (masse, charge, spin, ...).



19 R. Feynman, 1979, tome 2, 1^{ère} partie

Figure 1 : Deux diagrammes de Feynman pour un processus d'annihilation d'un électron et d'un positron suivi de la production d'une paire de fermions (quarks ou leptons).

Lors d'une interaction entre deux particules réelles, les processus peuvent être complexes comme l'illustre l'exemple ci-dessus dans lequel, à l'occasion d'un choc entre un électron et son antiparticule, deux particules virtuelles ont une probabilité non nulle de se manifester, un photon gamma et un boson Z, le résultat de cette interaction complexe étant la production d'un quark et d'un antiquark ou d'un fermion et d'un antifermion. La question qui reste ouverte est l'existence simultanée de ces deux particules virtuelles ou seulement de l'une d'entre elles pour chaque collision. Ces deux subpossibilités coexistent en termes de probabilités, mais rien n'oblige qu'elles soient toutes deux simultanément réalisées. Ainsi le photon gamma ou le boson Z pourront exister ou n'être que des artefacts, des possibilités non réalisées, pour une collision donnée.

Un électron n'est jamais isolé dans l'espace. Il est en réalité entouré d'un nuage de particules et d'antiparticules virtuelles qui vont légèrement affecter certaines de ses propriétés. On peut se représenter le déplacement d'un électron dans le vide avec une vitesse constante de la façon suivante : l'électron en se déplaçant interagit en permanence avec des particules virtuelles constituées notamment de couples électron-positron ; la collision statistique de l'électron originel avec un positron virtuel va détruire la particule initiale pour la remplacer par l'électron restant du couple virtuel électron-positron qui vient d'être partiellement détruit et qui va lui-même devenir réel en absorbant l'énergie issue de la collision sous forme de photon. Ce ne sera ainsi jamais la même particule que l'on mesure et qui semble se déplacer, même si les mesures réalisées semblent montrer une continuité. La substitution est parfaite en ce sens que l'évolution de l'électron semble être celle d'une particule unique, isolée, qui obéit aux lois cinématiques classiques ou relativistes. Certaines caractéristiques de l'électron, comme le spin, ne semblent pouvoir bien se comprendre qu'en faisant appel à l'influence de ce nuage tourbillonnant autour de la particule. Ces particules virtuelles interviennent également dans les effets observés d'écrantage partiel de la charge de la particule en mouvement. Si l'on se réfère à la définition de la causalité en tant que transfert d'une quantité conservée²⁰, et en utilisant l'équivalence totale entre masse d'une particule et énergie, on est fondé à conclure que la relation entre particules réelles et virtuelles correspond à un échange d'énergie. Le vide serait donc bien en ce sens un réservoir d'énergie même si sa valeur moyenne globale est nulle, un réservoir hypomicroscopique comme le définissait De Broglie. Mais si sa valeur moyenne est nulle, il est capable de fluctuations produisant localement une énergie réelle pendant un temps limité, la raison de cette apparente contradiction restant une question ouverte. Une interprétation possible serait de considérer le modèle d'un vide comme un océan qui serait perturbé de façon aléatoire par des vagues : en l'absence de vague, l'océan peut être considéré comme d'énergie nulle, ou de point zéro, dans la mesure où elle ne se manifeste pas ; les vagues, qui représentent les fluctuations, transportent une énergie de type mécanique qui peut être extraite au moins de façon temporaire. Avec un modèle de vide de ce type, nul besoin de définir une énergie négative.

20 Max Kistler, 2006, p. 53-77

A très petite échelle, typiquement en deçà de celle de Planck, Christophe Schiller²¹ a montré que ni les distances, ni le temps, ni les points de l'espace-temps, ni la masse ni aucune observable ou mesure n'a de sens ; c'est le concept d'espace-temps lui-même qui perd toute signification à ces échelles. Mais comme une particule élémentaire doit avoir une dimension nulle, selon l'interprétation de la mécanique quantique standard, alors il semble qu'il ne soit plus possible de séparer la matière du rayonnement et du vide, le vide existant mais n'étant pas défini par ces dimensions spatiales, temporelles ou massique²² :

« *Le vide, c'est-à-dire l'espace-temps vide, ne peut se distinguer de la matière aux échelles de Planck* »

Nous avons avancé l'hypothèse selon laquelle, l'énergie intrinsèque des particules virtuelles de la mer de Dirac étant diffuse dans le vide, le vide devait être pensé comme un réservoir d'énergie, même s'il présentait une énergie moyenne globale nulle comme les hypothèses de la mécanique quantique l'affirment. Selon Dirac, on peut se représenter une particule virtuelle, lorsqu'elle est extraite du vide sans apport externe d'énergie, par l'image de la création d'une particule et d'un trou, son antiparticule associée présentant une énergie négative si l'on veut conserver une énergie globale moyenne nulle. Pour justifier cette interprétation du vide comme conteneur d'énergie latente, nous allons utiliser les résultats de plusieurs expériences importantes, notamment celles de Casimir, d'Unruh et de Lamb. Les effets d'Unruh et de Lamb vont nous permettre de justifier l'existence des particules virtuelles et leur réalité pendant le court intervalle de temps de leur existence. L'effet Casimir, utilisant les effets des particules virtuelles, apportera une justification à notre identification du vide comme conteneur d'énergie non nulle. Mais avant cela nous devons préciser ce que nous appelons un couple particule-antiparticule, et rappeler les fondements de la théorie de Dirac.

La création de paires particules – antiparticules, la mer de Dirac

Commençons par rappeler brièvement l'argument développé par Dirac pour expliquer l'apparition de solutions d'énergie négative lorsque l'on modifie l'équation de Schrödinger pour tenir compte des effets relativistes.

En mécanique quantique, le mouvement des particules élémentaires est décrit par les solutions de l'équation de Schrödinger ; dans le cas relativiste il faut la modifier pour tenir compte des effets relativistes et on obtient alors la relation de Klein-Gordon :

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \Psi - \Delta \Psi + \left(\frac{m_0 c}{\hbar} \right)^2 \Psi = 0$$

En résolvant cette équation, par exemple pour l'électron, on obtient les états d'énergie E :

$$E = \pm \sqrt{p^2 + m_0^2 c^4}$$

21 E. Gunzig et S. Diner, 1997, p. 341 - 361

22 Christophe Schiller 1997, p341

Qui sont les états d'énergie de Dirac où m_0 est la masse de la particule au repos, et p son impulsion.

En plus des états d'énergie positive $+E$ on a aussi des états ayant une énergie négative, qui sont inacceptables dans le corpus des théories physiques. L'état fondamental d'une particule étant celui où son énergie est minimale, les électrons devraient passer à des états d'énergie de plus en plus négative d'où ils ne pourraient plus revenir. Comment se fait-il dès lors que les électrons ne disparaissent pas tous. Une seconde difficulté est inhérente à l'équation de Klein-Gordon : les états d'énergie négative ont une densité de probabilité négative. Enfin, la création d'une paire particule - antiparticule pourrait se faire, selon les relations d'Heisenberg, avec un apport d'énergie nul, ce qui permettrait d'atteindre n'importe quel niveau d'énergie en l'absence d'une énergie externe fournie. En 1927, Dirac²³ apporte une réponse à ces problèmes en formulant une autre équation relativiste qui réussit à résoudre le problème de la densité de probabilité négative. Cette équation, ou plutôt cet ensemble d'équations, décrit uniquement les particules à spin $\frac{1}{2}$, qu'on appelle fermions, et utilisent les matrices de Pauli γ_i :

$$\left(\gamma_0 \frac{\partial}{c \partial t} + \gamma_i \frac{\partial}{\partial x_i} - \frac{m_0 c^2}{\hbar} \right) \Psi = 0$$

Mais le spectre d'énergie obtenu comporte toujours des états d'énergie négative. Dirac va alors invoquer le principe d'exclusion de Pauli, principe qui interdit à deux fermions ayant les mêmes nombres quantiques d'appartenir au même état d'énergie. Ce principe a été énoncé par Pauli, quelques années auparavant, pour expliquer la structure des orbitales et des spectres atomiques et expliquer le fait que nous ne pouvons pas traverser tout objet solide et jouer les « passe muraille ». Dirac a postulé que tous les états d'énergie négative sont occupés, l'ensemble constituant ce qu'on appelle une « mer ». Il considère le vide comme le réceptacle d'un ensemble infini d'états d'énergie négative. Dès lors, les électrons d'énergie positive ne peuvent pas tomber dans des états d'énergie de plus en plus négative puisque cela est interdit par le principe d'exclusion de Pauli. De ces équations relativistes il obtient deux solutions : l'une représente bien ce qu'il cherchait, à savoir la représentation d'une particule relativiste, mais l'autre, symétrique, présente une énergie négative. Selon Dirac, l'antimatière est l'image de la matière :

*« Un électron dans un état d'énergie négative est un objet tout à fait étranger à notre expérience, mais que nous pouvons cependant étudier au point de vue théorique ; ... Admettons que dans l'univers tel que nous le connaissons, les états d'énergie négative soient presque tous occupés par des électrons, et que la distribution ainsi obtenue ne soit pas accessible à notre observation à cause de son uniformité dans toute l'étendue de l'espace. Dans ces conditions, tout état d'énergie négative non occupé représentant une rupture de cette uniformité, doit se révéler à l'observation comme une sorte de lacune. Il est possible d'admettre que ces lacunes constituent les positrons ».*²⁴

23 L. De Broglie, 1952
24 P.A.M. Dirac, 1934

Dirac, pour contourner le problème des énergies négatives, interprète les antiparticules comme des antiélectrons de même masse que l'électron, mais de charge opposée, ce qui lui permet de leur attribuer une masse positive. Cette antiparticule, le positron, qui correspond selon lui, au trou laissé par l'électron émergeant du vide, fut observée dans le rayonnement cosmique en 1932 par Anderson, confortant ainsi l'hypothèse de la mer de Dirac et son interprétation des antiparticules. Depuis la détection du positron, les antiparticules de toutes les particules connues ont été détectées expérimentalement. Ces particules, virtuelles ou non, sont actuellement toutes décrites par la théorie quantique du champ qui pose des questions conceptuelles encore ouvertes.

L'antiparticule définie selon ces hypothèses est caractérisée par un ensemble de nombres quantiques (charge, nombre leptonique et baryonique, saveur, isospin...) opposés à ceux de la particule associée mais par une même masse et un même spin que la particule dont elle est la symétrique. La théorie de Dirac n'aborde pas la question de la nature de cette mer d'états d'énergie négative du vide, invisible, qui ne se manifesterait que par d'éventuels trous et ne donne également aucune réponse quant à la valeur de l'énergie globale du vide. Cette interprétation laissant ouverte la possibilité au vide d'être doté d'une énergie non nulle a été longtemps contestée par nombre de physiciens principalement pour son incompatibilité avec la relativité d'Einstein :

« Le statut ontologique du vide "nu" a été un sujet largement discuté. On peut rappeler que Furry et Oppenheimer (1934), Pauli et Weisskopf (1934), Wentzel (1943) et d'autres ont élevé des objections contre l'idée de Dirac (1930) selon laquelle le vide serait un état où tous les états à une particule d'énergie négative seraient occupés. L'argument le plus fort avancé contre l'hypothèse du "plein" était que selon la relativité restreinte, le vide doit être un état invariant de Lorentz d'énergie nulle, de moment nul, de moment angulaire nul, de charge nulle, où tout est nul, c'est à dire un état de rien. »²⁵

C'est précisément cet « état de rien » qui est l'élément central du problème. L'argument d'Einstein repose sur l'hypothèse qu'un volume duquel on a retiré toutes formes de matières ou d'énergie électromagnétique, ne comporte plus rien ; l'hypothèse de la mer de Dirac répond à cet état de rien en affirmant l'existence d'un objet substantiel, possédant une caractéristique d'énergie et qui n'est pas de même nature que ce que l'on a retiré du volume. C'est cette mer de Dirac qu'il nous faut définir.

La mise en évidence expérimentale des antiparticules de leurs comportements et de leurs caractéristiques étant en accord avec le modèle de Dirac, son hypothèse d'une mer de particules, bien que constituant une question ouverte, est acceptée faute d'une solution alternative.

Quelles sont les implications de la théorie de Dirac et de son modèle de « mer de particules ». Si l'on pose comme principe que la mer de Dirac est le vide remplissant l'espace séparant les atomes et les particules les constituants, deux caractéristiques peuvent lui être attribuées :

25 CAO et SCHWEBER, 1993, 97,33-108

- Le vide est caractérisé par une densité de particules virtuelles d'énergie moyenne nulle.
- Le vide est capable de fluctuations quantiques d'énergie conformes aux relations d'Heisenberg.

Si des électrons occupent tous les états possibles du vide, comme le soutient Dirac, alors il doit en être de même pour toutes les autres particules, par exemple le proton ou le neutron. Mais si l'électron est une particule élémentaire, il n'en est pas de même pour le proton et le neutron. Pour quelle raison les états du vide seraient-ils occupés par des particules composites au lieu de particules simples comme l'électron ; pourquoi les états du vide ne seraient-ils pas occupés par les quarks composant ces particules complexes. Enfin, les expériences réalisées montrent que l'extraction d'une particule du vide nécessite une quantité d'énergie juste égale à son équivalent massique selon la relation $E = mc^2$, ce qui entraîne, par exemple, que tous les électrons présents dans le vide occupent un même état d'énergie ce qui n'est pas possible selon le principe d'exclusion de Pauli. Pour cette raison, l'hypothèse de l'existence d'une infinité d'états tous occupés par des particules virtuelles est contredite.

Le modèle cosmologique standard prévoit à l'origine de l'univers la création en nombre égal de particules et d'antiparticules. Notre univers contient une dissymétrie apparente entre les couples de particules-antiparticules du vide et les particules de l'univers observable dans lequel on ne retrouve presque aucune antiparticule. Le modèle cosmologique explique cette dissymétrie par l'hypothèse d'une brisure de symétrie initiale ayant entraîné un léger excédent de particules, qui après recombinaison aurait conduit à l'univers tel que nous l'observons. La question de cette brisure de symétrie est une question ouverte.

Pour extraire du vide, pour matérialiser, un couple particule-antiparticule avec une énergie cinétique nulle, la quantité d'énergie devant être apportée doit être au moins égale à l'énergie des masses formant le couple particule-antiparticule. En considérant le principe de conservation de l'énergie comme accepté, nous en déduisons que le couple particule-antiparticule à l'état de potentialité a une énergie nulle, ce qui peut s'interpréter de plusieurs manières :

- Le couple de particule-antiparticule « dissout » dans la mer de Dirac possède une caractéristique de masse nulle,
- Dans l'état de potentialité, le couple particule-antiparticule n'existe pas encore, il n'y a rien d'autre que le vide en tant que substance, et c'est l'apport d'énergie qui va provoquer un changement d'état du vide le faisant passer à un état de matière.

