Versatilité du temps physique à l'époque moderne

Claude Aslangul

(LPTMC - Université Pierre et Marie Curie)

Rencontres de Physique de l'infiniment grand à l'infiniment petit

Orsay, 16 juillet 2015

1 Introduction

De toutes les grandeurs appartenant au *corpus* de la Physique, la variable *temps* est sans doute la plus insaisissable, comme l'est d'ailleurs l'instant présent, enfui à peine survenu. La question ici n'est pas de tenter de *définir* le temps – admettant qu'il existe[1] –, entreprise qui semble devoir à jamais être inachevée comme en témoignent les discussions et les débats auxquels ont contribué depuis des siècles des générations de philosophes et de physiciens ; pour saisir la difficulté d'une telle question, il suffit de se reporter à la littérature disponible et notamment aux ouvrages[2] et conférences[3] d'Étienne Klein, et aux conférences du Séminaire Poincaré en 2010[4]. Tout comme selon Francis Wolff[5] *"Partout où il y a des hommes, il y a de la musique"*, on doit pouvoir dire *Partout où il y a des hommes, il y a le temps...* Mais si la musique est *"l'art des sons"*[6], qu'est-ce donc que le temps ?

Si la recherche de la définition du temps fait penser au mythe de Sisyphe, soulevant de nouvelles questions quand l'objectif a donné l'illusion de se rapprocher, il est en revanche possible de se placer dans la position de l'observateur qui, constatant l'irruption apparemment essentielle et inéluctable du temps dans la description des phénomènes, cherche à en analyser la *perception* et le *rôle* à travers l'élaboration des concepts et, à l'époque moderne, la construction du formalisme. Dans la suite, on se propose d'examiner comment les différentes propriétés attribuées au temps au fil des siècles ont été sinon battues en brèche, du moins ont fait l'objet d'une remise en cause subtile d'abord par le problème de la flèche du temps puis par les bouleversements radicaux que la Relativité et la Théorie quantique ont exigé d'admettre.

Il est naturel de s'en remettre à l'ordre chronologique et c'est pourquoi on discutera successivement du temps à l'âge classique (jusqu'à 1905), à la suite de la révolution relativiste ($c<\infty$) et enfin après l'apport de la Théorie quantique ($\hbar>0$ mais $c=\infty$, milieu des années 1920), sans cependant omettre au passage la question de l'irréversibilité dont Boltzmann fut le héros (et le héraut !) juste à la fin du XIX$^{\text{ème}}$ siècle et voir comment elle s'est transposée dans le cadre quantique.

[1] Voir le livre de Carlo Rovelli, *Et si le temps n'existait pas ?* (Dunod, 2014). Une autre approche est exposée dans l'article de Craig Callender *"Le temps est-il une illusion ?"*, disponible à l'adresse : http://www.pourlascience.fr/ewb_pages/a/article-le-temps-est-il-une-illusiona-26041.php.

[2] *Le facteur temps ne sonne jamais deux fois* (Flammarion, 2009), *Les tactiques de Chronos* (Flammarion, 2009).

[3] Voir par exemple :
https://www.youtube.com/watch?v=4lf9xFKoT8Y, https://www.youtube.com/watch?v=Z5Jbh3_4F14.

[4] http://www.bourbaphy.fr/decembre2010

[5] Francis Wolff, *Pourquoi la musique ?* (Fayard, 2014)

[6] Francis Wolff, *op. cit.*

2 Le temps à l'âge classique

Pour Platon, le temps est *"l'image mobile de l'éternité immobile"* [7], affirmation où le mot *mobile* est indissociable de la notion de *mouvement*. Il semble bien que l'une des premières incursions explicites du paramètre temps remonte à Galilée à propos de son étude de la chute des corps, lorsqu'il affirme que la vitesse acquise est proportionnelle au temps écoulé, mais on peut en déceler les prémisses dans le débat sur l'atomisme qui, lui, remonte à l'Antiquité grecque : pour que des atomes existent, ils doivent se *mouvoir* dans l'espace, dans le vide, mais comment définir le vide, comment définir ce qui n'existe pas ? Temps et espace semblant indissociables, la question du temps est dès lors au cœur d'une querelle passionnée et passionnante sur l'existence des atomes, querelle qui ne s'éteindra qu'au début du XX$^{\text{ème}}$ siècle...

