



HAL
open science

Pour un principe d' " a-certitude " en physique

Bernard Guy

► **To cite this version:**

| Bernard Guy. Pour un principe d' " a-certitude " en physique. 2014. hal-01062731

HAL Id: hal-01062731

<https://hal.science/hal-01062731>

Preprint submitted on 10 Sep 2014

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.

Pour un principe d' « a-certitude » en physique

Bernard Guy
Ecole nationale supérieure des mines de Saint-Etienne

guy@emse.fr

Première version, septembre 2014

Résumé

Les valeurs numériques attribuées aux grandeurs physiques sont soumises à diverses sources de variabilité semblant limiter leur bonne connaissance. Il y a d'abord 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, est proposée ici de façon préliminaire. 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*, dont la forme est donnée dans un cas particulier (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 recul sur le 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 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 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, seule possible pour des observateurs à l'intérieur du monde, par opposition à la pensée substantielle de l'observateur qui se pense extérieur au monde.

Mots clés : indétermination ; incertitude ; a-certitude ; espace ; temps ; mouvement ; incomplétude ; erreur systématique ; erreur statistique ; relations d'indétermination ; relations d'a-certitude ; pensée relationnelle ; étalon ; arbitraire ; pluralisme théorique ; 9 degrés de liberté ; supersymétrie ; supercordes

Introduction

Le mot *incertitude* est utilisé en physique dans plusieurs sens. On l'emploie fréquemment à propos des erreurs inconnues portant sur la valeur des grandeurs (valeur « vraie » moins valeur mesurée) ; on le rencontre également, en mécanique quantique, à propos de l'impossibilité de déterminer simultanément et précisément les valeurs de certaines grandeurs physiques en dualité¹. Dans cet article, nous venons poser la question d'une incertitude d'un troisième type : elle est en relation avec les étalons de mesure et les modèles dans lesquels on les comprend ; nous ne l'avons pas rencontrée comme telle dans la littérature ; pour clarifier la pensée, il nous paraît utile de lui attribuer le vocable différent d'*a-certitude*.

1. Rappels : limitations portant sur les valeurs attribuées aux grandeurs physiques (approche standard)

On distingue a priori deux grandes classes de limitations portant sur les valeurs numériques des grandeurs associées aux objets physiques que nous étudions :

- celles relatives à l'opération de mesure effectuée sur eux, selon deux voies différentes : la première renvoyant aux imperfections de l'appareil de mesure (il n'est pas forcément parfaitement cohérent avec les étalons) : on parle d'incertitude ou d'erreur systématique ; la seconde renvoyant à l'opération de mesure et au savoir faire de l'opérateur : on parle d'incertitude ou d'erreur statistique. C'est l'entendement classique, au sens de notre éducation scientifique, du mot *incertitude* (voir par exemple Taillet et al., 2013).

- à ces incertitudes, il faut rajouter, depuis le développement de la mécanique quantique, l'*indétermination* associée au fait que l'objet à mesurer peut avoir un certain "étalement", une certaine extension, c'est à dire ne pas, par lui-même, être susceptible d'être mesuré avec une

¹ On parle aussi d'indétermination à ce propos, voir plus loin.

précision infinie². Un auteur comme J.-M. Lévy-Leblond (dans son livre « Aux contraires », 1996a, chapitre : Certain / incertain) insiste pour faire la distinction nette entre cette *indétermination* et les *incertitudes* rappelées ci-avant : c'est l'objet qui est en cause, et non la mesure.

Dans l'un et l'autre cas, on peut voir ces "limitations" de façon positive : - comme fournissant des intervalles de confiance pour les "incertitudes" classiques ; - comme permettant des calculs et la prévision des valeurs possibles de certaines grandeurs pour les "indéterminations" en mécanique quantique.

2. Une limitation fondamentale (a-certitude) portant sur les étalons et les modèles

Il nous semble, et nous arrivons à notre propos, qu'il faudrait parler d'un troisième (ou quatrième) type de limitation : il n'est relatif ni à l'appareil de mesure, ni à l'opération de mesure, ni à l'objet à étudier, mais est plus fondamentalement lié aux propriétés que l'on est obligé d'accorder (sans "certitude") aux *étalons* mêmes qui vont nous servir (directement ou indirectement) dans ces mesures, et cette situation n'est pas séparable des modèles (y compris d'espace-temps) que nous postulons pour décrire la réalité physique (incertitude épistémique).