Le choix entre ces deux propositions reste une question ouverte. Il subsiste une précision à apporter pour accepter l'hypothèse d'un vide d'énergie globale nulle : le formalisme de Feynman fait jouer à l'électron et au positron, particules réelles, des rôles entièrement symétriques ; lors d'un choc, ils peuvent s'annihiler, créant de l'énergie en quantité égale à la masse qui disparaît. Ainsi si l'énergie stockée sous forme de masse est identique pour une particule et son antiparticule, la mise en relation d'une particule et de son antiparticule les convertit immédiatement en énergie équivalente à la somme de leurs masses ; dans la mer de Dirac, les couples de particules-antiparticules sont ainsi sous une forme de pure énergie de

valeur nulle et ne se matérialisent que sous l'effet d'un apport d'énergie suffisant pour les extraire du vide, de cet état d'énergie de point zéro. Mais, si nous acceptons l'hypothèse d'un vide d'énergie globale nulle, où se trouve l'énergie nécessaire aux fluctuations quantiques, est-elle uniformément dispersée dans la mer de Dirac, dans le vide, la théorie quantique ne répond pas à cette question. Le modèle que nous avons déjà énoncé et que nous soutenons ici est que l'énergie liée aux fluctuations du vide est comme l'énergie des vagues d'un océan.

Les résultats empiriques montrent que chaque particule possède une antiparticule qui lui est associée. Ces antiparticules ont des caractéristiques communes avec les particules auxquelles elles sont liées, c'est-à-dire même masse, même moment cinétique intrinsèque, ou spin. On a récemment expérimentalement vérifié au CERN que la masse d'une antiparticule est positive, ce qui élimine une des hypothèses proposées par Feynman²⁶ d'antiparticule avec une masse négative. Particule et antiparticule ont des valeurs de leurs autres nombres quantiques opposées qui sont la charge électrique, le moment magnétique, l'étrangeté, le charme, la beauté, le nombre baryonique, le nombre leptonique, etc. Il existe ainsi un antiproton chargé négativement, un antineutron différent du neutron, Certaines particules neutres, comme le méson π_0 composé d'un quark et de son anti quark, ou le neutrino, sont pour des raisons évidentes leur propre antiparticule. C'est également le cas du photon, ce qui permet de comprendre pourquoi les ondes électromagnétiques sont les mêmes pour la matière et pour l'antimatière.

Les relations d'Heisenberg nous disent qu'une agitation permanente du vide est à l'origine de son caractère flou²⁷. Contrairement à la matière et la lumière qui fonctionnent par unités entières de quanta h , les fluctuations du vide semblent avoir lieu par demi-quanta, $h/2$, en plus ou demi-quanta en moins, qui sont représentés selon les diagrammes de Feynman par des particules et antiparticules virtuelles, de durée de vie très brève, fusionnant en un photon virtuel puis se redécomposant en un couple particule/antiparticule virtuel (comme électron/positron ou quark/antiquark). Il suffit qu'une particule virtuelle reçoive l'énergie équivalente à sa masse de l'extérieur du système étudié, par exemple sous la forme de photons provenant d'une source externe, pour devenir réelle. Inversement, l'émission d'un photon peut rendre virtuelle une particule réelle. Ainsi un électron qui va se propager dans un système et interagir avec, par exemple une autre particule, ne sera jamais le même, il va s'échanger tout le long de sa trajectoire dans le système avec des électrons virtuels qui vont devenir réels :

« L'apparence durable de la particule provient des échanges permanents avec les corpuscules virtuels de matière et ou de lumière. La particule interagissant avec le vide disparaît sans cesse mais elle réapparaît de façon très proche et la nouvelle particule a les

26 Feynman a proposé plusieurs explications alternatives pour ces antiparticules, toutes rejetées : une particule de même masse que la particule associée et de même charge électrique mais qui remonte le cours du temps, une particule de masse négative et de même charge électrique qui se déplace dans le sens du temps

27 Lors de la quantification du champ, il apparaît des fluctuations du vide qui sont la conséquence directe de la non commutation entre les opérateurs de création et d'annihilation du champ, voir par exemple Aslangul C., (2010), mécanique quantique t.2, pp. 920 et 1156

mêmes caractéristiques que l'ancienne ce qui donne cette apparente stabilité à la matière et à la lumière. Le photon réel comme la particule réelle ne sont jamais les mêmes. Le mouvement est identique au changement. La particule qui se déplace dans le vide n'est jamais la même particule. La particule ne se contente pas de changer de place. La particule réelle n'est jamais la même. L'effet « réel » est échangé d'une particule virtuelle à une autre ; la physique quantique décrit ainsi une succession de « sauts » d'une particule virtuelle à une autre. La particule réelle disparaît pour devenir virtuelle et une autre particule virtuelle proche devient réelle. »²⁸

La mer de Dirac avec son nombre infini de particules et antiparticules associées confère ainsi au vide un statut ontologique, une substantialité, une réalité et une potentialité d'énergie. L'objection de la nécessaire vérification de l'invariance par la transformation de Lorentz, qui est équivalente à l'acceptation d'une énergie nulle pour le vide, de moment nul, de moment angulaire nul, de charge nulle, est levée si l'on considère que l'énergie du vide est en moyenne globalement nulle puisque particules et antiparticules n'existent que sous une forme de potentialité avant l'action d'une fluctuation les faisant passer dans un état d'existence.

Le décalage de Lamb, l'effet de la polarisation du vide

Les fluctuations du vide peuvent être mises en évidence par leur action perturbatrice sur les raies d'émission des atomes : en présence d'un champ électrique externe, on constate que certaines raies du spectre d'un atome, s'accompagnent d'un dédoublement de la raie prévue. Cet effet extrêmement petit, difficile à observer, est expliqué par les physiciens comme une interaction entre l'atome utilisé et les fluctuations du vide. Pendant la phase de cette transition, une paire virtuelle d'électron – positron est générée par le vide soumis à ce champ électrique externe. L'interaction électromagnétique du champ généré par cette paire de particules virtuelles avec l'atome entraîne un dédoublement de la raie observée. Cet effet correspond à ce que l'on nomme une polarisation du vide sous l'action du champ électrique externe appliqué au système étudié. C'est là encore un cas d'observation indirecte de l'existence de ces fluctuations du vide et un argument en faveur de notre hypothèse sur l'énergie du vide et de sa réalité, de sa substantialité. Le processus d'interaction est conforme aux diagrammes de Feynman qui le décrivent :

« L'électron interagit avec les « paires virtuelles » de son propre champ électromagnétique. (...) Le vide quantique contient de telles paires virtuelles et cet effet a été observé sous le nom de « polarisation du vide ». L'électron se trouve interagir avec la charge d'un des éléments de la paire virtuelle, en sorte qu'un électron quantique n'est jamais « nu » mais « habillé » d'un essaim ou nuage de paires virtuelles qui polarisent son environnement immédiat et modifient, par voie de conséquence, ses niveaux d'énergie. (...) La procédure dite de renormalisation considère que la masse et la charge physique de l'électron sont celles de l'électron « habillé » et non celles de l'électron « nu ». Ce dernier n'existe pas réellement, puisqu'il est toujours impensable sans son champ. »²⁹

28 Feynman, 1993

29 B. Hoffmann et M. Paty, 1981

Cet effet empirique soutient l'hypothèse d'un vide qui autorise l'extraction de certaines quantités d'énergie pendant un intervalle de temps supérieur à ce que prévoit strictement les relations d'Heisenberg. Mais ces observations, comme la théorie quantique elle-même, ne donnent aucune indication sur la valeur absolue de l'énergie du vide.

L'effet Unruh, les pseudos particules de Rindler, l'action de l'accélération

En l'absence de repère absolu, nous savons qu'il n'est pas possible de privilégier un état de mouvement uniforme par rapport à un autre. Une masse, une particule animée d'un mouvement uniforme, sans accélération, peut-être dite au repos dans un repère qui lui est lié, donc au repos par rapport au vide. Si l'on considère deux particules en mouvement relatif constant l'une par rapport à l'autre, on en déduit que le vide est en mouvement par rapport à lui-même. Le vide devrait donc être en même temps dans tous les états de mouvement possibles, y compris l'immobilité, ce qui revient à affirmer qu'il n'a pas d'état de mouvement. Mais le vide est par définition, selon le sens commun, un volume où ne se trouve ni matière, ni rayonnement, ni énergie de quelle que sorte connue que ce fut. Ainsi, la référence par rapport au vide ne saurait distinguer un quelconque mouvement, ce qui justifie la proposition précédente. Pour définir un référentiel, nous avons besoin de quelque chose d'identifiable, quelque chose qui existe, qui a des propriétés mesurables. Par exemple, Newton considérait que les étoiles fixes les plus éloignées pouvaient définir un repère absolu. Même si le vide est quelque chose de réel, de substantiel, il se différencie de la matière par le fait que la notion de mouvement ne semble pas s'appliquer à lui, il semble sans structure ce qui signifie qu'aucun de nos sens ou des appareils de mesure qui les prolongent n'ont de relation avec lui. Le principe de relativité entraîne nécessairement que le vide ne peut constituer une référence pour le mouvement comme Einstein l'affirme :

« On ne peut évoquer le mouvement d'un corps matériel par rapport à lui-même ni celui du vide par rapport à quoi que ce soit »³⁰.

Ne pouvant définir d'état de mouvement, on attribue au vide la propriété d'être cinématiquement invariant ; la notion de mouvement ne s'applique pas au vide ainsi défini. Cela n'est le cas ni de la matière, ni du rayonnement ni des charges électriques qui constituent les seuls éléments réels et substantiels reconnus : dans un gaz, une particule en mouvement vers la droite diffère d'une autre en mouvement vers la gauche ou d'une troisième au repos car, dans ce cas, des mesures relatives peuvent être faites. Ceci s'exprime, comme nous l'avons déjà vu plus haut, en rappelant que le vide reste invariant par rapport aux transformations de Lorentz. Une autre façon de le dire est que l'on peut interpréter cette invariance comme une rotation de l'espace-temps. Le vide est donc un invariant de Lorentz, et a contrario, une particule dotée d'une caractéristique de masse ne l'est pas puisqu'une énergie strictement positive lui est attachée. Ceci nous conduit à une description du vide impliquant qu'il ne contienne aucune particule, du moins telle que nous les définissons dans l'espace tridimensionnel où nous les mesurons, c'est-à-dire dans la représentation de l'univers accessible au travers de nos sens, celui du sens commun. Ces propriétés du vide vont nous

30 Einstein, 1972

permettre de compléter sa définition : le vide est l'état qui reste invariant sous les transformations d'inertie. Einstein résumait cette idée de la façon suivante :

« *Le vide reste le même que l'on soit ou non en mouvement uniforme par rapport à lui* ».

Avec cette définition, la représentation quantique d'une particule sous forme d'un paquet d'ondes est compatible avec celle du vide : Un paquet d'ondes s'étale avec le temps et finit par remplir l'espace tout entier. Le vide, même s'il contient des particules virtuelles, reste homogène et de densité d'énergie moyenne nulle. Mais le vide n'est pas invariant pour des repères non inertiels. Par exemple, il est modifié par une transformation qui correspondrait à un mouvement accéléré et non plus uniforme. Cette modification, effet purement relativiste, est à la base de ce que l'on appelle l'effet Unruh. L'effet Unruh³¹ prédit qu'un observateur en mouvement uniformément accéléré observera autour de lui des particules ayant un rayonnement de corps noir, là où un observateur extérieur, dans un référentiel galiléen, n'en verra pas. Autrement dit, l'observateur en mouvement uniformément accéléré se retrouvera dans un environnement pour lequel on pourra définir une température T , appelée température de Fulling, Davies et Unruh. Le rayonnement de corps noir associé à ces particules trouve une explication satisfaisante dans les fluctuations du vide quantique. Contrairement à l'effet Casimir que nous analyseront plus loin, ces particules virtuelles ne sont pas la conséquence d'une modification du champ électromagnétique lié à la structure des électrodes mais celle d'un mouvement accéléré. La fréquence du rayonnement observé se décale, suite au déplacement accéléré de l'observateur, selon un mécanisme semblable à celui de l'effet Doppler relativiste. Le rapport entre la température observée T et la valeur de l'accélération γ est déterminée par la relation :

$$k_b T = \frac{\hbar \gamma}{2 \pi c}$$

Où k_b représente la constante de Boltzmann, \hbar la constante de Planck réduite et c la vitesse de la lumière dans le vide. Le principe d'invariance de Lorentz découle du remplacement d'un espace et d'un temps, qui ne sont pas des invariants de Lorentz, par l'espace-temps quadridimensionnel d'Einstein. L'invariance de Lorentz constitue la symétrie fondamentale de l'espace-temps mais elle intervient également en physique quantique, dans sa version relativiste au sens de la relativité restreinte. La réalité de ces particules a été discutée, notamment par Rindler qui ne leur accorde qu'un statut virtuel³², celles-ci n'étant selon lui qu'un effet du bruit de fond du vide, celui des fluctuations quantiques aléatoires, vu dans un repère accéléré par rapport à un autre repère, lui, inertiel. Bien que virtuel, ces particules sont responsables du rayonnement de corps noir qui lui est détectable directement, montrant la réalité des particules virtuelles et la possibilité d'extraction d'une énergie du vide soutenant notre hypothèse d'un vide conteneur d'une potentialité d'énergie non nulle.

31 D. W. Sciama, 1991, pp 137 - 158

32 Rindler, W. 1966, 34:516-18

L'effet Casimir, le vide un milieu rempli d'ondes

Hendrik Casimir découvre, en 1948, que le vide est un milieu physique dans lequel peuvent se produire des phénomènes tout à fait réels et mesurables liés à ces fluctuations quantiques du vide. Cet effet a été l'objet de plusieurs vérifications expérimentales toutes conduisant à sa réalité³³ et à l'explication soutenue par les physiciens. Historiquement, Casimir s'est interrogé sur le résultat surprenant montrant que des particules colloïdales (donc en suspension dans un liquide) semblaient ne pas obéir aux lois régies par les forces de Van der Waals, qui assurent une cohésion entre les molécules même très espacées les unes des autres. L'histoire raconte que c'est lors d'une rencontre avec Bohr pendant un congrès que celui-ci lui fit une suggestion sur une possible interaction des particules avec des fluctuations du vide. Cet effet peut être décrit de la façon suivante : si deux électrodes planes sont immobiles, et placées assez proches l'une de l'autre dans une enceinte dans laquelle on a réalisé un vide poussé, on observe une force d'attraction mutuelle des électrodes. Les physiciens expliquent cette force d'attraction entre ces deux électrodes par des fluctuations du vide engendrant, par interaction avec les atomes des électrodes, des ondes d'origine électromagnétique : dans l'espace délimité par les deux plaques, la distance finie implique un nombre limité de modes pour ces ondes électromagnétiques générées par les fluctuations du vide, plus faible qu'à l'extérieur où l'absence de limites latérales, hors des électrodes, entraîne un nombre infini de modes de résonance. La différence d'énergie due à la différence du nombre de modes vibratoires, cause d'un excès de pression à l'extérieur des électrodes, est responsable de la force d'attraction résultante entre celles-ci.

