Zeitschrift: Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Herausgeber: Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Band: 70 (1968-1970)
Heft: 331

Artikel: La mesure et son objet
Autor: Gouiran, Robert
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-276268

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 11.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

BULL. SOC. VAUD. SC. NAT., VOL. 70, N° 331, 1969 (LAUSANNE, SUISSE)

La mesure et son objet

PAR

ROBERT GOUIRAN

Il est probable que les premières mesures furent celles des phases de la lune permettant aux premiers hommes de connaître les cycles du soleil, donc les saisons, les périodes de chasse, de reproduction, puis celles des semailles et des récoltes. L'agriculture est, en ce sens, la première activité scientifique, car semer pour récolter suppose une attitude de confiance dans la répétition des phénomènes suivant une séquence mesurable.

C'est pourquoi nous nous permettons de voir dans la racine *me* le même sens qui s'est attaché à la lune, premier instrument de mesure, et qui donnera *moon*, *Monat*, mois, etc., suivant une profonde infusion de sens et de sons s'enroulant et se mêlant autour de la lettre *m*, premier symbole du pluriel dans l'hébreu biblique. Cette lettre avait à l'origine un double sens : fermée, elle signifiait un ventre fécond, une matrice pleine, comme on le retrouvera dans *mater*, mère ou Marie ; ouverte, elle devenait le pluriel et donnait naissance au multiple.

Le premier système de mesure a donc pu être celui du temps, et ce serait ainsi construit, par la lune, dans un système duodécimal, celui des douze mois et des, presque, 360 jours. En même temps devait se développer la mesure de l'espace, basée, elle, sur la main écartée, fière de ses cinq doigts, l'empan, 5 en face de 5 ; et la mesure de l'espace sera essentiellement décimale et servira au début à mesurer des champs et à en marquer les limites.

Nous voyons donc se dessiner les deux systèmes de mesure, le duodécimal symbolisant le temps, et le décimal symbolisant l'espace.

Mais en même temps se trouve défini le système binaire du oui et du non, et c'est de ce système que la mesure fait problème ; car il s'agit de dire si un objet est ou n'est pas, si une proposition est vraie ou fausse, sans possibilité d'une tierce valeur, car la mesure est liée à la notion d'objets isolables, donc à la notion même d'être, d'un être, pouvant être pris dans une série discontinue. La mesure (oui ou non) commence à partir du moment où nous pouvons isoler un domaine à l'intérieur d'un autre, c'est-à-dire lorsque nous pouvons fermer une frontière et dire que le phénomène est à l'intérieur ou n'y est pas. Or c'est là le symbole premier du cercle : isoler un intérieur d'un extérieur.

Or on n'isole que si on peut nommer. Nommer, c'est trouver une cohérence à une forme, et le symbole premier de la forme cohérente jaillie hors de l'informe est la pierre. Ainsi, dès l'origine des temps, la mesure sera sous le signe symbolique du cercle de pierre.

Le latin *calculus* donne caillou et calcul, les premiers calculs se font avec des abaques de pierre, calendriers et cadrans solaires sont gravés dans la pierre. Les nombreux cercles de pierre de la mythologie (Gilgal en hébreu biblique où se retrouve le dédoublement du G) ont donc pu être des instruments de mesure ; le fait a pu être prouvé pour Stonehenge, en Grande-Bretagne.

Mais la série binaire ne donne pas les nombres irrationnels qui restent un merveilleux mystère. On peut toutefois remarquer qu'ils apparaissent avec des mesures de surface, la racine carrée avec le triangle, pi avec le cercle comme s'ils se dévoilaient avec l'apparition d'une dimension supplémentaire, comme pour compenser le fait que notre espace soit isotrope et qu'on puisse y effectuer la même mesure dans toutes les directions.

* * *

La science est donc fondée sur la mesure de séries discrètes d'événements. Ces séries peuvent-elles être continues et donner ainsi une mesure finalement précise, absolument ? Cette question se divise en plusieurs volets.

1) Y a -t-il une plus petite mesure possible ?
2) Y a-t-il une partie des faits qui ne puisse pas nous atteindre ?
3) Une mesure peut-elle être sans dispersion ?
4) Le phénomène a-t-il une réalité propre en dehors de la mesure ?
5) La mesure est-elle objective, c'est-à-dire indépendante de l'observateur ?