Nous sommes, selon notre réflexion, dans une situation où c'est le cadre lui-même de notre entendement qui est soumis à perplexité et fragilité; nous ne sommes pas sûrs du sens même des mots que nous utilisons pour parler du réel. Nous pouvons renvoyer à notre étude sur la pensée de la relation (Dujardin et Guy, 2012) : nous devons, pour raisonner, « mettre en absolu » (c'est à dire déclarer « certaines ») des caractéristiques du réel que nous désignons, mais cet absolu est précaire. En déclarant constants, sans en être certains, les étalons, nous donnons un statut tout particulier à ces objets et *nous les faisons échapper au processus de mesure lui-même* ; le statut des « constantes » de la physique est le même. Et la constance des étalons et des constantes est inséparable de la solidité que l'on accorde aux théories physiques portant sur les grandeurs qu'ils

² On peut parler de la variabilité naturelle, de l'*élasticité* ou de la *plasticité* de l'objet, ou plus scientifiquement dire que la grandeur associée n'a pas une valeur mais un *spectre de valeurs* qui peut dépendre des circonstances. Cette propriété n'est ici pas séparable d'une dualité dont nous parlons plus loin.

permettent de calibrer³. Si constance signifie « constance dans l'espace et dans le temps », on voit le rôle privilégié dans cette discussion des repères d'espace-temps.

La situation à laquelle nous arrivons ainsi *est une conséquence inévitable de la pensée relationnelle* à laquelle nous sommes contraints dans notre situation à l'intérieur du monde ; par opposition à la pensée substantielle d'un observateur qui pourrait regarder le monde « de l'extérieur ». Les récursivités inévitables entraînées conduisent à des régressions à l'infini que l'on arrête par des décrets, dont on a souligné à l'instant la fragilité⁴.

Le mot « absolu » dans « mise en absolu » peut laisser penser que l'on a trouvé une caractéristique substantielle de la réalité. Insistons pour dire qu'il n'en est rien, et qu'il n'y a pas d'incompatibilité avec le degré d'arbitraire dans le choix du modèle, ni avec l'écart entre le réel empirique et le réel en soi, inatteignable. Plutôt que d'absolu, parlons de mise en hyperbole, soit de l'opération par laquelle un terme, une notion, une mesure font « fonction » d'absolu⁵. Cette procédure vaut au terme, à la notion, à la mesure, de n'être plus discutées... ou à tout le moins de faire fonction de référents obligés, dans le cadre de la configuration élaborée. La procédure de mise en hyperbole est révisable et précaire (le constat inséparable de cette fragilité peut s'appeler « mise en ellipse ») ; cet ordre de réalité « procédural » relève de contraintes que l'on pourrait qualifier d'anthropologiques⁶ et n'a pas à voir avec un statut ontologique des objets qui font « fonction de »⁷.

Nous avons-nous même pu employer le mot d'incertitude dans cette situation (par exemple : Guy, 2004), mais il nous semble, en suivant Lévy-Leblond, que ce mot est piégé (voir aussi cet auteur, 1996b, sur le rôle du langage). Nous pouvons donc nous demander comment appeler proprement cette situation. Faute de mieux, nous proposons pour l'instant de l'appeler *a-certitude*⁸, ce mot renvoyant à une certitude en somme décidée par l'homme, mais avec un degré d'arbitraire non

³ On parle aujourd'hui de la « dématérialisation » de l'étalon de masse ; elle n'en renvoie pas moins à la fois à des lois et à des constantes de la physique.

⁴ Dujardin, 2009, utilise à propos de cette situation les mots de suspension, de manque, d'*ellipse*.

⁵ Cela se raccorde avec l'utilisation du mot « possible », quoique dans un sens un peu différent (Léonhardt, 2014).

⁶ Ainsi le jeu de l'*a-certitude* vaut dans les sciences humaines et sociales.

⁷ Nous reprenons dans ce paragraphe les mots de Ph. Dujardin. Dans cette démarche, où l'on déclare constante telle grandeur et en assumant les conséquences, nous faisons « comme si » (c'était vrai) ; cette attitude rejoint l'idée de « fiction » discutée par A.F. Schmid (2014).

⁸ La coexistence d'un préfixe d'origine grecque et d'un mot d'origine latine n'est pas complètement satisfaisante.

réfutable. Le mot *a-certitude* s'oppose au caractère « clairement » affirmatif, en positif ou négatif, des mots certitude ou incertitude. On pourrait aussi parler de mal-détermination, mais il nous semble que dans la « mise en absolu » que nous venons de rappeler, il y a plus qu'une « détermination » : *il y a justement la déclaration d'une certitude, qui se nie elle-même dans sa fragilité*⁹...

L'incertitude et l'indétermination permettent des affirmations utiles, dans les encadrements et les prévisions qu'on en dérive. L'a-certitude, comme on le verra plus loin, permet d'écrire des relations analogues aux relations d'indétermination de la mécanique quantique ; d'un point de vue plus général, elle peut également être vue de façon positive : - comme principe de liberté, de choix libre : nos représentations ne sont pas strictement imposées par le réel (situation d'incomplétude, cf. Léonhardt, 2008) ; - comme principe d'ouverture, de pluralisme théorique (cf. Poincaré, 1902, 1905 ; Mizony, 2010) ; - comme principe de dialogue, de remise en cause possible de nos protocoles, de reprise sans fin de la construction de nos représentations ; c'est en somme un principe de recul sur nos démarches (« je sais que je ne sais pas ») ; - comme soulignant enfin la part de confiance que nous devons accorder, au moins provisoirement, aux propositions des scientifiques : l'adhésion n'est pas imposée automatiquement.