L'association entre temps et mouvement est plus que manifeste dans les premières formulations de la Mécanique, dont la clé de voûte est l'équation de Newton, $m\frac{\mathrm{d}^2\vec{r}}{\mathrm{d}t^2} = \vec{F}$. En tant qu'équation du 2$^{\text{ème}}$ ordre susceptible de représenter une *vraie* [8] situation physique, elle possède une solution et une seule pourvu que l'on connaisse les conditions initiales, c'est-à-dire la position et la vitesse du point matériel au départ. Cette solution s'exprime par des fonctions du temps t traduisant analytiquement l'existence d'une trajectoire, ligne continue admettant presque partout une tangente, représentant ainsi la position et la vitesse de l'objet lorsque le temps s'écoule et constituant la figuration géométrique de l'évolution du destin de celui-ci.

Le temps (objectif) ainsi considéré possède implicitement un ensemble de propriétés remarquables :

1. il est *continu* (pas de *quantum* de temps), ce qui permet définir une vitesse... si l'on admet toutefois que l'espace lui aussi est représentable par une variable continue.
2. Il permet d'ordonner les événements selon leur chronologie tout comme, étant donné deux points d'une ligne (droite ou non d'ailleurs), l'un est à la gauche de l'autre, l'un est *antérieur* à l'autre. L'espace du temps est *unidimensionnel* par essence, caractéristique vitale car c'est sur elle que repose le Principe de causalité.
3. Il est *universel*, affirmation qui est au cœur de la relativité au sens de Galilée ; il est le même partout, de sorte que le passé est le passé pour tout observateur, et la simultanéité est absolue.
4. Il s'écoule de façon *linéaire*, si deux événements durent Δt_1 et Δt_2, leur durée totale Δt est égale à la somme $\Delta t_1 + \Delta t_2$. Il ne ralentit ni n'accélère [9], tous les instants se valent, aucun n'est privilégié. Cette *uniformité* donne lieu au principe de la conservation de l'énergie, qu'aucune théorie n'a remis en cause [10], qu'aucune expérience n'a jamais pris en défaut. Comme souvent, les affirmations précédentes peuvent être perçues comme

[7] *Timée*, 39d (en grec ancien $T\iota\mu\alpha\iota o\varsigma$). Il est amusant de constater la proximité de ce mot avec le *time* anglais. Timée est en fait le *nom* d'un philosophe pythagoricien.

[8] On entend par là évacuer d'emblée les situations pathologiques où l'unicité de la solution ne serait pas assurée en raison de termes trop singuliers figurant dans l'équation.

[9] Pourtant, selon Einstein *"Placez votre main sur un poêle une minute et ça vous semble durer une heure. Asseyez vous auprès d'une jolie fille une heure et ça vous semble durer une minute. C'est ça la relativité."*

[10] Si l'on excepte les réflexions de Bohr qui, dans ses tentatives pour surmonter les difficultés de la Physique classique, en vint très brièvement à envisager que la conservation de l'énergie n'était vraie qu'en *moyenne*, statistiquement parlant.

tautologiques mais les réduire au rang de simples truismes serait excessif car il convient de les énoncer afin de pouvoir construire un *corpus* théorique. Si *"une accumulation de faits n'est pas plus une science qu'un tas de pierres n'est une maison"*[11], encore faut-il avoir des pierres.

5. Il s'écoule dans un sens et c'est pourquoi on parle de la *flèche du temps*, recourant d'ailleurs souvent à la métaphore du fleuve qui s'écoule de la source à son embouchure tout comme le temps s'écoule du passé vers le futur[12]. Cette question, capitale, sera brièvement discutée dans le cadre classique à la fin de cette section mais sera reprise ultérieurement, p. 14.

Autrement dit, pour Newton il existe une et une seule horloge régnant en maître absolu partout dans l'univers.

