



HAL
open science

Sur l'identité des relations spatiales et des relations temporelles : une clé pour reprendre les problèmes de la physique
Bernard Guy

► **To cite this version:**

Bernard Guy. Sur l'identité des relations spatiales et des relations temporelles : une clé pour reprendre les problèmes de la physique. 2018. hal-01870027

HAL Id: hal-01870027

<https://hal.science/hal-01870027v1>

Preprint submitted on 7 Sep 2018

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.

Sur l'identité des relations spatiales et des relations temporelles : une clé pour reprendre les problèmes de la physique

Bernard GUY

Ecole des Mines de Saint-Etienne, Institut Mines Télécom
UMR CNRS n°5600 EVS (Environnement, Ville, Société)
LASCO (*) Idea Lab de l'Institut Mines-Télécom
(*) Laboratoire Sens et Compréhension du monde contemporain

bernard.guy@mines-stetienne.fr

Mise en ligne : septembre 2018

Résumé

Nous passons ici en revue quelques questions de physique qui nous semblent éclairées par un meilleur couplage entre les concepts de temps et d'espace, et par la primauté du mouvement. Ces questions constituent autant de chapitres de que l'on pourrait appeler une théorie physique basée sur l'identité des relations spatiales et des relations temporelles, ou encore sur la seule catégorie de « mouvement ». Nous proposons ici quelques mots éclairant cet édifice en construction, reprenant certains morceaux de textes déjà offerts par ailleurs, en particulier sur les archives ouvertes HAL. Les sujets suivants sont abordés : la « vitesse » de la lumière ; les flèches du temps et de l'espace et la thermodynamique ; la composition de transformations de Lorentz non colinéaires ; le paradoxe des jumeaux (théorie de la relativité) ; les relations élémentaires (ou de « degré zéro ») de la physique ; les relations d'a-certitude épistémique ; le lien entre l'espace et le temps et la compréhension du hasard ; les liens à chercher entre mécanique quantique et relativité générale ; une loi modifiée de la gravitation. Nous terminons par une discussion sur ce que nous apporte le lien temps-espace sur la compréhension de la structure et du fonctionnement des équations de la physique, modifiées ou non.

Mots-clés : espace ; temps ; mouvement ; relations spatiales ; relations temporelles ; physique ; théorie de la relativité ; équations de la physique ; paradoxe des jumeaux ; mécanique quantique et relativité générale.

Introduction

Nous passons ici en revue quelques questions de physique qui nous semblent éclairées par un meilleur couplage entre les concepts de temps et d'espace, et par la primauté du mouvement. Nous renvoyons le lecteur à une série de références où ces questions sont largement développées. Cela constitue autant de chapitres de que l'on pourrait appeler une théorie physique basée sur l'identité des relations spatiales et des relations temporelles, ou encore sur la seule catégorie de « mouvement ». Il s'agit, pour une majorité, de compositions préliminaires déposées sur des archives ouvertes, avec toutes les limitations que cela suppose. Nous proposons ici quelques mots éclairant cet édifice en construction (reprenant parfois certains morceaux de textes déjà offerts).

La vitesse de la lumière

Commençons cette revue sommaire de la physique par la discussion de ce que l'on appelle la vitesse de la lumière, plus précisément dans le vide ; c'est aussi une façon de voir comment notre propos concerne déjà tout autant une « pratique » qu'un développement théorique. Mais cette « vitesse » n'en est plus une aujourd'hui au sens où l'on disposerait déjà d'étalons d'espace et de temps indépendants d'elle, qui permettraient d'en faire la mesure. C'est au contraire la propagation de la lumière qui fournit de nos jours les étalons d'espace et de temps (qui reviennent au même étalon via le postulat $c = cste$). Par rapport aux pratiques plus anciennes, il y a ainsi un double changement : 1) changement d'ordre de priorité : la propagation de la lumière « précède » les étalons d'espace et de temps ; 2) changement du nombre d'étalons : on passe de deux étalons (espace et temps) à un seul. Y a-t-il continuité entre ces pratiques ? Oui et, pour le montrer, on peut faire correspondre au mètre et à la seconde dans leur définition ancienne des portions de mouvement de la lumière, évaluant ainsi deux grandeurs de natures *a priori* différentes par la même jauge. La « vitesse » de la lumière a alors deux valeurs : 299 792 458 m/s exprimant le ratio (figé par décret) entre les deux anciens étalons, comme deux « objets » particuliers de notre monde et désignés comme tels ; et $c = 1$, fréquemment utilisé en physique, exprimant aujourd'hui qu'elle n'a pas de nombre, c'est elle qui permet de mesurer. Parler de la « constance de la vitesse de la lumière » c'est exprimer une tautologie, mais pouvoir « constater » cette dernière nous rassure quant au

