Relier la mécanique quantique et la relativité générale ? Réflexions et propositions

Bernard Guy

▶ **To cite this version:**

Bernard Guy. Relier la mécanique quantique et la relativité générale ? Réflexions et propositions. 2013. hal-00872968v1

HAL Id: hal-00872968

https://hal.science/hal-00872968v1

Preprint submitted on 14 Oct 2013 (v1), last revised 13 Oct 2016 (v2)

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.

Relier la mécanique quantique et la relativité générale ?

Réflexions et propositions

Bernard GUY

Ecole nationale supérieure des mines de Saint-Etienne
guy@emse.fr

1ère version
Octobre 2013

Résumé

Nous examinons les relations possibles entre la relativité générale et la mécanique quantique, du point de vue des représentations qu'elles se font de l'espace et du temps, qui sont différentes. Nous nous rapportons à notre propre compréhension des concepts d'espace et de temps, construits en opposition l'un à l'autre à partir des phénomènes physiques, et non constituant un cadre extérieur a priori. Dans le cadre d'une pensée relationnelle, on ne peut que comparer des phénomènes à d'autres phénomènes, et de cette confrontation naissent les repères d'espace-temps, dessinés par les trajectoires de certains phénomènes considérés arbitrairement de façon privilégiée. C'est dans ce cadre qu'il faut penser la possible association de la relativité générale (qui n'a pas le monopole de l'espace et du temps) et de la mécanique quantique (qui n'a pas le monopole de la quantification, cette dernière devant être comprise par la comparaison de deux classes de phénomènes dans une vision probabiliste). La question générale à se poser est celle d'échanges possibles entre les différents points de vue, appuyés sur les divers phénomènes possibles, c'est-à-dire ceux sur lesquels espace et le temps sont définis, et les autres. Ce ne sont pas l'espace et le temps qui disparaissent, ce sont les points de vue qui s'échangent. Ces échanges sont rendus possibles en représentant espace et temps, comme les autres phénomènes, par une paire de champs (r, t) ; r et t sont des vecteurs dans un espace à trois dimensions (le temps est marqué par la position d'un point mobile dans le même espace que celui qui définit la position des points), en opposition aux paires de champs (f, g) associées aux autres phénomènes (comme l'est la paire des champs électrique et magnétique). On peut in fine envisager une quantification de l'espace et du temps ; on peut envisager encore la définition de temps et espace par la seule mécanique quantique. Un cadre préliminaire et qualitatif est ici présenté comme base de futures recherches quantitatives.

Mots clés : mécanique quantique ; relativité générale ; coexistence ; transformation de Lorentz ; relativité restreinte ; quantification ; espace ; temps ; mouvement ; chute libre ; gravitation ; lois physiques de degré zéro ; dualité ; champs ; 3 + 3 dimensions ; disparition du temps et de l'espace ; électromagnétisme

Introduction

Il est admis par les spécialistes que l'un des problèmes importants de la physique d'aujourd'hui est de comprendre comment relier les deux théories majeures de la discipline que sont la mécanique quantique et la relativité générale (voir par exemple : Smolin, 2000, 2006 ; Rovelli, 2004). Ces deux théories n'ont à première vue pas l'occasion de se rencontrer : la mécanique quantique s'intéresse au premier chef aux phénomènes microscopiques, tandis que la relativité générale est utilisée pour étudier les structures de l'univers aux dimensions cosmologiques.

La question se pose pourtant de les relier :
- en premier lieu, on peut vouloir discuter de phénomènes définis sur des échelles de temps et d'espace où les deux théories se rejoignent, comme lors des instants voisins du Big-bang : la matière est très concentrée (petites échelles d'espace) et très massive (intervention de la gravitation) ; la question se pose aussi dans certaines situations où les effets quantiques interviennent à l'échelle macroscopique.
- en second lieu, on peut être désireux d'examiner la concordance entre les deux théories au niveau conceptuel : une incompatibilité se manifeste en effet dans l'image qu'elles se font de l'espace et du temps. Dans le cas de la mécanique quantique, espace et temps constituent un cadre extérieur (« background ») où se déploient les phénomènes, tandis qu'en relativité générale, temps et espace deviennent des variables « dynamiques », fonction de la distribution changeante des masses. On parle aussi d'antagonisme entre les deux théories du point de vue de la définition ponctuelle ou étalée des grandeurs qu'elles manipulent, et des aspects reliés de probabilité, de quantification et d'« incertitude ».

C'est ainsi que les physiciens proposent des directions de recherche que l'on peut synthétiser comme suit : il faut quantifier la gravitation, il faut quantifier l'espace et le temps, il faut rendre la mécanique quantique indépendante d'un cadre extérieur d'espace-temps, il faut donner à l'espace et au temps le statut de variables dynamiques en mécanique quantique, il faut avoir une vision probabiliste de la relativité, avec apparition d'incertitudes, etc.

Dans la discussion qui suit, c'est au second lieu de discussion mentionné plus haut que nous nous restreindrons, et *c'est la possible adéquation entre les deux théories quant à leur compréhension de l'espace et du temps que nous examinerons*, en restant sur un plan très général. Nous n'aborderons que de façon ponctuelle les nombreuses difficultés techniques discutées dans la littérature. Cet examen sera appuyé sur les réflexions de l'auteur sur les concepts d'espace et de temps (voir les références bibliographiques et l'Annexe 1). Disons en quelques mots que nous promouvons une vision où le temps et l'espace ne sont pas pensés indépendamment l'un de l'autre, mais en association étroite (la relativité relie les lectures faites sur les règles et les horloges, mais garde deux concepts distincts, et, dans ses représentations mathématiques, envisage à l'avance des variables séparées dans des espaces à quatre dimensions). Espace et temps sont construits en s'appuyant sur les phénomènes physiques en général (et les « mouvements » qu'ils permettent de définir), la gravitation n'ayant pas de rôle privilégié. On peut définir une multitude de temps locaux associés au déploiement des phénomènes, parmi lesquels un marqueur est choisi (ce n'est pas toujours possible) pour définir un temps unique ; ce dernier est associé à la position d'un point mobile dans l'espace, avec trois coordonnées (pensons à la position du soleil dans le ciel, ou d'un photon dans une horloge atomique). Cette approche fournit de nouvelles règles de pensée et des pistes de recherche pour la réécriture des équations utiles à la description des phénomènes physiques. Elle ne fait pas l'économie de difficultés conceptuelles et la nécessité d'un renoncement à tout comprendre (situation d'« incomplétude »).

Dans le présent texte, nous commencerons par examiner comment les phénomènes, compris de façon générale, permettent de construire l'espace et le temps, et comment se pose la coexistence ou opposition entre les phénomènes à cet endroit. Si des leçons spécifiques nous semblent devoir être retenues de la mécanique quantique et de la relativité générale, la question de leur raccord doit se poser dans les termes généraux de la représentation de temps et espace de façon conjointe par plusieurs phénomènes. Dans un second temps, nous indiquerons comment nous pouvons envisager de relier mécanique quantique et relativité générale, à condition de ré-examiner ces deux théories quant à leur appréhension de l'espace et du temps, selon des directions de recherche qui seront indiquées.

L'auteur a des connaissances limitées sur les théories physiques discutées ici ; de même il ne connaît pas toutes les tentatives explorées pour les relier (la littérature appelée dans cet article est très réduite : nous nous sommes appuyés sur des traités de physique de base tels ceux de Landau et Lifchitz (1970), Basdevant et Dalibard (2002), Rougé (2002), ou des livres moins techniques tel celui de Klein et d'Espagnat (1993)). Ainsi ce texte souhaite d'abord présenter un cadre conceptuel et des éléments de discussion sur ces questions, en vue de travaux plus quantitatifs[1].

[1] Au moment où nous mettons un terme provisoire à ce travail, nous découvrons les travaux de Patrick Iglesias-Zemmour sur la « géométrie des mouvements ». Nous sommes heureux de voir que les recherches que nous menons depuis une quinzaine d'années pour reprendre la physique sur la seule catégorie de mouvement (en remplacement de la dualité temps / espace) correspondent à d'autres recherches faites par des mathématiciens. A suivre.

Première partie : approche générale

1. L'espace et le temps sont définis par les phénomènes

Un des premiers résultats de nos travaux est de convenir que le temps et l'espace ne sont pas fournis au physicien comme une scène extérieure indépendante de ce que nous appellerons les phénomènes, mais construite en s'appuyant sur eux ; il n'y a pas de cadre spatial et temporel primordial (pas de scène, pas de « background ») sans phénomènes (ce résultat est conforme à l'esprit de la relativité générale). Les phénomènes eux-mêmes sont définis en opposition les uns aux autres comme nous le discuterons dans la section suivante (nous sommes à l'intérieur du monde et nous ne pouvons que comparer des phénomènes à d'autres phénomènes). Nous pensons que, dans son expression élémentaire, un phénomène φ doit être caractérisé par deux champs tri-dimensionnels f et g en dualité (on peut donner l'exemple de la paire (E, B) de l'électromagnétisme)[2] ; il est responsable des relations de mobilité et d'immobilité des points matériels du monde, support de nos constructions associées du temps et de l'espace. En relativité restreinte, espace et temps sont bien associés à un phénomène élémentaire φ_0 : la propagation de la lumière dans le vide ; on lui associe deux champs en dualité, un champ d'espace, un champ de temps, soient r et t, tous deux représentés par des vecteurs tri-dimensionnels[3], la définition du temps s'appuyant sur le déplacement d'un point matériel au sens large dans l'espace à trois dimensions. *C'est fondamentalement cette circonstance qui va permettre les ouvertures discutées ici*. Il nous paraît important d'utiliser pour r et t le nom de champs, les mettant sur le même plan que les champs physiques, définis par des paires de vecteurs (f, g) fonction de r et t ; l'intérêt de ce point de vue « symétrique » entre les paires (f, g) et (r, t) apparaîtra dans la suite du texte.

Une corrélation de base entre concepts d'espace et de temps se manifeste dans un même repère, et il n'est pas besoin, pour définir un « espace-temps » d'envisager des repères en mouvement relatif comme en relativité. Comme nous l'avons dit, il n'y a pas de cadre neutre sans phénomène et le phénomène définissant le repère au repos est aujourd'hui la propagation de la lumière ; *l'axe spatial représente en somme la trajectoire de la lumière et contient déjà*

[2] Nous commençons par *un* phénomène défini par sa paire (f, g), mais comme nous venons de le dire, il ne peut être défini tout seul et le sera par comparaison avec au moins un autre phénomène (h, i) ; ce dernier peut être associé à l'espace-temps (r, t), comme le texte va le préciser.

[3] Nous n'utiliserons pas de symboles particuliers pour les vecteurs et supposerons que le contexte permettra de comprendre.

espace et temps. Le lien entre deux repères est contraint par l'adoption du même ratio entre unités de temps et d'espace pour chacun d'eux, appuyé sur le même phénomène ; il y a donc une correspondance entre l'élection d'un phénomène élémentaire permettant de définir temps et espace dans un seul repère (ici la propagation de la lumière) dans l'équation r = ct (à prendre de façon vectorielle), et les transformations de Lorentz reliant deux repères R et R' (à transcrire avec six relations pour les équations reliant les six composantes de r' et t' vectoriels à r et t) ; nous écrivons cette dernière simplement comme :

$$r' = ar + bt$$
$$t' = br + at \qquad (1)$$

La symétrie des points de vue spatial et temporel se traduit par la symétrie de la matrice reliant $(r, t)^T$ à $(r', t')^T$ (deux coefficients a et b seulement, pour c = 1). A ce stade, on ne s'intéresse pas (on fait comme si c'était possible) à d'autres phénomènes physiques que le phénomène élémentaire de propagation, qui reste implicite ou caché en grande partie. Les transformations de Lorentz pour un autre phénomène φ_1 marqué par la dualité (f, g) auront la même expression que (1) (ou des expressions s'en déduisant par transformations linéaires ; voir Guy, 2012) et pourraient donc fournir la définition d'un espace-temps au même titre que φ_0 (voir plus loin).