Divers auteurs ont discuté, dans un esprit différent, qui rejoint notre propos, la possibilité que les « constantes » de la physique puissent être variables. Nous n'avons pas fait de recherche bibliographique systématique sur le sujet (voir par exemple les travaux de Jean-Philippe Uzan, 2011). Plus largement, de nombreux auteurs ont souligné le rôle positif des incertitudes, incomplétudes, contradictions, auxquelles sont soumises nos représentations du réel (nous rangeons ensemble ces mots apparentés, quoique non synonymes ; voir par exemple les actes des Ateliers sur la contradiction, Guy coord. 2010, 2012, 2014 ; ou encore le congrès AISLF, 2012).

⁹ Avec le préfixe « mal », on pouvait aussi proposer mal-certitude ou mal-incertitude. Nous avons laissé ce préfixe qui a une connotation péjorative.

3. Les étalons d'espace et de temps

Le cas des étalons d'espace et de temps (voir par exemple Guy, 2004, 2011, 2013) donne une illustration du point de vue précédent, en même temps qu'il fournit un cadre à la signification de la constance même des autres étalons. Dans la mesure où nous construisons des repères d'espace-temps sur ces étalons, nous pouvons parler de l'imperfection liée au choix de l'espace-temps dans lequel nous opérons. Incertitudes sur les longueurs et les durées et incertitudes sur les repères s'identifient. Nous pourrions imaginer (nos équations le permettent) que le morceau de monde que nous voyons (la pièce dans laquelle nous sommes) se dilate en même temps que les vitesses des phénomènes visibles s'ajustent en proportion pour que l'effet résultant soit nul (voir aussi Poincaré, 1905). Ainsi nous ne savons dire la mobilité et l'immobilité de façon absolue, comme si nous regardions le monde de l'extérieur. Mais nous décidons à un moment donné : cette portion du monde est immobile (cette règle étalon a une longueur invariable), par opposition à : ce mobile a une vitesse constante (la lumière se propage à vitesse constante). Ces deux décrets reviennent au même (nous pourrions dire de façon plus adaptée que c'est l'étalon de mouvement qui est constant, Guy, 2013). Mais, de tout cela, nous ne savons rien, ou plutôt nous ne pouvons rien en savoir ; *à la limite, cela n'a pas de sens d'en savoir quelque chose*. Mais nous décidons ainsi pour avancer, pour communiquer, et nous en assumons les conséquences dans les équations de la relativité. On peut même dire plus généralement que, dès que nous utilisons des noms communs, et non des noms propres, nous faisons à l'avance des hypothèses de ce type sur une certaine stabilité du monde. Sans « certitude ». On aura bien vu qu'il s'agit alors d'une incertitude fondamentale, épistémologique ou ontologique¹⁰.

Le côté positif de cette situation est de nous faire prendre du recul par rapport à nos « constructions » des concepts et repères d'espace et de temps, non strictement imposés par le réel et accepter plus sereinement des phénomènes de non-localité et non-temporalité, étudiés

¹⁰ Dans nos travaux, nous cherchons à construire espace et temps à partir de mouvements et leurs vitesses relatives ; nous avons besoin à un moment donné de définir des mouvements sans vitesse (la vitesse ne résulte que de la comparaison des mouvements). On peut dire aussi que dans l'a-certitude discutée ici se loge la compréhension « impossible », et sans mot support, de ces mouvements sans vitesse, qui précèdent ce que l'on peut dire des mouvements observés.

aujourd'hui dans le cadre de la mécanique quantique (voir par exemple Gisin, 2012) : l'espace et le temps nous échappent¹¹.

4. Relations d'a-certitude

4.1 Relations d'indétermination et dualités

Les relations d'indétermination rencontrées en mécanique quantique concernent des variables en *dualités*. Ce résultat est au départ une conséquence du formalisme ondulatoire et probabiliste utilisé, dans la fonction d'onde Ψ et sa transformée de Fourier ; la première permettant de définir la loi du vecteur position (x, y, z) , et la seconde la loi de la quantité de mouvement (p_x, p_y, p_z) ; ces lois s'entendent au sens probabiliste, et définissent en l'occurrence des densités de probabilité. Les relations d'indétermination relient les étalements ou variances de ces fonctions, et il n'y a rien d'extraordinaire à cela ; elles traduisent une propriété mathématique (transformée de Fourier) de fonctions ayant des spectres de valeurs. Dit autrement, l'existence même des dualités, exprimées par des relations organiques entre les variables, a pour conséquence que la « précision » sur la valeur d'une variable entraîne l'« imprécision » sur la valeur de la variable associée. Insistons : les relations d'indétermination, par exemple les relations fameuses entre les variables de position (x, y, z) et les variables d'impulsion (p_x, p_y, p_z) se comprennent d'abord dans ce cadre de variables liées par paires. La variabilité possible des variables à l'intérieur de ces paires (et qui va donner in fine les relations d'indétermination), reflète quant à elle une propriété des objets dont l'étalement est plus ou moins important suivant les circonstances. Variabilité et dualité sont ici intimement liées.