Ces propriétés étant admises, la machinerie technique peut se mettre en route pour la formulation quantitative de la Mécanique. La première phase fut en effet entièrement construite sur l'équation de Newton, équation différentielle du second ordre permettant en principe de calculer la trajectoire d'un point matériel (et de là, d'un ensemble de points). Une fois précisées les conditions initiales (position et vitesse), on obtient une et une seule solution analytique définissant la trajectoire réellement suivie et contenant toute l'information sur l'évolution dans le temps du système analysé. Par exemple, pour un mouvement uniformément accéléré, la position à l'instant t est :

$$x(t) = \frac{1}{2}\gamma t^2 + v_0 t + x_0 \quad ; \tag{1}$$

pour un oscillateur harmonique, on trouve :

$$x(t) = x_0 \cos\omega t + \frac{v_0}{\omega}\sin\omega t \quad . \tag{2}$$

L'équation de Newton est du second ordre par rapport au temps (on peut dire que le temps y figure *au carré*) ; cette propriété remarquable se retrouve sur les expressions ci-dessus, où l'on note que les termes pairs par rapport à t sont associés à la position, cependant que les termes impairs sont jumelés avec la vitesse – d'ailleurs, dans le cas le plus simple, celui d'une particule libre, on a l'égalité $x(t) = v_0 t + x_0$ où la même constatation peut être faite. En d'autres termes, si on *inverse* le temps ($t \to -t$), rien ne change puisque cette inversion change évidemment le signe de la vitesse. On reviendra plus loin sur cette invariance dans le renversement du temps et le paradoxe qui semble devoir en résulter.

Par la suite, une autre formulation plus globale a été proposée par Lagrange, Hamilton et Jacobi, la voie ayant été ouverte par Maupertuis avec son *Principe de moindre action.* Elle consiste à raisonner d'emblée dans l'espace-temps et à se poser la question de la trajectoire dans les termes intuitifs suivants : comment un point matériel, partant de x_i à l'instant t_i et arrivant en x_f à t_f, "choisit"-il *sa* trajectoire, celle que l'on observe ? La réponse technique repose sur la mise au point d'un critère de sélection parmi l'infinité de chemins possibles entre les points de départ et d'arrivée, lequel affirme que la trajectoire réelle entre ces deux points d'espace-temps est celle qui rend stationnaire une certaine grandeur encore appelée *action* mais généralisant la notion introduite par Maupertuis. Cette approche est particulièrement séduisante au sens où elle fonde la Mécanique sur un principe variationnel,

[11] Henri Poincaré, *La Science et l'Hypothèse*, chapitre 9 (Flammarion, Paris, 1917)

[12] Francis Herbert Bradley (1846 - 1924) pense, lui, que le temps s'écoule à l'envers, du futur vers le passé.

en tout point analogue à celui utilisé en Optique, domaine où Hamilton exerça précocément son génie. On sait ce que, vers 1850, le même Hamilton fit de cette surprenante analogie, dont la fécondité alors insoupçonnée n'éclata que bien plus tard lorsqu'elle servit de fil d'Ariane à Schrödinger en 1925 pour établir sa célébrissime équation. Schrödinger, lui, avait à sa disposition un atout majeur, l'hypothèse de Planck : s'il avait connu l'égalité $E = h\nu$ (et bien sûr d'autres faits incompréhensibles classiquement), Hamilton n'aurait-il pas inventé la Mécanique Ondulatoire de Schrödinger ?

Dans ce formalisme, le temps semble avoir été relégué au rang d'une variable comme les autres, positions ou vitesses, mais il n'en est rien : il possède encore tous les attributs que Newton lui avait plus ou moins explicitement donnés. En particulier, c'est le temps qui continue à être au cœur du Principe de causalité en permettant de décider lequel de deux événements se produit avant l'autre, lequel *peut*[13] être la cause de l'autre. Pour une particule astreinte à se déplacer sur la droite, l'espace-temps est le plan $\mathbb{R}^2$, où il n'existe plus d'ordre non-ambigu au contraire de la droite $\mathbb{R}$, mais il n'en demeure pas moins que deux événements *peuvent* encore être identifiés l'un comme la cause, l'autre comme l'effet, s'ils surviennent respectivement aux instants t_1 et t_2 avec $t_1 < t_2$. En quelque sorte, si l'espace-temps est bien à deux dimensions, on raisonne par tranches de temps caractérisées chacune par une valeur donnée de t.

Noter que l'approche variationnelle est encore aujourd'hui la règle : *toutes* les formalisations utilisent cette vision des choses, qu'il s'agisse de l'Électrodynamique quantique ou de la Théorie des champs – sans oublier les tentatives d'unifier Relativité générale[14] (RG) et Théorie quantique et, pour la compréhension physique, la description de Feynman de la Mécanique quantique standard en termes d'intégrale de chemins.