Quoique d'origine purement électromagnétique, la force issue de cette propriété du vide, et responsable de l'attraction des plaques, est proportionnelle seulement à deux grandeurs physiques : la constante de Planck h et c la vitesse de la lumière dans le vide, toutes deux constantes fondamentales. Elles sont donc des caractéristiques du vide, et pas des particules. La vitesse de la lumière c s'exprime en fonction de la permittivité μ_0 et la constante diélectrique ε_0 du vide par une relation simple :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$$

Cette force de Casimir s'exprime, par unité de surface, selon une loi ne dépendant que de d , la distance séparant les plaques, \vec{u} étant un vecteur unitaire orthogonal à la surface des plaques supposées planes :

$$\vec{F} = \hbar c \frac{\pi^2}{240} \frac{1}{d^4} \vec{u}$$

L'origine de la force de Casimir découle de la théorie quantique des champs (QFT) qui impose par hypothèse que tous les champs, y compris les champs de type électromagnétique, soient quantiques en chaque point de l'espace ; cette opération est réalisée dans ce que l'on appelle la seconde quantification. Ceci peut être compris en prenant comme analogie

33 A. Lambrecht & S. Reynaud, 2003

l'attribution à chaque point de l'espace tridimensionnel d'un oscillateur harmonique et en faisant en sorte que ces oscillateurs soient tous couplés. Cependant, dans ce modèle simplifié, chaque oscillateur ayant une énergie fondamentale égale à $E = \frac{1}{2} \hbar \omega$, l'énergie du vide dans son état fondamental devient infinie. Quantifiant le vide selon cette méthodologie, on en déduit une densité d'énergie infinie du vide bien que cette expérience ne mette en évidence qu'une différence finie d'énergie. Il semble y avoir contradiction entre l'affirmation de la mécanique quantique quant à la nullité de l'énergie du vide, et les conséquences de l'explication de l'effet Casimir par les fluctuations du vide. Celle-ci est levée par une opération mathématique dite de renormalisation qui est équivalente à une redéfinition du zéro d'énergie de façon conventionnelle au niveau qui satisfait la condition d'invariabilité de Lorentz.

Quelle est la cause de ces ondes électromagnétiques apparaissant dans le vide entre et hors des deux plaques ? La mécanique quantique standard répond : les fluctuations quantiques du vide qui, en perturbant les électrons des atomes constituant chacune des deux plaques, produisent des trains d'ondes électromagnétiques statistiquement uniformément répartis en fréquence, un bruit blanc. Le mouvement des électrons des atomes va localement perturber le vide en produisant des champs électriques aléatoires et le vide va réagir sur ces mêmes électrons en les perturbant à son tour par l'émission de couples de particules-antiparticules. Il y a interaction réciproque entre le vide et les électrons des atomes. Si le vide agit sur les électrodes dans l'expérience de Casimir, alors le vide fournit une quantité d'énergie $\Delta E > 0$. Si le vide possède une énergie globalement nulle, l'énergie ΔE doit être empruntée aux fluctuations du vide qui vont demander un « remboursement » après un temps Δt lié à la quantité d'énergie fournie ΔE par la relation d'Heisenberg. Cette force pouvant agir pendant un temps long comparé à l'intervalle de temps autorisé Δt , se pose la question du processus suivi pour le « remboursement » de l'énergie empruntée. Ou bien les relations d'Heisenberg sont fausses, hypothèse que nous rejetons, ou bien le vide possède une forme d'énergie propre non nulle, se traduisant par les ondes virtuelles agissant sur les électrodes, et pouvant expliquer cet emprunt. Mais le vide est, selon les hypothèses formulées par les défenseurs de la mécanique quantique standard, d'énergie globale moyenne nulle par hypothèse. Quelle est donc l'origine de cette énergie transférée aux électrodes, la mécanique quantique standard n'apporte pas de réponse à cette question qui reste ouverte. L'image qui vient à l'esprit est toujours la même, celle d'un océan à la surface de laquelle se propage quelques vagues, les fluctuations quantiques.

L'énergie du vide de point zéro

Le concept de mer de particules de Dirac conforté par la découverte des antiparticules, les expériences de Casimir mettant en évidence les paquets d'ondes associés aux particules, les particules virtuelles apparaissant pour un observateur en déplacement accéléré et le décalage des raies atomiques sous l'effet des fluctuations du vide soumis à un champ électrique externe nous renvoient à une ontologie du vide, et à la question de la détermination de sa densité absolue d'énergie.

Pour qualifier le vide il est plus simple de le considérer dans son état minimal, c'est-à-dire en l'absence de toutes particules, de tous champs électromagnétiques, de toutes perturbations quelles qu'elles soient. Mais les relations d'Heisenberg reliant position et vitesse, temps et énergie, vont empêcher ce vide de demeurer dans un état minimum stable, un état statique ; des fluctuations vont persister et évoluer autour d'une limite que l'on appelle l'énergie de point zéro. C'est pour cette raison, par exemple, que l'hélium reste liquide même à des températures extrêmement proches du zéro absolu : Les incessantes créations – annihilations de couples de particules virtuelles entraînent l'existence d'un état d'énergie minimale permanent de ce vide qui se traduit par un terme constant dans l'énergie d'un oscillateur harmonique empêchant l'hélium de se solidifier. La question induite par ce modèle du vide est la densité d'énergie qui en résulte. Si l'on se contente de se référer à ce terme constant, elle doit être infinie dans la mesure où chaque point de l'espace est associé à un oscillateur harmonique et que la densité de point est infinie par définition. Mais on pourrait penser qu'elle est limitée en avançant l'hypothèse que soit il existe une fréquence maximale à cet oscillateur, fréquence qui correspondrait à une longueur d'onde égale à la longueur de Planck, soit que la densité du vide puisse être calculée à partir de contraintes dimensionnelles définies par exemple en utilisant les dimensions de Planck. Selon la première hypothèse, la limitation à une fréquence maximale des oscillateurs harmoniques ne va pas modifier la valeur infinie de la densité d'énergie car la densité des oscillateurs reste, elle, infinie pour un volume donné même si certains physiciens pensent qu'une fréquence de 1,6 Thz doit correspondre à la fréquence maximale de chaque oscillateur harmonique. La seconde hypothèse permet, elle, la définition d'une valeur finie. Pour évaluer la densité d'énergie du vide les physiciens déterminent un volume minimal et une quantité d'énergie dans ce volume élémentaire en se fondant sur les hypothèses fondamentales acceptées de la mécanique standard. La grandeur élémentaire d'action choisie est h , la constante de Planck, et le volume élémentaire celui de Planck ; nous pouvons alors estimer cette densité d'énergie volumique à partir des relations dimensionnelles bien connues :

Longueur de Planck

$$L_p = \sqrt{\hbar c^3 / G} = 1,6 \cdot 10^{-35} \text{ m}$$

Temps de Planck

$$T_p = \frac{L_p}{c} = 0,54 \cdot 10^{-43} \text{ s}$$

Masse de Planck

$$M_p = \frac{\hbar}{c L_p} = 2,2 \cdot 10^{-8} \text{ Kg}$$

Energie de Planck

$$E_p = \frac{\hbar c}{L_p} = 2,0 \cdot 10^{-9} \text{ GeV}$$

La densité d'énergie contenue dans un volume de Planck calculée à partir de ces données a pour valeur (cette valeur est en fait plus faible d'un facteur 1000 environ) :

$$\rho_v = \frac{\hbar c}{L_p^4} = 0,5 \cdot 10^{114} \text{ J/m}^3$$

Cette quantité est gigantesque : elle représente dans un centimètre cube plus d'énergie, et de plusieurs dizaines d'ordres de grandeur, que toute la matière contenue dans l'univers ! Selon la théorie de la relativité générale, si la densité de l'univers dépasse une certaine densité critique, l'univers doit passer par un volume maximum puis se contracter à nouveau. Les résultats empiriques montrent que la densité de matière globale de l'univers est très inférieure à cette valeur critique même si l'on tient compte de la matière noire, invisible, qui semble responsable de la vitesse anormale de rotation des galaxies. De plus les mesures faites sur les supernovæ semblent indiquer que notre univers est en expansion accélérée. Cette densité critique peut être définie selon la théorie relativiste comme la valeur de la constante cosmologique Λ de l'équation d'Einstein ; les observations actuelles conduisent à une estimation de la densité d'énergie voisine d'environ 10^{-9} J par mètre cube. La comparaison entre ces deux valeurs conduit à un écart d'environ 10^{120} qui n'a aucune signification sauf celle de conclure qu'au moins l'une des évaluations est fautive et peut être les deux. Ce résultat est connu comme celui de la catastrophe du vide. Il nous faut rejeter cette approche par les grandeurs de Planck. L'analyse dimensionnelle qui nous a servi de base ne repose pas sur une représentation conceptuelle soutenue par une théorie fondée sur quelques principes simples comme la relativité, mais seulement sur une utilisation de constantes agencées selon des règles dimensionnelles. Rien ne nous prouve que ces valeurs ainsi obtenues correspondent à une réalité physique bien définie. On ne sait pas à quelle grandeur le quanta d'action h se rattache, et aucune de nos théories physiques n'est capable, à ce jour, de décrire ce qui se passe proche de l'échelle de Planck. On pourrait proposer une autre approche, par exemple en utilisant la taille d'une particule et sa masse, le neutron par exemple, pour calculer la densité d'énergie du vide en supposant que l'arrangement de particules le plus proche du vide pourrait être représenté par celui d'une étoile à neutrons à son dernier stade, juste avant la formation d'un trou noir ; on obtient par cette approche une valeur d'environ $5 \cdot 10^{34}$ J par mètre cube qui n'est pas plus satisfaisante que la précédente valeur même si l'écart est nettement plus petit entre les évaluations quantique et relativiste.

La principale critique que l'on peut formuler à l'encontre de toutes ces tentatives de calcul de la densité d'énergie du vide est qu'elles reposent sur des modèles arbitraires en l'absence de toute description de la nature du vide et d'une définition de ce qu'est l'énergie des objets du monde réel et en particulier de l'équivalence entre la masse et l'énergie. Nous soutenons que bien que toujours utilisées, ces estimations par analyse dimensionnelles ou par comparaison avec un objet astronomique doivent être rejetées en l'absence de modèles ou de schémas décrivant une organisation de la matière et du vide.

Conclusion provisoire

Le vide quantique nous apparaît comme réel, substantiel, et le contenant sous forme de potentialité d'une infinité de particules virtuelles et de leurs images miroir, les antiparticules ; ces particules virtuelles, qui présentent les mêmes caractéristiques que les particules constituant notre environnement quotidien, sont indétectables car elles n'interviennent que dans des processus transitoires ; elles ne sont qu'un artifice utile à un modèle de la mécanique quantique, celui du modèle standard. Cette description repose sur le modèle de Dirac expliquant la génération de particules virtuelles comme un emprunt au vide, temporellement limité ; il permet de fournir une explication simple aux effets qui leurs sont imputés, comme l'écrantage partiel de la charge des particules réelles par des particules virtuelles. Mais ces couples de particules virtuelles, pendant leur existence et même après, ont une certaine réalité, puisqu'elles peuvent interagir avec des particules extérieures au système étudié par effet électromagnétique ou annihilation, ce qui implique que le vide, en tant que contenant, soit réel et pourvu d'une énergie en lui-même. Pour permettre au vide de la mécanique quantique de vérifier la condition d'invariance de Lorentz imposée par la théorie de la relativité, nous sommes conduits à former l'hypothèse d'un vide d'énergie globalement nulle mais animé de fluctuations locales et temporaires d'énergie : un vide dans lequel sont diluées des particules, un vide possédant une énergie interne suffisante pour expliquer les fluctuations quantiques porteuses d'énergie et générer des particules sans aucun apport énergétique externe mais qui ne se manifeste que lors des perturbations. Cette nullité de l'énergie globale en l'absence de fluctuations quantiques est une question ouverte.

Les expériences de Casimir montrent les interactions entre des particules et les fluctuations du vide quantique. Les limites matérielles d'un volume contraignent les ondes générées par ces fluctuations à certains modes discrets alors qu'en l'absence d'obstacles les modes vibratoires peuvent être représentés par des fonctions continues. L'existence d'une force agissant sur les deux électrodes qui se déplacent et donc extraient de l'énergie du vide est un argument soutenant notre hypothèse d'un vide avec une densité d'énergie non nulle. La nature de ces ondes électromagnétiques virtuelles ne contribuant pas à l'énergie totale du vide, mais cause de la force de Casimir reste également une question ouverte, les termes « électromagnétique » et « virtuel » présentant une incompatibilité conceptuelle.

L'invariance relativiste de Lorentz ne s'applique au vide quantique qu'à deux conditions nécessaires :

- Que l'espace physique décrit par la mécanique quantique soit de même nature que l'espace-temps de la relativité, c'est-à-dire un temps pris comme une quatrième dimension spatiale avec un facteur c de proportionnalité, ce qui n'est pas le cas en mécanique quantique standard.
- Que l'énergie globale moyenne du vide soit nulle dans cet espace-temps. Cette condition est remplie avec l'hypothèse du vide, peuplé de potentialités de particules virtuelles, que nous soutenons.

En résumé, la mécanique quantique standard, reconnaît au vide une énergie intrinsèque extractible, bien que sa valeur moyenne soit globalement nulle. Mais un objet matériel peut-il posséder une caractéristique d'énergie non nulle sans être substantiel et réel, le vide contenant la potentialité d'une multitude de particules virtuelles peut-il ne pas être substantiel ? La thèse que nous soutenons ici attribue au vide une existence propre, et une valeur d'énergie globalement nulle mais seulement en moyenne. Nous sommes ainsi conduits à attribuer au vide une réalité, une substantialité et un statut ontologique. La nullité de l'énergie globale peut alors être interprétée comme un océan sans vagues, l'apparition de ces vagues représentant les fluctuations quantiques. Cette image pose une question, celle de la caractérisation du vide : si le vide au repos présente une énergie que nous qualifions de nulle parce qu'elle ne présente aucune interaction accessible à nos sens et qu'en mouvement ce vide acquiert une caractéristique d'énergie non nulle au travers des fluctuations quantiques, comment caractériser cette substance « vide », que sont ces fluctuations du vide, quelle relation entretient le vide avec la « matière » ?

3 L'énergie du vide de la théorie de la relativité

Dans ce chapitre nous allons d'abord rappeler brièvement les concepts théoriques de la relativité générale qui constitue la forme aboutie de la théorie de la relativité. Puis, en nous appuyant sur le concept d'inertie et un résultat empirique récent, l'effet Lens Thirring, nous allons analyser le concept de vide défendu par les relativistes et montrer que l'énergie du vide doit à la fois être globalement nulle et comme un réservoir d'énergie au sens que lui prêtait L. De Broglie.

La relativité générale

L'espace-temps utilisé dans la relativité restreinte suppose que tous les objets soient de masse nulle, ce qui ne correspond manifestement pas à la réalité. L'action gravitationnelle se trouve donc exclue de cette nouvelle conception du monde rendant la théorie de la relativité restreinte incomplète. C'est la relativité générale qui va la compléter en incluant à la relativité restreinte la gravitation par l'introduction d'une métrique courbe pour la représentation de l'espace-temps, celle de Riemann, conférant au vide une réalité et une substantialité qu'il avait perdu avec la seule relativité restreinte³⁴.