2. Compositions / oppositions entre les phénomènes

Si l'on veut bien y regarder de plus près, et en prolongement de ce que nous venons de voir à l'instant, on conviendra que, pour parler d'un phénomène (étymologiquement, ce qui « apparaît »), il faut que quelque chose se manifeste, se détache de la « scène », ou en fonction de ce que nous venons de dire, qu'un deuxième phénomène φ_1 s'oppose au premier phénomène implicite φ_0 qui fixe le cadre spatio-temporel de départ. On peut dire encore que, pour parler d'un phénomène, on oppose implicitement une situation où il agit, ou se manifeste, à une situation où il n'agit pas, ou ne se manifeste pas. Cette opposition entre phénomènes (un phénomène φ_1 que l'on pointe –marqué par les champs (f, g) d'une part, et un phénomène implicite φ_0 servant à définir le champ (r, t) d'autre part) se lit sur les lois de

degré zéro (Guy, 2012) qui composent ou associent les deux paires de champs (r, t) et (f, g), soient :

$$\frac{\partial f_i}{\partial t_j} = \frac{\partial g_j}{\partial x_i} \qquad (2)$$

Dans ces relations, chaque champ est défini par trois composantes : (f_1, f_2, f_3) pour f, (g_1, g_2, g_3) pour g, (x_1, x_2, x_3) pour r, et (t_1, t_2, t_3) pour t ; on voit que les rôles de f et g d'un côté, x et t de l'autre pourraient être échangés. Nous parlons de lois de degré zéro, exprimant le minimum que nous puissions dire sur les grandeurs physiques : on ne les connaît pas « seules » de façon substantielle, on ne connaît que leurs variations dans l'espace et le temps, reliées à des variations d'autres grandeurs en dualité. On dérive de ces relations de nombreuses autres, en particulier en faisant apparaître le temps scalaire t, module du vecteur t. Nous voyons dans ces lois de degré zéro (qui sont invariantes de Lorentz) certaines formes des équations de Maxwell, des lois de la mécanique et de nombreuses lois. En relativité restreinte, où un seul phénomène (la propagation de la lumière) est désigné, on ne voit pas d'autre phénomène opposable, contrairement à ce que l'on vient de postuler. On peut répondre que le phénomène φ_0 est opposable à tous les φ_i potentiels. Ainsi, en premier lieu, on annonce que la propagation de la lumière se fait dans le vide, par opposition à celle dans la matière, (renvoyant alors à l'électromagnétisme ou à la relativité générale). On peut dire aussi que le premier phénomène φ_0 sur lequel nous construisons le cadre d'espace-temps de départ (le mouvement de la lumière assorti de l'hypothèse c = cste), se détache de tous les mouvements inconnus et inconnaissables φ_i qui constituent le réel « voilé » ou « fond d'incomplétude » ; c'est au milieu d'eux que l'on a pris la décision d'élire la lumière comme phénomène sur lequel s'appuyer pour arrêter une régression qui nous mènerait à l'infini, avec le postulat épistémologique c = cste (ceci se comprend dans une pensée de la relation, voir Guy, 2011a).

En relativité générale, on ne manipule apparemment qu'une seule métrique associée à un unique espace – temps (dont on dit qu'il est déformé par la matière). En réalité, il y a bien deux points de vue couplés, marqués par la distinction entre la longueur dl associée à la métrique d'ensemble, et les petites variations des coordonnées dx_i. Ainsi dans $dl^2 = \Sigma g^{ij} dx_i dx_j$ on oppose implicitement une situation sans matière avec $g^{ij} = 1$ (dl et les dx_i ont mêmes

valeurs) à une situation qui en contient avec $g^{ij} \neq 1$ (dl et les dx_i sont différents). C'est-à-dire que, dans son esprit, la relativité générale relève de la situation d'opposition entre phénomènes que nous mettons en relief. Nous ne discutons pas ici la dimensionnalité de l'espace associée à la métrique, à récrire en 3 + 3 dimensions[4], ni la nécessité, pour le bon fonctionnement de notre approche, de faire apparaître deux champs en dualité pour la gravitation ; dans la suite nous considérerons implicite cette possibilité, avec celle de reprendre la relativité générale dans cette perspective (voir section 8). En relativité générale, cette possibilité d'opposer deux classes phénomènes est également présente de façon cachée quand on parle de « courbure de l'espace » par les masses : on compare par exemple la trajectoire d'un rayon lumineux venant d'une étoile dans le cas où le soleil est absent (trajectoire non courbée, on parle de ligne droite ; il s'agit du phénomène élémentaire sans gravitation) à ce qu'elle est en présence de la masse du soleil (propagation en présence de gravitation, deuxième phénomène). On le fait pour le soleil (expérience de l'éclipse) mais on considère implicitement qu'on peut toujours le faire, à chaque fois que l'on écrit une métrique non euclidienne.

3. Espace-temps « droit » / espace-temps « courbe »

Les noms d'espace et de temps sont associés au premier phénomène, souvent implicite, auquel on s'intéresse ; on lui associe une régularité par rapport à laquelle le second phénomène (celui que l'on appelle comme tel) se déploie de façon « courbe ». La composition ou opposition entre phénomènes se manifeste ainsi par une composition ou opposition entre les espace-temps qui leur sont rattachés : le premier « droit », défini par le quadrillage régulier et rectiligne des coordonnées fixant un cadre, et le second « courbe », associé au second phénomène qui se manifeste par opposition au premier.

Nous pouvons illustrer cette opposition en reprenant l'exemple de la déviation de la lumière en provenance d'une étoile par le soleil. Dans la mesure où, dans notre compréhension, les

[4] Il nous paraît utile de faire une distinction entre la *dimension* (au sens de dimensionnalité) de l'*espace physique ou géométrique* où sont définis les déplacements des objets (avec un sens à la fois spatial et temporel ; pour nous elle vaut 3 –cf l'analyse de H. Poincaré dans la valeur de la science, 1905-) et la *dimension* de l'*espace du modèle* ou *espace mathématique* construit à partir de l'espace physique. Le même mot de *dimension* est utilisé mais recouvre deux concepts différents. Il nous parait pertinent de nous appuyer sur un espace du modèle à 6 dimensions (en isolant 3 dimensions d'espace, dans son sens restreint sans temps, et 3 dimensions de temps), avant de construire éventuellement un espace mathématique à 4 dimensions (3 d'espace et une de temps).

règles et horloges sont définies par le même phénomène de propagation, celui de la lumière en l'occurrence, le trajet même du photon qui contourne le soleil est une visualisation directe de l'espace-temps associé à cette lumière (Figure 1 ; les dessins qui suivent sont un support de notre discussion qualitative). On oppose ainsi le trajet d'un photon depuis une étoile en l'absence de soleil (nous l'appelons trajet droit) au trajet du photon lorsque le soleil est présent lors d'une éclipse (nous l'appelons courbe). L'opposition des mots « droit » et « courbe » est rendue possible par l'opposition des deux expériences, dans la mesure où, en l'absence de soleil, nous avons commencé par déclarer droit le trajet du photon : ce qui est courbe est qualifié tel par comparaison. Mais si le soleil était toujours présent lorsque nous regardons cette étoile, nous déclarerions droit le trajet du photon qui nous en parvient. Le choix des mots utilisés dépend en somme du phénomène que nous choisissons comme base, comme référence ; c'est une question de point de vue, il faut bien commencer par un bout.

Dans l'esprit de notre approche où les mesures d'espace et de temps sont associées à un mouvement (via un « phénomène »), nous pouvons véritablement dire que les espace-temps sont des *trajectoires*, et utiliser de préférence ce terme plus conforme à notre point de vue ; les comparaisons / oppositions entre phénomènes et espace-temps faites à l'instant sont dans une certaine mesure simplement des comparaisons / oppositions entre trajectoires[5].

4. Echanges entre espace et temps « premiers », et champs physiques

Ce qui peut alors se faire, comme nous avons commencé à le suggérer, c'est que l'on veuille intervertir les deux points de vue précédents, et voir la seconde trajectoire rectiligne et la première courbe (Fig. 2). Cela revient à échanger le champ élémentaire d'espace-temps associé au phénomène premier et implicite de la propagation de la lumière dans le vide, avec le champ physique dérivé, associé à la gravitation dans notre exemple, qui se manifeste dans le phénomène « second » de propagation de la lumière « déformée » par des masses attirantes.

Il peut y avoir toute une série de raisons de permuter les points de vue, ou de faire apparaître en premier le second phénomène (et le rendre implicite), et le premier dérivé (et explicite).

[5] Les étalons d'espace et de temps fournis par les règles et les horloges disparaissent en fait derrière le seul « étalon de mouvement » fourni par la lumière (Guy, 2013d), donnant ainsi à notre utilisation du concept de trajet ou trajectoire plus de pertinence.

Dans le cas de l'influence d'une distribution de masses sur la trajectoire de la lumière, on peut être dans une situation où la quantité de matière est telle que la trajectoire rectiligne dans le vide apparaît toute idéale. On s'appuie ainsi sur le trajet effectif de la lumière auquel on associe les mesures d'espace et de temps. C'est ce qui se passe en relativité générale lorsque l'on passe des intervalles de temps et d'espace dx_i et dt à la métrique d'ensemble dl via le tenseur métrique g^{ij} fonction de la distribution des masses. On échange le temps et l'espace dans leur acception première (associés aux dx_i et dt) contre un nouveau temps et un nouvel espace, associés à une nouvelle « ligne droite » marquée par dl (la recherche de géodésiques marque bien ce dl comme ligne droite).

On peut aussi imaginer diverses situations où les déplacements qui comptent véritablement pour l'observateur, et dont il veut par exemple économiser la dépense énergétique, sont associés à un phénomène distinct de la propagation élémentaire de la lumière ; il est alors opportun de mesurer temps et espace eux-mêmes par cette dépense plus directement parlante. Dans de nombreuses situations de la vie de tous les jours, on n'utilise pas directement des unités standard de longueur (des mètres, des kilomètres) pour désigner une distance, mais des unités plus proches de ce qui compte effectivement pour l'utilisateur humain, par exemple des heures de marche lorsqu'on est en montagne. Si l'on dispose d'un hélicoptère et que l'on ne se soucie pas de la dépense énergétique, l'équivalence directe subsiste entre la dépense de l'appareil et la distance exprimée en unités standard. Si l'on voyage en voiture sur des routes droites en terrain plat, on peut parler indifféremment de distance parcourue et d'essence consommée ; mais si on circule en montagne avec des routes sinueuses, la distance évaluée en ligne droite a moins de sens, et on peut vouloir exprimer les distances en essence consommée. Cette opposition entre le local et le global renvoie aussi à des questions d'échelle : en prenant encore l'exemple de la lumière, on considèrera, à l'échelle de notre terre, que son trajet est rectiligne (associé à un φ_0 pour r et t), alors qu'à l'échelle de son voyage entre des galaxies, la courbure de son trajet doit être pris en compte (associée à un φ_1 pour f et g).

Dans ces situations, les déplacements à calculer sont liés aux champs locaux éventuellement variables (on peut imaginer que la route elle-même de tout à l'heure soit déformée au cours même de la progression du voyageur). On ne peut plus alors avoir un point de vue quantitatif global, c'est-à-dire annoncer à l'avance une distance et un temps ayant une valeur d'ensemble. Cela ne veut pas dire que l'espace et le temps (ou le background) ont disparu, mais on ne peut les associer, dans leur sens premier, à des mesures d'ensemble, ils n'ont qu'un sens local ; on

perd la possibilité de définir un espace-temps synchronisé, en en reste à un temps multiple, éclaté (à l'instar de ce qui se fait en relativité générale). Ce qui a disparu c'est le temps, ou l'espace, rapportés à leurs définitions premières (comme si l'on avait voulu leur donner une signification fondamentale), mais, une fois l'échange entre points de vue effectué, on peut à nouveau parler de temps et espace, c'est alors au sens du second point de vue. Dans les conditions où l'on se situe, on ne voit plus les anciens temps et espace et les anciennes lignes droites associées ; on voit les nouvelles lignes droites auxquelles on peut bien attribuer les mots temps et espace[6]. Le cadre régulier est devenu davantage encore implicite ou invisible, mais il est toujours nécessaire pour établir une comparaison avec le trajet irrégulier que l'on met en avant dans la nouvelle situation. Il est en somme caché ; ceci se joue dès que l'on a envisagé la dimensionnalité d'une variété, défini des coordonnées et des axes pour mesurer les choses, dès que l'on a opposé un phénomène qui se construit à un autre phénomène implicite que l'on appelle absence de phénomène (on pourra aller jusqu'à dire que le temps est caché dans la droite réelle qu'il paramètre, Teissier, 2009). L'échange entre les champs (r, t) et (f, g) est d'abord local, quitte ensuite (comme on le fait en relativité générale) à relier les « cartes » locales dans des « atlas ».