Quoi qu'il en soit, l'universalité du temps s'exprime par la relativité au sens de Galilée, qui proclame l'uniformité du temps et de l'espace (et aussi l'isotropie de ce dernier), conduisant respectivement d'une part à la conservation de l'énergie, à celle des moments linéaire et cinétique d'autre part. Techniquement, elle a pour conséquence les formules bien connues reliant les coordonnées et le temps d'un même événement dans deux repères galiléens R et $\mathsf{R'}$ en translation uniforme l'un par rapport à l'autre :

$$x' = x - vt \ , \qquad t' = t \qquad\qquad \text{(Galilée)} \ . \tag{3}$$

Le point important est de remarquer à la fois l'invariance du temps quand on change de référentiel et le fait qu'il ne se "mélange" pas avec les coordonnées spatiales, ces deux aspects étant étroitement liés ; ils sont en fait manifestement indissociables.

La Mécanique étant formulée d'une façon ou d'une autre, il reste que ses équations sont invariantes par renversement du temps. Cette symétrie est pour le moins troublante puisque, dans l'expérience quotidienne, tout semble prouver au contraire que le cours du temps est *irréversible*, contradiction apparente qui a provoqué de vifs débats à la fin du XIX$^{\text{ème}}$ siècle et même un peu plus tard. Il revient à Boltzmann d'avoir donné le premier coup de boutoir dans cette vérité aux conséquences fort subtiles, son coup d'éclat inédit se concrétisant dans la fameuse équation établie en 1872 et qui décrit l'évolution *irréversible*

[13] Les italiques sont là pour rappeler qu'il faut soigneusement distinguer, le cas échéant, entre *causalité* et *corrélation*.

[14] On s'en remettra ici à la terminologie traditionnelle et historique bien qu'elle ne semble pas aujourd'hui la plus appropriée. En effet, on peut se demander en quoi la RG *généralise* la RR : la première n'est pas une théorie de la gravitation qui, quand il le faut, n'intervient finalement que par la formule de... Newton $G\frac{MM'}{d^2}$ – et dans un formalisme *à la* Newton –, alors que la seconde affirme d'emblée en être une et utilise des prémisses radicalement différentes.

d'un gaz hors d'équilibre. La comparaison entre les points de départ et d'arrivée de la démarche de Boltzmann peut laisser perplexe puisque, outre les outils usuels de la statistique et des probabilités, il est fait appel aux lois de conservation de la Mécanique pour décrire les collisions ; dès lors, la Mécanique étant encore à l'œuvre, comment se fait-il que la dynamique du gaz ne soit plus, elle, invariante dans le changement $t \to -t$? Et heureusement puisque l'équation de Boltzmann vise à décrire la *relaxation* obligatoire du système vers son inévitable état d'équilibre, archétype d'un phénomène irréversible.

La réponse à cette question se trouve principalement dans l'hypothèse dite du *chaos moléculaire* qui permet à Boltzmann de considérer que si deux particules sont effectivement fortement corrélées à l'issue d'une collision puisque les lois de conservation énergie - impulsion règnent en maîtres absolus, les mêmes particules, par la suite, perdent peu à peu toute mémoire de leur brève rencontre[15]. Fortement corrélées à un certain instant, décorrélées nettement plus tard : ainsi s'introduit l'irréversibilité temporelle – signature sans équivoque de la flèche du temps – dans un formalisme où pourtant, au niveau fondamental, la symétrie $t \to -t$ reste la règle absolue.

L'approche *statistique* de Boltzmann a donné les clés permettant de mieux comprendre l'antagonisme entre la Mécanique et l'observation au sens commun, entre la symétrie des équations et le sort d'une goutte d'encre déposée à la surface de l'eau, mettant au premier plan le rôle fondamental joué par l'aspect microscopique ou macroscopique du système analysé. Même si des questions très formelles restent encore aujourd'hui ouvertes (les mille et un problèmes autour de l'ergodicité), Poincaré a clos le débat sur le plan physique en montrant que si la réversibilité reste effectivement la règle absolue au niveau des principes, à toutes les échelles y compris les plus inaccessibles, le temps de retour d'un système à son état initial augmente exponentiellement vite avec le nombre de ses degrés de liberté. Dès lors, aucune irréversibilité n'est à attendre avec quelques particules (et c'est bien le cas) mais si le temps de retour est $10^{10^{20}}$ fois plus grand que l'âge de l'univers parce que le système contient $\sim 10^{25}$ particules, cela n'aurait aucun sens de persister à croire que le système reviendra un jour à (ou près de) son état de départ et donc à considérer que la dynamique de ce dernier est réversible. C'est pourquoi, se hissant au niveau des *principes* tels que la Physique se doit de les envisager pour finalement les énoncer, on est fondé à *poser* le Second principe de la Thermodynamique affirmant que l'entropie d'un système isolé ne peut décroître. En l'occurrence, comme partout ailleurs en Physique, la considération des bonnes échelles (ici de temps) vient jouer le rôle d'un juge de paix dans un dilemme apparaissant, en définitive, comme une question *mal posée.*

