

## A propos du concept de “mesure exacte” : a-t-il une signification physique ?

D. CANALS-FRAU

22 rue d'Athènes, F-75009 PARIS

RESUME. On attire l'attention sur le fait qu'en général on ne peut pas faire de mesures *exactes*. D'où on conclut que le concept de “mesure exacte” est une vue de l'esprit.

On rappelle aussi que si la théorie quantique proclame l'impossibilité d'une mesure exacte et simultanée de la vitesse et de la position, cela est une conséquence du fonctionnement de notre univers physique et pas une exigence a priori de la théorie quantique.

*ABSTRACT. Attention is drawn to the fact that, in general, it is not possible to make exact measurements. Wherefrom we infer that the “exact measure” concept is a concept of the classical world of fantasy.*

*We remember also that if it is impossible to know simultaneously and with exactness both the position and the momentum of a particle, this is a consequence of the functioning of our physical world and not an a priori of quantum theory.*

On admet généralement qu'on puisse faire une mesure exacte. Mais l'expérimentateur ne donne jamais un résultat comme étant exact. Ses résultats se présentent toujours sous la forme  $R = A \pm \Delta\epsilon$ . Ici  $\Delta\epsilon$  est l'erreur cumulée de tous les paramètres qui interviennent dans la détermination du résultat  $R$ , et  $A$  est quelque chose comme le résultat le plus probable.

Beaucoup de mesures sont obtenues en plaçant un “index” en coïncidence avec ce qu'on veut mesurer. Pour augmenter la précision, l'expérimentateur utilise fréquemment un agrandissement optique. Mais à mesure qu'il augmente l'agrandissement, les imperfections de l'index

et de la chose sur laquelle il doit le placer (encoche, bord, trait, etc.), augmentent aussi. D'où une nouvelle source de difficultés.

Si, par exemple, il s'agit de mesurer la longueur d'une règle, l'expérimentateur pourrait être tenté de demander l'aide d'un démon de Maxwell pour placer *exactement* son index. J'imagine que ce démon verrait des noyaux d'atomes, séparés les uns des autres par du vide et entourés par des électrons qui forment un, ou des, "nuage(s)". Il ne saura donc où placer l'index qui, à son tour, a une structure analogue à celle de la règle à mesurer. Et comment faire coïncider le "dernier" nuage d'électrons de la règle avec le "premier" nuage d'électrons de l'index, quand un nuage d'électrons est une chose pas très distinctement définie ? Pire encore, le tout vibre et s'agite de façon plus ou moins désordonnée à cause de la température. Même au zéro absolu il y aura encore une énergie résiduelle. Je ne sais pas si le démon de Maxwell peut "voir" sans lumière. Si non, il y aura encore la complication supplémentaire qu'il faut "bombarder" l'ensemble (règle et index) avec des photons. Une partie de ces photons va interagir avec les structures de la règle et de l'index pour être renvoyée ensuite vers l'observateur. Ce qui va altérer la situation existante sans éclairage et ne va sûrement pas "calmer" le jeu des vibrations.

En vue des renseignements que lui transmet le démon de Maxwell, l'expérimentateur sera tenté de conclure que le concept de *mesure exacte* ne peut qu'être un mythe, une vue de l'esprit.

Ce concept semble donc être une extrapolation hypothétique d'une mesure grossière faite à l'époque pré-atomiste, quand les physiciens croyaient qu'un solide était une chose continue et homogène jusqu'à la dernière infime parcelle et qui commence et finit brusquement, comme se l'imagine encore aujourd'hui l'homme de la rue.

Mais, à présent, poussé par ses connaissances, le physicien est obligé de constater que la "mesure exacte" n'est qu'un concept métaphysique, dépourvu de "réalité physique", puisque pour lui, n'ont de sens physique que les concepts dont la véridicité peut être confirmée par une expérience, puisque la physique est une science expérimentale.

D'autre part, le physicien a appris à ne pas faire des affirmations absolues : ce qui est indiscutable avec nos connaissances actuelles, ne l'est pas forcément avec nos connaissances futures. D'où la conclusion logique : *aujourd'hui*, le concept de "mesure exacte" ne trouve pas de place dans la panoplie des concepts physiques.