Einstein définit la gravitation, à laquelle est soumise un corps dans un repère d'observation, comme équivalente à une accélération communiquée à ce corps avec une valeur telle que la force résultante à laquelle le corps est soumis, soit équivalente à la force de gravitation. Si par exemple un observateur est enfermé dans une cage sans fenêtre, posée sur le sol, il va pouvoir conclure qu'il est immobile à la surface de la terre en réalisant plusieurs expériences simples comme par exemple l'observation de la chute d'un corps avec et sans vitesse initiale. Il va en déduire l'accélération de la pesanteur à laquelle il est lui-même soumis. Si par contre, dans un second temps, alors que la personne enfermée est endormie, cette cage est emmenée dans une fusée loin de toute planète et est soumise à une accélération constante de telle manière que celle-ci soit égale à celle perçue à la surface de la Terre du fait de la pesanteur, alors notre observateur, lorsqu'il va se réveiller dans cette situation, ne pourra pas conclure qu'il a changé d'état ; pour lui la cage sera toujours à la surface de la terre. C'est cette équivalence entre gravitation et accélération qui permet d'expliquer l'effet de courbure de la trajectoire d'un rayon lumineux passant à proximité immédiate d'un corps massif comme une étoile ou un trou noir.

Mais cette nouvelle définition de la gravitation n'est pas suffisante, il faut définir l'espace dans lequel elle peut s'appliquer. Dans un article célèbre³⁵, Einstein, donne une nouvelle description de la relation entre l'espace et la matière. Il redéfinit l'espace comme un espace à quatre dimensions obéissant aux lois des espaces de Riemann. On parle alors d'une variété de dimension quatre qui est un espace topologique dans lequel un évènement est représenté par quatre nombres représentant la position spatiale et temporelle. Avec cette nouvelle hypothèse

34 A. Einstein 1905

35 A. Einstein 1915, p. 831

structurant l'espace-temps, la distance ds entre deux événements A et B de cette variété de dimension 4 prend la forme :

$$ds^2 = c^2 d\tau^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2$$

Où t représente le temps absolu, grandeur mathématiquement existante, mais sans signification physique car non accessible par la mesure (il faudrait être hors de l'univers pour cela), c la vitesse de la lumière et τ le temps propre, mesurable et lié au repère de mesure local d'un observateur. Cette nouvelle définition de l'espace a plusieurs conséquences :

- Si l'on suit un photon sur sa trajectoire, il va parcourir la distance D définie par l'expression $D^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$, ce qui conduit finalement à la relation $d\tau = 0$ que l'on peut interpréter comme l'absence de temps pour un observateur se déplaçant à la vitesse de la lumière.
- Le temps acquiert le statut de dimension spatiale, la vitesse de la lumière jouant le rôle du facteur dimensionné de conversion.
- L'espace observable, pour un repère donné, est situé à l'intérieur d'un hypercône à quatre dimensions dont l'axe de symétrie est l'axe du temps propre lié au repère d'observation.

Il avance ensuite l'hypothèse que la présence d'une densité de masse, ou d'énergie, dans un volume donné, va déformer l'espace-temps en le courbant à la manière d'une boule posée sur une nappe tendue³⁶. C'est cette déformation qui est responsable de l'effet de gravitation, un premier objet de faible masse situé à proximité de la déformation espace-temps causé par un second de masse importante va avoir tendance à « tomber » dans le puits de potentiel ainsi créé. Pour justifier cette courbure de l'espace-temps sous l'effet d'une masse, Einstein va définir, par hypothèse, une relation entre la géométrie de cet espace-temps et une distribution spatiale de masse ou d'énergie. Travaillant dans des espaces à quatre dimensions, il définit un premier tenseur $G_{\alpha\beta}$ (les indices α et β étant des indices se référant aux dimensions de l'espace-temps et pouvant prendre une valeur entre un et quatre³⁷) représentant la structure de l'espace-temps en chaque point, sa topologie, et un second tenseur $T_{\alpha\beta}$, le tenseur énergie impulsion, qui est représentatif de la distribution spatiale des densités de masses et d'énergie sous la forme de champs électromagnétiques. Dans un repère inertiel, ce tenseur d'énergie impulsion est constant le long d'une géodésique : c'est le principe de conservation de l'énergie étendu. Dans un même référentiel un corps initialement au repos peut acquérir de la vitesse sans pour autant changer de masse, ce qui correspond à une acquisition d'énergie cinétique : la loi de conservation de l'énergie d'un corps reste valable uniquement dans les référentiels inertiels. Le tenseur énergie-impulsion étant définie par une densité de masse et/ou d'énergie électromagnétique, à l'échelle de l'univers, en théorie cosmologique il suppose soit l'approximation d'une continuité de la matière dans l'espace, soit l'assimilation

³⁶ Cette déformation de l'espace-temps a été vérifiée notamment par les effets de lentille gravitationnelle des galaxies massives permettant de voir un objet, situé derrière ce groupement de galaxies massives, et en principe inobservable

³⁷ En général on utilise les indices en lettres grecques lorsqu'ils peuvent prendre quatre valeurs correspondantes aux quatre coordonnées de l'espace-temps, et les lettres romaines pour les indices ne représentant que les trois dimensions de l'espace euclidien.

d'un ensemble de particules à un gaz de densité continue. Cette hypothèse faite par Einstein, et toujours acceptée depuis, va permettre, par exemple, l'assimilation du gaz galactique à un fluide et la formulation d'une solution à l'équation d'Einstein, mais s'avère une difficulté pour la mécanique quantique comme nous l'avons expliqué dans le chapitre précédent. Enfin, il forme l'hypothèse, tout à fait arbitraire, que ces deux tenseurs peuvent s'égaliser, à une constante dimensionnelle près, si la géométrie de l'espace-temps est bien liée uniquement à la fonction de la distribution de masses et d'énergie :

$$G_{\alpha\beta} = R_{\alpha\beta} - \frac{1}{2} g_{\alpha\beta} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\alpha\beta}$$

C'est ce que l'on appelle l'équation d'Einstein, où $R_{\alpha\beta}$ est le tenseur de Ricci qui représente un aspect de la courbure de l'espace-temps en chaque point, $g_{\alpha\beta}$ le tenseur métrique de Riemann caractérisant l'espace-temps quadri dimensionnel et R la courbure scalaire, qu'il ne faut pas confondre avec le rayon de courbure de l'univers défini par le tenseur de Riemann. Cette équation est un ensemble de seize équations différentielles que l'on ne sait pas résoudre dans le cas général. Il faut insister sur le fait que l'égalité entre le tenseur énergie-impulsion et le tenseur de courbure de l'espace-temps n'est qu'une hypothèse formulée par Einstein. On en connaît un certain nombre de solutions particulières correspondant à des situations simples, généralement symétriques. C'est le cas, par exemple, de la solution trouvée par Schwarzschild et qui représente le cas d'un astre de densité constante, sans rotation ni charges, centré sur l'origine d'un repère inertiel, et entouré de vide au sens relativiste, c'est-à-dire un espace sans masse ni énergie électromagnétique. Cette solution permet d'aborder le problème des trous noirs non chargés et sans rotation. L'équation d'Einstein conduit mathématiquement à un univers en expansion. Pour « corriger » ce problème, Einstein, qui pensait que l'univers n'était pas immobile mais statique, a introduit une constante Λ , appelée constante cosmologique, de valeur non nulle, afin de créer une force de répulsion, donc une accélération de l'espace, qu'il va ajuster pour obtenir son univers statique :

$$G_{\alpha\beta} + \Lambda g_{\alpha\beta} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\alpha\beta}$$

Il est possible de reformuler cette équation d'Einstein en isolant le tenseur de Ricci³⁸ :

$$R_{\alpha\beta} = \frac{8\pi G}{c^4} \left(T_{\alpha\beta} - \frac{1}{2} g_{\alpha\beta} T \right) + g_{\alpha\beta} \Lambda$$

Dans le vide où le tenseur énergie-impulsion est identiquement nul par hypothèse, le tenseur de Ricci est également nul lorsque la constante cosmologique est nulle (Cela ne signifie pas qu'un espace sans masse est nécessairement plat, car la courbure est donnée par le tenseur de Riemann à quatre indices et non un tenseur à deux dimensions comme le tenseur de Ricci). Cela montre seulement que la constante cosmologique a une action similaire à celui du tenseur de masse-énergie et est donc liée d'une certaine manière à une énergie du vide. Si nous nous restreignons à un sous espace tridimensionnel, vide de matière et d'énergie

38 Ericourgoulhon, 2014, chapitre 7 p. 167 et suivantes

électromagnétique, homogène et isotrope, on peut déduire de l'équation d'Einstein que la constante cosmologique prend la valeur :

$$\Lambda = 3\kappa$$

Avec

$$\kappa = \frac{R}{n(n-1)}$$

où n est le nombre de dimensions spatiales et R la courbure de l'espace-temps. Dans ce cas et de la même façon on peut extraire des équations d'Einstein la densité ρ_v d'énergie du vide, représentant l'état d'énergie minimum de l'espace-temps, pour un espace-temps non vide, c'est-à-dire avec une certaine densité de matière et/ou d'énergie électromagnétique :

$$\rho_v = c^2 \frac{3\kappa - \Lambda}{8\pi G}$$

La densité d'énergie du vide, sans matière et sans énergie électromagnétique, se trouve par conséquent strictement nulle et la constante cosmologique d'Einstein devient nulle également. Ainsi selon les équations d'Einstein, le vide serait bien un vide d'énergie au sens de l'absence de masse et de rayonnement électromagnétique. Le vide serait décrit comme l'absence de toute énergie ou du moins comme une énergie de densité moyenne nulle.

Ce rappel des fondements les plus importants de la relativité générale étant fait, examinons le statut que ce cadre théorique confère au vide. Dans le cadre de la relativité restreinte, le vide, comme l'indique Einstein, n'entretient aucun lien de causalité avec le monde qui nous est familier, notre univers fait de particules et d'ondes électromagnétiques. Mais avec la théorie relativiste de la gravitation, la relativité générale, l'espace-temps est déformé par la matière : si nous considérons un espace vide de toute matière et de toute énergie électromagnétique, un espace dit de De Sitter, la topologie de l'espace-temps est plane. En introduisant une masse à l'instant t_0 , nous provoquons une déformation qui va s'établir de façon non instantanée et va se propager à grande distance à la vitesse de la lumière. La courbure de l'espace-temps sous l'effet de la matière, décrit de cette façon, peut-on dire que l'apport de matière à un instant donné est la cause de la déformation de l'espace-temps ?

Selon l'équation d'Einstein, l'espace-temps est déformé par la présence de masse ou d'énergie. Si cette hypothèse est vraie, ce que semble confirmer toutes les observations astronomiques réalisées jusqu'à maintenant, il faut s'interroger sur la nature du lien entre la structure topologique de l'espace-temps et le concept de masse. Autrement dit, s'il existe une relation causale entre la présence d'une masse et la déformation locale de l'espace-temps, quelle loi de la nature relie la structure de l'espace-temps à la matière ; pour répondre à cette interrogation il nous faut questionner le concept de masse, l'agent d'action qu'utilise la matière pour agir sur l'espace-temps, ainsi que les modalités de cette interaction. Un point important, nous semble-t-il, est de déterminer si la présence de matière ayant une caractéristique de masse et la déformation de l'espace-temps sont simultanés ou forment une séquence temporelle. La question ne se pose jamais en pratique car il est physiquement impossible d'amener ou de créer une masse en un point donné de façon instantanée (sauf par

fluctuation du vide, point que nous n'aborderons pas dans le cadre de ce mémoire). Mais la théorie de la relativité nous dit qu'une déformation de l'espace-temps va se propager dans l'univers avec une vitesse égale à celle de la lumière, elle ne peut pas apparaître subitement. Ainsi il semble que selon le sens commun nous puissions attribuer un caractère causal à la courbure de l'espace-temps par la matière (ou l'énergie électromagnétique). Il est donc justifié d'analyser le concept de masse, et de tenter de définir quel est l'agent d'action utilisé par la masse pour agir sur la topologie de l'espace-temps.

La notion de masse est liée au concept de particules élémentaires constituant la matière visible. La masse est un concept dual : la masse pesante et la masse inertielle. Le débat entre ces deux masses est ancien et, pensait-on, clos depuis que ces deux différents types de masses avaient été définis : La première n'est définie en mécanique classique que par son action gravitationnelle et sa capacité à stocker une énergie sous forme de potentialité, transformable en énergie cinétique, pour un corps se déplaçant à une vitesse donnée par rapport à un observateur. La seconde explique la force de résistance que va subir un objet qui est soumis à une accélération, un changement de vitesse. Toutes les expériences réalisées ont confirmé l'identité entre ces deux masses quelles que soient les mesures empiriques réalisées. Depuis longtemps il est ainsi admis que ces deux masses sont égales et définissent une même caractéristique d'un objet, caractéristique qui ne s'applique pas à l'ensemble des particules composant les objets qui nous entourent, certaines, comme le photon, ou les gluons étant dépourvues de masse selon le modèle standard de la mécanique quantique.

La masse avec le rayonnement électromagnétique et les charges électriques qui en sont l'origine, sont des caractéristiques accessibles à nos sens et à nos mesures. En appliquant, dans le cadre de la relativité restreinte, un changement de référentiel à la loi fondamentale de la dynamique appliquée à une masse on peut déduire une expression généralisée de la masse quel que soit le référentiel inertielle utilisé :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Examinons l'interprétation donnée à cette équivalence entre la masse et l'énergie. Si l'on définit l'énergie comme une potentialité d'action, peut-on en déduire que la masse n'a pas de réalité propre, n'est pas substantielle ; la réponse est évidemment non car la masse qui, selon la relativité est également une potentialité d'action, a une réalité que les sens peuvent éprouver de diverses manières. Un objet macroscopique occupe un certain espace, un volume, et peut se définir comme une substance ayant une réalité propre dont on peut établir les caractéristiques. Ce que nous dit la relation d'Einstein liant la masse d'un objet au repos à celle du même objet mais animé d'une vitesse constante par rapport à un repère d'inertie, c'est que les variations apparentes de masses sont intimement liées à l'écart entre les vitesses supposées constantes mesurées depuis différents repères de mesure. Une même particule pourra avoir une valeur de masse égale à m_0 selon un premier repère dans lequel la particule est au repos, et m pour un second repère animé d'une vitesse \vec{v} par rapport à la particule. La valeur apparente de la masse, grandeur mesurable, est ainsi dépendante non pas de l'espace-

temps mais de l'observateur qui la mesure. La seule grandeur réelle est donc la masse au repos m_0 qui est la valeur minimale mesurable de la masse d'une particule, la variation $\Delta m = m - m_0$ pouvant être qualifiée de virtuelle dans le sens où elle n'est pas réelle, mais une simple illusion due à l'existence d'une valeur limite pour la vitesse de la lumière et à son invariance dans tous les repères inertiels³⁹. Il faut considérer ici qu'une illusion représente une méprise des sens et de l'esprit par le fait que les instruments de mesure utilisés localement par l'observateur au repos ne donnent que des mesures dans un repère immobile, disjoints des repères mobiles, les dispositifs de mesure n'étant adaptés qu'à un repère particulier. Aucun phénomène empirique ne semble ainsi corroborer une quelconque interaction du vide sur la particule en mouvement uniforme.