savoir-faire remarquable des physiciens, et à l'efficacité du bouclage entre les pratiques et les choix d'écriture des équations. Ces points de vue se raccordent avec l'identité de nature entre espace et temps que nous avons proclamée. On peut utiliser indifféremment le vocabulaire et les unités du temps ou de l'espace : une portion de mouvement relie de façon indissociable un aspect temporel (le procès du mouvement) et un aspect spatial (l'amplitude du mouvement). Dans ce contexte, il est plus approprié de dire qu'*il n'y a plus d'étalons d'espace ni de temps* et que *la seconde est l'étalon de mouvement*. Et de dire qu'une vitesse est le ratio d'un mouvement à l'étalon de mouvement (il y a encore continuité entre les définitions anciennes et nouvelles de la vitesse)¹.

Flèches du temps et de l'espace

La question du lien entre l'espace et le temps se pose aussi en thermodynamique ; il s'agit alors *a priori* d'un temps macroscopique associé à des ensembles formés de collections de particules. Les formulations habituelles du second principe lient entropie et temps de façon étroite et quasi-exclusive : l'entropie d'un système isolé augmente. Et ceci, qu'on se rapporte à l'énoncé historique (Carnot, Clausius) ou statistique (Boltzmann, Gibbs). Cela ne fournit pas une compréhension intuitive de l'entropie qui reste mystérieuse. De plus, on ne voit pas l'unité conceptuelle qui se cache derrière deux contenus en apparence très différents, portant l'un sur les échanges de chaleur, l'autre sur les probabilités d'un état macroscopique en fonction des états microscopiques. Ces difficultés nous paraissent s'alléger à condition d'insister sur le rôle de la variable spatiale et ses gradients. Ainsi les deux formulations habituelles peuvent être reprises dans ce sens, la première en disant que « la chaleur va du chaud vers le froid » (déjà proposé par Clausius), et la seconde en disant qu'un système hétérogène évolue plus probablement vers l'homogénéité, en prenant le soin de définir des probabilités de trajectoires conduisant vers des états plus ou moins probables. On voit ainsi l'unité conceptuelle du second principe : il exprime que, dans un système isolé, des hétérogénéités, qu'elles soient de température ou d'autres paramètres, ont tendance à s'adoucir, faisant augmenter la probabilité des états microscopiques correspondants. On peut dire que *la flèche du temps est en relation étroite avec la flèche de l'espace*, c'est-à-dire les

¹ Texte extrait de : Guy B. (2013) Sur la « vitesse » de la lumière et sa mesure : disparition des étalons d'espace et de temps ; l'étalon de mouvement ; <hal-00814874>; et communication au 22^e Congrès général de la société française de physique, Marseille, Juillet 2013 (P082).