Encouragés par ces relations d'indétermination « primaires », les physiciens ont écrit de très nombreuses relations, qu'ils ont en général dénommées relations d'incertitude. Ils l'ont fait, non plus strictement à partir des propriétés mathématiques (cf. la transformée de Fourier) des fonctions associées aux grandeurs physiques (elles ne présentent pas forcément d'étalements), mais sur la base de raisonnements plus ou moins simples, que l'on peut parfois discuter. Citons

¹¹ Ou dit encore : le réel en soi n'est pas régi par l'espace-temps ; ce dernier est associé à un réel empirique provisoire.

par exemple les relations entre temps et énergie, les relations entre des composantes des champs électrique et magnétique (e.g. Bohr et Rosenfeld, 1933, 1950 ; travaux analysés par Darrigol, 1991) ; voir aussi plus loin.

4.2. Relations d'a-certitude

Dans la pensée de la relation, nous sommes amenés à concevoir les grandeurs en opposition les unes aux autres. Dans ce cas, la dualité est une conséquence de ce mode de pensée et non du formalisme ondulatoire au sens large utilisé comme en mécanique quantique. Il n'est plus question d'objets a priori étalés et la variabilité des variables a quant à elle sa source dans la méconnaissance foncière du cadre de pensée, et non dans les circonstances guidant le plus ou moins grand étalement des fonctions associées aux objets, ni dans le processus de mesure. La liaison entre variabilités est in fine une conséquence à la fois de la dualité (c'est l'aspect relation) et de la méconnaissance du cadre (s'exprimant dans la possibilité de variabilité elle-même). Nous pourrions appeler ces relations relations d'a-certitude ; nous ne présentons pas le formalisme général permettant de les écrire : c'est un problème largement ouvert. Toute la question est de savoir comment exprimer la variabilité du cadre de référence. Il peut y avoir, comme nous allons le voir sur un cas particulier, convergence de forme mathématique avec les relations d'indétermination.

4.3. Relations d'a-certitude reliant variables spatiales et temporelles

Les variables spatiales et temporelles sont définies en dualité. Cette dualité se lit dans ce que nous avons appelé les lois de degré zéro de la physique (reliant les dérivées par rapport au temps et à l'espace de grandeurs en dualité) et dans les transformations de Lorentz qui sont équivalentes (Guy, 2010, 2012). Ces dernières montrent des comportements symétriques des variables spatiales et temporelles. Elles expriment une structure de groupe révélant à la fois conservation (de la « vitesse » de la lumière par exemple) et changement (de repère).

La méconnaissance du cadre de référence peut s'exprimer en se servant à nouveau de la transformation de Lorentz. On peut en effet écrire que l'on n'est pas certain d'un repère, en le confrontant à un repère très voisin qui se déduit du premier par un déplacement relatif à la petite vitesse inconnue v . L'observateur se croit dans le repère R , mais il ne peut exclure d'être dans un

repère R' qui se déduit de R par transformation de Lorentz. Dans ce petit déplacement, on exprime également plusieurs incertitudes : celle sur la frontière entre espace et temps, celle sur l'origine des grandeurs d'espace-temps à mesurer (et non sur l'extrémité de la grandeur comme d'habitude¹²), ou encore, à la limite, sur la vitesse même de la lumière dans le facteur $\delta c = v/c$; en bref se joue ici la méconnaissance que nous avons des repères au sens large, incluant étalons et lois de propagation. Mais malgré ces incertitudes, on décide de garder constant une grandeur appui de nos représentations, en l'occurrence la vitesse de la lumière¹³.

Relations d'a-certitude : nous présentons ici le calcul sur le cas scalaire avec une dualité entre deux variables x et t . Plus précisément, raisonnons sur un couple (L, T) où L est une longueur, et T une durée. Utilisons, sans les reprendre pour l'instant, les calculs classiques portant sur la contraction des règles de longueur L et dilatation durées T , dans :

$$L' = \frac{L}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{1/2}} \quad \text{et} \quad T' = T \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{1/2}$$

Où L' et T' sont les valeurs observées dans le repère R' (résultat de la transformation de Lorentz). On a alors

$$LT = L'T'$$

exprimant le lien entre dilatation de l'une et contraction de l'autre. On voit à partir de là que les précisions ou incertitudes δL et δT sur l'une et l'autre sont liées¹⁴. Calculons comment.

¹² De façon imagée, on peut associer à un vecteur représentant une grandeur deux incertitudes : celle sur la position de l'origine du vecteur, qui n'est pas imputable à la grandeur, mais au repère ; et celle sur l'extrémité du vecteur, qui, elle, renvoie à la grandeur elle-même.

¹³ Encore une fois, ce choix est indispensable pour communiquer, penser, édifier nos représentations ; il est à la fois fort puisque tout est construit sur lui, et faible dans sa « gratuité ». Indépendamment des aspects épistémologiques, on conviendra que la « constance » de la vitesse de la lumière a aussi un caractère « pratique ».