L'échange entre deux phénomènes est une façon de dire qu'il n'y a pas de différence fondamentale entre scène (« background ») et acteurs, c'est une question de choix et de point de vue. On peut dire aussi qu'ils se définissent l'un par l'autre. Reconnaître cela est utile pour prendre du recul par rapport à certaines expressions courantes en relativité générale : pas plus que de déformation de l'espace-temps par la matière, il n'y a de déformation d'une trajectoire par la matière : une trajectoire est ce qu'elle est, elle n'est pas « modifiée » ; elle n'est vue / déclarée courbe ou droite que par rapport à une autre trajectoire qui est vue / déclarée droite ou courbe. Il n'y a que des comparaisons entre trajectoires associées à tel ou tel phénomène, et choix d'une trajectoire « de base » pour définir la régularité. On pourrait opposer des axes spatio-temporels définis par le mouvement de neutrinos presqu'insensibles aux masses à ceux définis par celui de photons, et qui sont « courbés » par rapport aux premiers (quand on évoque le trajet entre Paris et New-York on ne pense pas à la ligne droite qui traverserait la terre et que pourraient emprunter les neutrinos évoqués à l'instant).

[6] Dans l'exemple de tout à l'heure, on mesure les distances et les temps par des litres d'essence, au prix d'un changement de point de vue (l'essence est « première », temps et espace « initiaux » sont dérivés), on a changé de vocabulaire, on a changé de choix d'unités. Mais si on le souhaite, on a la liberté de rétablir le vocabulaire ancien.

Pour obtenir une durée en relativité générale, on parle du temps propre à intégrer sur l'ensemble de la trajectoire d'un mobile, mais ce temps propre est implicitement comparé à une durée « rectiligne » associé au phénomène non perturbé. Le temps propre n'est alors pas propre au mobile, ce qui n'a pas de sens ; il est propre à la relation aux lieux traversés, il reflète un lien temps-espace local, « perturbé » (à comparer avec un lien temps-espace sans perturbation dans le phénomène « libre » initial).

Si on revient à notre discussion générale avec utilisation des symboles (f, g) pour désigner les champs en dualité (le champ d'espace-temps de départ est désigné par (r, t)) on peut donc dans certaines situations avoir intérêt à dire : *les champs f et g sont notre référence et les mesures d'espace et de temps r et t sont des fonctions des champs f et g*. On fait alors un échange entre les paires (f, g) et (r, t) ; *il est rendu possible par la symétrie des lois de degré zéro, traduite encore par l'identité des transformations de Lorentz pour les paires (r, t) et (f, g), avec le caractère vectoriel de la variable associée au temps.* Regardons l'exemple des champs électrique et magnétique associés à une charge mouvante, avec E = E(r, t) et B = B(r, t) ; on peut inverser ces lois en r = r(E, B) et t = t(E, B) où les vecteurs E, B, r, t ont tous la même dimension (nous admettons alors implicitement que, ce faisant, nous ne sommes pas « bloqués » par la relativité générale qui se donnerait le monopole de la définition de r et t ; voir infra).

Remarquons enfin que, comme nous l'avons dit, si nous voulons le fonctionnement des échanges (r, t) (f, g) entre champs d'espace et temps et autres champs physiques pour les exemples empruntés à la gravitation, cette dernière doit être décrite par une telle paire ; nous en reparlerons dans la section 9.

5. Valeurs numériques attachées aux variables d'espace et de temps ou leurs substituts

Nous pourrions proposer des calculs pour définir de façon quantitative les diverses trajectoires dont nous venons de parler en fonction des équations des champs φ_1 (f, g) et des grandeurs associées, en composition avec les champs de départ φ_0 (r, t). Nous ne le ferons pas ici et postulerons que ces trajectoires sont définies par des valeurs constantes de certaines grandeurs associées aux champs φ_1 (potentiels, composantes des champs ou grandeurs obtenues par

divers changements de variables ; ainsi dans les exemples précédents d'évolution en montagne, on peut dire que les déplacements qui « comptent » correspondent à des différences du champ de pesanteur g, au contraire des équipotentielles). Ceci peut se comprendre aussi dans le cadre de principes variationnels incorporant les lois utilisées et des (moindres) distances associées définissant des métriques (voir par exemple Basdevant, 2002). Ainsi nous supposerons que l'on peut in fine remplacer le quadrillage (x, t) par le quadrillage (f, g) où x et t apparaissent alors fonction de f et g. On peut aussi, si on le désire, utiliser les mêmes unités pour les divers champs.

6. Remarques sur la quantification et les approches probabilistes (l'inspiration de la mécanique quantique)

La quantification

Les aspects de quantification sont à comprendre, comme ce qui précède, par des oppositions ou compositions entre points de vue. La quantification n'appartient en propre à aucun phénomène ; elle ne se révèle, ne se manifeste, que par la comparaison de deux échelles, de deux phénomènes. Sinon comment la verrait-on, comment la mettrait-on en évidence, comment en parlerait-on ? On a besoin de penser les intermédiaires (premier point de vue, relions le à un phénomène φ_0) qui vont être sautés dans la quantification (second point de vue, relions le à un phénomène φ_1). C'est une question exprimable en termes de probabilité : les valeurs manquantes ont une faible probabilité, ou une probabilité nulle, d'apparaître. Suivant l'échelle que l'on choisit comme point de départ, la quantification est attribuée à l'un ou l'autre des phénomènes ; c'est-à-dire que si l'on a choisi φ_0 comme base, c'est φ_1 qui apparaît ou est dit quantifié ; mais l'on peut échanger les points de vue. Cette façon de comprendre répond aux objections de Simone Weil (1942) qui n'acceptait pas que l'on puisse définir des quanta d'énergie sans envisager d'intermédiaires ; toutes les grandeurs physiques (en particulier l'énergie) se ramènent selon elle à des mouvements de poids dans l'espace et le temps, et sauter des portions d'espace ou de temps n'a pas de sens.

En tant que tels, les aspects de quantification ne sont d'ailleurs pas spécifiques à la mécanique quantique, mais apparaissent dans les solutions d'équations aux dérivées partielles avec conditions aux limites (Basdevant et Dalibard, 2002). Dans ce cas, l'espace de base où l'on pense l'ensemble des valeurs des grandeurs (qui vont être « quantifiées ») peut être l'espace-

temps « habituel ». Les variables d'espace et de temps interviennent dans les équations aux dérivées partielles modélisant le problème étudié. Si l'on prend l'exemple de la position d'un électron dans un atome, modélisée par une équation de Schrödinger (fonction des variables d'espace et de temps), nous opposons une situation implicite où toutes les positions sont possibles (appelons cette situation φ_0 (r, t)), à une répartition inhomogène, quantifée où la position de l'électron est restreinte à des rayons particuliers (comme régi par l'équation, appelons cela φ_1). A ces positions particulières de l'électron sont associées des valeurs discrètes de l'énergie. On peut alors écrire des lois E = E(r) (où l'énergie E est fonction de la distance r) qui font apparaître des quantifications. Si plutôt que se guider sur la distance r, on préfère se guider sur une échelle continue d'énergie, on peut inverser les lois E(r) en r = r(E) et définir alors un espace géométrique quantifié. C'est-à-dire que *les intervalles d'espace correspondant aux différentes valeurs de l'énergie n'ont pas toutes la même probabilité* (voir aussi Fig. 4). On peut exprimer cela en termes de longueurs d'onde des rayonnements émis lors des transitions entre différentes positions de l'électron : on oppose une situation implicite où toutes les longueurs d'onde λ sont également représentées dans l'espace, à cette autre situation, où la lumière interagit avec la matière (les électrons de l'atome), et où tous les λ ne sont pas également représentés mais apparaissent quantifiés.

La nature nous donne, dans le domaine macroscopique, de tels exemples d'une quantification du temps et/ou de l'espace, à ne pas comprendre « seule », mais par composition / opposition entre deux points de vue. On la met en évidence par l'échange entre l'échelle spatio-temporelle de départ et l'échelle relative à la grandeur physique dont on étudie la répartition dans l'espace et le temps. Nous avons examiné nous-même des phénomènes se développant dans l'espace et le temps et exhibant des changements brusques (type ondes de choc) dans des systèmes d'équations aux dérivées partielles (Guy, 1993, 2005). La quantification concerne des compositions minérales dans des roches, ou, par échange entre les champs de composition et les champs d'espace-temps (r, t), l'espace et le temps eux-mêmes. Autrement dit si l'on repère l'espace et le temps par les concentrations des constituants chimiques, alors l'espace et le temps standards sont des champs dérivés et apparaissent quantifiés. Le temps, ou l'espace, associés à une composition intermédiaire entre les compositions quantifiées, est de faible probabilité par rapport au temps ou l'espace associés aux compositions formant les bornes de la quantification (Fig. 4). Nous avons parlé de quantification par interaction fluide-roche. Dans le cas de la physique, l'opposition entre les deux points de vue appelés φ_0 et φ_1 (et qui

fait apparaître une quantification) peut se comprendre en disant que la quantification n'est pas dans les propriétés de la lumière seule (φ_0), ou de la matière seule (φ_1), mais dans la composition ou l'interaction entre lumière (φ_0) et matière (φ_1). Dans l'équation de Schrödinger, l'interaction lumière matière est écrite dans l'hamiltonien où le potentiel auquel est soumis la matière (l'électron) est en général le potentiel électromagnétique. On fait ainsi apparaître une symétrisation entre lumière et matière. Ces considérations qualitatives demanderaient un approfondissement théorique (toutes les équations aux dérivées partielles ne sont pas à mettre sur le même plan en ce qui concerne les effets de quantification ; il faut en particulier distinguer les cas linéaires et non-linéaires).

Si l'on se place plus généralement dans l'espace (ou ensemble) des événements (ou des épreuves de la théorie des probabilités) sur lequel on définit des probabilités, on fait apparaître encore deux points de vue : d'un côté l'espace des événements permet d'envisager tous les « intermédiaires » des grandeurs étudiées, et de l'autre, et par opposition, les valeurs des probabilités qu'on leur associe permettent d'éventuelles quantifications. Il faudrait en toute rigueur distinguer le niveau des événements de celui de la tribu que l'on peut construire sur eux, les probabilités étant définies sur les éléments de cette tribu ; si l'on se place dans le cadre de la tribu borélienne de la droite réelle d'un côté, et du segment [0, 1] pour la définition des probabilités de l'autre, on est bien ramené à des échanges possibles entre portions de R comme décrit de façon qualitative sur la Fig. 4. Nous faisons l'hypothèse que, dans l'espace des événements, sont toujours cachées d'une façon ou d'une autre les dimensions spatio-temporelles habituelles (voir Guy et Bay, en préparation).

Approches probabilistes générales

Si la quantification manifeste des aspects probabilistes, ce fait se relie à l'utilisation générale de concepts probabilistes dans la théorie quantique. En physique quantique, on ne représente pas les objets étudiés comme des points matériels ayant une localisation précise, mais on leur associe une fonction étalée dans l'espace, dont l'amplitude va donner une probabilité de présence : c'est la fonction d'onde ψ. On peut justifier cet usage en disant qu'une gaussienne (fonction présentant un certain étalement comme la fonction d'onde) est l'approximation d'un Dirac (fonction en tout ou rien associée à la présence ou l'absence d'un point matériel en un endroit parfaitement défini). Ce choix est fondamental pour la suite du développement

mathématique de la théorie ; il en découle en effet toute une série de résultats comme l'équation de Schrödinger et les règles de quantification, les relations dites d'indétermination ou d'incertitude (dérivant des propriétés de la transformation de Fourier appliquée à la fonction d'onde), la définition d'opérateurs, la correspondance entre opérateurs et grandeurs de la mécanique classique etc. Cette approche probabiliste peut a priori s'appliquer à divers aspects de la réalité physique. Dans l'esprit de notre propos, il faut remarquer alors que nous aurons besoin de deux vecteurs ψ et φ en dualité, avec chacun trois composantes (voir section 8.2) pour exprimer des lois de degré zéro, ce qui permettra aussi des échanges, au sens où nous l'avons défini, entre les champs (r, t) et les champs (ψ, φ).