La première question est ambiguë. On peut diviser par l'esprit une mesure en fractions aussi petites que l'on veut. Mais chaque mesure suppose une observation et chaque observation suppose une extraction d'information du système étudié, le dégradant jusqu'à une limite à laquelle l'observation n'est plus possible. Où placer cette limite ? On peut, entre autres, en proposer une qui serait énergétique. Supposons, par exemple, que nous voulions mesurer 10^{-50} cm (en réalité, nous ne savons guère aller au-delà de 10^{-14} cm avec nos plus puissants accélérateurs). Il nous faut une règle à cette dimension, donc une lumière ayant une longueur d'onde λ dans cet ordre de grandeur, soit $\lambda = hc/E$, où h est la constante de Planck, c est la vitesse de la lumière, E est l'énergie du photon de cette lumière. Si la longueur d'onde λ doit être 10 cm^{-50}, on trouve $E = 2.10^{34}$ CGS. Si on pouvait obtenir un seul photon, en désintégrant l'équivalent énergétique de matière, ce qui est déjà fort

improbable, il faudrait désintégrer une masse M donnée par $E = Mc^2$, soit $M = 20$ millions de tonnes ! Même l'annihilation de notre univers, supposé de masse limitée, ne permettrait pas de mesurer une distance infiniment petite.

Comme deuxième question, nous nous demandons si le phénomène observé peut être influencé par d'autres phénomènes qui néanmoins ne peuvent pas nous atteindre directement. Hélas oui, à cause de la relativité qui en imposant une vitesse limite pour la transmission de toute énergie, permet la présence de variables cachées exerçant des influences occultes. On peut le voir schématiquement sur la figure 1, où l'espace est en abscisse et le temps en ordonnée. Les objets A, B et l'observateur M sont supposés alignés pour simplifier, et leur évolution est représentée par une ligne verticale. L'information sur l'état de A parvient en M suivant une ligne dont l'inclinaison dépend de la vitesse de transmission de ce signal. Or en même temps A reçoit de B des forces dépendant de l'état de B à un instant où M ne peut pas communiquer avec lui, car B est dans une région de l'espace-temps qui est inatteignable pour M, et qui est figurée par la zone hachurée.

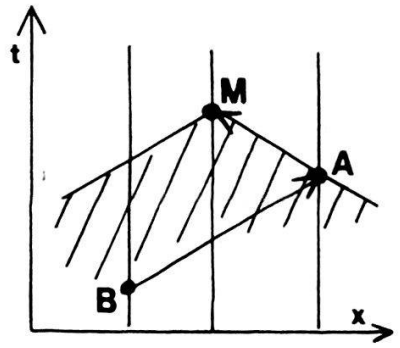

Fig. 1

L'observateur M peut extrapoler à posteriori l'état de B avec une incertitude qui diminuera avec le temps, mais qui ne deviendra nulle qu'au bout d'un temps infini ; n'est-ce pas déjà là une sorte de relation d'incertitude « information-temps » ?

La troisième question est : la mesure peut-elle être sans dispersion ? Tout le monde connaît les relations d'incertitude de HEISENBERG, qui restent la base de la mécanique quantique. Essayons simplement de les décrire intuitivement. Nous ne pouvons mesurer la position d'un mobile en x que si nous pouvons prouver en même temps qu'il n'est pas en $x \pm \Delta x$; nous retrouvons la notion de domaine dans lequel doit se trouver la mesure. Nous devons donc faire deux observations entre lesquelles l'objet s'est déplacé à une vitesse v pendant un temps Δt ; il couvre donc une certaine longueur d'espace, car l'observation double n'est pas instantanée à cause de la vitesse finie de toute transmission de signaux portant de l'énergie. C'est un peu le flou photographique sur un instantané.

D'une façon plus rigoureuse, on démontre qu'il existe, entre certains couples de paramètres qui ne sont pas indépendants (principalement lorsque l'un se déduit de l'autre en faisant intervenir le temps) des

relations qui interdisent de les mesurer ensemble avec une précision absolue sur chacun. Ainsi l'erreur sur x, Δx, et l'erreur sur p, Δp ($p = mv$, v étant la vitesse, x étant la position), sont liées par $\Delta x \, \Delta p \geqq h$, h étant la constante de *Planck*. De même $\Delta E \, \Delta t \geqq h$, E étant l'énergie du mobile au moment de l'observation, Δt étant le temps pendant lequel le système observé a cette énergie. Imaginez une balance sur laquelle vous jetez un poids et qui va se mettre à osciller : la mesure du poids demandera un certain temps !