Cette vision des choses ouvre une nouvelle perspective sur la façon de concevoir le temps, dont certains vont jusqu'à affirmer qu'il n'existe pas à un niveau fondamental[16] mais est seulement un concept *émergent*, tout comme la rigidité d'une tige d'acier n'a de sens qu'à grande échelle et perd toute signification si l'on regarde au niveau atomique, de la même façon que les 2.4 enfants par famille dans une population humaine ne sauraient avoir une quelconque réalité là où un réductionnisme aveugle et outrancier ferait perdre la tête.

[15] Ce qui n'est jamais le cas pour deux *partiqules* dans un état intriqué...

[16] Dans son ouvrage cité ci-dessus (note 1), Carlo Rovelli écrit :

> *"... le temps est un effet de notre ignorance des détails du monde. Si nous connaissions parfaitement tous les détails du monde, nous n'aurions pas la sensation de l'écoulement du temps. J'ai beaucoup travaillé sur cette idée et sur l'idée mathématique qui la soutient ; celle-ci doit montrer comment des phénomènes typiques liés au passage du temps peuvent émerger d'un monde atemporel, lorsque nous en avons une connaissance limitée."*

Il convient d'ajouter que l'irréversibilité peut survenir d'une tout autre façon dans un cadre pourtant toujours strictement réversible. Une analyse remarquable à bien des égards peut être trouvée dans un article pénétrant de Max Born[17] montrant comment une incertitude sur les conditions initiales suivie de l'effacement délibéré de certains aspects de la dynamique (effectué par une trace partielle) conduit à une évolution irréversible alors que toutes les équations sont rigoureusement invariantes dans le renversement du temps. Le même scénario se produit d'ailleurs dans l'instabilité de Landau survenant dans un plasma, l'équation de Vlasov étant pourtant purement mécanique ; bien d'autres exemples pourraient être cités. La sommation partielle revenant à renvoyer en coulisse des données en toute rigueur disponibles, on associe parfois trop schématiquement l'irréversibilité à de la *perte d'information* ; de là à dire que l'entropie est un avatar du flou, du désordre et de l'incertain, il n'y a qu'un pas à franchir... avec prudence et après avoir défini une mesure non-ambigüe du désordre.

3 La Relativité restreinte, $c < \infty$ et $\hbar = 0$[18]

À la suite des expériences de Michelson et Morley révélant que l'Éther n'existe pas, Einstein proposa en 1905 sa théorie révolutionnaire dite de la *Relativité restreinte* (RR) en posant les deux postulats[19] :

1. les lois de la Physique sont les mêmes dans tous les référentiels d'inertie,
2. la vitesse de la lumière, c, est la même dans tous les référentiels d'inertie,

étant entendu que l'espace est toujours réputé isotrope et homogène. Ceci étant admis, on en déduit de diverses façons les formules des transformations de Lorentz, que l'on peut mettre en perspective avec celles de Galilée, (3) ($\beta \stackrel{\text{déf}}{=} \frac{v}{c}$) :

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1-\beta^2}} \ , \qquad t' = \frac{t - \beta\frac{x}{c}}{\sqrt{1-\beta^2}} \qquad \text{(Lorentz)} \ , \tag{4}$$

et auxquelles elles se réduisent sans accident si $\beta \to 0$. L'égalité de droite est la plus spectaculaire des deux : elle montre que le temps n'est pas le même pour deux obervateurs en mouvement l'un par rapport à l'autre ! Alors que les transformations de Galilée ne touchent pas au temps, celles de Lorentz en font un attribut de chaque référentiel : le temps n'est

[17]Max Born, *"Dans quelle mesure la Mécanique classique peut-elle prédire les trajectoires ?"*, J. de Physique et le Radium, **20**, 577 (1959). À propos d'un système pourtant *linéaire*, Born montre comment toute incertitude sur les conditions initiales a des conséquences à moyen terme sur la dynamique et, surtout, explique pourquoi la prise de moyenne sur la vitesse, justifiée par le choix de ne regarder que la position, produit une évolution *diffusive*, c'est-à-dire essentiellement irréversible.