gradients dans les propriétés du système, temps et espace étant tous deux appuyés sur la matière et ses grains. On peut discuter dans ce contexte une série de sujets. - La notion d'équilibre : elle signifie une invariance du système par rapport au temps, mais le temps lui-même est défini par les phénomènes et fonction de l'échelle à laquelle on les considère ; la limite entre équilibre et déséquilibre relève *in fine* d'un choix. – La question des échelles de temps et d'espace est une autre façon de voir la question précédente : une échelle plus petite est celle où nous ignorons (ou décidons d'ignorer) les mouvements de (sous-)particules éventuelles plus modestes. – Le concept d'entropie suit logiquement : lorsque nous décidons de geler les mouvements à une échelle plus petite, la question se pose : dans quelle situation du système allons-nous faire cette opération ? La réponse la plus raisonnable est : dans la situation la plus probable ; l'entropie est la fonction qui permet de trouver cette configuration. – L'affectation d'une entropie à une particule individuelle : cela se comprend si l'on envisage que cette particule est construite à partir de particules plus petites dont on prend la configuration la plus probable. – Les notions de chaleur, d'énergie interne et toutes les fonctions que l'on en dérive et qui sont caractéristiques de la thermodynamique, dérivent également des considérations précédentes : le bilan énergétique de la mécanique est bouclé en prenant en compte les énergies associées au mouvement des particules à l'échelle inférieure. - La distinction entre travail et chaleur : elle n'est pas intrinsèque, mais aussi question d'échelle. D'autres questions encore peuvent être discutées de cette façon (la distinction intérieur / extérieur pour un système, l'utilisation des expressions $d_i S$ et $d_e S$, la définition ou non d'une production d'entropie suivant l'échelle choisie et la compréhension de toute une hiérarchie de « thermodynamiques » et d'écritures du second principe)². Le problème du temps en thermodynamique, c'est-à-dire l'irréversibilité des lois macroscopiques par contraste avec la réversibilité des lois de la mécanique rassemble un certain nombre de ces propos. A la compréhension pragmatique de l'irréversibilité déjà proposée par divers auteurs (les perturbations poussent le système dans son état le plus probable³) se relie une compréhension plus fondamentale liée à l'indétermination de la frontière entre espace et temps et à celle de la position des particules. La limite entre réversibilité et irréversibilité résulte d'un choix en relation avec les échelles d'intérêt.

² Texte extrait de : Guy B. (2016) L'espace, le temps et l'entropie, Editions universitaires européennes, 110 p. Guy B. (2017) What can a better coupling between space and time concepts bring to thermodynamics ? <hal-01529570>.

³ Ce qui nous demande d'étudier le caractère aléatoire de ces perturbations et leurs conséquences sur les trajectoires des particules ; les perturbations aléatoires ont toujours tendance à effacer les hétérogénéités.

Composition de transformations de Lorentz non colinéaires

Une question plus technique concerne les transformations de Lorentz, pilier de la théorie de la relativité ; elles nous montrent comment les variables d'espace et de temps se transforment lorsque l'on passe d'un repère à un autre en mouvement relatif. Des difficultés se rencontrent dans les situations où l'on compose des transitions entre trois repères dont les vitesses relatives sont non colinéaires, c'est-à-dire non parallèles. On a alors du mal à corréler le passage direct du premier au troisième repère et la succession des passages du premier au deuxième, puis du deuxième au troisième repère. On n'a pas simplement $T_{13} = T_{12} \circ T_{23}$ où T_{ij} est la transformation de Lorentz faisant passer du repère i au repère j , et où \circ désigne la composition ou multiplication des opérateurs linéaires correspondants. Pour comprendre cette difficulté, il est utile de regarder de plus près les deux grandes classes de transformations de Lorentz définies dans la littérature et qui servent de façon différenciée dans ce problème : - les transformations spéciales, ou boosts (dans le cas d'un déplacement parallèle des repères), et - les transformations générales dans le cas de déplacements non parallèles. Pour définir ces dernières, on a besoin d'effectuer des rotations : on se ramène d'abord à une transformation spéciale en positionnant un axe du repère mobile parallèlement à la vitesse de déplacement relatif ; puis après transformation de Lorentz on revient à la disposition initiale par la rotation inverse. Les difficultés évoquées plus haut sont en relation avec le fait que les transformations générales perdent la symétrie entre variables spatiales et temporelles, présente dans les transformations spéciales en se restreignant à un seul axe de coordonnées. Selon la compréhension standard, les variables d'espace sont concernées de façon différente du scalaire temps dans les rotations évoquées à l'instant. La symétrie est restaurée en utilisant un paramètre temporel associé à un déplacement, de direction donnée dans l'espace, et ayant un caractère vectoriel. Les rotations des axes que l'on fait pour ajuster pas à pas les transformations générales (vitesses relatives de directions quelconques) aux transformations spéciales (où l'on manipule une seule paire de coordonnées temporelles et spatiales en dualité) vont alors avoir des effets identiques sur les variables spatiales et sur les variables intermédiaires de position qui servent à définir le scalaire temps. Cette compréhension des choses permet de rendre plus simple la composition de transformations de Lorentz non colinéaires alors que la discussion classique conduit à des situations inextricables ; ces dernières, bien analysées par les physiciens critiques, ne sont pas résolues, ni du point de vue

mathématique, ni du point de vue de la signification physique, par les nouvelles rotations, dites de Thomas, que l'on doit rajouter. Ceci montre pour les formulations standard de la relativité, dans des situations il est vrai rares et de peu de conséquences pratiques, l'intérêt d'une reprise technique du formalisme dans la voie que nous avons proposée⁴.