Dans la théorie de la mesure on fait la distinction entre “donnée de l’expérience” et “résultat de la mesure”. En général, la donnée de l’expérience n’est pas le résultat de la mesure. Mais cette “donnée” implique le “résultat”. Considérons la mesure faite avec un spectrographe de masse. La donnée de l’expérience est une distance entre deux taches sur une plaque photographique, d’où on déduit la valeur d’une masse, qui est le résultat de la mesure.

Evidemment, nos considérations générales sur la possibilité d’une mesure exacte font toujours référence à la donnée de l’expérience. Ces considérations intéressent autant la physique classique que la physique quantique.

Faisons une parenthèse pour dire quelques mots sur une mesure en mécanique quantique.

### Une mesure en mécanique quantique

La mécanique quantique a ses propres difficultés conceptuelles qui proviennent surtout de son discours interprétatif et pas de l’ensemble de ses règles opératoires. En pratique, l’algorithme de la mécanique quantique est heuristique : il a été “construit” de façon telle que ses opérations conduisent aux résultats de mesure. Et chaque résultat calculé est affecté d’une probabilité de l’obtenir. Ce n’est qu’“après coup” qu’on a essayé d’interpréter l’ensemble de ses opérations pour construire un édifice logique. Malheureusement, dans cette construction se sont glissés des concepts qui supposent que le domaine de validité de la théorie classique peut être extrapolé à la physique du tout petit.

Comme exemple prenons ce qui est écrit dans n’importe quel traité de mécanique quantique à propos de la mesure de la position et de la vitesse d’un électron. On lit dans la “Mécanique Quantique” de Landau et Lifchitz [1], page 11 : “Par conséquent, en mécanique quantique les coordonnées et la vitesse de l’électron sont des grandeurs ne pouvant être mesurées exactement simultanément, c’est-à-dire ne pouvant avoir simultanément des valeurs déterminées.”

Nous avons déjà vu qu’une mesure *exacte* est une vue de l’esprit. Alors, la nouveauté ici c’est le mot : simultanément.

La phrase citée est évidemment une tautologie : la “mesure” de la vitesse est basée sur la mesure des coordonnées de deux positions rapprochées  $(Q_1, Q_2)$ , faites au début et à la fin d’un court intervalle de temps  $\Delta t$ . Ce qui exclut toute simultanéité entre la mesure de la

position  $Q_1$  et la vitesse  $v = (Q_2 - Q_1)/\Delta t$ . Et on peut ajouter que cela est, d'une part, logique –on ne peut pas faire *simultanément* deux mesures “suivies” ( $Q_1$  et  $Q_2$ )– et d'autre part, un fait physique et pas une caractéristique particulière découlant de la théorie quantique.

Le caractère tautologique de la phrase citée n'apparaît pas à première vue comme évident : en théorie classique on suppose qu'une limite pour  $\Delta t \rightarrow 0$  est physiquement réalisable, puisque conceptuellement imaginable dans le cadre de cette théorie. En extrapolant naïvement au domaine des particules élémentaires, le discours interprétatif de la mécanique quantique suppose implicitement qu'on peut aussi mesurer deux positions de l'électron aussi rapprochées qu'on veut dans le temps, afin d'obtenir une mesure de la vitesse avec une précision arbitrairement grande.

Mais nous savons qu'une mesure est une interaction, un transfert d'énergie et/ou de quantité de mouvement [2] qui, comme tel, n'est jamais instantané. Alors, dans les faits, cette limite pose problème.

Dans l'ouvrage cité, page 10, on lit : “Le processus de mesure jouit en mécanique quantique d'une particularité très essentielle : il exerce toujours une action sur l'électron qui lui est soumis et cette action ne peut, en principe, pour une précision de mesure donnée, être rendue arbitrairement petite.”

Pour voir clair, considérons la suite des faits. L'électron se meut dans une certaine direction. La première mesure de position l'affecte de façon incontrôlable en modifiant sa vitesse en module et direction. Elle donne le résultat  $Q_1$  qui, de toutes façons, n'est pas exact dans le sens expliqué au début de cette note. La deuxième mesure de position ne pourra se faire qu'après *cessation* de l'interaction qu'est la première mesure. Donc, jamais après un intervalle  $\Delta t \rightarrow 0$  de la première. Pour les mêmes raisons que celles signalées plus haut,  $Q_2$  n'est pas exact non plus. La deuxième mesure a été faite sur l'électron “affecté” par la première mesure et elle “affectera” une deuxième fois la trajectoire primitive de l'électron. Ces deux mesures de position se font alors sur deux états différents de l'électron. Par conséquent, nous n'avons pas de mesure de, disons, deux positions de son état primitif, qui est ce que nous voulions déterminer pour calculer sa vitesse.