¹⁴ Il est étonnant qu'au moins l'analogie de forme avec les relations d'indétermination de la mécanique quantique n'ait pas davantage été commentée ; dans certains traités de relativité (Becquerel, 1922), on écrit même $\delta x \delta t = cte$. Après multiplication des expressions précédentes par les autres coordonnées, on parle à ce propos de constance de l'hypervolume d'univers ; dans notre compréhension, et pour le cas général à 3 + 3 coordonnées $(x_i \text{ et } t_i)$, il s'agirait plutôt de la conservation de la somme (ou norme) $\sum x_i t_i$ (voir Guy, 2004).

L'observateur « hésite » entre R (x, t, L, T), et R' (x', t', L', T'), ce qui se manifeste dans une incertitude $\delta L = L' - L$, $\delta T = T' - T$. On a alors

$$\delta L \delta T = (L' - L)(T' - T) = \left(\frac{L}{(1 - \frac{v^2}{c^2})^{1/2}} - L \right) \left(T(1 - \frac{v^2}{c^2})^{1/2} - T \right)$$

$$\delta L \delta T = LT \left(\frac{1}{(1 - \frac{v^2}{c^2})^{1/2}} - 1 \right) \left((1 - \frac{v^2}{c^2})^{1/2} - 1 \right)$$

Pour calculer cette expression, on effectue un développement limité au deuxième ordre pour la variable v^2/c^2 . On sait que

$$(1+x)^n = 1 + nx + \frac{n(n-1)}{2!} x^2 + \dots$$

On a alors

$$\delta L \delta T = LT \left(1 - \frac{1}{(1 - \frac{v^2}{c^2})^{1/2}} - (1 - \frac{v^2}{c^2})^{1/2} + 1 \right) = LT \left(2 - 1 - \frac{v^2}{2c^2} + \frac{v^4}{8c^4} - 1 + \frac{v^2}{2c^2} + \frac{v^4}{8c^4} + \dots \right)$$

Il vient

$$\delta L \delta T \approx LT \frac{v^4}{4c^4}$$

On peut aussi écrire ce résultat sous la forme

$$\frac{\delta L}{L} \frac{\delta T}{T} = \frac{1}{4} \left(\frac{v}{c} \right)^4$$

L'égalité correspond à la valeur minimum ou seuil de la grandeur. Dans le cas général on a une inégalité

$$\frac{\delta L}{L} \frac{\delta T}{T} \geq \frac{1}{4} \left(\frac{v}{c}\right)^4$$

Nous laissons pour l'instant ouverte l'interprétation d'un tel résultat, l'important à ce stade étant que la « précision » sur L, dans le facteur $\delta L/L$ est limitée par celle sur T dans le facteur $\delta T/T$; la valeur du ratio $v^4/4c^4$ est très petite. Comment comprendre ce v inconnu ? Bohr et Rosenfeld font apparaître un petit δl inconnu, intervenant dans la relation d'indétermination. Ici on peut dire que v/c joue le rôle d'un δc .

On traite dans Guy (2004), le cas général où sont envisagées trois variables d'espace x_i et trois variables associées au temps t_i , avec une procédure elle-même plus générale (non directement fondée sur les aspects de dilatation / contraction des règles et horloges). Elle conduit aux relations d'a-certitude écrites ci-dessus.

4.4. Autres relations d'a-certitude entre variables d'espace et de temps.

L'expression ci-dessus ressemble à certaines formulations écrites en familiarité avec la mécanique quantique. Ainsi Burderi et Di Salvo (2012) proposent une relation entre les variables d'espace et de temps montrant la même dépendance de la vitesse de la lumière (exposant c^{-4}) que dans notre relation. D'autres relations d'a-certitude semblables à celles de la section précédente pourraient être dérivées dans le cadre des « lois physiques de degré zéro » (Guy, op. cit.), encore intimement liées à la transformation de Lorentz, comme nous l'avons dit. L'exemple archétypal est fourni par les équations de Maxwell pour les champs magnétique et électrique¹⁵. Un travail complémentaire devra être conduit sur les diverses équations rencontrées dans la littérature, et les mécanismes physiques postulés, pour les relier à notre problématique d'« a-certitude ».

¹⁵ Puisque les champs magnétique et électrique (ou des combinaisons de ces champs) suivent les mêmes transformations de Lorentz que les variables d'espace et de temps, on pourra s'attendre à des relations d'a-certitude analogues. Il faudra les comparer aux expressions de Bohr et Rosenfeld citées plus haut.

5. Convergences

L'exemple précédent nous montre une convergence de forme entre relations d'indétermination et relations d'a-certitude¹⁶.