[18]L'écriture $\hbar = 0$ (tout comme $c = \infty$) doit être bien comprise, tout juste comme un raccourci, car la constante de Planck et la vitesse de la lumière valent ce qu'elles valent. Il est évidemment plus satisfaisant d'écrire $s \stackrel{\text{déf}}{=} \frac{\hbar}{S_{\text{typ}}} \ll 1$, S_{typ} étant une action typique du problème, et d'envisager la limite $s \to 0$, tout comme le cadre galiléen se retrouve approximativement quand $\beta \ll 1$. D'un point de vue *formel*, il n'est toutefois pas défendu de considérer le processus de *limite* au sens mathématique du terme, tout comme on l'effectue en Mécanique statistique. Il faut cependant se souvenir que la limite $\beta \to 0$ est régulière (les séries entières ont un rayon de convergence fini) alors que la limite $s \to 0$ est singulière puisque la valeur $s = 0$ est une singularité essentielle.

[19]Seul le second était inédit à l'époque. Le premier est aussi la clé de voûte de la Relativité galiléenne et constitue la négation moderne du géocentrisme, amorcée par Copernic et parachevée par Kepler.

plus à part mais participe pleinement aux formules de changement de repère et a ainsi perdu son universalité. Il convient de noter que ces formules de passage d'un repère à l'autre sont *linéaires* par rapport aux coordonnées d'espace-temps ; si les Δ désignent les différences des coordonnées de deux événements dans le même référentiel ($\Delta x = x_2 - x_1$, $\Delta t = t_2 - t_1$), on a tout autant :

$$\Delta x' = \frac{\Delta x - v\Delta t}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad , \qquad \Delta t' = \frac{\Delta t - \beta\frac{\Delta x}{c}}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad . \tag{5}$$

Cela étant, il est aisé de mettre en lumière une conséquence[20] majeure de la transformation de Lorentz, à savoir l'invariance de l'intervalle[21] $\Delta s^2 \stackrel{\text{déf}}{=} c^2\Delta t^2 - \Delta x^2$ dans tout changement de repère ; au-delà de sa concision formelle et de son élégance, ce résultat a des retombées remarquables.

La toute première est la *relativité* des durées. En effet, soit deux repères R et R', le second se déplaçant à la vitesse v par rapport au premier, et deux événements se produisant au même endroit quand ils sont repérés dans R, l'intervalle dans ce référentiel se réduisant alors à $c^2\Delta t^2$. Dans R', l'intervalle entre ces deux mêmes événements vaut $c^2\Delta t'^2 - (v\Delta t')^2$. L'invariance de la distance d'univers exige alors l'égalité $c^2\Delta t^2 = c^2\Delta t'^2 - (v\Delta t')^2$, d'où :

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1-\beta^2}} \geq \Delta t \quad . \tag{6}$$

L'augmentation de la durée séparant deux événements se produisant au même endroit s'appelle la *dilatation du temps* : pour l'observateur "fixe", le temps dans le repère mobile semble s'écouler moins vite (d'où le fameux paradoxe des jumeaux). Appliqué à la désintégration d'une particule instable en mouvement à la vitesse v, R est le repère de la particule dont la durée de vie propre est τ_0 ; vu du laboratoire (repère R'), la particule a une durée de vie[22] $\tau = \gamma\tau_0 \geq \tau_0$. Ceci permet de comprendre la grande abondance des muons μ au niveau du sol[23] alors qu'ils sont produits dans la haute atmosphère et que leur durée de vie n'est pas bien grande, de l'ordre de deux microsecondes.