Sur l'âge et le vieillissement comparés de deux jumeaux

La discussion de ce que l'on appelle le paradoxe des jumeaux nous donne une autre occasion de mettre à l'épreuve nos propositions. Plus d'un siècle après son énoncé par Langevin en 1911, le paradoxe dit des jumeaux continue en effet de susciter des débats passionnés dans la communauté des physiciens. S'il en est ainsi, ce n'est pas que l'on chercherait encore les erreurs de calcul ou de raisonnement disqualifiant les uns plutôt que les autres ; ou les expériences discriminantes permettant d'attribuer un âge plutôt qu'un autre à telle entité, différent de sa jumelle, comme si cela devait être imposé par le réel. Pour nous, cette situation révèle que le problème reste mal posé. Certes, avec la théorie de la relativité, l'idée d'un temps absolu qui serait le même partout est abandonnée ; mais, en voulant lui accorder une valeur locale propre, en voulant l'attacher à telle particule de matière (à tel jumeau), *on continue d'absolutiser le temps*. Le temps n'a pas une valeur substantielle qui n'aurait besoin de rien d'autre pour être définie. Sa valeur est relationnelle : il est défini par abstraction à partir des relations mutuelles des objets les uns par rapport aux autres dans l'espace (sinon, pourquoi changerait-il avec le mouvement ? Pratiquement, mesurer le temps revient comme nous l'avons dit à plusieurs reprises, à s'accorder sur le déplacement d'un mobile étalon). Dans ce processus, des conventions laissées au libre arbitre sont toujours nécessaires, et ouvrent à une pluralité d'interprétations. On peut montrer la variété des différences d'âge (dans un sens ou dans l'autre ; ou l'absence de différence ; rejoignant en cela les différents points de vue rencontrés) que l'on peut attribuer à des jumeaux, suivant les conventions faites pour mesurer le temps, c'est-à-dire en particulier celles concernant *la direction* du mouvement lui correspondant dans les horloges, et le type de modélisation physique adopté. Le formalisme relativiste au sens large est présent dans ces situations. Les équations utilisées ne peuvent se passer d'*interprétation* mettant à jour des choix différents pour le repérage du temps. Cela ne se pose pas lorsque le temps se définit tout seul sans besoin de choisir (de

⁴ Texte extrait de : 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. En ligne sur le site archive.org.

montrer) un mouvement. Il convient de distinguer *âge* (en relation avec un simple repérage) et *vieillesse* (en relation avec des phénomènes à discuter dans chaque cas). Un même cadre conceptuel me paraît pouvoir être défini, unifiant la discussion sur la relativité standard d'une part, et notre compréhension de l'espace et du temps d'autre part, et n'écarter pas le point de vue des physiciens critiques sur le sujet⁵.