Mais une question se pose : dans une situation expérimentale donnée où l'on observe ou prescrit une variabilité des grandeurs, connaît-on la signification de cette variabilité, c'est à dire peut-on l'assigner à l'opération de mesure, à l'objet (pour qui on n'a pas forcément à l'avance écrit le formalisme le régissant) ou au cadre de référence ? On ne peut exclure non plus que les trois sources de variabilité se cumulent¹⁷. Dans la mesure où on ne peut faire le partage, une convergence dans le vocabulaire et l'utilisation du seul mot « incertitude », pour parler des trois types de variabilité, paraît inévitable.

Deux facteurs plus fondamentaux rendent aussi difficiles un strict partage entre les différentes situations. Tout d'abord, si l'on s'intéresse aux relations d'indétermination de la mécanique quantique, le nœud du problème (se traduisant par l'abus du mot incertitude en lieu et place du mot indétermination) ne vient-il pas en amont de ce que l'on a décidé d'utiliser le formalisme ondulatoire pour toutes les grandeurs physiques ? Tout en continuant à associer par ailleurs aux objets macroscopiques, pour qui cela a un sens, un formalisme permettant des positions déterminées (sans question d'étalement). Les deux systèmes de pensée et de vocabulaire co-existent. Cela peut-il excuser quelque peu ceux qui usent d'expressions du type : « on ne peut mesurer à la fois position et vitesse avec une infinie précision »¹⁸, et parlent alors d'incertitude (et non d'indétermination) ? C'est aussi la question de la frontière entre la mécanique quantique et la mécanique classique qui se pose. Et lorsque les auteurs construisent diverses relations d'incertitude sur des paires de variables sans faire appel au formalisme ondulatoire et aux propriétés d'étalement qui lui sont liées, peut-on encore parler d'indétermination ?

¹⁶ Dans le texte « Penser ensemble le temps et l'espace » (Guy, 2011), nous parlons de cette convergence d'« incertitudes » entre la situation de la relativité et celle de la mécanique quantique, mais sans assez de rigueur sur les expressions utilisées ; disons ici que l'a-certitude rencontrée dans la relativité rejoint l'indétermination rencontrée dans la mécanique quantique (et adoucit ainsi l'opposition entre les deux théories si souvent signalée).

¹⁷ L'incertitude sur l'origine du repère (expression de l'a-certitude) va avoir in fine le même effet que celle sur l'extrémité du vecteur mesurant (cf. l'incertitude) et caractérisant (cf. l'indétermination) l'objet.

¹⁸ Expression à comparer à celle proposée par Lévy-Leblond (1996a): « le produit de l'extension spatiale d'un quanton par la largeur de son spectre de vitesse possède une borne inférieure ».

Une seconde raison d'inévitables confusions à propos du mot « précision » pour les mesures des grandeurs tient à ce que, à partir du moment où l'on se donne un cadre d'espace et de temps, avec les protocoles de mesures associés, on se dit que l'on va pouvoir se positionner de façon précise à l'intérieur de ce cadre. A moins de concevoir l'espace et le temps comme eux-mêmes flous, on ne peut éviter les difficultés mentionnées à l'instant. Dans notre compréhension de l'espace et du temps comme « fournis » par les phénomènes et non donnés a priori comme un cadre extérieur, on pourra admettre que le flou possible des variables d'espace et de temps est le même que celui portant sur des grandeurs physiques en dualité. Dans cet esprit, il n'est pas forcément aisé de faire la distinction entre les propriétés d'un objet et sa mesure, tous les deux étant saisis par les « phénomènes » sur lesquels il nous faut in fine nous appuyer. En se rapportant à ce que l'on dit en relativité générale, on soulignera qu'il n'y a pas de repère imposé de l'extérieur (pas de « background ») et *les méconnaissances sur les repères (avec eux les étalons et les mesures), les phénomènes et les objets s'identifient*¹⁹. C'est dire en fin de compte que la constance des étalons divers de la physique ne se distingue pas de la constance des étalons d'espace et de temps (dans la pensée relationnelle, nous dirons : on ne peut que comparer entre elles des « constances »).

6. Ouverture à 9 degrés de liberté pour le cadre d'espace-temps ?

La discussion précédente sur le concept d'a-certitude nous paraît porteuse de conséquences quant au nombre de degrés de liberté mathématiques que nous avons pour construire les modèles physiques. Nous le distinguons de la dimensionnalité physique de notre espace-temps, a priori égale à trois²⁰. Dans cette condition d'a-certitude où nous nous trouvons, autre façon de parler de la pensée de la relation, les variables spatiales et temporelles sont définies en opposition les unes aux autres, dans le même espace physique à 3 dimensions. Le temps est associé à la position d'un point repère dans l'espace même où nous décrivons les positions « géométriques » des points.

¹⁹ Ceci ne se présente pas de cette façon en mécanique quantique où le repère d'espace-temps est donné de l'extérieur, et où les relations d'indétermination gardent donc a priori un sens différent, malgré la convergence mentionnée.

²⁰ La distinction entre dimensionnalité physique (3) et nombre de degrés de liberté mathématiques (6, 9 ...) peut être délicate ; elle importe peu lorsqu'il s'agit de construire une représentation et faire des prévisions, à condition de rester prudent quant à la signification physique donnée à ces degrés de liberté (cf. la théorie des cordes).