On montre aussi que l'objet quantique possède une onde qui est comme une vibration d'être, et que, par conséquent, il est plus ou moins diffus à l'intérieur d'une longueur d'onde $\lambda = hc/E$. Pour les particules les plus énergiques que nous pouvons obtenir avec nos accélérateurs, λ est de l'ordre de 10^{-15} cm.

Nous avons donc une incertitude due au fait que nous ne pouvons pas mesurer simultanément certains paramètres, et sur le plan logique cela veut dire qu'il existe toujours des couples de propositions dont on ne peut pas dire si elles sont vraies ou fausses simultanément. Ceci nous amène vers une nouvelle logique, la logique des quanta, différente de la logique classique où le temps n'intervient pas.

Comme quatrième point, nous nous demandions si le phénomène pouvait avoir une réalité en dehors de la mesure. C'est un sujet fort débattu.

Sans préjuger si cela est satisfaisant pour l'esprit ou non, par définition l'objet quantique n'est pas plus que la somme de ses qualités groupées en une structure unique, c'est-à-dire la somme des phénomènes observables à l'intérieur d'un certain volume d'espace-temps, et dans un domaine fini de propositions. Ce n'est pas un objet, c'est une famille ; il appartient à une classe à l'intérieur de laquelle il est anonyme, car elle recouvre toutes ses qualités mesurables. La mesure ici prend une autre dimension car c'est elle qui nomme en dehors de toutes les croyances que je pourrais avoir en une réalité objective au-delà d'elle. Et le comportement individuel à l'intérieur de la classe est identique, coïncide avec celui de la classe. S'il était différent on créerait une autre classe et ainsi de suite. La discernabilité des individus s'évanouit progressivement au fur et à mesure qu'on s'enfonce vers l'élémentaire, c'est-à-dire à mesure qu'on agrandit les classes d'objets.

Nous pensons que malgré les apparences, la question de l'identité n'est guère différente dans le domaine de l'infiniment petit de celle qui se pose déjà dans le macrocosme courant ; mais nous les voyons différentes parce que les échelles de temps et d'espace y sont complètement disjointes. Tout peut se ramener à une seule question : lorsqu'un être entre en réaction dans une boîte noire, comment pouvons-nous dire qu'un être qui en sort est celui qui vient d'entrer ? On peut supposer en effet que

l'objet incident se dissout immédiatement et qu'un autre est formé de ses morceaux épars et de matériaux disponibles dans la boîte. On reporte alors le problème de l'identité sur les morceaux, et ainsi *ad infinitum*. Car c'est autre chose de dire que quelque objet s'est conservé dans le passage à travers la boîte, et de dire que cet objet est identiquement le même, dans son intégrité, en sortant et en entrant. Il faudrait en effet prouver qu'il existe véritablement une structure finale absolument insécable et indivisible en parties, ce qu'il serait présomptueux d'admettre aujourd'hui.

Ainsi la mesure des paramètres observables est nécessaire et suffisante pour décrire la réalité physique de l'objet ; s'il y avait des variables cachées, ou bien elles resteraient cachées et alors ne provoqueraient aucun phénomène détectable, ou bien elles engendreraient un comportement différent, alors elles ne seraient plus cachées.

Enfin nous arrivons à la dernière question : la mesure est-elle objective ? Nous allons voir qu'il y a toujours interaction entre le système observé et le système observateur, et cela de deux façons, par une relation objective, mais aussi par une relation subjective que nous allons expliciter.

Une raison objective d'abord, car justement le domaine quantique est, presque par définition, celui où la mesure modifie l'objet. L'objet quantique ne survit pas à l'expérience, au moins dans son intégrité. Nous savons en effet que pour mesurer il faut extraire de l'information ; c'est pourquoi les photons de lumière que nous envoyons « éclairer » l'objet vont entrer en collision avec lui et ainsi modifier son état après cette observation. Mais les relations subjectives sont plus délicates à saisir, car nous sommes obligés maintenant d'introduire deux notions, la fonction d'onde et la formule de BAYES.