En définitive : on ne peut donc pas en même temps mesurer avec exactitude la position et la vitesse d'un électron et cela indépendamment de considérations théoriques propres à la mécanique quantique, contrairement à ce qu'affirme le discours interprétatif de Landau et Lifchitz. Par

le simple fait que notre univers physique est tel que toute intervention avec des dispositifs pour faire des mesures affecte la marche de ce qu'on veut mesurer. En outre, l'action de mesurer –l'interaction– nécessite un laps de temps pour se faire. Ces phénomènes sont surtout sensibles en microphysique.

Alors le discours interprétatif, au lieu de dire “qu'en *mécanique quantique* les coordonnées et la vitesse de l'électron sont des grandeurs ne pouvant pas être mesurées exactement simultanément”, devrait plutôt dire : parce qu'on ne peut pas mesurer simultanément et exactement les coordonnées de deux positions de l'électron (assez rapprochées dans le temps) nécessaires pour déterminer exactement sa vitesse, la mécanique quantique a inclus ce fait dans son schéma de l'univers. On peut ainsi éviter des quiproquos.

Jusqu'ici nous n'avons rien dit sur la mesure de  $\Delta t$ . Sachant qu'une mesure de temps se réduit toujours à la mesure du déplacement –supposé uniforme– de quelque chose, l'impossibilité d'une mesure *exacte* de longueur se transforme en impossibilité d'une mesure exacte de temps.

Finalement, les positions  $Q_1$  et  $Q_2$  ne peuvent être mesurées ni simultanément, ni exactement. D'autre part le temps  $\Delta t$  ne peut pas être mesuré exactement. D'où : la position et la vitesse d'un électron ne peuvent pas être mesurées simultanément exactement.

Si on suppose pour un instant que la limite théorique, classique  $\Delta t \rightarrow 0$  existe aussi en microphysique, elle ne pourrait nous donner que la vitesse de l'électron affecté par la première mesure de position. Personne ne pourrait garantir que cette vitesse est *exactement* celle que nous voulions déterminer en module et direction : celle de l'électron avant toute mesure.

Incidemment, à la suite de la phrase citée en premier lieu (op. cit., page 11) il est écrit : “On peut dire que les coordonnées et la vitesse de l'électron sont des grandeurs n'existant pas simultanément”. Cette phrase peut induire en erreur le lecteur non averti : le fait que nous ne puissions pas déterminer simultanément la position et la vitesse de l'électron, ne nous autorise pas à suggérer qu'elles n'existent pas. Une fois de plus le discours interprétatif est en cause ...

Notre façon élémentaire de présenter les mesures microphysiques a pour objet de montrer certaines analogies avec les mesures macrophysiques : les unes et les autres sont limitées par la nature atomique

discontinue de la matière et par le “chaos” qu’est l’agitation thermique. Mais nous n’avons rien dit de ce qui vraiment différencie les mesures en micro et macrophysique. C’est le fait que les “particules” élémentaires en mouvement ont un comportement ondulatoire *intrinsèque* [3]. Des phénomènes de diffraction ou d’interférences se manifestent quand on les approche avec des dispositifs pour faire la mesure. Ce sont ces phénomènes qui permettent de donner des valeurs numériques aux incertitudes de nos mesures.

Fermons la parenthèse et revenons à nos considérations sur la possibilité de mesures exactes.

Heureusement, ce concept n’est pas nécessaire pour faire de la physique, pour décrire et comprendre le fonctionnement de l’univers. Dans chaque cas nous nous contentons de savoir si la précision obtenue suffit à nos fins. Et il est préférable de laisser aux philosophes la responsabilité de l’utilisation du concept de mesure exacte puisque dans la “réalité intersubjective” [4] des physiciens d’aujourd’hui, ce concept ne peut pas avoir cours.