Relations de degré zéro et relations d'a-certitude

Relations de degré zéro

Nous avons à plusieurs reprises dans nos travaux évoqué l'intérêt de considérer des formulations des lois physiques mettant en jeu au niveau fondamental un meilleur couplage entre les variables d'espace et les variables de temps. Nous les appelons lois ou relations *de degré zéro* ; nous les voyons déjà fonctionner dans la physique. En effet, les grandeurs y apparaissent souvent par groupes de deux (par exemple les paires {champ électrique, champ magnétique}, {énergie, quantité de mouvement}, {charge, courant} etc.) ; et on retrouve ces grandeurs dans des lois physiques se manifestant également en binômes (les équations de Maxwell vont par paires ; énergie et quantité de mouvement se retrouvent dans deux types d'équations, exprimant des conservations d'une part et des lois de forces d'autre part, etc.). Ces constats révèlent des qualités fondamentales de nos représentations possibles du monde, à comprendre dans une « pensée de la relation » : nul sens à une grandeur seule, mais à une dualité de grandeurs, ou mieux à des *variations liées de deux grandeurs* ; et les points de vue possibles (spatial / temporel) sur ces variations peuvent eux-mêmes être échangés. Pour le temps et l'espace, le constat est le même : nul sens à une variable d'espace ou de temps seule, mais à leur dualité et à leurs variations associées. Sur cette base, nous proposons qu'une loi élémentaire de la physique relie les dérivées partielles de deux grandeurs en dualité, par rapport au temps et à l'espace respectivement. Du fait de la symétrie espace - temps, l'échange, dans l'équation de la loi, des variables temporelles et spatiales, ou des deux grandeurs en dualité, donne une autre loi admissible. Cette approche permet de comprendre, *comme deux formes de la même loi*, des paires de lois de la physique a priori distinctes, et reliant chacune des combinaisons des dérivées temporelles et spatiales des grandeurs en dualité : ainsi les lois qui expriment des conservations d'une part, et celles qui expriment des

⁵ Texte extrait de : Guy B. (2015) Sur l'âge et le vieillissement comparés de deux jumeaux (théorie de la relativité), <hal-01196320>.

fonctions de forces d'autre part, reliant des dérivées spatiales (dans des divergences dans le premier cas, dans des gradients dans le second), à des dérivées temporelles. Ainsi pouvons-nous interpréter la deuxième loi de Newton (la dérivée temporelle de la quantité de mouvement est égale au gradient de l'énergie) et la loi de la conservation de l'énergie (la divergence de la quantité de mouvement est égale à la dérivée temporelle de l'énergie) *comme deux formes de la même loi*. On peut lire de la même façon les diverses équations de Maxwell. Sous leur forme élémentaire, les lois proposées sont invariantes par transformation de Lorentz, et les grandeurs en dualité se transforment par des relations analogues à celles portant sur les coordonnées spatio-temporelles (on pourrait inversement parler du temps et de l'espace comme des fonctions des champs de grandeurs en dualité)⁶.

Relations d'a-certitude

Les dualités rencontrées dans les relations de degré zéro vont se manifester d'une façon particulière à propos des valeurs numériques attribuées aux grandeurs physiques ; ces valeurs sont soumises à diverses sources de variabilité semblant limiter leur bonne connaissance. On connaît déjà les *incertitudes* ou *erreurs* associées au processus de mesure. Il y a ensuite l'*indétermination* imputable au fait que telle grandeur physique n'est pas susceptible par elle-même d'avoir une valeur précise mais montre un spectre de valeurs. Une troisième source d'incertitude, dénommée *a-certitude* pour la différencier des deux premières peut être distinguée. Elle est en relation avec les propriétés de solidité que l'on est forcé d'attribuer, sans en être certain, aux différents éléments du cadre de référence selon lequel les représentations sont construites : les étalons (auxquels sont comparées les grandeurs à mesurer pour obtenir des valeurs numériques), les constantes, les lois, les repères d'espace-temps, les mots mêmes utilisés. L'a-certitude, c'est la déclaration d'une certitude qui se nie elle-même dans sa fragilité. Des conséquences concrètes en sont dérivées : – relations d'a-certitude, portant sur des grandeurs connues non séparément mais en composition l'une avec l'autre : la méconnaissance du repère, source de variabilité, est simulée par un petit déplacement dans une transformation de Lorentz ; – discussion sur la dimensionnalité des représentations. On en retire le point positif du constat du caractère provisoire des théories, la liberté de faire certains choix, associés à des désignations, sur lesquels nous bouclons l'énoncé de nos lois et la mise en œuvre de nos mesures. Ainsi le postulat de constance de la

⁶ Textes extraits de : Guy B. (2012) Degré zéro des lois physiques, considérations heuristiques <hal-00723183>. Guy B. (2014) Pour un principe d'a-certitude en physique, <hal-01062731>.

vitesse de la lumière dans le vide permet de construire nos représentations de l'espace et du temps à l'intérieur de la théorie de la relativité ; l'a-certitude associée favorise le recul par rapport à cette construction et l'acceptation plus sereine des phénomènes de non-localité (ou non-séparabilité) et non-temporalité, étudiés aujourd'hui dans le cadre de la mécanique quantique ; elle ouvre encore à la possibilité de neuf degrés de liberté pour les modèles physiques (nombre également requis par les théories de la supersymétrie et des supercordes). L'a-certitude est une conséquence de la pensée relationnelle.