Avant la mesure, l'objet a certaines probabilités d'être dans plusieurs états A ou B ou C, et son état est décrit par une fonction disant que l'état (ou la fonction d'onde) de l'objet, ψ, est la superposition linéaire des états possibles ψ_A, ψ_B..., ψ_i, suivant $\psi = c_A \psi_A + c_B \psi_B + \ldots c_i \psi_i$; on traduit ces amplitudes de fonctions d'onde en probabilités en disant que la probabilité pour trouver l'objet dans l'état A est c_A^2. Si toutes les possibilités sont exhaustives, alors on peut normaliser toutes les probabilités en disant que la somme des c_i^2 est 1, ou $\Sigma_i c_i^2 = 1$. Nous avons donc une connaissance à priori, mais subjective ; c'est celle de l'hypothèse.

Après la mesure, nous savons que l'objet était bien dans l'état A ; au même moment tous les coefficients c_i qui n'étaient pas c_A deviennent nuls : nous venons, par la mesure, de réduire l'état ψ, en annulant toute possibilité de mesurer l'état ψ_B. Nous avions déjà trouvé une réduction de ce genre : en mesurant la position du mobile, nous annulons

toute possibilité de mesurer sa vitesse à ce moment-là et à cet endroit-là. Nous avons donc une influence subjective de l'observation sur les mesures qui vont suivre. Et cela va se traduire par une extension dans le domaine logique. Observation signifie maintenant : je dis que la proposition A est vraie, mais en même temps je peux perdre le contrôle d'une proposition B. Il y a, entre certaines valeurs A et B, une implication qui ne traverse pas la mesure, qui s'évanouit pendant la mesure, car une potentialité n'a pas de réalité objective à priori. C'est une longue bataille qui opposa EINSTEIN et BOHR sur l'exemple suivant.

Après une réaction limitée à un certain volume d'espace-temps, nous obtenons deux systèmes A et B dont les états sont corrélés par des lois connues sur la conservation de certains paramètres (énergie, spin, parité, etc.), c'est-à-dire que A et B continuent à former à eux deux un système cohérent, bien qu'ils ne communiquent plus entre eux, et qu'ils soient partis vers des destins différents en s'ignorant mutuellement dès le moment où ils ont quitté le volume d'interaction. De telle sorte qu'en mesurant l'état de A on détermine la connaissance de B, même sans le mesurer, ce qui reste paradoxal puisque A et B ne peuvent plus communiquer. BOHR répondit qu'en mesurant A nous annulons la corrélation potentielle et probabiliste entre A et B, et que le paradoxe n'était donc que subjectif.

C'est qu'en effet, l'implication à priori $A \longleftrightarrow B$ était subjective, car dans la réalité physique, le fait que A soit vraie n'implique plus que B soit aussi vraie, car la possibilité de mesurer B s'est évanouie au moment où la proposition A est passée à l'acte, s'est objectivée. Nous avons là le point où la logique des quanta se sépare de la logique classique : il y a des implications qui ne traversent pas l'expérience, et c'est déjà en ce sens que nous pouvons dire que la mesure dépend de l'observation.

Dans la logique classique, l'implication réciproque $A \longleftrightarrow B$ entraîne qu'on ait A et B si on a A, soit $(A \longleftrightarrow B) \longleftrightarrow (A \text{ et } B)$, dans tous les cas. Dans la logique des quanta, il existe certains couples de variables mesurables A et B telles que l'implication réciproque $A \longleftrightarrow B$ implique A ou B, mais non - (A et B), soit $(A \longleftrightarrow B) \longleftrightarrow (A \text{ ou } B)$ et $\overline{(A \text{ et } B)}$.

Un autre exemple illustrera l'importance de l'à priori dans la mesure, c'est l'extraordinaire théorème de BAYES, dit de la probabilité des causes, qui semble jeter un mystérieux pont entre le passé et le futur.