7. Multiplicités d'espace-temps en composition

L'échange entre deux phénomènes faisant disparaître l'espace et le temps n'est pas un but en soi. Comme nous l'avons dit, il peut être nécessité par la plus grande adaptation d'une représentation par rapport à une autre. Il fait aussi apparaître les différents choix sous-jacents aux diverses représentations utilisées, et les manières de progresser dans les cas nouveaux qui s'offrent à nous. Dans la section précédente, où deux phénomènes φ_1 et φ_0 sont définis en composition, l'échange entre eux ne semble pas poser de difficulté de principe, sinon technique. Il faut donc nuancer ce que nous avons écrit dans le résumé ou l'introduction : en toute rigueur, le problème de compatibilité entre des phénomènes par rapport à leurs représentations de l'espace et du temps ne se pose pas quand ils sont deux. Ceci se comprend à condition d'accepter le point de vue selon lequel on a dès le départ deux phénomènes au moins, et on compte pour un phénomène ce qui permet de tracer les axes de coordonnées. L'élucidation de ce point est utile pour discuter le problème de la coexistence entre la mécanique quantique et la relativité générale ; dans l'examen de leurs relations, il conviendra d'examiner « combien » de phénomènes sont concernés.

Lorsque, de façon générale, on se trouve devant plus de deux phénomènes, dans le sens que nous venons de redonner, soient par exemple les phénomènes φ_0 associé aux champs (r, t), φ_1 aux champs (f, g) et φ_2 aux champs (h, i), il peut y avoir problème ; divers cas se présentent.

1. Si les trois phénomènes sont indépendants, c'est-à-dire si les champs (f, g) et (h, i) n'ont pas de facteurs physiques communs, on peut faire différents choix :

1A. - remplacer (r, t) par (f, g) ou (h, i) indifféremment. Il y a en tout trois possibilités de choix pour les champs de base définissant espace et temps : (r, t), (f, g) ou (h, i). Le choix retenu dépend de ce qui est le plus commode. On pourra par exemple écrire les lois régissant (h, i) en fonction du champ de base (f, g), le temps et l'espace étant alors aussi « dérivés » par rapport à f et g.

1B. - éliminer (r, t) et ne considérer que la paire {(f, g) (h, i)} ou {(h, i) (f, g)} suivant les champs sur lesquels on s'appuie pour définir notre vocabulaire d'espace et de temps.

1C. – faire avec deux associations strictement indépendantes, soient {(r, t), (f, g)} d'un côté et {(r, t), (h, i)} de l'autre, chaque association peut être remaniée à loisir, en procédant à des échanges entre (r, t) et (f, g), ou entre (r, t) et (h, i). Il y a dans ce cas deux espace-temps indépendants qui coexistent dans chaque association, c'est-à-dire deux façons différentes de définir r et t en fonction des phénomènes différents que l'on envisage séparément. C'est le cas où les particules étudiées peuvent être partagées entre celles qui ne seraient sensibles qu'aux champs (f, g), et celles qui ne seraient sensibles qu'aux champs (h, i).

2. Il peut y avoir des situations de conflit où les associations {(r, t), (f, g)} d'une part et {(r, t), (h, i)} d'autre part ont été définies et étudiées de façons séparées, mais où l'on s'aperçoit qu'elles ne sont pas indépendantes et donc non compatibles. C'est-à-dire qu'elles mettent en jeu des facteurs physiques communs, qui lorsqu'ils s'expriment modifient aussi bien les valeurs des champs (f, g) que des champs (h, i). On ne peut pas alors, en procédant à un échange avec φ_0, définir indifféremment l'espace – temps en s'appuyant sur φ_1 ou en s'appuyant sur φ_2 (Figure 3). Il faut alors reprendre l'écriture des équations. Différents cas peuvent se présenter.

2A. Il se peut que l'une des deux théories ayant conduit à l'écriture des champs (f, g) ou des champs (h, i) respectivement soit à abandonner car elle est très malcommode par rapport à l'autre. C'est comme si on voulait définir temps et espace en s'appuyant à la fois sur la propagation du son et sur la propagation de la lumière. On va abandonner l'usage du son, non que la démarche appuyée sur le son soit fausse dans l'absolu, ce qui n'a pas de sens, mais sa

mise en œuvre est moins facile et d'applicabilité moins générale que celle appuyée sur la lumière[7].

2B. Il se peut aussi que, à cause d'interactions entre eux, ce soient les deux phénomènes qu'il faille reprendre et récrire dans une formulation unique qui les associe mieux.

Dans ces situations, nous comprenons que le problème fondamental n'est pas relatif à la constitution de l'espace et du temps : ils n'ont pas d'existence « en eux-mêmes », ils sont « seconds » et déterminés par les phénomènes. Il n'y a pas de blocage de notre démarche, il y a « simplement » la nécessité de remettre l'ouvrage sur le métier et se demander : *quelles conventions sont-elles les plus utiles à adopter ?*

Comment alors procéder pour établir un formalisme commun ? Nous ne discutons pas la méthode générale ; ce peut être par exemple d'écrire des formulations variationnelles (fondées sur un concept unificateur d'énergie permettant des « transferts » d'un phénomène à un autre, avec utilisation de Lagrangiens ou d'Hamiltoniens) et des lois de degré zéro faisant apparaître les moments associés à l'énergie. Dans ces diverses situations, il est bien possible qu'il ne soit pas praticable de définir des paramètres globaux de temps et d'espace pour l'ensemble du système et que l'on ne puisse le faire que localement en fonction de la dynamique du système. Les divers choix adoptés doivent être assumés dans leurs conséquences et dans le bouclage des concepts et des équations.

Le cas de tels conflits peut être par exemple celui d'une situation où l'on a à la fois des phénomènes gravifiques et des phénomènes électromagnétiques (par opposition à la simple propagation de la lumière dans le vide, sans particules massiques ni chargées) ou, pour les cas qui nous intéressent plus spécialement ici, où l'on a à la fois des phénomènes relevant de la gravitation et des phénomènes décrits par la mécanique quantique. Cette dernière contient dans son écriture les phénomènes électromagnétiques, auxquels on peut rajouter les interactions forte et faible. Si on rajoute la gravitation aux potentiels du formalisme quantique (on sait que c'est possible), on ne peut plus opposer la gravitation à la mécanique quantique ni discuter son rôle « privilégié » pour définir l'espace et le temps (ce qui d'ailleurs pour nous n'est pas un inconvénient, comme on le redira plus bas).

[7] L'exemple choisi ne cadre pas complètement avec le point de vue général proposé. Retenons qu'il y a des cas où, pour des raisons variées, on est amené à éliminer un des deux phénomènes φ_1 ou φ_2.

Deuxième partie : application à la mécanique quantique et à la relativité générale

8. Dans quelles directions ré-examiner la relativité générale et la mécanique quantique ?

Nous pouvons tirer de ce qui précède quelques premières leçons : -la relativité générale n'a pas le monopole de l'espace et du temps ; - la mécanique quantique n'a pas le monopole de la quantification. On voit donc que, d'une certaine façon : - il n'y a pas que la gravitation ou l'espace-temps que l'on peut quantifier ; - il n'y a pas que la mécanique quantique que l'on peut rendre indépendante d'un cadre extérieur. Comment reprendre alors notre question de départ, sur la coexistence entre la mécanique quantique et la relativité générale ? Dans notre compréhension, on ne peut chercher à ajuster entre elles ces deux théories comme si elles étaient achevées et intangibles, en particulier dans leur représentation de l'espace et du temps. C'est chacune d'elles qu'il faut revoir quant à son fonctionnement par rapport au temps et à l'espace (ce constat rejoint celui fait par Lee Smolin, 2006, pour qui le problème du raccord entre les deux théories repose sur une mauvaise compréhension fondamentale de ce qu'est le temps ; plus précisément, pour nous, il s'agit d'une mauvaise compréhension des relations entre le temps et l'espace, autre visage du temps). C'est seulement après une telle révision des deux théories que l'on pourra songer sérieusement à les relier ou les associer[8].

8.1 Reprendre la relativité générale

Certains résultats précédents sont conformes à l'esprit de la relativité générale. Ainsi le statut de l'espace et du temps comme variables dynamiques ou champs (Rovelli, 2004, parle également d'espace et temps comme *champs* en relativité générale), l'absence de temps unique synchronisé pour les modèles d'univers (ou la multiplicité des temps), la « disparition » de l'espace et du temps (Saint-Ours, 2011 ; Rovelli, 2006) etc. Nous avons retrouvé cela de façon générale à partir de l'examen du « partage » du temps et de l'espace entre plusieurs phénomènes, et la relativité générale n'en a donc pas l'exclusivité. Elle n'est pas *la* théorie de l'espace et du temps. L'espace-temps n'est pas déformé par la matière : il n'y a pas d'espace-temps primordial en attente d'être déformé. Pas plus que l'espace, le temps ne disparaît dans l'examen des situations locales « influencées » par les masses ; il s'agit d'un

[8] Il s'agit fondamentalement de se placer dans le cadre d'une pensée relationnelle et non substantielle et, techniquement, en 3 + 3 dimensions.

échange de points de vue et de façons d'appeler les choses. Espace et temps sont présents dans tout phénomène, dans toute relation (Guy, 2011a). La relativité générale n'est d'ailleurs pas conforme à ce qu'elle dit d'elle-même, en annonçant que l'espace et le temps y sont sur le même plan et, à la limite, non distingués : elle se place en effet à l'avance en quatre dimensions et distingue soigneusement les facteurs temporels et spatiaux dans les métriques (l'utilisation du qualificatif « pseudo » dans la désignation des métriques pseudo-euclidiennes ou pseudo-riemanniennes de la relativité rappelle que temps et espace restent distingués a priori dans cette théorie). Notre approche où espace et temps sont strictement de même nature (on peut tout désigner avec le vocabulaire de l'un ou l'autre) est au contraire une façon de parachever l'objectif de la relativité générale de ce point de vue.

Comment est-on arrivé à cette situation de monopole de la relativité générale sur l'espace et le temps ? Le principe d'équivalence énoncé par Einstein a eu un rôle majeur : la chute libre semble effacer la gravitation, et un choix d'espace-temps est équivalent à un champ de pesanteur. Ce constat est appuyé sur la deuxième loi de Newton qui lie force, accélération et masse. A chaque fois qu'on parle d'accélération, on l'associe à une masse, et la gravitation se manifeste alors (le principe d'équivalence relie aussi masse inerte et masse pesante). Nous devons prendre du recul par rapport à cette démarche, en faisant remarquer que la deuxième loi de Newton n'est pas spécifique à ce qui relève des masses, mais doit être comprise de façon plus générale comme exprimant une dualité entre une énergie et un moment associé (Guy, 2012). Cette dualité s'exprime dans une loi de degré zéro écrite pour tout phénomène. On peut envisager une « chute libre » effaçant un champ électromagnétique agissant sur des particules insensibles à la masse ; l'actualité du boson de Higgs nous rappelle que l'on peut envisager des particules sans masse (insensibles à la gravitation). Pour des phénomènes où l'on peut ou veut négliger la masse, il y a équivalence entre la loi de Newton mettant en jeu une accélération et une chute libre sans gravitation ! Divers auteurs ont fait des remarques dans cette direction (Basdevant, 2002, donne l'impulsion en présence de champ magnétique, différente de mv ; dans son traité de physique, Feynman, 1979, aborde aussi la question de la dualité énergie / quantité de mouvement pour les phénomènes électromagnétiques en dehors des masses). Dans le cas où des phénomènes électromagnétiques se rajoutent à des effets gravitaires, le tenseur énergie-impulsion contient des termes d'origine électromagnétique, en plus des termes gravitationnels, et un mouvement de « chute libre » n'annule donc pas sélectivement le champ de pesanteur mais une combinaison des deux champs (électromagnétique et de gravitation).