Hasard, espace, temps

L'aspect « mesure » des probabilités renvoie toujours concrètement, pour un problème donné, à des *comparaisons de morceaux d'espace et/ou de temps occupés par les divers événements discutés*. Et nous savons que les mesures d'espace et de temps sont établies à travers la confrontation entre différents phénomènes physiques et supposent des choix arbitraires quant à la définition des étalons. Une approche relationnelle de la notion de probabilité peut ainsi être envisagée, le caractère relationnel des uns (espace, temps) retentissant nécessairement sur les autres (hasard, probabilités)⁷. Le modèle probabiliste attaché à telle série d'événements, que nous qualifions d' « apparents », se construit en opposition à, ou en composition avec, un autre modèle probabiliste, concernant un ensemble d'événements « cachés » ; ceux-ci servent de jauge et leur loi est uniforme (les probabilités de leurs différents événements sont égales). Les deux points de vue peuvent être échangés, en s'appuyant, pour définir la jauge, sur les événements initiaux du modèle de probabilité non uniforme : on leur accorde alors une loi uniforme, et, par comparaison, on définit de nouvelles mesures pour le modèle caché initialement uniforme. Parlons de formulation duale du problème, par opposition à sa formulation primale initiale. Suivant les circonstances, suivant l'histoire, on peut être amené à changer d'étalon. On voit ainsi un caractère inéluctable de récursivité dans la démarche : il y a un aspect relationnel, révisable, de discussion et de choix des étalons au sein même des probabilités. Cela permet de contribuer au débat entre fréquentistes et bayésiens (il n'y a pas de probabilité intangible sans nécessité d'aucun choix) et de formuler quelques considérations générales sur le hasard, indéfinissable de façon substantielle : on ne peut qu'opposer des situations plus hasardeuses, ouvrant de façon égale à un ensemble d'éventualités (auxquelles

⁷ Texte extrait de : Guy B. (2017b) Hasard, espace, temps : introduction à une approche relationnelle de la probabilité, <hal-01468456>.

on attache de façon révisable un caractère d'étalon dans une loi uniforme), à des situations moins hasardeuses où telle ou telle éventualité a davantage de poids (ou à la limite, reste seule). Une des applications potentielles se rapporte à la conciliation conceptuelle de la relativité générale et de la mécanique quantique, où interviennent des fonctions à caractère probabiliste (voir section suivante). Les sauts qui y sont observés sont compris comme des intervalles de valeurs des grandeurs de faible probabilité, c'est-à-dire de faible occupation de l'espace et du temps.

A propos de gravitation quantique

Pour de multiples raisons, la relativité générale et la mécanique quantique ont une coexistence difficile, qui se cherche encore. Ce qui frappe, quand on observe les travaux des physiciens qui s'essaient à faire converger d'une façon ou d'une autre les deux théories, c'est le degré élevé de technicité mathématique. Sans être complètement capable de les juger, faute de les suivre dans tous leurs développements, nous formulons l'acte de foi qu'il manque à cette entreprise un nouveau regard conceptuel ; c'est en reformulant les bases mêmes de notre intellection que l'on pourra avancer. Plus précisément, les deux théories se font des représentations différentes de l'espace et du temps, et il nous paraît intéressant de reformuler la question en se rapportant à notre compréhension de ces concepts, 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'intervertissent. 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 définissant 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. Ces quelques idées ouvrent un cadre préliminaire et qualitatif comme base de futures recherches quantitatives⁸.

Une loi modifiée de la gravitation ?