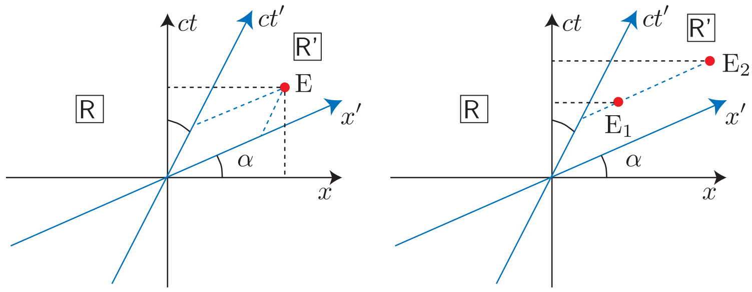

Figure 1: À gauche : définition du diagramme de Minkowski, le repère R' se déplaçant à la vitesse v par rapport à R ; les angles indiqués valent tous deux Arctan $\frac{v}{c}$. À droite, illustration de la non-universalité de la simultanéité : les événements E_1 et E_2 sont simultanés dans R' mais dans R, E_1 est antérieur à E_2.

[20] De façon plus formelle, on peut s'y prendre autrement : admettre d'emblée cette métrique (dite de Minkowski) et en déduire les formules de Lorentz en s'appuyant sur l'invariance de cette "distance".

[21] Δs est aussi appelé *intervalle d'univers* ou encore *distance d'univers*.

[22] $\gamma \stackrel{\text{déf}}{=} (1-\beta^2)^{-1/2}$.

[23] Environ 10 000 muons par mètre carré et par minute.

D'autres conséquences sont remarquables. L'une d'elles est que la vitesse de la lumière est indépassable puisque dans le cas contraire, la quantité $c^2\Delta t'^2 - (v\Delta t')^2$ serait négative d'où, par l'invariance de Δs, un intervalle de temps Δt... imaginaire pur ! De plus, la notion de simultanéité n'est plus universelle, comme le visualise bien le diagramme de Minkowski[24] (figure 1) dans lequel les événements simultanés dans chaque repère sont les lignes parallèles aux axes x et x'.

D'un autre côté, pour deux événements *quelconques* observés dans le même référentiel, l'intervalle Δs^2 est égal à $c^2\Delta t^2 - \Delta x^2$ où rien ne lie *a priori* l'intervalle de temps Δt et la distance (au sens usuel) Δx, de sorte que Δs^2 peut fort bien être négatif. Cette constatation intrigante justifie que l'on distingue deux sortes d'intervalles :

1. ceux pour lesquels $\Delta s^2 > 0$, dits[25] du genre *temps*,
2. ceux pour lesquels $\Delta s^2 < 0$, dits du genre *espace*.

Pour le cas-frontière $\Delta s^2 = 0$, on dit que l'intervalle est du genre *lumière* : seules des particules de masse nulle (les photons par exemple) sont susceptibles de relier les deux événements. Géométriquement, l'inégalité ci-dessus se traduit par la définition de deux régions du plan, l'une s'appelant traditionnellement le *cône de lumière* (figure 2).

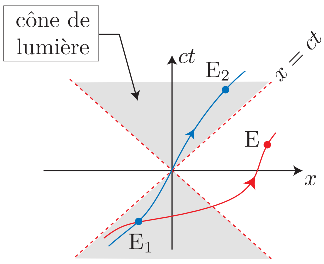

Figure 2: Les deux événements E_1 et E_2 *peuvent* avoir une relation de cause à effet ; au contraire, E_1 ne peut pas être la cause de E. Si l'origine du temps ($t = 0$) est associée à l'instant présent, le demi-cône inférieur contient tous les événements du passé, l'autre contenant tous les événements pouvant survenir dans le futur. Les régions spatiales situées en dehors du cône sont un "ailleurs" inaccessible...

Une telle classification semble porter atteinte à la belle symétrie du jeu des coordonnées d'espace-temps, notamment exprimée par le fait qu'elles participent *démocratiquement* aux transformations de Lorentz. En réalité, les deux types d'intervalles ont un contenu physique très différent, ce qui justifie une telle distinction, essentiellement en raison du Principe de causalité : si l'intervalle entre deux événements est du genre *temps*, cela veut dire qu'une particule (massive) peut se rendre de x_1 à x_2 entre t_1 et t_2, l'antériorité du premier instant étant indiscutable ; en définitive, si les *intervalles* de temps peuvent varier d'un repère à l'autre (c'est le surprenant *ralentissement* des horloges), l'*ordre* des instants est inaliénable de sorte qu'un lien de causalité *peut* exister entre ces deux événements.

[24] Pour une explication de ce diagramme, voir par exemple : Alain Comtet, *Relativité et Électromagnétisme*, disponible à http://www.eleves.ens.fr/home/bolgar/.