Nous observons enfin que les équations de la gravitation (auxquelles se ramènent celles de la relativité générale pour c tendant vers l'infini) ne répondent pas aux conditions de symétrie que nous avons posées en écrivant les relations de degré zéro. Ces conditions sont cruciales pour permettre les échanges généraux entre champs (r, t) et (f, g) que nous avons discutés. Sur cette base, nous devons reprendre les équations de la gravitation (voir une tentative dans Guy, 2010b) en cherchant une forme générale comprenant un champ additionnel h (forces dépendant des vitesses des masses en mouvement) ; comme on l'a indiqué dans l'article cité, cela fournit d'ailleurs des pistes pour discuter les questions de matière noire et d'énergie noire. Cette approche ne sera pas sans conséquence sur la façon de formaliser la relativité générale (en modification ou en remplacement de cette théorie ?). Il reste enfin, dans le fil de notre démarche, la nécessité de reprendre l'ensemble du formalisme en 3 dimensions ou 3 + 3 dimensions en prenant pour le temps un point (mobile) dans l'espace à trois dimensions. Quant aux divergences mathématiques présentes dans la relativité générale, les remarques que nous avons faites plus haut à propos de la non déformation de l'espace-temps par la matière, assorties au caractère non substantiel mais relationnel de l'énergie (Guy, 2012) peuvent-elles les éviter ?

8.2. Reprendre la mécanique quantique

En mécanique quantique, l'outil mathématique de base est la fonction d'onde : c'est un scalaire, alors que, comme nous l'avons dit, nous avons besoin de vecteurs à trois dimensions, et par paires, pour faire jouer pleinement les symétries entre les champs étudiés et les champs d'espace et de temps. Dans l'hypothèse d'une représentation des grandeurs sous forme probabiliste, nous serions donc conduits à proposer de définir des couples (ψ, φ) de deux grandeurs tri-dimensionnelles représentant des probabilités associées à des grandeurs physiques, et d'écrire pour ces couples des lois de degré zéro du type :

$$\frac{\partial \psi_i}{\partial t_j} = \frac{\partial \phi_j}{\partial x_i} \qquad (3)$$

D'où nous pouvons dériver d'autres lois telles :

$$\sum_i \frac{\partial \psi_i}{\partial t_i} - \sum_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_i} = 0 \qquad (4)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} - \sum_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_i} = 0 \qquad (5)$$

par des sommations, ainsi que par utilisation du scalaire t à partir de ses composantes t_i (voir Guy, 2012) ; on peut obtenir d'autres expressions encore par échange des paramètres spatiaux et temporels. Diverses interprétations peuvent être données à ces lois, comme des bilans où apparaissent termes de source (dérivées temporelles) et termes de flux (dérivées spatiales)[9], ou comme des dérivées de transport ; on pense aussi au principe ergodique dans le couplage de deux points de vue probabilistes. De telles lois sont invariantes de Lorenz (Guy, op. cit.), par opposition à l'équation de Schrödinger qui ne jouit pas de cette propriété. La proposition des lois (3) nous rapproche des recherches de Dirac (dont l'équation ressemble formellement à celle donnée ci-dessus), de Pauli, et de ce qui concerne les spineurs, à propos de quoi il existe une littérature très abondante. Pour fabriquer un vecteur ψ, on peut procéder à partir du ψ classique scalaire de la même façon que nous l'avons fait pour l'énergie, en utilisant les cosinus directeurs du mouvement étudié (Guy, 2012). On peut aussi définir d'emblée un vecteur, en remarquant que le scalaire habituel ψ seul n'est pas sans reproche : un mobile pourrait n'être nulle part sur un axe, ou même deux axes, alors que l'intégrale de ψ sur l'ensemble de l'espace pourrait malgré tout être égale à un par la contribution des autres axes. Ne peut-on pas définir une probabilité pour la composante le long de chaque axe, avec des conditions de normalisation pour chaque axe, et définir ensuite un scalaire ψ de différentes façons ? Nous ne rentrons pas dans les détails mathématiques pour l'instant et supposerons que c'est possible.

9. Problèmes techniques associés et commentaires sur quelques travaux de la littérature

De très nombreux points techniques mériteraient d'être discutés en relation avec l'approche présentée. Il est intéressant de constater qu'un grand nombre d'entre eux a déjà été abordé dans la littérature, et rejoignent tel ou tel point abordé ici. Nous en avons cité dans nos

[9] On parle aussi en mécanique quantique de densité et de flux de probabilité (Rougé, 2000).

travaux, et le lecteur pourra s'y reporter, sachant que notre connaissance de la littérature correspondante est limitée. Les tentatives des auteurs restent dispersées et leur portée à notre sens modeste car elles ne s'inscrivent pas dans une compréhension générale. Elles n'en sont pas moins précieuses car elles montrent le plus souvent une dérivation mathématique rigoureuse[10].

Ainsi peut-on parler des nombreuses tentatives où l'on discute de modèles physiques écrits avec des dimensionalités différentes de la valeur habituelle de quatre (trois dimensions d'espace et une de temps) et qui semblent permettre de résoudre tel ou tel problème du cadre standard 4D. Ainsi, suivant les auteurs (citons par exemple, sans aucun souci d'exhaustivité, Demers (1975), Franco (2006), Pappas (1978, 1979), Souriau (1970), Tsabary et Censor (2005) et Ziino (1979a et b)), on peut trouver des dimensionalités égales à six, avec trois dimensions pour le temps, ou encore simplement égales à trois où le temps n'est pas distingué, si ce n'est comme l'un des paramètres du système ; on trouve aussi des modèles à 1 + 1 ou à 2 + 1 dimensions (une ou deux dimension(s) d'espace et une de temps ; le cas à 1 + 1 dimensions montre que la parfaite symétrie entre espace et temps permet des résultats prometteurs, qui ne peuvent cependant être généralisés au cas 3 + 1 classique à cause alors de la perte de cette symétrie). Ces tentatives, qui ressemblent localement à ce que nous avons fait, renvoient à différents sujets comme le fonctionnement des équations de Maxwell et les transformations de Lorentz, ou encore la question discutée ici du raccord entre mécanique quantique et relativité générale. La signification du temps n'est en général pas abordée, les auteurs se contentant d'observer un meilleur fonctionnement mathématique par rapport au problème posé pour telle ou telle dimensionalité différente de quatre (par exemple, selon Chen, 2005, la meilleure dimensionalité permettant de relier la mécanique quantique à la relativité générale est trois).

Il y aussi tout ce qui concerne la discussion des équations de base de la mécanique quantique, l'équation de Schrödinger, non invariante de Lorentz, n'étant pas complètement satisfaisante. On retrouve alors la question d'essayer de définir un ψ tridimensionnel, et divers travaux de la littérature sont à examiner de ce point de vue. En restant dans ce domaine de la physique quantique, on parle aujourd'hui des phénomènes d'atemporalité et de non localité. Peut-on prétendre que ces phénomènes, difficiles à interpréter, peuvent s'appréhender dans notre

[10] Sur ce point, il n'est pas opportun d'écarter trop vite les travaux des physiciens « critiques » anti-relativistes, que, le lecteur l'aura compris, nous ne suivons pas jusque dans leurs conclusions ultimes.

perspective ? Non temporalité : en effet le temps ne « passe » pas partout, il ne s'applique pas à tout, il est une construction appuyée sur une partie de ce que nous voyons ; non localité : oui, l'espace (dans les « relations spatiales ») est aussi une construction qui ne nous dit pas le tout de la réalité dont le fond nous échappe.

Il y a encore ce qui concerne les équations de la gravitation et les liens avec celles de la relativité générale. La littérature est immense et de nombreuses tentatives ont été faites sur le modèle des équations de Maxwell (voir en relation avec ce point les travaux récents de Buchert, 2006).

Nous n'avons pas parlé de la théorie des cordes et des nombreux développements de ce domaine que nous ignorons presque totalement ; un certain nombre de résultats théoriques, qui rejoignent les questions discutées ici, ont été établis. Le fonctionnement des équations, quel que soit le sens qu'on leur donne, a par lui-même un sens, et mériterait d'être examiné en relation avec nos idées. Nous pouvons remarquer malgré tout que l'on ne trouve pas dans cette théorie de réflexions de nature conceptuelle sur l'espace et le temps ; celles-ci nous semblent pourtant un préalable à tout progrès. On retrouve dans des variantes importantes de la théorie des cordes la dimensionalité neuf (9). En rajoutant aux 6 dimensions que nous postulons (3 d'espace et 3 de temps), 3 degrés de liberté correspondants à l'*incertitude fondamentale sur les échelles adoptées* pour chacun des axes (en relation avec le statut incertain, ou « mal-certain » de la constance de la vitesse de la lumière définissant les échelles sur les trois axes de coordonnées au sens à la fois spatial et temporel), nous obtenons une dimensionalité également de neuf (ce point est discuté avec Ph. Coueignoux, comm. pers.). Est-ce une pure coïncidence, il faudrait aller voir de plus près…

10. Sur la coexistence entre la mécanique quantique et la relativité générale en matière de représentation de l'espace et du temps

Pour récapituler, que dire de la coexistence entre la mécanique quantique et la relativité générale du point de vue de leurs relations à l'espace et au temps ? Si nous reprenons d'abord le regard que nous héritons sur elles de notre éducation, nous dirons, avec quelque distance :- la relativité générale s'intéresse à découvrir le temps et l'espace à partir du phénomène de gravitation ; - la mécanique quantique se place dans un cadre spatio-temporel indépendant des

phénomènes et étudie les comportements des particules matérielles au niveau microscopique dans une approche probabiliste ; elle rend compte d'inhomogénéités de comportement ou *quantifications*. Si maintenant nous supposons que nous avons mis en œuvre les modifications suggérées dans les parties précédentes, nous postulerons que chacune des deux théories est définie par deux champs en dualité : (g, h) pour la gravitation (que l'on se permet d'assimiler à la relativité générale sous cette forme), et (ψ, φ) pour les phénomènes microscopiques de la mécanique quantique ; chaque paire est elle-même définie en composition / opposition avec un champ de base (r, t) associé au phénomène élémentaire support de nos définitions d'espace et de temps. Le problème de départ peut alors se reformuler de la façon suivante : *les trois groupes de champs (r, t), (g, h) et (ψ, φ) sont-ils compatibles ?* Comment peuvent-ils coexister ? Peut-on éliminer l'un d'entre eux, (r, t) par exemple, parmi les trois ? L'élimination de (r, t) n'est pas « obligatoire », elle répond à un souhait d'examiner des situations où le phénomène élémentaire de propagation de la lumière dans le vide (construisant le champ (r, t) de départ) n'est pas suffisant pour le problème traité. Si on *veut* faire cette élimination, la question est de savoir *si on en a la possibilité logique ou mathématique* compte-tenu des différents liens entre les phénomènes. Nous avons examiné plus haut ce type de problème de façon générale, et pouvons y répondre en l'appliquant au cas particulier des deux théories qui nous intéressent. Plusieurs cas sont possibles (nous reprenons les items distingués dans la section 7) :

1. Les champs (g, h) et (ψ, φ) sont indépendants car les phénomènes pris en compte sont différents : on ne met dans (ψ, φ) que les interactions électromagnétiques et les interactions fortes et faibles à l'exclusion de la gravitation (ou l'on considère que cette dernière y est négligeable), alors que (g, h) de son côté n'exprime que la gravitation à l'exclusion des autres interactions. On peut alors adopter plusieurs choix (certains choix reviennent en fin de compte à la même structure, mais nous les présentons de façon séparée car correspondant à des démarches différentes) :

1A. Choisir l'une des trois paires comme définissant les champs de base (3 possibilités)

1B. Eliminer complètement la paire (r, t) et envisager l'espace-temps {(g, h) (ψ, φ)} Suivant ce que l'on prend comme « base » pour définir l'espace et le temps on pourra dire : (g, h) est quantifié ou (ψ, φ) est quantifié ; (ψ, φ) sert de *background* pour (g, h), ou (g, h) sert de

background pour (ψ, φ). Ou encore : il n'y a aucun *background* pour personne au sens du premier cadre (r, t). On peut aussi envisager (à nouveau par de tels échanges) une définition de l'espace et du temps par la seule mécanique quantique.