Les recherches précédentes nous font revisiter la relativité générale. Le passage de cette théorie à la loi de Newton de l'attraction universelle se fait classiquement avec des métriques⁹ à symétrie sphérique. Pour les métriques les plus générales (correspondant à des repères ayant des mouvements de rotation etc.) de nouveaux termes apparaissent qui viennent se rajouter aux termes classiques newtoniens ; ils ont été appelés termes gravito-magnétiques dans la littérature car ils ressemblent aux lois du magnétisme, et plus généralement aux équations de Maxwell. Revenant à des expressions ne passant pas directement par le formalisme de la relativité générale, nous sommes conduits à postuler une loi modifiée de la gravitation newtonienne qui soit décalquée sur celles de l'électromagnétisme, c'est-à-dire qui tienne compte des vitesses relatives des masses en mouvement¹⁰. Elle simule in fine un « supplément » de masse. Son application à quelques problèmes fournit des bons ordres de grandeur pour les excès de masse ou de gravitation apparents associés au mouvement des satellites Pioneer, des étoiles dans les galaxies ou des galaxies dans les amas de galaxies, et ce pour la même valeur du paramètre additionnel. La loi donne de façon équivalente l'impression d'un défaut d'attraction pour les stades ultérieurs par rapport aux stades précoces d'un système de masses en éloignement relatif (expansion) les unes par rapport aux autres, ce que l'on peut qualifier de façon relative comme une force répulsive. L'ordre de grandeur prévu de l'énergie correspondante est aussi conforme à ce qui est indiqué dans la littérature à propos de l'« accélération » de l'expansion de l'univers.

⁸ Extrait de : Guy B. (2016g) Relier la mécanique quantique et la relativité générale : réflexions et propositions <hal-00872968>.

⁹ Une métrique est une façon mathématique d'exprimer une distance entre deux points.

¹⁰ Extrait de: Guy B. (2010b) A modified law of gravitation taking account of the relative speeds of the moving masses. A preliminary study, <hal-00472210>.

Cette proposition n'est qu'une parmi tant d'autres qui, aujourd'hui, se partagent la scène, avec d'un côté les écritures de lois modifiées, et de l'autre, les recherches de matière noire et d'énergie noire. Le cadre conceptuel dans lequel nous nous situons repose sur l'affirmation des liens fondamentaux qui unissent les concepts de temps et d'espace et une meilleure symétrisation des lois de la physique par rapport à ces paramètres. Sans prétendre à une durée de vie illimitée de notre proposition (d'autres lois modifiées paraissent supérieures¹¹), nous voudrions souligner que les lois modifiées ne s'opposent pas forcément à la relativité générale. Il faut reprendre ce supposé antagonisme entre des compréhensions différentes de la physique : ni les uns ni les autres ne semblent avoir vu le caractère non substantiel du temps, la rationalité relationnelle à l'œuvre, les inévitables régressions à l'infini et leur arrêt par des choix arbitraires donnant un statut conventionnel à la vitesse de la lumière. Ces voies nouvelles ouvrent au pluralisme théorique, cher à Poincaré, non embarrassé d'une coexistence de la relativité générale et d'autres lois reposant sur des concepts différents. Ces recherches pourront être étendues à d'autres questions de la physique où la compréhension du temps comme liée à un mouvement est éclairante : - la discussion des symétries CPT¹² ; - le comportement des variables d'espace et de temps dans la traversée de l'horizon des événements des trous noirs ; - la formulation des équations de l'électromagnétisme... ; pour n'en citer que trois.

Sur le fonctionnement des équations

D'une façon générale, le fonctionnement des équations, quelles qu'elles soient, a un sens, même si on ne comprend pas tout ce qui se passe¹³. Pour nous donc, il est important que, dans la suite de la démarche dont nous venons d'exposer quelques étapes, on puisse écrire un ensemble d'équations qui a une cohérence interne ; cet ensemble montre en particulier que l'espace et le temps, décrit par une paire de deux champs tri-dimensionnels r et t (le temps étant construit à partir de la position d'un mobile dans l'espace), sont sur le même plan que d'autres paires de champs physiques, envisagées de façon très générale, et dont l'exemple type est la paire (champ électrique, champ magnétique).

¹¹ Voir par exemple les travaux d'Assis : *Relational mechanics*, Apeiron, Montréal, 286 p., 1999.

¹² Symétries ou non-symétries observées lorsque l'on combine des transformations portant sur le temps, sur l'orientation des axes spatiaux et sur la conjugaison de charge électrique (remplacement d'une charge par son opposée).

¹³ Les éléments de cette section ont été exposés oralement à un séminaire donné à l'Ecole normale supérieure, rue d'Ulm, Paris en octobre 2017 (Collège international de philosophie et ENS Paris, coordination Carlos Lobo).