Aux trois coordonnées spatiales se rajoutent trois coordonnées de ce point. A ce stade, une première conséquence de notre propos est de passer de 4 à 6 degrés de liberté pour la dimensionnalité de l'espace de représentation. Mais nous ne nous arrêtons pas là. A ces six valeurs, il faut en effet rajouter trois nombres exprimant l'indétermination que nous avons sur les étalons d'espace et de temps. Du fait de l'identité foncière entre les deux modalités espace et temps du cadre de référence, cette indétermination peut aussi bien être comprise comme concernant l'extrémité de la règle étalon dans un espace à trois dimensions (ou de trois règles le long des trois axes), extrémité dont on ignore au fond la fixité²¹, que celle concernant les trois coordonnées de l'extrémité de l'aiguille de l'horloge. Si nous considérons qu'il n'y a qu'un seul étalon de mouvement (disparition des étalons d'espace et de temps), l'indétermination concerne les trois coordonnées du point mouvant qui associe règles et horloges (cf. Guy, 2013). Au total nous voyons que nous avons $6 + 3 = 9$ paramètres pour construire notre cadre mathématique. Il se trouve que ce 9 (nous ne comptons pas le temps séparément et n'allons pas jusqu'à $9 + 1 = 10$) est le nombre de degrés de liberté requis par la théorie des supercordes ou par la théorie de la supersymétrie des particules élémentaires (voir par exemple Gubser, 2012 ; nous ne disons pas que ces deux théories coïncident). Les symétries de l'espace-temps imposent des symétries sur les objets que l'on y positionne, particules ou autres ; ainsi, envisager un espace-temps à neuf degré de liberté n'est peut-être pas étranger aux deux théories précédentes. Il reste certes un travail important à faire pour examiner si cette coïncidence est folle ou non. Il faut aussi se demander quel sens peuvent avoir les trois dimensions ou degrés de liberté supplémentaires associées à l'incertitude sur l'étalon ; cela a-t-il un lien avec les expériences de non localité et non temporalité ? Peut-on le comprendre en rappelant que, dans le cadre relationnel où nous nous situons, les étalons ne doivent pas être substantifiés. Ils sont indissociables des phénomènes ; ainsi la valeur de la vitesse de la lumière ne peut être pensée indépendamment des vitesses v associées aux phénomènes (on ne connaît et traite que des rapports v/c). La multiplicité de valeurs associées aux trois coordonnées supplémentaires (passant de 6 à 9) exprime-t-elle la multiplicité de façons d'envisager les « espace-temps » associés à la multiplicité des phénomènes et des interactions ? La question de la bonne dimensionnalité à attribuer aux espaces

²¹ On a cité plus haut la remarque de Poincaré : tous les objets de l'univers pourraient se dilater dans les mêmes proportions sans que l'on puisse le remarquer ; en somme nous incorporons cette « dilatation » inconnue dans les degrés de liberté possibles des modèles physiques. L'indifférence de la forme des modèles par rapport aux translations d'espace et de temps doit s'étendre à ces facteurs de dilatation (c'est-à-dire encore aux composantes des étalons de mouvement).

mathématiques représentant le réel (en prenant ce mot dans un sens large englobant les deux sens distingués plus haut, dimensionnalité physique / nombre de degrés de liberté mathématique) reste un sujet de discussion dans la communauté des physiciens (voir par exemple les discussions sur le raccord entre mécanique quantique et relativité, Chen, 2005).

6. Conclusion

Nous avons souligné la situation de méconnaissance où nous sommes quant à la constance des étalons et du cadre de référence où penser le réel (repère d'espace-temps, lois et constantes physiques...) et plus généralement, au caractère absolu du sens des mots que nous utilisons. Nous pensons utile de mettre en valeur cette *a-certitude*. En effet, tant dans le discours que dans les pratiques, on est amené à la mettre en parallèle ou en cumul avec les autres incertitudes ou indéterminations portant sur les grandeurs physiques. Il est nécessaire de faire la part des choses, au moins au niveau conceptuel (voir Tableau 1), même si ce n'est pas toujours possible pratiquement ; et même si nous pouvons dans un second temps percevoir des convergences conceptuelles profondes. Expliciter cette situation, alors que l'on pourrait simplement parler d'incomplétude, comme ce mot existe déjà, nous paraît profitable pour les aspects concrets auxquels elle conduit (relations d'*a-certitude*, discussion sur la dimensionnalité des représentations). Le principe d'*a-certitude*, qui exprime tout cela, n'est pas accessoire mais fondamental ; c'est-à-dire il est fondamentalement lié à la façon dont nous construisons nos représentations du monde.

Résumons-le de la façon suivante : « nous ne sommes pas complètement sûrs de ce que nous déclarons certain²². Dans une pensée relationnelle, les grandeurs physiques sont pensées en opposition les unes aux autres. La variabilité des valeurs qu'on leur accorde est soumise à des *relations d'a-certitude*, tirant leur origine dans la méconnaissance ultime de la solidité du cadre de référence ».