Si un observateur au repos mesure la masse d'une particule animée d'une vitesse voisine de c , il va trouver une valeur $m > m_0$, mais après avoir stoppé celle-ci il va lui trouver une valeur de masse égale à m_0 . Cette variation est une simple conséquence de la structure des relations établies par Einstein en relativité restreinte. Il serait par contre faux de dire que la variation du temps écoulé est une illusion : si l'on observe deux horloges, situées au même endroit et synchrones, et que l'on déplace l'une d'elle à une vitesse élevée en lui faisant faire, par exemple, le tour de la Terre, les deux horloges revenues au même endroit présenteront un décalage temporel permanent. Ainsi les lois de la relativité établissent un lien entre la variation de cette masse et la vitesse observée, mais pas entre la masse et l'espace-temps lui-même. Selon la théorie de la relativité il n'existe pas d'autre lien direct entre la matière et sa masse que celui de son équivalence avec l'énergie. Ces lois définissant le comportement de la masse se révèlent donc insuffisantes pour établir un lien entre la présence d'une masse et l'effet de déformation de l'espace-temps décrit.

Il y a contradiction entre la définition de l'énergie, potentialité d'action sans réalité, et sa caractéristique substantielle donnée par la relation entre masse et énergie : Higgs a tenté de résoudre cette contradiction en formant l'hypothèse que la masse ne représente que le résultat de l'interaction d'une quantité d'énergie localisée dans une particule avec un champ scalaire qu'on nomme le champ de Higgs⁴⁰. L'action de ce champ se comporte, selon lui, de façon similaire à des personnes s'agglutinant autour d'une personnalité rentrant dans une pièce, freinant ainsi son avance. Si, avec l'ensemble des physiciens, l'on admet cette interprétation de la masse en tant que simple propriété d'une particule, disjointe du concept d'énergie lié directement à la particule, il nous faut redéfinir le concept d'énergie intrinsèque d'une particule : Einstein relie l'énergie au repos d'une particule directement et uniquement à sa masse par la relation $E = m_0 c^2$; cette relation signifie que l'énergie potentielle d'une particule n'est liée qu'à sa masse elle-même dépendant directement du champ scalaire de Higgs. Autrement dit l'énergie d'une particule est une conséquence directe de son interaction avec le vide, le champ scalaire assurant le lien. Si de l'énergie est transférée à une particule par l'obtention de masse, cette énergie doit être prise d'une façon ou d'une autre au vide. Mais qu'est-ce qu'un champ scalaire : Par définition, un champ scalaire est l'attribution en chaque point de l'espace, sur lequel il existe, d'une valeur définissant une potentialité d'action sur

39 Gourgoulhon, 2014, chapitre 2 paragraphe 2.5.4

40 P.W. Higgs, 1964

chaque particule qui peut s'y trouver. Pour le champ scalaire attaché au boson de Higgs la potentialité d'action est une potentialité de masse. La physique moderne ne répond pas à la question de la nature de ce champ se contentant de dire que puisque le concept de champ et le formalisme mathématique associé donne une description correcte du monde et font des prédictions qui sont empiriquement vérifiées, il est inutile de se poser des questions sur le pourquoi. Même en occultant la nature du champ de Higgs qui transporte d'une certaine façon de l'énergie puisqu'il est la cause de ce que l'on nomme une masse, l'équivalence entre masse et énergie ainsi que la nature profonde de cette caractéristique de masse conférée par ce champ de Higgs restent des questions ouvertes. Aucune réponse n'est proposée par la physique moderne à ces deux questions, certains, peu nombreux, avancent l'idée que les particules seraient, d'une certaine façon, de l'énergie du vide « gelée » mis en réserve comme l'est l'énergie mécanique potentielle d'un réservoir d'eau situé en hauteur, d'autres que la matière pourrait se comprendre comme une déformation locale de l'espace-temps et être constituée de la même substance⁴¹.

Examinons maintenant dans quelles conditions on peut convertir cette énergie de masse en énergie mécanique. La totalité de cette énergie est-elle disponible ? Dans l'état des connaissances actuelles en physique, seule l'annihilation entre particule et antiparticule conduit à une conversion complète de l'énergie de masse sous forme de rayonnement électromagnétique, lui-même porteur d'énergie ; Même l'explosion finale d'une supernova ne convertit qu'une faible partie de l'énergie de masse, et les réactions nucléaires encore moins. Ainsi, si la nature purement énergétique de la masse est érigée en principe par la relativité, elle n'est jamais empiriquement observée sauf dans des annihilations entre particule et antiparticule dont le résultat est l'émission d'une paire de photons. Cette énergie est réelle puisque nous pouvons en utiliser une partie pour produire des effets physiques divers, par exemple en absorbant les photons et en les transformant en énergie calorique ; il faut donc que l'énergie du rayonnement électromagnétique résultant de l'annihilation d'un couple de particule – antiparticule puisse être décrite soit comme une substance, soit comme une perturbation d'un milieu substantiel lui servant de support et réalisant le transport d'énergie. C'est le concept d'éther auquel Einstein avait, dans un premier temps, renoncé en 1905, n'ayant pas besoin de cette hypothèse mais qu'il a ensuite lui-même ressuscité et assimilé à l'espace-temps quinze ans après ce premier article sur la relativité. Il explique que cet éther n'entrait pas dans les hypothèses nécessaires à la théorie de la relativité restreinte mais qu'il existait bel et bien et pouvait être assimilé à l'espace-temps⁴² :

« Le principe de la relativité restreinte nous interdit de considérer l'éther comme constitué de particules qu'on peut suivre dans le temps ; mais l'hypothèse de l'éther comme telle ne contredit pas la théorie de la relativité restreinte. Il faut seulement se garder d'attribuer à l'éther un état de mouvement..... Mais on peut, d'autre part alléguer en faveur de l'hypothèse de l'éther un argument important. Nier l'éther, signifie en dernier lieu qu'il faut supposer que l'espace vide ne possède aucune propriété physique. Or les faits fondamentaux de la mécanique ne se trouvent pas en accord avec cette conception..... D'après la théorie de la relativité générale, les propriétés métriques du continuum spatio-temporel sont différentes

41 M. Esfeld, 2012, paragraphes 6.2 et 8.2

42 Einstein, 1920

dans l'entourage de chaque point spatio-temporel et conditionnées par la matière qui se trouve en dehors de la région considérée.... L'éther de la théorie de la relativité générale est un milieu privé de toutes les propriétés mécaniques et cinématiques, mais qui détermine les phénomènes mécaniques et électromagnétiques.... D'après la théorie de la relativité générale, l'espace est doué de propriétés physiques ; dans ce sens par conséquent un éther existe. Selon la théorie de la relativité générale un espace sans éther est inconcevable, car non seulement la propagation de la lumière y serait impossible, mais il n'y aurait même aucune possibilité d'existence pour les règles et les horloges, et par conséquent aussi pour les distances spatio-temporelles dans le sens de la physique. Cet éther ne doit cependant pas être conçu comme étant doué de la propriété qui caractérise les milieux pondérables, c'est à dire comme constitué de parties pouvant être suivies dans le temps : la notion de mouvement ne doit pas lui être appliquée. »

Le vide, ainsi identifié à l'espace-temps, acquiert une réalité et une substantialité ; il se voit attribuer la caractéristique d'une densité d'énergie intrinsèque. En 1941, Jean Perrin, adoptant pleinement cette idée, écrit pour justifier la propagation d'une onde électromagnétique⁴³ :

« Ce qui oscille dans l'éther est la même chose, à la période près, dans la lumière infrarouge, visible ou ultraviolette, et dans les rayons X, et cette oscillation se déplace dans le vide avec la même vitesse invariante c par rapport à tout référentiel de Galilée. Ou en termes encore plus frappants, et nous rappelant ce que la relativité nous a enseigné : ... deux observateurs, animés l'un par rapport à l'autre d'une vitesse suffisante, percevraient une même radiation, l'un comme étant du rayonnement X, l'autre comme de la lumière visible ».

La masse semble donc à la fois une forme d'énergie potentielle et une manifestation de l'interaction de l'énergie avec le champ scalaire de Higgs remplissant l'espace-temps. L'hypothèse avancée par certains physiciens selon laquelle la matière pourrait n'être que de l'espace-temps sous une nouvelle forme ne peut être rejetée a priori, mais n'a pas à ce jour reçu de confirmation empirique. Cette question de la nature de la masse, Einstein et d'autres se la posait déjà peu de temps après la formulation de la relativité générale. Poincaré écrivait à ce sujet :

« L'une des découvertes les plus étonnantes que les physiciens aient annoncées dans ces dernières années, c'est que la matière n'existe pas. Hâtons-nous de dire que cette découverte n'est pas encore définitive. L'attribut essentiel de la matière, c'est sa masse, son inertie. La masse est ce qui partout et toujours demeure constant, ce qui subsiste quand une transformation chimique a altéré toutes les qualités sensibles de la matière et semble en avoir fait un autre corps. Si donc on venait à démontrer que la masse, l'inertie de la matière ne lui appartiennent pas en réalité, que c'est un luxe d'emprunt dont elle se pare, que cette masse, la constante par excellence, est elle-même susceptible d'altération, ou pourrait bien dire que la matière n'existe pas. Or, c'est là précisément ce qu'on annonce. »⁴⁴

Que la matière soit une forme d'énergie, mesurable et accessible à nos sens, en interaction avec le champ scalaire de Higgs, ou une simple déformation locale de l'espace-temps, le

43 J. Perrin, 1941

44 H. Poincaré, 1895

champ de Higgs étant l'agent de la transformation de l'espace-temps en matière, l'identification du vide à cet espace-temps montre qu'il doit être pourvu d'une densité d'énergie non nulle. Cet argument est-il suffisant pour attribuer à la seule constante cosmologique un rôle causal dans l'expansion accélérée de l'univers, nous ne le pensons pas pour plusieurs raisons : premièrement parce que nous soutenons l'idée que le vide doit avoir une énergie globale nulle comme le suppose Einstein, deuxièmement parce que le rôle de la constante cosmologique comme unique origine de l'énergie du vide est encore, chez les physiciens, une question ouverte. L'énergie noire qui semble responsable de l'expansion accélérée de l'univers n'est pas nécessairement reliée à cette constante. Il est vrai que la structure de l'équation d'Einstein donne un statut de densité d'énergie à la constante cosmologique Λ , et que sa présence implique un univers en expansion accélérée, mais rien ne démontre qu'elle en serait l'unique cause, ou que l'équation d'Einstein est complète.

Nous venons de voir que l'action d'une densité de masse locale ou d'énergie déforme l'espace-temps. Une déformation est la conséquence de l'action d'une énergie mais n'est en aucun cas une énergie par elle-même. Lorsque le vent crée de hautes vagues sur l'océan, il le déforme mais ne change pas son énergie potentielle de masse. Cette déformation pourra atteindre des valeurs extrêmes si la densité est suffisante ; c'est ce qui semble se passer dans les trous noirs que nous observons au centre de toutes les galaxies ; la structure de l'espace-temps semble se courber infiniment, se déchirer.

Entre un événement cause et un événement effet qui en est la conséquence, il doit y avoir un lien relationnel de compatibilité permettant aux deux événements cause et effet d'établir une relation de dépendance. Cette compatibilité peut se définir en termes d'échange d'une grandeur conservée entre la cause et l'effet⁴⁵. Dans cette relation entre cause et effet par échange d'une grandeur conservée, il est nécessaire que la cause et l'effet soient des événements qui obéissent à au moins une même loi de la nature. Par exemple, lorsqu'une voile se gonfle en présence de vent, le lien entre le vent et la voile qui se gonfle est explicable par la vitesse des molécules d'air projetées sur le tissu de la voile. Elles sont arrêtées par cette dernière sous l'action des forces électromagnétiques entre les molécules d'air et les molécules constituant les tissus de la voile, ce qui entraîne une force de réaction sur la voile et donc son gonflement. Une loi commune entre l'événement cause, le vent, et l'événement effet, la voile qui se gonfle, pourra être celle de l'électrocinétique. Au contraire, un vent de neutrinos ne pourra pas expliquer, et donc être la cause du gonflement d'une voile, les neutrinos n'étant soumis ni aux forces électromagnétiques ni aux interactions fortes, mais à la seule force de gravitation. Le lien entre la masse d'un objet et la topologie de l'espace-temps n'est pas trivial. Il peut être soit causé par une loi reliant la masse à l'espace-temps ou à une de ses parties, soit par un élément commun présent à la fois dans l'objet et l'espace-temps. Si l'espace-temps est absolument vide, alors une relation causale entre une masse et une déformation de l'espace-temps ne peut pas exister. Or les équations d'Einstein prédisent cette déformation. En égalant le tenseur de courbure de l'espace-temps avec le tenseur énergie-impulsion, les équations créent un lien entre une déformation de l'espace-temps et la présence

45 Max Kistler, 1999

d'énergie localisée d'énergie sous la forme électromagnétique ou massique, une masse représentant une énergie limitée dans un volume fini.

Si la masse est une forme particulière d'énergie et de rien d'autre, et que d'autre part le vide ne contient rien si ce n'est de l'énergie, on est fondé à se demander si le lien reliant la matière au vide est de nature causale. Une condition nécessaire pour établir cette relation causale est que l'effet de courbure sur l'espace-temps soit postérieur à l'existence de la masse en un point donné. Comme nous l'avons déjà expliqué, l'établissement de la courbure de l'espace-temps n'est pas instantané ; donc même si nous étions capables de placer de façon instantanée une masse en un point précis, ce qui est impossible selon la relativité, la courbure de l'espace-temps n'apparaîtrait qu'après un temps correspondant à la propagation de cette courbure à la vitesse de la lumière et pourrait générer des ondes gravitationnelles. Le lien matière espace-temps pourrait donc être de nature causale. La détection, le 14 septembre 2015, d'une émission d'ondes gravitationnelles par la coalescence de deux trous noirs de faible masse apporte un élément empirique en faveur de notre hypothèse et vérifie la capacité du vide à propager une énergie importante sous la forme d'une déformation de l'espace-temps.

Une seconde possibilité de relation, que nous qualifierons de relation forte, est de considérer que la masse des particules est non seulement une forme particulière d'énergie, mais qu'en plus cette énergie est un morceau de la substance vide, un volume d'espace-temps, sous une forme différente, accessible à nos sens. Nous avons bien conscience que cette seconde hypothèse est une pure conjecture et qu'à ce stade il n'existe aucun argument théorique pour la défendre.