1C. Considérer que l'on a deux espace-temps coexistant au même endroit (un même espace physique mais des relations spatio-temporelles différentes) : {(r, t), (g, h)} et {(r, t), (ψ, φ)} à l'intérieur de chacun desquels on peut aménager en procédant à des échanges et en faisant « disparaître » temps et espace. On pourra alors pour le second couple parler de « quantification » de l'espace et du temps, procédant aux échanges de points de vue entre les couples de champs (x, t) et (ψ, φ). C'est bien l'association des deux théories, relativité générale et mécanique quantique, qui permet de penser cela, la première nous inspirant quant à la définition du temps et de l'espace par les phénomènes, et la seconde quant à leur « quantification ».

2. Si les deux groupes de phénomènes décrits par (g, h) et (ψ, φ) ne sont pas indépendants, soit que l'on ait mis la gravitation dans (ψ, φ), soit que l'on ait mis d'autres interactions que la gravitation dans le tenseur impulsion énergie qui sert à définir les métriques intervenant dans le couple (g, h) (on suppose momentanément qu'on a su le faire du point de vue technique), il peut y avoir alors conflit.

2A. On peut alors éliminer l'un des deux ; par exemple : il n'y a plus de gravitation séparée, mais simplement le couple {(r, t), (ψ, φ)}, cela ressemble à certains des cas précédents, mais maintenant la mécanique quantique est plus riche. On peut aussi préférer ne pas considérer de « mécanique quantique » séparée et en rester au coupe {(r, t), (g, h)} de la gravitation.

2B. On peut reprendre les écritures et chercher une formulation unique

Cas 3 (nouveau par rapport à l'inventaire discuté dans la section 7). On peut aussi envisager le cas où les deux groupes de phénomènes ne sont pas indépendants mais que l'on veuille malgré tout considérer la gravitation séparément, alors qu'elle intervient effectivement dans le mouvement des particules chargées et massiques dans (ψ, φ). Qu'on la mette en plus (**cas 3a**) ou non (**cas 3b**) dans les potentiels de (ψ, φ) cela correspond à la situation actuelle qui représente une *approximation* : on considère que l'on examine les choses à deux échelles

d’espace et de temps distinctes ne se recouvrant pas (une échelle microscopique d’un côté, une échelle cosmologique de l’autre), le cas 3a correspondant à une attitude un peu contradictoire consistant à un raffinement de la mécanique quantique avec gravitation à l’échelle microscopique (avec les lois de la gravitation qui servent aussi pour les autres échelles) sans compromettre une analyse séparée de la gravitation aux grandes échelles ; pour ces dernières on considère réciproquement que les phénomènes habituellement mis dans la mécanique quantique (interactions électromagnétiques, forte et faible) sont négligeables aux grandes échelles d’espace et de temps. On peut imaginer des calculs permettant de voir à quelle échelle d’espace et de temps tel ou tel effet est négligeable suivant les options prises. Dans ces cas, il peut y avoir une certaine dissymétrie suivant que l’on garde ou non d’un côté ou de l’autre (c'est-à-dire le côté appelé « gravitation » et celui appelé « mécanique quantique »), tous les phénomènes sous-jacents (ceux de gravitation sensu stricto, les interactions électro-magnétique, forte et faible).

Cas 4. (ce cas est aussi nouveau). Enfin il peut se faire que l’on s’aperçoive que les lois de la gravitation qui servent pour les grandes échelles (où on les sépare des autres interactions) et celles qui se manifestent à l’échelle microscopique soient différentes. Il se peut que cela corresponde à une situation bien cernée, par exemple celle où l’on voudrait utiliser le modèle MOND pour les grandes échelles. On est ramené alors à l’un des cas précédents avec des fonctionnements différents. Il se peut que l’on n’ait pas compris la gravitation, c'est-à-dire que l’on n’ait pas compris ses liens cachés avec les autres interactions. Il faut alors clarifier cela avant de continuer…

En plus de ceux concernant l’espace et le temps, la mécanique quantique se démarque donc de la relativité générale par deux types de choix : celui de considérer les phénomènes de façon probabiliste, et celui d’envisager comme phénomènes (intervenant dans l’hamiltonien de l’équation de Schrödinger par exemple) ceux liés à l’électromagnétisme ou aux interactions faible ou forte, mais non en général à la gravitation. Cette interdiction de faire figurer les interactions gravitationnelles dans la mécanique quantique est reliée à l’analyse « classique » que la gravitation est intimement liée à la relativité générale et à l’espace et au temps. Cette interdiction peut donc être dépassée. On a rappelé que l’on peut mettre les interactions gravitationnelles de type newtonien dans un hamiltonien et faire fonctionner le formalisme quantique de façon identique au cas courant avec les autres interactions, ceci conduisant à une quantification de la gravitation. Si la question de la définition de l’espace et du temps ne nous

parait plus une pomme de discorde entre mécanique quantique et relativité générale, nous pouvons nous demander en fin de compte si la difficulté n'est pas davantage dans la compréhension des relations entre la gravitation et les autres interactions (électromagnétique et interactions faible et forte) et dans le choix de mettre ou non la gravitation dans les potentiels de la mécanique quantique.

11. Mécanique quantique et relativité générale et situations d'« incertitude »

Nous n'avons pas parlé de la question des relations dites d'indétermination ou d'incertitude, et d'une opposition possible entre mécanique quantique et relativité générale de ce point de vue. Cela ne nous paraît pas faire problème. Des incertitudes sont bien présentes, dès le stade de la mécanique classique, et donc en relativité générale, dans la définition des positions des points matériels dont on ignore les caractéristiques exactes de mobilité et d'immobilité ; ces caractéristiques font à un moment donné l'objet d'un choix, qui est celui même de la construction du temps et de l'espace en opposition l'un à l'autre (Guy, 2004, 2011a). Ces incertitudes peuvent être modélisées par des écarts entre deux repères, c'est-à-dire écarts entre les valeurs des variables dans un repère et leurs valeurs dans un autre repère « légèrement » modifié par rapport au premier. La modification des repères est régie par une petite vitesse (inconnue) v de déplacement. Dans le passage d'un repère au repère modifié, on doit continuer d'imposer des contraintes de conservation de divers types ; nous pouvons conserver les quantités mêmes sous-jacentes à l'écriture des transformations de Lorentz (conservation de la « vitesse » de la lumière par exemple) ; on fait apparaître l'action du groupe de Lorentz paramétré par la petite vitesse v. Les transformations, considérées comme infinitésimales, portent sur les incertitudes[11] précédentes (c'est une autre façon de voir les relations de degré zéro, Guy, 2012).

Si maintenant nous remarquons que les grandeurs étudiées arrivent par paires, le groupe précédent peut agir sur ces dualités et faire apparaître des relations entre les écarts (ou incertitudes) associés des grandeurs en dualité. *C'est-à-dire que les incertitudes dont nous avons parlé dans le paragraphe précédent vont arriver par paires et être reliées* ; nous aboutissons à ce que nous pouvons bien appeler des relations d'incertitude au sens de la

[11] Ou « mal-certitudes », Guy, 2013b

mécanique quantique. Nous avons suivi cette approche dans Guy (2004) (en exprimant les dualités entre variables d'espace et de temps à l'aide d'un formalisme tensoriel) et obtenu des relations générales, que nous pouvons écrire pour des cas particuliers sous la forme : $\delta x \delta t = A(v)$ (portant sur les variables d'espace et de temps, où A est une fonction de la vitesse inconnue séparant les deux repères)[12]. On trouve dans la littérature une grande variété de relations pragmatiques d'incertitude du même type (voir Burderi et Di Salvo, 2012, pour un exemple récent proche de notre résultat) mais qui ne sont pas incorporées dans un cadre conceptuel comme proposé ici. Plus généralement pour des variables en dualité dans les relations de degré zéro et compte-tenu de l'équivalence des couples (r, t) (g, h) (dans la « disparition » du temps et de l'espace), on tire d'autres relations d'incertitude que celles initialement écrites pour l'espace et le temps, et que l'on peut écrire $\delta g \delta h = A(v)$ (Bohr et Rosenfeld, 1933, 1950, ont écrit de telles relations pour les champs électrique et magnétique ; à comparer à celles que nous pourrions dériver par notre approche).

Cette démarche, que nous pouvons développer de façon générale, et dont on voit le lien profond avec le principe de relativité (dans l'action du groupe de Lorentz) rejoint ce qui est pratiqué en mécanique quantique. Dans ce cas la dualité en jeu est celle entre une fonction et sa transformée de Fourier, et les relations d'incertitude relient les étalements au sens statistique des grandeurs en jeu. Basdevant et Dalibard (2002) montrent que l'on peut envisager une dualité plus générale encore de grandeurs qui ne commutent pas au sens du formalisme quantique. Balibar et al. (2007) indiquent quant à eux que les relations d'incertitude peuvent être considérées, dans la mécanique quantique même, comme résultant de l'action du groupe de Lorentz Poincaré sur les variables en dualité que sont la fonction d'onde et sa transformée de Fourier. Ce dernier résultat est à replacer dans le cadre plus général de l'action d'un groupe sur une dualité, comme nous l'avons dit à l'instant.

Nous avons donc une convergence entre les relations d'incertitude de la mécanique quantique et celles de la relativité. Les relations évoquées à l'instant sont des égalités. On obtient des inégalités dans certaines conditions particulières sur lesquelles nous ne nous arrêterons pas ici.

Notons que nous avons utilisé un terme unique d'incertitude pour des situations de significations fondamentales différentes, correspondant à des quantités qui peuvent s'ajouter

[12] Plus précisément $(\delta x/x)(\delta t/t) = A(v)$, Guy, 2013b

sans qu'on puisse faire a priori la part entre elles : *indétermination* au sens de l'étalement d'une grandeur qui, par sa nature même, ne peut faire l'objet d'une mesure précise (Lévy Leblond, 1996) ; *incertitudes* en relation avec les opérations de mesure (à mettre sur le compte de l'appareil de mesure ou de l'opérateur) ; et non certitude de la constance ou stabilité même des étalons et des repères, que nous préférons nommer *mal certitude* pour la distinguer des deux autres (Guy 2013b).

12. Conclusion

Nous n'avons fait dans ce texte que brosser un cadre très général permettant de poser, à notre façon, la question du lien entre la mécanique quantique et la relativité générale. Comme nous l'avons dit, la relativité générale n'a pas le monopole de l'espace et du temps, ni la mécanique quantique celui de la quantification ; il n'y a pas que la gravitation ou l'espace-temps qui peuvent être quantifiés, mais, à travers un échange de points de vue, tout phénomène en composition inhomogène avec un autre ; il n'y a pas que la mécanique quantique que l'on peut rendre indépendante d'un cadre extérieur d'espace-temps, mais, de façon analogue, tout phénomène « échangeable » avec l'espace et le temps. On peut in fine envisager une quantification de l'espace et du temps, ou encore la définition de temps et espace par la seule mécanique quantique. *C'est l'identité des relations spatiales et temporelles qui a permis de formuler ces questions sous une forme nouvelle*. Comme nous l'avons vu, il faut reprendre un certain nombre de points techniques avant de reprendre la confrontation des deux théories et leur coordination. En particulier reprendre la mécanique quantique en définissant des vecteurs ψ et φ en dualité ; et reprendre la relativité générale de façon à associer à la gravitation deux champs en dualité comme en électromagnétisme ; l'ensemble est à récrire en 3 + 3 dimensions. C'est un gros chantier pour lequel il existe déjà diverses tentatives partielles dans la littérature ; il conviendra de s'y relier plus étroitement, et la reprise des formulations mathématiques montrera si les pistes évoquées ici sont praticables.

Remerciements

L'auteur remercie toutes les personnes avec qui il a pu discuter la matière exposée ici. Ce texte a été mis en chantier à l'occasion de la préparation d'une journée à Saint-Etienne consacrée à l'espace et au temps (« L'espace et le temps entre les philosophes et les physiciens », 5/2/2013, Chaire de physique de l'Ecole des mines, F. Gruy) : Thomas Buchert, Etienne Klein, Alexis de Saint-Ours, de même que les amis des Ateliers sur la contradiction, ont contribué de façon involontaire à son inspiration (dont la part non heureuse est le fait de l'auteur seul). L'auteur remercie à l'avance, les lecteurs pour leurs réactions.