²² La récursivité de cette expression n'est évidemment pas fortuite !

Les lignes qui précèdent n'offrent que des propositions préliminaires à critiquer, et support de recherches ultérieures nécessaires.

Remerciements

L'auteur remercie Philippe Dujardin pour le dialogue continué qu'il a avec lui sur ces questions, ainsi que Philippe Coueignoux pour des discussions préliminaires portant sur le nombre de dimensions mathématiques utile pour construire les modèles physiques (9 ?). Il remercie toutes les personnes avec qui il a discuté sur ces sujets, en particulier les amis des Ateliers sur la contradiction (Jean-Louis Léonhardt, Michel Mizony et tous les autres). Citons aussi Marc Doumas.

Nom de la « limitation »	Modalité de la variabilité	Source de la variabilité	Statut des variables	Formulation de la variabilité	Apport de la limitation
Incertitude	La mesure	Erreurs systématiques Erreurs statistiques	Isolées X, Y, Z...	$\delta X \cong a \cdot 10^{-n}$ ou $\delta X/X \leq 10^{-p}$	Intervalle de confiance
Indétermination	L'objet	Spectre de valeurs fonction des circonstances	Variables en dualité (X, Y)	$\delta X \cdot \delta Y \geq A$	Prévision, encadrement de valeurs possibles
A-certitude	Le cadre de référence (repère d'espace-temps, étalons, constantes, lois)	Méconnaissance foncière du cadre ; pensée relationnelle, arrêt d'une régression	Variables en dualités (X, Y) ou en groupes plus nombreux	$\delta X \cdot \delta Y \geq B$ ou $(\delta X/X)$ $\cdot (\delta Y/Y) \geq C$ ou ...	Prévision, encadrement Pluralisme théorique ...

Tableau 1

Confrontation des diverses incertitudes physiques, leurs modalités et expressions

Références bibliographiques

- AISLF (2012) XIX^e colloque international des sociologies de langue française: Vive l'incertain : <http://congres2012.aislf.org/>
- Bequerel J. (1922) Exposé élémentaire de la théorie d'Einstein, Payot, Paris, 206 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.
- Burderi L. & Di Salvo T. (2012) The quantum clock : a critical discussion on space-time ; ArXiv :1207.0207v1 [gr-qc] 1 jul 2012.
- Chen X. (2005) Three-dimensional time theory : to unify the principles of basic quantum physics and relativity, *arXiv : quant-ph/0510010v1*, 3 oct 2005.
- Darrigol O. (1991) Cohérence et complétude de la mécanique quantique : l'exemple de Bohr-Rosenfeld, *Revue d'histoire des sciences*, 44, 2, 137-179.
- Dujardin Ph. (2009) De quoi sommes-nous contemporains ? Essai d'anthropologie politique. Sens Public, Lyon, 11-91.
- 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.
- Gisin N. (2012) L'impensable hasard. Non-localité, téléportation et autres merveilles quantiques. Odile Jacob, Paris, 170 p.
- Gubser S. (2012) Petite introduction à la théorie des cordes. Dunod, Paris, 184 p.
- 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. (2010) Les relations de Lorentz et le temps, proposition d'utilisation d'un paramètre temporel tri-dimensionnel défini par un déplacement. Internet Archive.
- Guy B. (2011) Penser ensemble le temps et l'espace, *Philosophia Scientiae*, 15, 3, 91-113.
- Guy B. (2012) Degré zéro des lois physiques, considérations heuristiques, HAL : <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00723183>

Guy B. (2013) 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^e Congrès général de la société française de physique, Marseille, Juillet 2013 (P082).

Guy B. coord. (2010, 2012 ; 2014, à paraître) Actes des Ateliers sur la contradiction, Presses des mines, Paris.

Léonhardt J.L. (2008) L'homme de science et sa raison. Le rationalisme est-il rationnel ? Parangon.

Léonhardt J.L. (2014) Incomplétude et histoire de la physique, in : Actes des 3^e Ateliers sur la contradiction, coordination B. Guy, Presses des mines, Paris, 33-50.

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

Lévy-Leblond J.-M. (1996b) La langue tire la science, in : La pierre de touche, Gallimard, Folio-Essais, pp. 228-251.

Mizony Michel (2010) Sur le pluralisme théorique : de Kant à Poincaré ; ou comment gérer les paradoxes en sciences, Ateliers sur la contradiction, coord. B. Guy, Paris : Presses des mines, 93-100.

Poincaré H. (1902) La science et l'hypothèse, Flammarion, Paris.

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

Schmid A.-F. (2014) Ethique et mathématiques, Al-Mukhatabat, 11, 10-23.

Taillet R., Villain L. et Febvre P. (2013) Dictionnaire de physique, de Boeck, Bruxelles, 900 p.

Uzan J.-Ph. (2011) Varying constants, gravitation and cosmology; Living Rev. Relativity, 14, 2, 155 p.