En 1998, Alfonso Rueda et Bernhard Haisch montrent que l'inertie ne trouve pas son origine dans la somme des masses réparties dans l'univers, comme l'énonce le principe de E. Mach dont la validité est réfutée par les travaux de Sciama⁴⁶, mais est une réaction de freinage du vide⁴⁷. Vigier⁴⁸ explique que l'inertie ne peut être une action résultante de l'ensemble de toutes les masses de l'univers : en effet si tel était le cas, l'inertie sur terre devrait être soumise majoritairement à l'influence des masses des étoiles de notre galaxie, la voie lactée. Notre situation excentrée dans celle-ci devrait logiquement entraîner une anisotropie de cette inertie, ce que toutes les expériences réalisées infirment. La démonstration faite par Rueda et Haisch part de la conjecture de Sakharov qui relie l'action tirée des équations d'Einstein au vide⁴⁹. Ils avancent l'hypothèse que c'est l'interaction du vide avec le champ électromagnétique généré par les particules qui est à l'origine de la masse inertielle. Cette aptitude à freiner une particule implique pour le vide une capacité à fournir une force et par là même une énergie de freinage agissant sur les objets massiques en accélération par rapport à un repère inertiel. Si le vide peut fournir une force à un objet qui se déplace sur une certaine distance, il lui fournit de l'énergie qu'il ne peut prendre que de sa propre consistance. Le vide selon cette interprétation de l'inertie posséderait une énergie propre non nulle qui ne se manifesterait localement que

46 D. W. Sciama, 1953

47 Alfonso Rueda, Bernhard Haisch, 17 feb. 1998

48 J.-P. Vigier, 1995, No. 10, 1461.

49 Sakharov Sov. 1968, 1040

lors d'une accélération, le vide continuant à être de valeur globale moyenne nulle partout ailleurs.

A partir de 2011 une expérience a été réalisée pour mesurer l'effet d'un objet en rotation sur la structure de l'espace-temps : c'est la vérification de l'effet Lense-Thirring⁵⁰ prédit autour de l'année 1918 par la théorie de la relativité. Selon cette dernière, un corps massif en rotation, donc en accélération, doit déformer l'espace-temps de telle manière qu'il va apparaître à un observateur localisé sur le corps en rotation comme tordu selon le sens de rotation. L'effet est faible et difficilement mesurable mais sa détection et sa mesure ont été confirmées en 2013 par le satellite Gravity probe B dédié à cette expérimentation⁵¹. Si l'espace-temps n'est pas substantiel, on ne peut expliquer en termes de causalité l'effet de torsion, d'entraînement de l'espace-temps par le repère en rotation d'une masse. Cette expérience a deux conséquences principales : d'une part elle confirme une fois de plus la validité des équations d'Einstein et d'autre part elle montre également que l'inertie trouve bien son origine dans une action de freinage par le vide de tout corps massif subissant une accélération.

Dans l'expérience imaginée par Newton des deux sphères tournant l'une autour de l'autre dans un univers vide de toutes autres formes de masse ou d'énergie, la boule tournant autour de l'autre dans un repère lié aux étoiles fixes ressentait une force centrifuge conséquence de son mouvement de rotation. Si nous réalisons cette expérience de pensée dans le vide, et ceci sans faire référence à un repère particulier, nous pouvons en conclure que la sphère tournant autour de l'autre va effectivement être soumise à une force inertielle radiale conduisant à une force centrifuge ; la cause de cette accélération radiale pourra être expliquée par le freinage exercé en réaction par le vide sur cette sphère dans sa trajectoire orbitale autour de la seconde sphère. Considérant que l'action d'une force sur une distance donnée nécessite une dépense d'énergie, le vide doit dépenser de l'énergie pour générer une force d'inertie appliquée à tout objet changeant de vitesse. Le vide se trouve ainsi pourvu d'une caractéristique en tant que conteneur d'une potentialité d'énergie.

Le concept de vide a fortement évolué entre la théorie de la relativité restreinte et la relativité générale. A l'époque de la relativité restreinte, Einstein considérait que l'hypothèse même de l'éther, support des ondes électromagnétiques et de toute action à distance, devait être rejetée car non nécessaire à la description du monde. Puis, plus tard, après la validation de la relativité générale, Einstein change d'opinion et admet que d'une certaine manière, l'espace-temps peut être assimilé à un éther et donc que le vide est substantiel mais que celui-ci ne dispose d'aucune propriété se rattachant à quelque chose de connu, restant une substance inaccessible à nos mesures, sans caractéristiques comparables à celles que nous attribuons à une particule ou à un champ. Ce vide Einsteinien est dépourvu de matière et d'ondes électromagnétiques afin de satisfaire à l'invariance selon les transformations de Lorentz, une des clés de voûte de la théorie de la relativité. N'étant pas constitué de parties, de structures, il

50 Thirring, H. 1918, **19**: 33.

51 Gravity Probe B: Final results of a space experiment to test general relativity. *Physical Review Letters*. (2011-05-01). Retrieved (2011-05-06).

n'est pas possible de définir un quelconque mouvement. Ainsi, nous n'avons plus rien, ce qui rend impossible toute description mécaniste du vide.

Mais notre réflexion sur la masse et son action inertielle nous permet d'envisager une seconde possibilité. Nous avons supposé, afin de nous conformer à la pensée Einsteinienne, un vide sans structure fine (pas de composants élémentaires comme les atomes ou les particules), et avec la propriété de ne pas opposer de résistance à un élément matériel se déplaçant avec une vitesse constante. L'absence de tout élément de matière massique et d'une structure interne laisse ce dernier invariant par les transformations de Lorentz ce qui est la condition minimale. La propriété de non action sur un objet animé d'une vitesse constante va impliquer une caractéristique du vide similaire à celle des fluides parfaits⁵² vis-à-vis de la matière en déplacement. La résistance du vide à l'accélération, et sa déformation expliquent l'inertie en tant qu'interaction causale vide – matière. On peut dire que le vide agit sur la matière en générant une force d'inertie s'opposant au mouvement accéléré, mais la réciproque d'un objet matériel déformant le vide est également vrai. On est donc dans un cas de relations réciproques. L'hypothèse de l'existence d'un vide sans structure, mais avec une densité d'énergie non nulle, entraîne d'une part la réalité du vide et sa substantialité, et d'autre part l'attribution à ce dernier d'une potentialité d'énergie de valeur localement non nulle. Cette conception du vide, assimilé à l'espace-temps par Einstein lui-même, permet d'expliquer sa déformation en présence de masse ou d'énergie électromagnétique à condition de postuler que la masse des particules est soit une déformation de l'espace-temps soit un second état local de ce dernier que l'on peut se représenter par l'analogie d'une forme d'énergie « gelée ». Si le vide possédait une énergie globalement non nulle, il devrait induire des effets gravitationnels qui auraient été détectés par les nombreuses expériences de mesure de gravitation réalisées jusqu'à maintenant et que nous ne détectons pas. Le vide est donc globalement d'énergie nulle mais peut échanger localement de l'énergie en présence d'un objet accéléré. Quelle est cette potentialité d'énergie du vide, quelle est sa nature, son lien avec la matière pesante et le concept d'espace-temps, la relativité d'Einstein n'apporte pas de réponses à ces questions qui restent ouvertes.

52 Chassaing P., 1997, p12

4 Mise en regard des deux concepts de l'énergie du vide

Le vide selon la mécanique quantique est réel et peuplé d'un nombre, a priori infini, de particules et antiparticules virtuelles temporairement matérialisées ou sous une forme de potentialité. Dans la vision moderne de la mécanique quantique, la physique quantique des champs, on dit qu'une particule virtuelle est le résultat de l'application d'un opérateur de création sur un champ d'énergie. Son énergie globale est supposée nulle par hypothèse en relativité comme en mécanique quantique alors que les résultats empiriques tendent à montrer, pour ces deux théories, qu'il peut échanger localement une énergie non nulle ou du moins qu'il est pourvu d'une potentialité d'énergie non nulle à la manière des vagues sur un océan. Cette potentialité d'énergie du vide peut également être définie comme celle dite de point zéro, c'est-à-dire l'énergie minimale des particules virtuelles qui sont présentes dans ce vide. Le vide décrit par la relativité est supposé, par hypothèse, de densité d'énergie globale nulle, cette valeur étant suggérée par les résultats empiriques de la constante cosmologique qui est supposée la représenter. Cependant, des résultats de mesure récents portant sur les supernovæ montrent que ce vide contient une quantité d'énergie non nulle, dénommée énergie noire, dont l'origine et la nature constituent encore des questions ouvertes, et qui pourrait être responsable de l'expansion accélérée de l'univers. Malheureusement, les tentatives de mesure de cette énergie du vide, tant du point de vue des relativistes que des tenants de la mécanique quantique, conduisent à une évaluation de l'énergie globale du vide sans aucune signification. La valeur nulle de l'énergie du vide, donnée par hypothèse en mécanique quantique, limite la description du vide à l'absence des seules entités que le sens commun appelle réelles : les particules, chargées ou non et les ondes électromagnétiques. Néanmoins, une énergie non nulle du vide selon la relativité et la mécanique quantique semble permettre de répondre à la question de l'origine de la matière dans le modèle cosmologique standard : selon ce modèle, la matière serait née d'une transition du vide, entre un « faux vide » et un « vrai vide », c'est la phase d'inflation ; cette transition aurait permis l'extraction du vide des particules de notre univers engendrant une expansion exponentielle de notre univers, celle-ci s'arrêtant lorsque la transition du vide s'est terminée. Le modèle cosmologique standard reconnaît donc au vide une substantialité et une énergie primordiale, mais ne se prononce pas sur celle à l'issue de cette transition. Pouvons-nous relier l'énergie du vide relativiste avec celle de l'énergie noire, avec la mer de Dirac et les ondes liées aux fluctuations du vide de la mécanique quantique, cette question reste ouverte dans la cosmologie moderne.

L'énergie du vide de la mécanique quantique standard

Selon la mécanique quantique le vide peut être décrit par un espace classique tridimensionnel contenant une infinité de couples de particules et antiparticules, toutes virtuelles sous forme de potentialités et non localisées, donc représentées par des paquets d'ondes étalés dans tout l'espace. Mais l'énergie du vide de la mécanique quantique standard est supposée nulle par hypothèse. Cette description du vide soulève, pour un relativiste, au moins quatre questions :

La première question vient de l'espace en tant que conteneur : pour la mécanique quantique l'espace est à trois dimensions alors que celui des relativistes en comporte quatre. C'est donc

un sous espace de l'espace-temps, l'espace du sens commun, celui perçu par nos sens qui nous relie à ce que nous appelons notre réalité. Le vide de la mécanique quantique n'inclut pas le temps comme dimension spatiale, chaque instant définit un état du vide, son énergie fluctuant avec ce temps autour d'une valeur moyenne que la théorie, défendue par l'école de Copenhague, fixe à zéro, valeur qui semble infirmée par certains résultats empiriques comme nous l'avons expliqué. Cette valeur moyenne nulle permet d'une part de satisfaire à la condition d'invariabilité de Lorentz et d'autre part d'éviter une valeur infinie de l'énergie du vide déduite de la somme divergente des énergies de point zéro des particules virtuelles. La force de Casimir qui rapproche les électrodes utilise une énergie dont l'origine ne peut être que celle du vide, soit intrinsèquement soit de ses fluctuations. Mais cette énergie n'étant définie que dans un espace tridimensionnel elle ne peut se comparer sans précautions avec celle que décrivent les relativistes : comment définir une énergie, au sens de la relativité, dans un espace privé de la dimension temporelle. L'énergie E en un point O de l'espace-temps quadridimensionnel, pour un objet de masse au repos m_0 est défini en relativité, restreinte ou générale, par la relation :

$$E^2 = m_0^2 c^4 + p^2 c^2$$

Pour être utilisée en mécanique quantique, cette relation nécessite la définition d'une correspondance entre l'espace quantique, celui de Hilbert, et l'espace-temps de la relativité. Cette correspondance n'existe pas actuellement. Ainsi pour les relativistes, l'énergie du vide dont parle la mécanique quantique n'est pas directement transposable dans l'espace-temps de la relativité.

La seconde question est relative au concept de particules virtuelles et au double comportement particulaire ou ondulatoire d'une particule selon la mesure et l'évènement observés, par exemple l'effet Lamb ou la force de Casimir. L'idée d'une particule pouvant se comporter comme un objet massif localisé, ou comme un paquet d'ondes selon le système étudié, n'a simplement pas d'équivalent en relativité. Pour un relativiste il est simplement possible de concevoir une particule sans masse, comme le photon, et qui donc n'aura pas d'effet gravitationnel, ne déformera pas l'espace-temps ; une particule se comportant comme une onde est une possibilité absente du corpus théorique relativiste. Selon la relativité, ondes et particules sont des objets distincts. La mécanique quantique pose comme définition, qu'une particule virtuelle n'est pas détectable, car transitoire, et est générée par un emprunt d'énergie au vide. Ces particules virtuelles peuvent interagir avec des particules réelles, par exemple en réalisant un écrantage partiel de la charge. Elles possèdent toutes les caractéristiques des particules, notamment une masse strictement positive conférant au vide, selon une analyse relativiste, une énergie globale positive. Une particule virtuelle capable d'action indirecte, mesurable, sur des objets réels mais n'ayant pas d'influence sur l'énergie globale du vide, est en contradiction avec la relativité.

La troisième question porte sur la mesure de l'énergie globale du vide. L'analyse dimensionnelle que nous avons faite conduit à une densité telle que pour un relativiste cela implique nécessairement une fin cosmologique selon un scénario dit de « Big Crunch » incompatible avec les observations faites sur les supernovæ lointaines conduisant à un univers

en expansion accélérée : soit l'évaluation de la densité d'énergie faite à partir d'une analyse dimensionnelle est invalidée par la théorie de la relativité, soit c'est la théorie de la relativité qui doit être contestée. Nous proposons de rejeter cette seconde possibilité car il n'existe à ce jour aucune raison objective de contester une quelconque partie de la théorie de la relativité.

La quatrième question concerne la possibilité d'extraire du vide des couples de particules-antiparticules. Selon la relativité, le vide est un espace-temps sans particules ni ondes électromagnétiques. Extraire des couples de particules-antiparticules est en contradiction avec cette définition. Pour expliquer la genèse de l'univers, la cosmologie moderne doit faire appel à la mécanique quantique et à cette possibilité d'extraction de la matière du vide pour expliquer notre univers actuel. Seulement cette extraction des particules formant l'univers nécessite de l'énergie, quelle est son origine : la cosmologie moderne répond que le vide au premier instant de l'univers était dans un état instable dit de « faux vide »⁵³ qui a permis l'extraction de ces particules par fluctuation quantique au cours de la phase d'inflation ; cette idée est partagée par certains physiciens comme Edgard Gunzig⁵⁴. Accepter une telle propriété dans la théorie relativiste est équivalent à doter le vide d'un caractère réel et substantiel ainsi que d'une énergie de densité moyenne non nulle. De plus, l'extraction de particules du « faux vide » se fait en cosmologie à partir d'un espace tridimensionnel qui n'est pas l'espace-temps relativiste. Il faudrait définir précisément en mécanique quantique ce que signifie une « extraction de particules du vide selon l'espace-temps ». Enfin pour un relativiste, extraire des particules d'un vide sans énergie est impossible par définition sauf si l'on pouvait montrer que la relativité était compatible avec le concept de fluctuations quantiques, ce qui n'est pas le cas aujourd'hui.