Soit $P(A)$ la probabilité d'avoir un événement A. En général, cette probabilité n'est pas connue, car il faudrait savoir quelles sont toutes les possibilités que A se produise dans un ensemble exhaustif de théories et de prédictions. Toutefois, on peut limiter cet ensemble en en retirant des probabilités connues, comme celles reliant la cause à l'effet : par exemple A ne peut se produire que dans un volume d'espace-temps bien défini, et seulement au-dessus d'un seuil. A la limite, nous pouvons définir la probabilité que A se produise, étant donné qu'un autre événement B

s'est produit ; nous l'appellerons « probabilité de A, B étant donné », et nous l'écrirons $P(A|B)$. La formule de BAYES relie alors deux événements A et B par : $P(A|B) = P(B|A) \,.\, P(A)/P(B)$. On peut le montrer intuitivement par une représentation booléenne.

Soit, sur la figure 2, un domaine limité de surface S_A représentant la probabilité d'avoir A . $P(A) = 0$ en dehors de S_A, et $P(A) = 1/S_A$ pour tout point dans S_A. Dessinons aussi un domaine S_B, décrivant de la même façon les probabilités d'avoir B, et qui s'intersecte avec S_A, suivant une surface hachurée S_H. Soit un petit domaine dans cette intersection, E. La probabilité d'avoir A dans E est E/S_A, et celle d'avoir B dans E est E/S_B ; la probabilité d'avoir A, B étant donné, est S_H/S_A, et celle d'avoir B, A étant donné, est S_H/S_B.

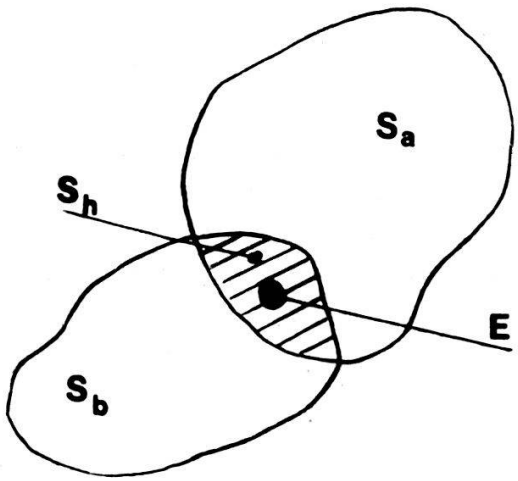

Fig. 2

Nous en déduisons (ce n'est pas très rigoureux mais suffisant pour comprendre) que $P(A|B)/P(B|A) = S_B/S_A = P(A)/P(B)$.

Mais où l'interprétation du théorème de BAYES devient délicate, c'est lorsque nous remplaçons les événements par des faits hypothétiques, par des hypothèses.

Supposons qu'une certaine théorie T nous permette de prédire que l'objet va se présenter dans le détecteur dans un état i ou dans un état j, et que par conséquent une certaine variable mesurable X aura la valeur théorique A_i ou A_j. La mesure a lieu et donne un résultat expérimental $X = A$. Nous allons chercher les probabilités respectives pour que X soit réellement A_i ou A_j, étant donné un résultat expérimental $X = A$, et nous l'écrirons $P(A_i|A)$, ou $P(A_j|A)$. La mesure A doit donc me permettre de décider si l'objet était dans l'état i ou dans l'état j au moment de son passage dans le détecteur, et le théorème de BAYES va nous dire le crédit à accorder à la conclusion que le X théorique était bien A_i lorsque nous mesurons $X = A$.

$P(A|A_i)$ est une connaissance à priori, fixée par la connaissance de la théorie et la réponse du dispositif expérimental. (Il faut noter en passant que la connaissance de cette réponse de l'équipement n'est pas plus objective que celle de nos sens dont il n'est qu'un prolongement). $P(A_i|A)$ est une connaissance à posteriori, car l'expérience a eu lieu. $P(A)$ n'est pas connue en général, nous l'avons vu plus haut. Par contre $P(A_i)$ peut être facilement connue si les possibilités A_i ou A_j sont précisées d'une manière exhaustive par la théorie T ; ce n'est pas autre chose que le

carré c^2_i dans le développement de la fonction d'onde que nous avons décrit plus haut. Le théorème de BAYES s'écrit alors : $P(A_i|A) = P(A|A_i)\,P(A_i)/P(A)$. On cherchera à éliminer $P(A)$ en effectuant simplement des comparaisons entre les différentes possibilités.