Ceci se voit sur les transformations de Lorentz, un pilier de la théorie de la relativité, à ré-écrire en 3 + 3 dimensions. Ceci se voit sur des équations que nous considérons comme équivalentes, que nous appelons de degré zéro (voir ci-dessus), et qui lient les divers champs physiques à l'espace et au temps (elles expriment que, dans une démarche relationnelle, on ne connaît pas les grandeurs en elles-mêmes, on ne connaît que des variations couplées rapportés les unes aux autres ; cf. les équations de Maxwell au sens large). Nous concluons de ce fonctionnement des équations que à la limite, on ne peut distinguer la paire (temps, espace) des autres paires de champs physiques, que n'importe laquelle peut être prise pour définir temps et espace, ou encore que nous avons divers modes de temps et d'espace appuyés sur les différents phénomènes à comparer les uns aux autres (c'est la seule chose que nous puissions faire).

On nous dira que nous avons proclamé haut et fort que le temps et l'espace disparaissaient au profit du mouvement. Et voici que nous reparlons d'équations où ils interviennent tous deux ! On peut faire plusieurs réponses à cette remarque.

D'abord le simple fait de mettre sur le même plan espace et temps, en comprenant le temps à travers une position dans l'espace tri-dimensionnel, nous révèle en transparence les mouvements cachés dans l'un et l'autre. Si temps et espace sont de même nature, on peut désormais, en utilisant certes deux systèmes de repérage pour notre commodité, utiliser un seul registre pour parler de l'espace et du temps : ne parler que de positions (le temps est la position de l'aiguille de l'horloge, cf. les propos d'Einstein) ; ne parler que de temps (une position distante est un temps de trajet de la lumière), chacun des deux registres renvoyant in fine à des mouvements.

Ensuite, les formes mêmes des équations sont la trace des raisonnements conduits et qui font intervenir des mouvements de différentes façons :

- choix du mouvement de la lumière comme reliant temps et espace et servant d'étalon de comparaisons entre points de vues différents dans les transformations de Lorentz (nous n'avons pas dit : même vitesse de la lumière, même si on peut le comprendre ainsi) ;
- égalités de vitesses le long des mouvements qui accompagnent les phénomènes et les modifications des repères : les équations de degré zéro peuvent en effet être écrites sous une forme différente en faisant intervenir les dérivées particulières, c'est-à-dire le long des mouvements. On discute alors de propagations qui se composent pour définir temps et espace.

- Enfin, nous pouvons dire que nous sommes maintenant lucides sur la fragilité des équations où le partage entre espace et temps n'est pas absolu, même dans un seul repère, mais est soumis à révision. Manipuler des variables d'espace et de temps nous cache les récursivités qui sous-tendent leurs définitions ; ceci étant posé, la dualité (espace, temps) quelle que soit sa généalogie, reste évidemment en accord avec le régime le plus habituel sous lequel nous voyons le monde ; son caractère pratique et fécond n'est pas contestable.

Nous n'avons pas reparlé dans cette énumération de tout le volet herméneutique associé au simple fonctionnement des équations : nous avons toujours besoin de parler des équations et redire quel lien nous voyons avec la réalité et les expériences. Le nouveau regard sur divers problèmes débattus dans la communauté des physiciens (nous avons évoqué plus haut le paradoxe des jumeaux, la composition de transformation de Lorentz non colinéaires, la mise en regard de la relativité générale et de la mécanique quantique) ne peut se faire que en donnant toute sa valeur au mouvement (en particulier, pour les deux premiers points, en regardant aussi sa direction).

En conclusion, nous espérons que cette revue rapide de divers secteurs de la physique aura montré la possible fécondité dans ce domaine de notre point de vue sur la trilogie temps / espace / mouvement, et l'intérêt de poursuivre des recherches dans cette voie ; tant pour examiner les problèmes repérés que les solutions qui leur ont déjà été proposées¹⁴.

¹⁴ Comme je l'ai dit à l'occasion, sans écarter a priori toutes les propositions des physiciens critiques, à resituer dans le nouveau contexte. Un seul exemple : l'utilisation des trois paramètres t_x , t_y , t_z associés au temps a déjà fait l'objet d'une abondante littérature, que je cite en partie dans mes travaux.