Analysé par la relativité, l'énergie du vide de la physique quantique laisse en résumé plusieurs questions sans réponses :

- Comment définir les fluctuations d'énergie du vide dans un espace-temps à quatre dimensions,
- Comment concilier les particules virtuelles avec le concept de vide relativiste,

L'énergie du vide de la relativité

Dans la mécanique Newtonienne la géométrie de l'espace Euclidien fait partie des lois de la nature. Avec Einstein, cela n'est plus le cas : la géométrie de l'espace-temps ne fait plus partie des lois de la nature. Rien dans les équations d'Einstein ne nous dit ce que décrit la géométrie de l'espace-temps, sa nature. Nous ne la découvrons qu'après avoir résolu ces équations pour un système donné. Les lois de la nature découlant des équations d'Einstein ne supposent pas une géométrie fixe, préexistante : c'est le principe « d'indépendance par rapport au fond ». La relativité confond vide et espace-temps comme l'a clairement expliqué Einstein en 1920⁵⁵ :

« Pour nous résumer, nous dirons donc que l'espace est, selon la théorie de la relativité générale, doté de qualités physiques et qu'en ce sens il existe un éther. D'après la théorie de la relativité générale, un espace sans éther est impensable, car dans un tel espace non

53 Acker A., 2005, pp. 412 - 439

54 Gunzig E. 2008

55 Einstein A., 1920

seulement la lumière ne pourrait se propager, mais aussi les règles et les horloges ne pourraient pas exister et il n'y aurait donc pas de distances spatio-temporelles au sens de la physique. Mais il ne faut pas s'imaginer cet éther comme doté de la propriété qui caractérise les milieux pondérables : être constitué de parties que l'on peut suivre au cours du temps ; on ne doit pas lui appliquer le concept de mouvement. »

La caractéristique la plus importante du vide, pour les relativistes, est sa capacité à être déformée par la présence locale d'une masse ou plus généralement d'une énergie d'origine massique ou électromagnétique. Cette déformation de l'espace-temps par la présence d'une masse est exclue de la mécanique quantique : rien, ni dans ses principes fondateurs, ni dans sa formulation mathématique ne peut conduire à une telle propriété. L'espace de la mécanique quantique est celui de la mécanique classique, un espace tridimensionnel Euclidien, distinct de la dimension temporelle. Celui de la relativité est quadridimensionnel et inclut le temps en donnant à ce dernier le même statut qu'une dimension telle que longueur, profondeur et hauteur. L'espace de la mécanique quantique, sous ensemble de l'espace-temps des relativistes, ne décrit pas le monde de la même façon : les phénomènes quantiques seront décrits selon le sens commun, traduction par nos sens du résultat d'une mesure. C'est une des raisons qui rend le concept de mesure si délicat en mécanique quantique. Même si l'équation de Schrödinger comporte la variable temps, les phénomènes de la mécanique quantique sont essentiellement statiques. La notion de géodésique n'a pas sa place en mécanique quantique. La gravitation comme déformation de l'espace-temps n'a pas de sens pour la mécanique quantique.

Pourtant, la théorie du modèle standard confère une masse aux particules qui n'en possèdent naturellement pas. Selon les principes de la physique quantique, c'est l'action d'un champ scalaire présent en chaque point de cet espace tridimensionnel, le champ de Higgs, qui confère à une particule donnée sa caractéristique propre de masse ; celle-ci n'est d'ailleurs pas systématique puisque certaines particules comme les photons et les gluons n'en possèdent pas. D'une certaine façon ce processus est équivalent à une action du vide sur les particules considéré comme des volumes finis d'énergie. Le modèle standard ne décrit pas de courbure dans l'espace Newtonien. Le boson de Higgs, en interaction avec les particules, pourrait-il être le responsable de la courbure de l'espace-temps quadridimensionnel de la relativité : Une particule de masse M présente en un point $O(x, y, z, t)$, par l'interaction avec le champ scalaire de Higgs en ce point, pourrait-elle être la cause de la courbure locale de l'espace-temps à proximité de ce point, le champ scalaire de Higgs seul ne pouvant pas entraîner une courbure de l'espace-temps. Mais en l'absence de l'interaction des particules avec ce champ de Higgs, une particule ne peut acquérir une caractéristique de masse. Si donc nous nous plaçons du point de vue de la mécanique quantique, la courbure de l'espace-temps pourrait avoir comme cause le boson de Higgs en interaction avec des particules ce qui n'est pas la conclusion de la relativité.

Synthèse de la comparaison des deux approches du vide

La relativité confond espace-temps et vide en un même objet. Celui-ci se caractérise par une déformation en présence de masse ou d'énergie. Défini comme d'énergie nulle pour satisfaire

à la condition d'invariance de Lorentz, le vide ne présente aucune fluctuation d'énergie et ne semble interagir qu'avec les objets possédant une masse ou une énergie interne ; ce vide est substantiel, d'énergie localement et temporairement non nulle. Il est capable de se manifester, par exemple, via la force d'inertie, mais reste inaccessible directement à nos sens. Comme le précise Einstein, toute tentative de détection d'un quelconque mouvement du vide est vouée à l'échec, celui-ci étant dépourvu de structure par hypothèse.

Le vide décrit par la mécanique quantique standard est assez différent bien qu'il soit, comme celui de la relativité, défini par hypothèse comme d'énergie globale moyenne nulle : Il est le siège de fluctuations aléatoires dont la cause est encore une question ouverte et semble peuplé de particules virtuelles en nombre quasiment infini. Mais comme le vide relativiste, il est pourvu d'une énergie non nulle qui semble ne s'exprimer ponctuellement et temporairement que par l'intermédiaire de ces fluctuations quantiques, cause par exemple du rapprochement des électrodes dans l'expérience de Casimir. Le vide de la mécanique quantique est défini dans un espace euclidien ou plus précisément dans un espace de Hilbert ; il n'est pas décrit dans l'espace-temps quadridimensionnel même si les relations de la relativité restreinte sont utilisées par les physiciens de la mécanique quantique pour décrire les comportements de particules aux hautes vitesses.

Ainsi le concept du vide semble très différent selon ces deux théories majeures que sont la relativité et la mécanique quantique standard. Cependant dans les deux théories, si le vide est défini par hypothèse avec une énergie globale nulle et satisfait à la condition d'invariance de Lorentz, il manifeste une énergie non nulle au moins localement et de façon temporaire. L'énergie du vide doit donc être considérée comme une potentialité ; une potentialité est ce qui existe en puissance mais n'est pas réel. Ainsi l'interprétation de cette potentialité d'énergie du vide reste une question ouverte.

5 Les bases d'un programme de recherche

La validité des arguments avancés dans cet essai repose sur la limitation de leurs interprétations à la mécanique quantique standard et à la relativité exposée par Einstein. Cette étude a ainsi volontairement négligé les approches modernes, notamment celles de la mécanique de Bohm, la gravitation quantique à boucle, les théories des cordes, et les espace-temps relativistes possédant plus que quatre dimensions. Il est important de soumettre nos conclusions aux concepts et aux nouvelles hypothèses sur lesquels ces extensions et théories alternatives sont fondées.

Le résultat principal que nous avons obtenu est la mise en évidence de conditions locales permettant un échange d'énergie entre des objets et le vide : l'une d'elle est la présence d'un objet accéléré, l'autre l'existence de fluctuations quantiques chaotiques porteuses d'énergie. Mais cette énergie, comment la définir, d'où provient-elle puisque nous déduisons également des théories quantiques et relativistes et des observations empiriques que le vide semble pourvu de la caractéristique d'une densité d'énergie globalement nulle en moyenne tant pour la relativité que la mécanique quantique standard. Cet essai ne répond pas à cette question, sa discussion dépassant largement le cadre de cet ouvrage. Par ailleurs, l'essentiel des arguments avancés pour défendre l'idée d'un vide avec une densité d'énergie localement non nulle repose sur l'hypothèse de l'existence d'un lien relationnel entre le vide et la matière ou l'énergie électromagnétique. Un programme de recherche qui vise à analyser cette contradiction d'une énergie globalement nulle et ponctuellement non nulle devra notamment aborder et répondre à plusieurs questions essentielles :

La première d'entre elles est le lien relationnel entre vide et matière : les particules virtuelles émanent du vide et y retournent après un intervalle de temps déterminé par les relations d'Heisenberg ; quel lien relie matière et vide, comment définir la matière et en quoi les concepts de masse et de matière sont-ils liés ? Que représente ce lien dans le cadre conceptuel de la physique des champs ? Si le vide et la matière partagent un lien qui permet l'existence des particules réelles ou virtuelles, ils doivent partager des propriétés et des lois. Les observations empiriques conduisent à la vérification d'une équivalence entre la masse et l'énergie, mais si nous soutenons l'idée que le vide est pourvu d'une énergie, de quoi parlons-nous lorsque nous parlons de masse, et quel est le lien entre énergie et temps qui apparaît dans les relations d'Heisenberg et dans l'équation de Schrödinger ? Pourquoi la masse est-elle une conséquence d'un champ scalaire selon la mécanique quantique, le champ de Higgs, et pas une caractéristique propre à la matière en tant qu'objet réel indépendant ? Toutes ces interrogations nous ramènent au lien entre le vide et la matière-énergie. Cette question est centrale et devrait, selon nous, constituer l'essentiel du programme de recherche dans la continuité de ce mémoire.

La seconde porte sur le concept de temps : la mécanique quantique soutient que les fluctuations du vide qui sont la cause des particules virtuelles ou réelles sont de type chaotique. Le principe d'inertie examiné dans le cadre de la relativité générale est également lié au temps par le paramètre d'accélération d'un objet matériel massique. La génération

d'énergie par le vide est-elle liée à une dynamique non linéaire, ou bien est-ce le temps qui présente un lien avec cette énergie échangée avec le vide ?

La troisième porte sur l'espace-temps : si l'on suit l'interprétation d'Einstein qui identifie l'éther avec l'espace-temps, tout en définissant celui-ci comme dépourvu de structure, alors que représente des fluctuations d'un tel éther sans structure, sommes-nous fondé à nous les représenter par exemple comme semblables aux ondes gravitationnelles décrites par la relativité ?

De cet ensemble de questions, toutes plus fondamentales les unes que les autres, il est important selon moi de commencer tout programme de recherche par l'étude de la relation entre le vide et la matière au travers d'une part du concept de particules virtuelles et d'autre part l'étude de la relation entre masse et matière. La masse est une forme d'énergie acquise par l'interaction avec le champ scalaire de Higgs, la matière est le support de la masse mais ne semble porter aucune énergie en elle-même. Cette différence est certainement un point central du lien relationnel entre vide et matière.

Conclusion générale

Le vide est un des objets les plus fondamentaux de la physique et de la métaphysique. Déjà dans l'Antiquité Empédocle croyait qu'en plus des quatre éléments l'éther remplissait notre univers. Platon pensait que l'espace vide est substance, la Chôra, et lui attribuait un rôle d'intermédiaire entre le sensible et l'intelligible. Aristote attribuait au vide une propriété de potentialité de la matière et en ce sens peut être considéré comme un précurseur du vide de la mécanique quantique moderne.

Mais ce n'est que bien plus tard, avec le concept d'éther que le problème du transport d'énergie et des actions s'est posé. Car comment penser la propagation d'une onde électromagnétique sans support, comment transférer de l'énergie depuis une source vers un objet distant sans contact matériel et sans émission de particules. Einstein pensait, en écrivant sa théorie de la relativité restreinte, que la question pouvait être résolue en attribuant aux ondes électromagnétiques une substance en elles-mêmes par l'hypothèse des photons rangés dans la catégorie des particules même si leur masse est nulle ; puis, l'introduction de la relativité générale l'a conduit à revenir sur ses certitudes et à admettre l'existence d'un éther qu'il identifie à l'espace-temps lui-même mais en lui refusant d'une part une structure et donc une vitesse, et d'autre part des caractéristiques mesurables comme une énergie mais en formant l'hypothèse que la matière massique va déformer cet espace-temps, cet éther, créant ainsi l'illusion d'une force gravitationnelle. Bohr a été lui aussi contraint d'accepter certaines propriétés du vide, notamment celle de pouvoir produire des fluctuations porteuses d'énergie alors que le vide restait globalement d'énergie nulle. Cette différence conceptuelle du vide et de son comportement constitue une des incompatibilités entre relativité et mécanique quantique.

La conclusion de notre étude attribue une caractéristique d'énergie au vide de la relativité et à celui de la mécanique quantique ne se manifestant, comme les fluctuations quantiques, que dans des circonstances précises. Le vide présente une potentialité d'énergie qui ne s'exprime que lors de perturbations locales et de durée limitée. Ce résultat contribue au rapprochement de ces deux conceptions antagonistes du monde mais échoue dans sa tentative à les réunir complètement. L'espace à trois dimensions de la mécanique quantique et l'espace-temps relativiste restent trop différents conceptuellement pour une synthèse de ces deux représentations du vide. Notre démarche nous a cependant conduits à une vision commune de l'énergie du vide que l'on peut se représenter par l'image d'une mer sur laquelle des vagues, des perturbations, transportant une certaine quantité d'énergie, seraient responsables de phénomènes observables. Le transport d'énergie par des ondes gravitationnelles, des déformations dynamiques de l'espace-temps, qui a été récemment mis en évidence par le résultat empirique de l'expérience américaine LIGO, est conforme à cette image de l'océan.

Ce concept d'un vide d'énergie globalement nulle, mais localement non nulle sous l'effet de fluctuations quantiques ou de forces d'inertie, nous l'avons établi en nous appuyant sur des représentations mentales, des modèles ; la théorie quantique des champs moderne exprimée

dans le corps des complexes ne nous permet pas de telles représentations et c'est, selon nous, une des raisons de la difficulté de compréhension de notre réalité dont le vide fait partie intégrante.

Cette contradiction entre un vide globalement d'énergie nulle et capable d'échanger de l'énergie localement avec des objets matériels conduit à un nouveau questionnement sur le concept d'énergie, celui de sa potentialité. Nous avons caractérisé le vide comme pourvu d'une énergie non nulle, ne se manifestant qu'en présence d'une fluctuation, de la modification de la vitesse d'un objet matériel ou d'un élément polarisant comme un champ électrique. Cette propriété de l'énergie du vide met en lumière une contradiction : comment l'énergie d'un objet peut-elle être à la fois globalement nulle et localement non nulle. Einstein pensait qu'il y a une équivalence totale entre la masse et l'énergie ce qu'il traduit par la relation $E=mc^2$; que signifie cette relation, définit-elle un lien d'interaction entre la matière et le vide ? Qu'est-ce que l'énergie du vide, quelle relation entretient-elle avec ce que nous appelons la matière et qui constitue notre réalité, celle à laquelle nous sommes reliés par nos sens et les instruments de mesure qui en sont les prolongements ? Pourquoi n'est-elle pas mesurable directement, c'est-à-dire accessible à nos sens ou aux instruments de mesure qui en sont les prolongements ? Nous terminons sur ces interrogations qui ne sont, nous l'espérons, que le début d'un long chemin.