Annexe 1

Eléments pour une théorie physique basée sur l'identité des relations spatiales et temporelles

L'auteur a publié de façon dispersée des éléments pour une théorie physique basée sur l'identité des relations spatiales et temporelles, ou encore sur la seule catégorie de « mouvement ». Il s'agit pour une majorité de textes préliminaires déposés sur des archives ouvertes, avec toutes les limitations que cela suppose. En voici une revue.

Cadre conceptuel général :

- Penser ensemble le temps et l'espace, *Philosophia Scientiae*, 15, 3, 91-113 (Guy, 2011a).
- version anglaise : Time and space are of the same stuff, HAL: http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00651429/ (Guy, 2011d)
- Contradictions dans la pensée de l'espace, du temps et du mouvement, in Guy, 2010, coord., Actes des ateliers sur la contradiction, Presses des mines, pp. 85-92 (Guy, 2010c).
- Vers une pensée de la relation, échanges entre un politologue et un physicien, Actes des deuxièmes ateliers sur la contradiction, coordination B. Guy, Presses des mines, Paris, 77-87 (Dujardin et Guy, 2012).
- Appelons (morceau de) mouvement toute amplitude de la réalité sensible, HAL : http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00562672/ (Guy, 2011c)
- Mesurer l'espace d'un instant, Grand Angle, revue de la conférence des grandes écoles, n° 37, février 2013, 2 pages, http://www.cge-news.com/main.php?p=696 (Guy, 2013c).

On trouvera aussi des considérations générales dans
- L'éclair et le tonnerre, promenades entre l'espace et le temps (à propos de la théorie de la relativité), Editions EPU, Paris, 224 p. (Guy, 2004).

Développement physique

Première étape : écriture des transformations de Lorentz avec un paramètre temporel ayant valeur de position (3 + 3 dimensions)

- Les relations de Lorentz et le temps : proposition d'utilisation d'un paramètre tri-dimensionnel défini par un déplacement. La question du temps en physique, Internet Archive http://archive.org/details/LesRelationsDeLorentzEtLeTempspropositionDutilisationDun (Guy, 2010a)

Conséquences sur les effets de contraction-dilatation des variables d'espace et de temps, et autres aspects techniques (paradoxe des jumeaux)

- Voir : L'éclair et le tonnerre, promenades entre l'espace et le temps, op. cit. (Guy, 2004).

Degré zéro des lois physiques :

- Degré zéro des lois physiques, considérations heuristiques, HAL : http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00723183 (Guy, 2012)

Lois de gravitation modifiée :

- A modified law of gravitation taking account of the relative speeds of the moving masses. A preliminary study, http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00472210/fr (Guy, 2010b)

Relations d'incertitude ou de mal-certitude :

- L'éclair et le tonnerre, promenades entre l'espace et le temps, op.cit. (Guy, 2004)
- Pour un principe de mal-certitude en physique, inédit, Ecole n.s. des mines de Saint-Etienne, 18 p. (Guy, 2013b).

Compréhension des étalons d'espace et de temps
Sur la « vitesse » de la lumière et sa mesure : disparition des étalons d'espace et de temps ; l'étalon de mouvement ; http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00814874/; et communication au 22° Congrès général de la société française de physique, Marseille, Juillet 2013, P082 (Guy, 2013d).

L'irréversibilité du temps :
- L'éclair et le tonnerre, promenades entre l'espace et le temps, op.cit. (Guy, 2004).
- Particles, scale, time construction and the second law of thermodynamics, Meeting the entropy challenge, An international thermodynamics conference in honor and memory of Professor Joseph Henry Keenan, The MIT, Cambridge, MA, USA, October 4-5, 2007. The american institute of Physics, p. 174-179 (Guy, 2008).
- L'architecture de la thermodynamique et ses développements futurs, HAL : http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00611861/en/ (Guy, 2011b).
- version anglaise : The architecture of thermodynamics and its future develoments, HAL : http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00863970(Guy, 2013a).

Aspects de quantification et aspects probabilistes pour un phénomène macroscopique :
- Mathematical revision of Korzhinskii's theory of infiltration metasomatic zoning, Eur. J. Mineral., 5, 317-339 (Guy, 1993).
- The behavior of solid solutions in geological transport processes: the quantization of rock compositions by fluid-rock interaction, in: Complex inorganic solids, structural, stability and magnetic properties of alloys, edited by P. Turchi, A. Gonis, K. Rajan and A. Meike, Springer, 265-273 (Guy, 2005).
- Introduction à une approche relationnelle de la probabilité. Etude d'exemples (Guy et Bay, en préparation).

Aspects liés aux sciences humaines et sociales :
- Groupes sociaux, espace, temps, dialogue entre un physicien et un anthropologue, 26 p., http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00468407/en/, Guy, 2010d
- Penser ensemble le temps et l'espace, op. cit. (Guy, 2011a)
Ainsi qu'une série de textes inédits (contacter l'auteur).

Références

Balibar F., Laverne A., Lévy-Leblond J.-M. et Mouhanna D. (2007) Quantique : éléments, 440 p., inédit.

Basdevant J.L. (2002) Principes variationnels et dynamique, Cours de l'Ecole polytechnique, 102 p.

Basdevant J.L. et Dalibard J. (2002) Mécanique quantique, Les éditions de l'Ecole polytechnique, 516 p.

Bohr N. et Rosenfeld L. (1933) *Zur frage der messbarkeit der electromagnetischen feldgrossen*, Kgl. Danske Videnskabernes Selskab Mat.-Fys. Medd. 12, 8.

Bohr N. et Rosenfeld L. (1950) *Field and Charge Measurements in Quantum Electrodynamics*, Physical Review 78, 794.

Buchert T. (2006) An exact Lagrangian integral for the Newtonian gravitational field strength, Physics Letters, A, 354, 8-14.

Burderi L. and Di Salvo T. (2012) The quantum clock: a critical discussion on space-time, arXiv:1207.0207v1 [gr-qc] 1 Jul 2012

Buchert T. (2006) An exact Lagrangian integral for the Newtonian gravitational field strength, Physics Letters A, 354, 8-14.

Chen X. (2005) Three dimensional time theory: to unify the principles of basic quantum physics and relativity, *arXiv: quant-ph/0510010 v1, 3 Oct 2005*.

Demers P. (1975) Symétrisation de la longueur et du temps dans un espace de Lorentz C^3 en algèbre linéaire, pouvant servir en théorie trichromatique des couleurs, *Can. J. Phys.*, 53, 1687-1688.

Dujardin Ph. et Guy B. (2012) Vers une pensée de la relation, échanges entre un politologue et un physicien, Actes des deuxièmes ateliers sur la contradiction, coordination B. Guy, Presses des mines, Paris, 77-87.

Feynman R.P.F. (1979) Cours de physique de Feynman, tome 2, traitant surtout de l'électromagnétisme et de la matière, Interéditions, 416 p.

Franco J.A. (2006) Vectorial Lorentz transformations, Electronic Journal of Theoretical Physics, 9, 35-64.

Guy B. (1993) Mathematical revision of Korzhinskii's theory of infiltration metasomatic zoning, Eur. J. Mineral., 5, 317-339.

Guy B. (2004) L'éclair et le tonnerre, promenades entre l'espace et le temps (à propos de la théorie de la relativité), Editions EPU, Paris, 224 p.

Guy B. (2005) The behavior of solid solutions in geological transport processes: the quantization of rock compositions by fluid-rock interaction, in: Complex inorganic solids, structural, stability and magnetic properties of alloys, edited by P. Turchi, A. Gonis, K. Rajan and A. Meike, Springer, 265-273.

Guy B. (2008) Particles, scale, time construction and the second law of thermodynamics, Meeting the entropy challenge, An international thermodynamics conference in honor and memory of Professor Joseph Henry Keenan, The MIT, Cambridge, MA, USA, October 4-5, 2007. The American institute of Physics, p. 174-179.

Guy B. (2010a) Les relations de Lorentz et le temps : proposition d'utilisation d'un paramètre tri-dimensionnel défini par un déplacement. La question du temps en physique. http://archive.org/details/LesRelationsDeLorentzEtLeTempspropositionDutilisationDun

Guy B. (2010b) A modified law of gravitation taking account of the relative speeds of the moving masses. A preliminary study, http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00472210/fr

Guy B. (2010c) Contradictions dans la pensée de l'espace, du temps et du mouvement, in Guy B. (2010), coord., Actes des ateliers sur la contradiction, Ecole nationale supérieure des mines de Saint-Etienne, Mars 2009, Presses des mines, Transvalor, ISBN 978-2-9111256-16-5, pp. 85-92.

Guy B. (2010d) Groupes sociaux, espace, temps : échos d'un dialogue entre un anthropologue et un physicien, HAL : http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00468407/en/

Guy B. (2011a) Penser ensemble le temps et l'espace, *Philosophia Scientiae*, 15, 3, 91-113.

Guy B. (2011b) L'architecture de la thermodynamique et ses développements futurs, HAL : http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00611861/en/

Guy B. (2011c) Appelons (morceau de) mouvement toute amplitude de la réalité sensible, HAL : http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00562672/

Guy B. (2011d) Time and space are of the same stuff, HAL : http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00651429/

Guy B. (2012) Degré zéro des lois physiques, considérations heuristiques, HAL : http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00723183

Guy B. (2013a) The architecture of thermodynamics and its future developments, HAL : http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00863970.

Guy B. (2013b) Pour un principe de mal-certitude en physique, inédit, Ecole n.s. des mines de Saint-Etienne, 18 p.

Guy B. (2013c) Mesurer l'espace d'un instant, Grand Angle, revue de la conférence des grandes écoles, n° 37, février 2013, 2 pages, http://www.cge-news.com/main.php?p=696

Guy B. (2013d) Sur la « vitesse » de la lumière et sa mesure : disparition des étalons d'espace et de temps ; l'étalon de mouvement ; http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00814874/; et communication au 22° Congrès général de la société française de physique, Marseille, Juillet 2013 (P082).

Guy B. et Bay X., en préparation : Introduction à une approche relationnelle de la probabilité. Etude d'exemples.

Klein E. et d'Espagnat B. (1993) Regards sur la matière : des quanta et des choses, Fayard, 310 p.

Landau L. et Lifchitz E. (1970) Théorie des champs, MIR, Moscou, 494 p.

Lévy-Leblond J.-M. (1996) Aux contraires. L'exercice de la pensée et la pratique de la science, Gallimard, 438 p.

Pappas P.T. (1978) Physics in six dimensions: an axiomatic formulation, Lett. Nuovo Cimento, 22, 15, 601-607.

Pappas P.T. (1979) The "three-dimensional time" equation, *Lett. Nuovo Cimento*, 25, 14, 429-434.

Poincaré H. (1905) La valeur de la science, Flammarion, Paris.

Rougé A. (2000) Introduction à la physique subatomique, Editions de l'Ecole polytechnique, 2 tomes, 398 p.

Rougé A. (2002) Introduction à la relativité, Les éditions de l'Ecole polytechnique, 180 p.

Rovelli C. (2004) Quantum gravity, Cambridge monographs on mathematical physics, Cambridge university press, 458 p.

Rovelli C. (2006) The disappearance of Space and Time, in Philosophy and Foundations of Physics. The Ontology of Spacetime D. Dieks (Editor) Elsevier B.V.

Saint-Ours Alexis de (2011) La disparition du temps en gravitation quantique, Philosophia Scientiae, 15, 3, 177-

Smolin L. (2000) Three roads to quantum gravity, Basic books.

Smolin L. (2006) The trouble with physics, the rise of string theory, the fall of science and what comes next, Penguin.

Souriau J.M. (1970) Structure des systèmes dynamiques, Dunod, Paris, 416 p.

Teissier B. (2009) Géométrie et Cognition: l'exemple du continu, *Ouvrir la logique au monde* [J.-B. Joinet et S. Tronçon 2009], Paris : Hermann.