Prenons un exemple pour illustrer la formule.

Une théorie prédit que l'objet peut se présenter sous deux états possibles de spin, soit $X = 1/2$ (A_i), soit $X = 3/2$ (A_j), et nous savons à priori par la théorie que l'objet a une probabilité 1/3 d'être dans l'état $X = 3/2$, et une probabilité 2/3 d'être dans l'état $X = 1/2$ (ce sont donc deux possibilités exhaustives). Donc $P(A_j) = 1/3$, et $P(A_i) = 2/3$. Le détecteur expérimental est un équipement qui dit seulement oui ou non, et notre connaissance du dispositif dit que la probabilité que le détecteur D déclenche est 1/2 si $X = 3/2$, et 1/10 si $X = 1/2$. Le détecteur est donc prévu avec une partialité nous permettant de savoir, après la mesure, si l'objet était dans l'état $X = 3/2$ ou $X = 1/2$. Appliquons la formule de BAYES.

$$P(X = 3/2 \text{ si } D \text{ déclenche}) \propto 1/2 \,.\, 1/3 = 1/6.$$
$$P(X = 1/2 \text{ si } D \text{ déclenche}) \propto 1/10 \,.\, 2/3 = 1/15.$$

Donc si D déclenche, il y a 5 chances contre 2 pour que le spin ait été 3/2 et non 1/2. S'il n'y avait pas d'autres possibilités de déclenchement ou de non-déclenchement, nous pouvons normaliser ces résultats en termes de probabilités et dire que la probabilité que X ait été 3/2 lorsque D a déclenché est 71 %. Mais si le détecteur avait été tellement mauvais qu'il n'aurait pas pu distinguer entre les deux états et qu'il aurait déclenché à tous les passages, la probabilité que le spin soit 3/2 lorsque le détecteur déclenche aurait été déjà de 66 % ! c'est-à-dire notre connaissance à priori ; voilà le point où nous voulions arriver et qui montre le périlleux mélange du subjectif et de l'objectif toujours présent dans la mesure scientifique qui n'est jamais neutre. Malgré que le détecteur soit très bon, dans un rapport 10 à 2, la mesure ne nous donne qu'un tout petit 5 % de mieux sur la connaissance à priori, et elle ne donnerait rien du tout si la connaissance à priori était nulle.

La mesure en quelque sorte crée le phénomène, donc le fait. Mais un fait ne vient à l'existence que dans le cadre d'une attitude, donc d'un à priori subjectif. Dans la nature, il n'y a pas de fait.

Je voudrais dire quelques mots en annexe sur ce qu'on mesure en physique nucléaire des hautes énergies. Ce sont le plus souvent des séries de points positionnés dans l'espace, avec l'instant de leur apparition. Qu'est-ce qu'un point ?

La particule n'est pas détectable visuellement, mais par les effets qu'elle provoque dans les matières qu'elle traverse, une bulle de gaz dans une chambre à bulles, une étincelle dans une chambre à étincelles,

une impulsion électrique lorsqu'elle passe dans le volume sensible d'un compteur, etc. Donc le point-événement est une bulle d'espace-temps macroscopique, et nous retrouvons dans ces mesures le principe du microscope : élever par amplification le phénomène à un niveau observable par les sens, et tout est dans le coefficient d'amplification. Ainsi nos appareils, accélérateurs, détecteurs peuvent déterminer directement des positions de l'ordre du dixième de millimètre et des temps de l'ordre de la nanoseconde (10^{-9} sec.), et on en déduit la connaissance d'un espace microscopique de l'ordre de 10^{-14} cm et par conséquent des temps de l'ordre de 10^{-24} sec., qui est le temps nécessaire à la lumière pour traverser justement cette distance de 10^{-14} cm.

RÉFÉRENCES

DE BROGLIE, L. 1957. — La Théorie de la Mesure en Mécanique ondulatoire. Gauthier-Villars, Paris.

GOUIRAN, R. 1967. — Le concept de Loi dans la Physique moderne. *Bulletin de la Société vaudoise des Sciences naturelles*, nº 325, vol. 69, fasc. 9.

JAUCH, J. M. 1968. — Foundations of Quantum Mechanics. Addison-Wesley, N.Y.

Manuscrit déposé le 26 mai 1969.