La “réalité intersubjective” des physiciens exprime le fait que des appareillages analogues, utilisés dans différents laboratoires pour faire une même expérience et servis par différents physiciens, donnent des résultats qui, avec leurs respectifs intervalles d’erreur  $\Delta\epsilon$ , se superposent suffisamment.

## Mesures exactes

Néanmoins, des “mesures” exactes sont possibles dans certaines circonstances : quand il s’agit d’énoncer chaque élément d’un ensemble en comptant. Par exemple, le nombre de moutons dans un enclos. Cela est possible parce que l’unité *naturelle* pour “mesurer” le nombre de moutons est “un” mouton : une fraction de mouton n’existe pas en tant que mouton. Ici la mesure sera exacte :  $n$  moutons.

Mais il semble évident que pour mesurer une longueur ou un temps, nous n’avons pas, nous ne connaissons pas d’unité naturelle. Si un jour nous découvriions une unité naturelle pour mesurer la longueur ou le temps, et si cette unité était aussi nettement définie qu’un mouton dans un pré, alors nous pourrions faire des mesures exactes de longueur. La même chose pour le temps : tout laps de temps serait égal à un nombre de fois l’unité naturelle et une fraction d’unité naturelle n’existerait pas en tant que temps.

A cette hauteur de nos remarques nous avons envie de poser la question : il y a-t-il une “unité naturelle” pour mesurer l’évolution de l’univers ?

Notre univers est quantique. Le poids d’une masse de fer ne peut pas être augmenté par une quantité inférieure au poids d’un atome de fer, si l’ensemble doit rester du fer. Cela nous rapproche du concept d’unité naturelle, sans nous donner des indications précises sur ce qu’il y a de commun dans tous les atomes de la création, et qui pourrait, peut-être, servir d’unité naturelle pour mesurer la masse.

Cependant, je voudrais quand même faire l’observation suivante. Toute mesure se fait par un échange d’énergie et/ou de quantité de mouvement. Ce “transfert” n’est pas instantané [2]. Le caractère quantique de l’univers se manifeste de nouveau par le fait que l’“action” associée à la mesure  $-\Delta E \cdot \Delta t$  ne peut pas être inférieure à  $h$ . Cela veut dire qu’“il ne se passe rien” jusqu’à ce que l’action ait la valeur  $h$ . Comme la mesure n’est sûrement pas un échange d’énergie d’un caractère différent de tous les autres échanges d’énergie qui se produisent dans l’univers, on peut conclure que l’évolution de l’univers ne peut se faire que de  $h$  en  $h$ . L’évolution de l’univers étant, évidemment, l’ensemble des transferts d’énergie qui se produisent ou se sont produits. Comme une fraction de  $h$  n’existe pas en tant qu’action qui produit du changement, et seuls les changements sont détectables, nous avons donc une unité naturelle pour mesurer *exactement* l’évolution de l’univers : la constante de Planck ... si nous connaissons exactement l’“unité”  $h$ .

Naïvement, il me semble évident que l’énergie n’est pas un concept adéquat pour caractériser l’évolution de l’univers. Si on admet que l’énergie se conserve “depuis le début”, l’énergie de l’univers est la même aujourd’hui qu’au moment du Big Bang. Ce n’est que la “densité” qui a changé en se diluant. Mais les échanges d’énergie nécessitent un temps pour se faire, temps qui ne peut pas se *dissocier* de cet échange, puisqu’un temps s’écoulera forcément pendant cette interaction. Donc le concept d’action me semble plus naturel pour caractériser l’évolution de l’univers et nous fournit aussi une unité naturelle pour sa mesure : la constante universelle  $h$ . D’ailleurs, le concept “temps” et sous-jacent au concept “évolution”.

## Références

- [1] L. Landau, E. Lifchitz, *Mécanique quantique*, Editions Mir, Moscou 1966.

- [2] D. Canals-Frau, *A propos des inégalités de Heisenberg*, à paraître aux Annales de la Fondation Louis de Broglie.
- [3] L. de Broglie, C.R.A.S., **177** (1923) 507.
- [4] B. d'Espagnat, *Une incertaine réalité*, Gauthier-Villars, Paris 1985, p. 31.

*(Manuscrit reçu le 27 juin 1990)*