Tsabary & Censor (2005) An alternative mathematical model for special relativity, Nuovo Cimento B, 120, 2, 179-196.

Weil Simone (1942) Réflexions à propos de la théorie des quanta, Œuvres complètes, 579-592.

Ziino G. (1979a) On the theoretical reliability of a three-temporal Lorentz transformation, *Lett. Nuovo Cimento*, 24, 6, 171-174.

Ziino G. (1979b) On the possibility of a three-temporal Lorentz transformation, *Phys. Lett.*, 70A, 2, 87-88.

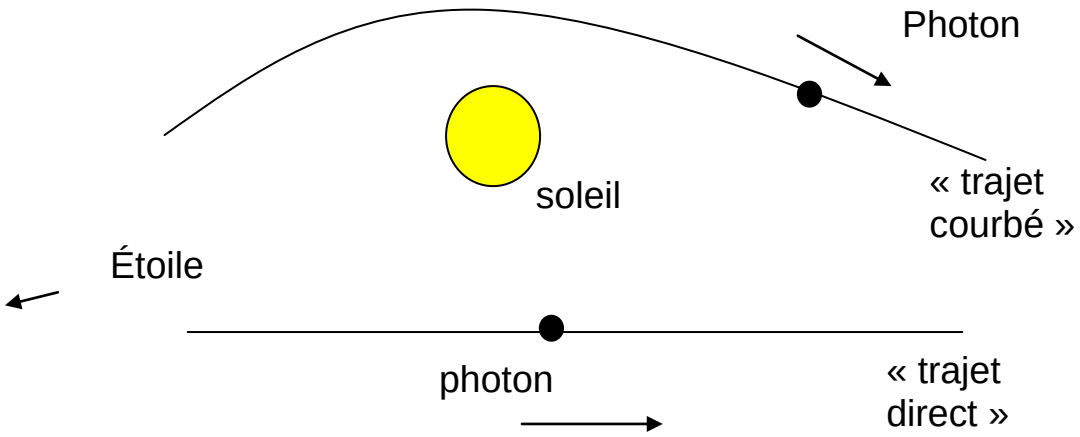

Figure 1

On oppose ici deux espace-temps, ou, ce qui est équivalent dans notre compréhension, deux trajectoires : la première associée à la propagation de la lumière (issue d'une étoile distante) sans influence des masses (ligne droite en bas), et la seconde associée au trajet de la lumière courbé par la présence du soleil, comme à l'occasion d'une éclipse (ligne courbe en haut).

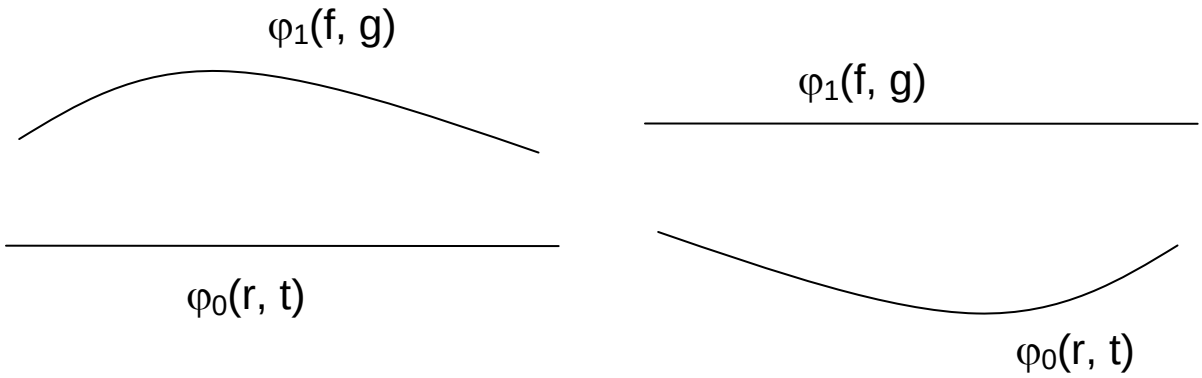

Figure 2

A gauche : deux espace-temps sont visualisés, chacun par une courbe ou trajectoire régie par un phénomène, φ_0 ou φ_1 : φ_0 est associé aux champs r et t (espace et temps) et φ_1 est associé aux champs f et g.
A droite : on a échangé les points de vue ; φ_1 est considéré comme premier, φ_0 est dérivé.

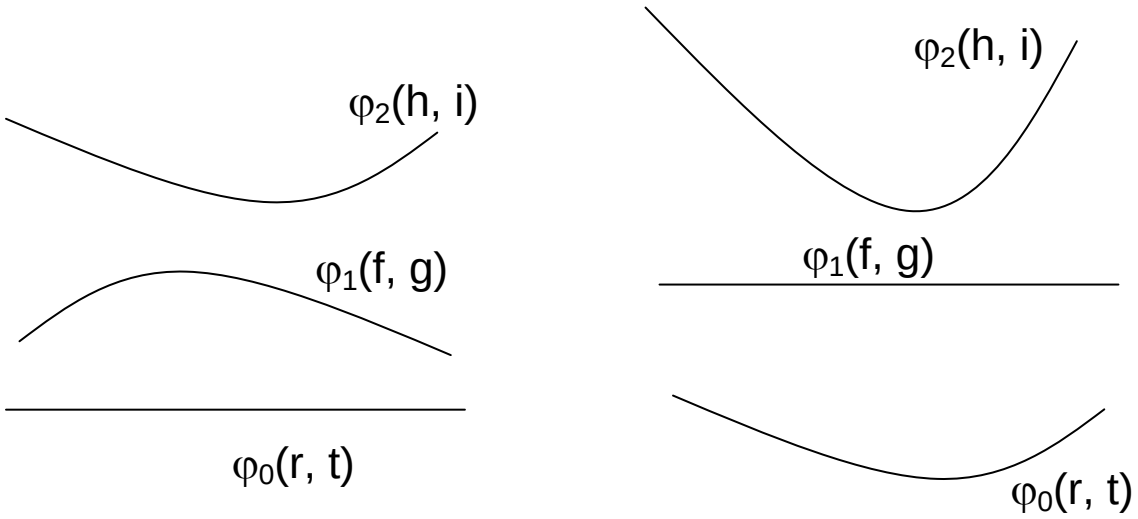

Figure 3

Cas où trois phénomènes sont envisagés. S'ils sont compatibles, on peut s'appuyer sur celui que l'on veut pour définir l'espace et le temps. Il y a trois choix possibles. On a ici mis deux d'entre eux : φ_0 à gauche, φ_1 à droite. Dans chacun des deux cas, les deux autres champs (φ_1 et φ_2 à gauche, φ_0 et φ_2 à droite) sont alors dérivés. Si les trois phénomènes ne sont pas compatibles, il faut reprendre l'écriture des équations (divers cas sont possibles, voir texte).

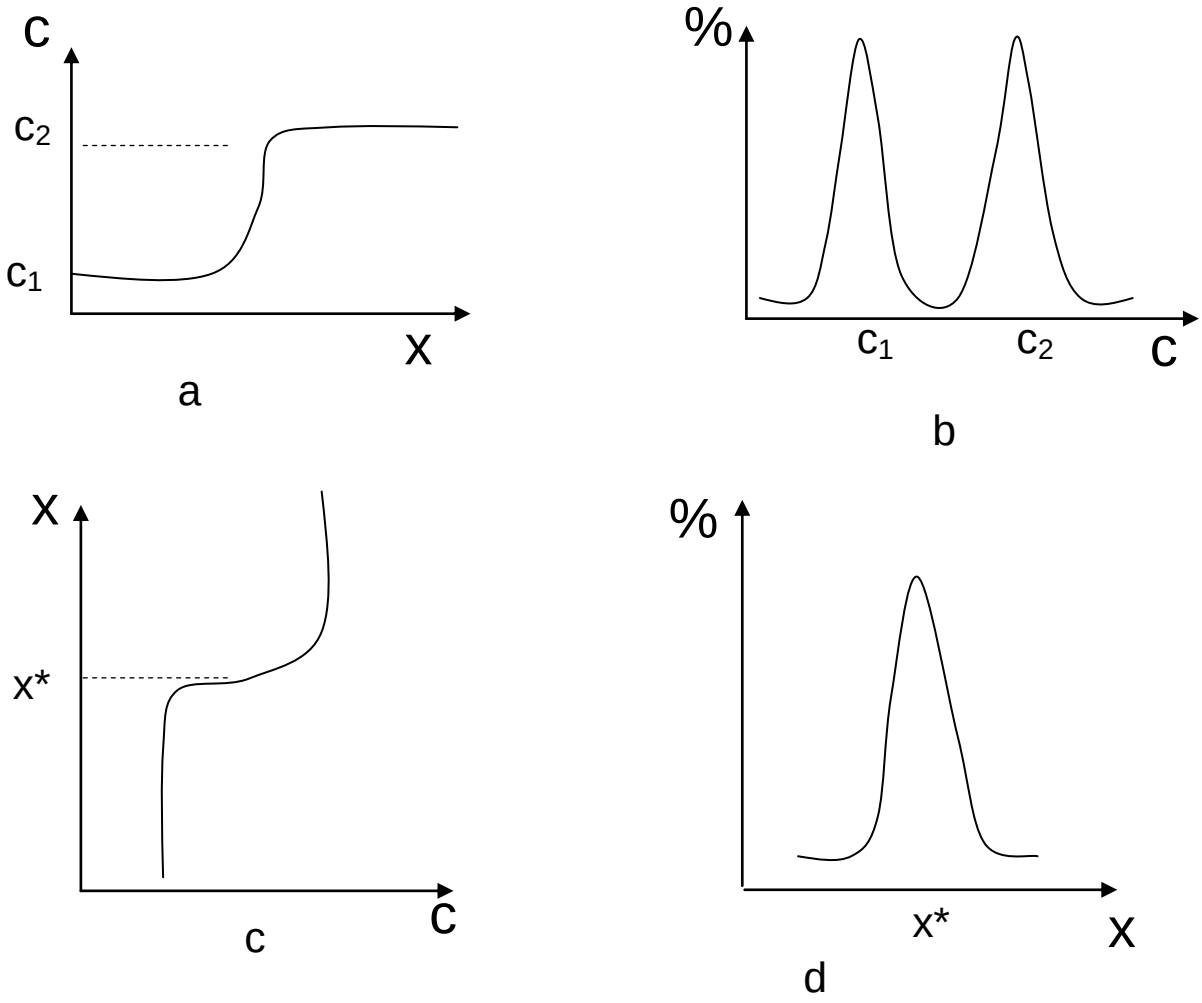

Figure 4

4a Champ d'une grandeur physique c se déployant dans l'espace x et montrant de façon préférentielle deux niveaux de valeurs c_1 et c_2 (quantification) ; le basculement entre les deux valeurs se fait autour de x = x* (la valeur x* est indiquée sur la Fig. 4c).
4b La quantification présentée dans la Fig. 4a est illustrée par l'histogramme ou spectre des valeurs de la grandeur c : deux pics autour des deux valeurs c_1 et c_2 respectivement.
4c Champ de la grandeur x en fonction de la grandeur c (point de vue dual de celui présenté dans la Fig. 4a avec échange des axes de coordonnées) : on déclare que l'espace x est une fonction de la grandeur c. Si c sert maintenant à graduer l'espace, l'espace initial x est lui aussi quantifié et montre de façon préférentielle une valeur x*
4d La quantification présentée dans la Fig. 4c se voit sur l'histogramme : rapporté à l'évolution continue de c, l'espace a plus de chance de se situer autour de la valeur x*.
Derrière les espaces abstraits sur lesquels on définit les probabilités % se cachent l'espace physique x pour c (Fig. 4b) et l'espace c pour x (Fig. 4d). Ceci illustre l'aspect relationnel de la quantification pensable seulement dans la comparaison de deux points de vue (elle n'est pas une propriété substantielle). Dans le cas général, une grandeur physique est définie a priori par rapport à un substrat qui est a priori implicitement l'espace-temps. On voit sur les exemples précédents que toute courbure d'une fonction c(x) permet de définir une probabilité non uniforme pour c (l'uniformité de c correspondrait à la linéarité c = ax +b).