Bibliographie

- [1] **Arageorgis A., Earman J., and Ruetsche L.** (2003), “Fulling non-uniqueness and the Unruh effect”, *Philosophy of Science*, 70, 1
- [2] **Acker A.**, (2005), *Astronomie, Astrophysique*, Dunod Science Sup
- [3] **Aslangul C.** (2010), *Mécanique quantique*, Collection Memento Science, Éditions De Boeck.
- [4] **Aristote**, physique livre IV, 214 b
- [5] **Basdevant J. L.**, (2006), 12 leçons de mécanique quantique, Vuibert
- [6] **Bordag M.**, (1999), *The Casimir Effect 50 Years Later*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Singapore
- [7] **De Broglie L.**, (1924), *Recherches sur la théorie des quanta*, Paris, (thèse de physique)
- [8] **De Broglie L.**, (1957 – 1958), *Cours professé à la Sorbonne durant l'année scolaire*. (Inédit)
- [9] **De Broglie L.**, (1952), *la théorie des particules de spin $\frac{1}{2}$ (électrons de Dirac)*, Paris Gauthier Villars
- [10] **Cao et Schweber**, (1993), *The conceptual foundations and the philosophical aspect of renormalization theory*. Synthèse. 97,33-108
- [11] **Casse M.** (2004), *Energie noire, matière sombre*, Odile Jacob Paris
- [12] **Chassaing P.**, (1997), *mécanique des fluides*, Cepadues éditions, collection Polytech
- [13] **Cohen-Tannoudji G., Spiro M.** (1986), *La Matière-Espace-Temps, La logique des particules élémentaires*, Paris, Fayard le temps des sciences
- [14] **Cox B. et Forshaw J.**, (2013), *L’univers Quantique tout ce qui peut arriver arrive*, Dunod Quai des Sciences Paris
- [15] **Derendinger J. P.**, (2008), *théorie quantique des champs*, Presses polytechnique universitaires romandes.
- [16] **Dirac P.A.M.** (2009), *Les principes de la mécanique quantique*, traduction de la 4^{ème} édition, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne.
- [17] **Dirac P. A. M.** (1934), *rapport au 7ème conseil Solvay de Physique*

- [18] **Einstein A.** (1905), « Zur Elektrodynamik bewegter Körper », dans *Annalen der Physik*, vol. 322, no 10, 26 septembre 1905, p. 891-921
- [19] **Einstein A.** (1972), *Réflexions sur l'électrodynamique, l'éther, la géométrie et la relativité*, Gauthier Villars
- [20] **Einstein A.** (1915), *Erklärung der Perihelbewegung des Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie*, Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte
- [21] **Einstein A.**, (1920), *L'éther et la théorie de la relativité*, conférence
- [22] **Englert F. et R. Brout**, (1964), « Broken Symmetry and the Mass of Gauge Vector Mesons », *Phys. Rev. Lett.*, vol. 13, no 9, 31 août 1964
- [23] **Esfeld M.**, (2012), *physique et métaphysique, une introduction à la philosophie de la nature*, Presses polytechniques et universitaires romandes
- [24] **Feynman** (1993), *le cours de physique de Feynman, mécanique quantique*, Interéditions
- [25] **Gourgoulhon E.** (2014), *Cours de relativité générale*, Laboratoire Univers et Théories (LUTH), CNRS / Observatoire de Paris / Université Paris Diderot (Paris 7)
- [26] **Gravity Probe B** (2011), *Final results of a space experiment to test general relativity. Physical Review Letters*. 2011-05-01. Retrieved 2011-05-06.
- [27] **Gunzig E.** (2008), *Que faisiez-vous avant le big bang ?* Paris Odile Jacob
- [28] **Gunzig E. et Diner S.** (1997) *Le vide, univers du tout et du rien*, revue de l'université de Bruxelles, Éditions Complexe
- [29] **Hladik J.** (2006), *Introduction à la relativité générale*, éditions Ellipses
- [30] **Hoffmann B. et Paty M.** (1981), dans « *Nouveaux voyages au pays des quanta* », Seuil
- [31] **Higgs P. W.**, (1964), *Phys. Lett.* 12, 132
- [32] **Kistler M.**, (2006), *la causalité comme transfert et dépendance nomique in : philosophie* 89, p. 53-77
- [33] **Kistler M.**, (1999), *causalité et lois de la nature*, librairie philosophique édition Vrin
- [34] **Lambrecht A. & Reynaud S.** (2003), *Recent experiments on the Casimir effect: description and analysis*, séminaire Poincaré (Paris, 9 mars 2002), publié dans : Bertrand Duplantier et Vincent Rivasseau (Eds.) ; *Poincaré Seminar 2002, Progress in Mathematical Physics* 30, Birkhäuser
- [35] **Leinaas J. and Myrheim J.** (1977), “ On the theory of identical particles”, *Il nuovo cimento*, B, Series 11, Volume 37, Issue 1
- [36] **Le Noxaïc**, (2004), *Les métamorphoses du vide*. Editions Belin

- [37] **Pagels H.**, (1985), perfect symmetry: the search for a beginning of time, New York, Simon and Chuster
- [38] **Perrin J.**, (1941), Électricité, Hermann
- [39] **Poincaré H.**, (1904), Bulletin des sciences mathématiques de décembre
- [40] **Poincaré H.**, (1895), la science et l'hypothèse, Paris Flammarion
- [41] **Rindler, W.** (1966), zero-point Energy and the Lamb Shift, am. J. Phys. 34:516-18
- [42] **Rueda A., Haisch B.**, (1998), Arxiv:physics/9802030V1, 17 feb 1998
- [43] **Rich J. A.**, (2010) Cosmologie, cours et exercices corrigés d'astrophysique, Vuibert Paris
- [44] **Sakharov** (1968), Sov. Phys. Dokl. 12, 1040
- [45] **Samueli J. J.**, (2011), L'éther des physiciens existe-t-il ?, écrits sur l'éther ; du « Sensorium Dei » de Newton à l'éther d'Einstein et à celui de Dirac, Ellipses Paris
- [46] **Saunders S. and Harvey R. Brown** (1991) The philosophy of vacuum, Edition Clarendon Press Oxford
- [47] **Sciama D. W.**, (1953), Mon. Not. Roy. Astr. Soc. 113, 34 ; et également G. Cocconi, and E. Salpeter, Il Nuovo Cimento, 10, (1958).
- [48] **Sciama D. W.**, (1991), the pilosophy of vacuum, Clarendon pres, Oxford
- [49] **Schlick M.**, (1934), les énoncés scientifiques et la réalité du monde extérieur, Paris Hermann éditeurs
- [50] **Thirring, H.** (1918). "Über die Wirkung rotierender ferner Massen in der Einsteinschen Gravitationstheorie". *Physikalische Zeitschrift* **19**: 33.
- [51] **Valentin L.**, (1989), Noyaux et Particules, modèles et symétries, Hermann éditeurs Paris
- [52] **Versteegh M. and Dieks D.** (2008), "Identical quantum particles and weak iscernibility", *Foundations of physics*, 38, 10
- [53] **Vigier J-P.**, (1995), Foundations of Physics, 25, No. 10, 1461.

Annexes

Annexe 1 : Transformation et invariance de Lorentz

Considérons deux repères S (x,y,z,t) et S' (x',y',z',t') orthonormés en translation relative avec une vitesse \vec{v} parallèle à la direction Ox. Nous cherchons la relation liant un couple (x,t) avec (x',t'). Du fait de la linéarité des relations on peut écrire :

$$x' = \gamma x + nt + \alpha y + bz$$

$$t' = \dot{t} + px + qy + rz$$

Par rotation autour de l'axe Ox (O'x'), y et z se transforment mais ni x ni t et de même pour x' et t'. Si la rotation est de $\pi/2$, y se transforme en z et z en -y. par suite les deux équations précédentes deviennent :

$$x' = \gamma x + nt + \alpha z - by$$

$$t' = \dot{t} + px + qz - ry$$

Avec les relations résultant de la rotation :

$$(a+b)y = (\alpha - b)z$$

$$(q+r)y = (q-r)z$$

Ces relations étant vraies quel que soit (y,z) cela implique :

$$\alpha = b = 0 \quad \text{et} \quad q = r = 0$$

Les constantes γ, n, l et p doivent toutes être fonction de \vec{v} seules variables distinguant S de S'. Si l'on effectue les mêmes opérations avec les couples (y,z) et (y',z') on obtient le second couple de relations :

$$y' = a(v)y$$

$$z' = a(v)z$$

$$\lim_{v/c \rightarrow 0} \dot{t} a(v) = 1 \dot{t}$$

$$x' = \gamma(v)x + n(v)t$$

$$t' = l(v)t + p(v)x$$

$$y' = a(v)y$$

$$z' = a(v)z$$

Pour déterminer les constantes restantes considérons le mouvement de l'origine O' du repère S', $x' = 0$:

$$x = vt$$

Ce qui conduit à :

$$n(v) = -v\gamma(v)$$

Et avec le mouvement de l'origine O de S :

$$-v = \frac{-\gamma(v)vt}{l(v)t} \rightarrow l(v) = \gamma(v)$$

Soit finalement :

$$x' = \gamma(v)(x - vt)$$

$$t' = \gamma(v)t + p(v)x$$

En utilisant l'invariance de la vitesse d la lumière :

$$p(v) = \frac{-v\gamma(v)}{c^2}$$

Le passage de (x,t) à (x',t') doit correspondre à une inversion de la vitesse de translation entre les deux repères ; on en déduit la valeur de la constante y(t):

$$\gamma(v) = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2}$$

Le coefficient a(v) se détermine en considérant un photon qui se déplace selon l'axe Oy du référentiel S et en faisant remarquer qu'à l'instant initial les origines de S et S' coïncident ; on obtient alors :

$$\gamma^2 \frac{v^2}{c^2} + a^2(v) = \gamma^2$$

Soit a(v) = 1

Ces relations mettent clairement en évidence le caractère relatif du temps : deux événements dans S qui correspondent au même instant t, mais à des positions différentes sur l'axe Ox auront des correspondants dans S' à des instants t' différents. Si deux événements sont simultanés dans S mais distants de Δx , dans S' ils seront non seulement séparés d'une grandeur $\Delta x' \neq \Delta x$ mais encore avec un écart de temps $\Delta t' = -(\gamma v \Delta x)/c^2$, simultanés dans un repère et pas dans l'autre, ce résultat permet d'expliquer certains paradoxes apparents.

Supposons un objet circulaire de rayon R qui se déplace selon une direction constante, avec une vitesse v constante du point de vue d'un observateur distant. La longueur dans le sens du déplacement va sembler plus courte du fait de l'application des formules de transformation ci-dessus. Dire que l'objet est « vu » de l'observateur serait incorrect si le verbe voir est pris dans son sens fort. On parlera d'empreinte sur S de l'objet appartenant à S' ; c'est la lumière reçue à un instant donné t, mesuré dans S qui concourt à la formation de l'image rétinienne de cet objet. Cette lumière a été émise par les points objets à des instants différents, même du point de vue de S. les positions observées de ces points ne coïncident pas avec leurs positions mesurées dans un processus de mesure des distances.

De même, un disque qui va tourner sur son axe de symétrie va donner, suite à une mesure faite par un observateur situé en ce centre, une longueur de son périmètre inférieur à $2\pi R$, R étant son rayon.

Le principe d'invariance de Lorentz utilise ces relations reliant les longueurs, intervalles de temps et masse dans différents repères inertiels. Si l'on veut qu'un espace soit invariant par

cette transformation, comme nous venons de le voir, cela implique que toutes les masses soient nulles et plus généralement que cet espace, ne comporte ni masse ni aucune forme d'énergie au sens relativiste c'est-à-dire électromagnétique.

L'utilisation du principe de causalité n'est pas toujours possible en relativité, l'ordre dans le temps des événements étant fonction du repère d'où on les observe. Il est nécessaire qu'un rayon lumineux parti d'un point A, où un événement E_1 a eu lieu, arrive à l'endroit où doit se passer l'événement E_2 avant que celui-ci ait lieu, ce qui n'est pas toujours le cas. Pour contourner cette difficulté, on peut par exemple se limiter à des phénomènes proches, locaux.

Annexe 2 : champ et boson de Higgs

Dans les années 1970, des physiciens ont compris que deux des quatre forces fondamentales étaient étroitement liées : la force faible et la force électromagnétique. Ces deux forces peuvent être décrites à l'aide d'une seule théorie, sur laquelle s'est érigé le Modèle standard. Une théorie dite « unifiée » parce qu'elle décrit l'électromagnétisme et certains phénomènes de radioactivité comme des manifestations d'une seule et même force fondamentale, appelée la force électrofaible.

Les équations fondamentales du modèle standard, extension aux particules de la mécanique quantique standard, expliquent bien la force électrofaible et les particules porteuses de force qui s'y associent, à savoir le photon et les bosons W et Z. La difficulté majeure qui découle de ce modèle est la masse nulle de toutes les particules. Or, si le photon n'a effectivement aucune masse, les particules W et Z en ont une, équivalente à près de 100 fois la masse du proton. Robert Brout, François Englert et Peter Higgs⁵⁶ ont élaboré une théorie permettant de résoudre ce problème. La masse des particules est le résultat d'une interaction entre ces particules et un champ scalaire défini en tous points de l'Univers, « le champ de Higgs ».

Dans les premiers instants qui ont suivi le Big Bang, le champ de Higgs était de valeur nulle. En se refroidissant en dessous d'une valeur critique, le champ de Higgs a augmenté spontanément et donné une masse à toutes les particules qui étaient capables d'interagir avec lui. Plus une particule interagit avec ce champ, plus elle est massive. Certaines particules, comme le photon ou les gluons, qui n'interagissent pas avec lui, gardent une caractéristique de masse nulle.

L'unification électrofaible suppose l'interaction entre particules par l'échange de bosons. Ainsi dire que deux particules interagissent, qu'elles exercent une force l'une sur l'autre c'est accepter l'hypothèse qu'elles échangent des bosons. Dans le cas de l'unification électrofaible, pourquoi les bosons W^\pm et Z^0 acquièrent-ils une masse alors que ce n'est pas le cas pour le photon ? La réponse est donnée par un mécanisme proposé par Salam, Glashow et Weinberg selon lequel il y a brisure de la symétrie de jauge permettant aux W^\pm et Z^0 d'acquérir une masse.

Pour expliquer le champ de Higgs on peut utiliser l'image d'une personnalité qui rentre dans une pièce remplie de personnes qui attendent son arrivée. Elle va avancer à travers l'espace avec difficulté, comme si elle était dans un milieu visqueux, donnant ainsi l'impression d'une masse.

56 F. Englert et R. Brout, 1964, p. 321-323