[25] La terminologie provient du fait que si $c^2\Delta t^2 - \Delta x^2$ est positif, c'est que le temps domine l'espace – et inversement dans l'autre cas.

Au contraire, pour deux événements dont l'intervalle est du genre espace, la relation d'ordre chronologique n'est plus invariante et peut même être *inversée*, le passé dans un repère devenant le futur dans l'autre, ce qui exclut toute référence à la notion de causalité. En effet, revenant à la deuxième égalité (5), examinons la possibilité d'avoir simultanément $\Delta t > 0$ et $\Delta t' < 0$, ce qui signifie que le premier événement est postérieur au second quand ils sont tous deux observés dans R mais que cet ordre est inversé dans R'. Pour cela et selon (5), il faut et suffit que l'on ait $\Delta t - \beta\frac{\Delta x}{c} < 0$, soit $v\Delta x > c^2\Delta t$ qui entraîne $v\Delta x > c^2\Delta t$, mais comme $c < v$, on *de facto* la double inégalité $c\Delta x > v\Delta x > c^2\Delta t$ d'où $\Delta x > c\Delta t \Longrightarrow \Delta x^2 - (c\Delta t)^2 > 0$: une telle inversion chronologique est donc bel et bien possible pour un intervalle du genre espace.

La Physique étant fondée sur le Principe de causalité puisqu'elle prétend expliquer et prévoir les phénomènes à l'aide de lois, on peut affirmer que les intervalles du genre espace n'ont pas de réalité physique à proprement parler. L'extérieur du cône de lumière est ainsi un “ailleurs” indéfinissable autrement que par le biais d'un mot représentant le complémentaire du monde perceptible au sens large en usant d'une sorte de tautologie négative. Au contraire, l'intérieur du cône représente le passé et l'avenir, souvent qualifiés d'*absolus* pour marquer le fait que si Einstein a chamboulé notre vision d'un temps universel et absolu, cette révolution reste dans un cadre où le monde (et les physiciens) n'ont pas tout à fait perdu la... boule !

Une fois adoptés les deux postulats d'Einstein, la théorie se développe selon le même schéma que dans le cadre de la relativité au sens de Galilée. L'équation fondamentale remplaçant celle de Newton est $\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\gamma m\vec{v}) = \vec{F}$ et peut à son tour être englobée dans un formalisme plus général s'appuyant sur la définition d'une action relativiste, tout comme Lagrange et Hamilton l'avaient fait en d'autres temps en relativité galiléenne.

4 Le temps à l'âge quantique, $\hbar > 0$ et $c = \infty$

La Théorie de la relativité (restreinte puis générale) d'Einstein, toute révolutionnaire qu'elle est, n'est que l'un des deux *corpus* théoriques qui, aujourd'hui encore, constituent l'ossature de la Physique. Le second bouleversement conceptuel s'est produit lors de la construction de la Théorie quantique par Heisenberg et Schrödinger, au milieu des années 1920. On aimerait pouvoir présenter ces deux exploits de l'esprit humain dans un seul et même cadre mais tout le monde sait que c'est actuellement un rêve puisque Relativité générale et Théorie quantique ne se sont toujours pas réconciliées – si c'est seulement possible[26]. C'est pourquoi, s'agissant d'examiner ce que devient le temps en Théorie quantique, il convient d'abord d'en revenir à Galilée, tout en sachant néanmoins qu'il existe heureusement des versions relativistes de la théorie se confinant aux préceptes de la théorie *restreinte* d'Einstein en conservant encore l'idée que l'espace où vivent les systèmes est uniforme et isotrope, et *plat* (sans courbure), quoi qu'il arrive ; sous une forme ou sous une autre, ces formalisations constituent la Théorie quantique des champs. L'inclusion des effets relativistes est une nécessité si l'on veut rendre compte de phénomènes très fins (les corrections radiatives pour un atome par exemple) mais c'est aussi justice : le photon − particule relativiste par excellence − n'a pas été pour rien dans la genèse de la Théorie quantique !

[26] De fait, ces deux théories ne semblent pas pouvoir s'accepter l'une l'autre en l'état actuel de leur édification, pour au moins une raison de fond : la Théorie quantique présuppose que l'espace est *plat*, donné une fois pour toutes, étant la scène indéformable où se produisent tous les phénomènes. La Relativité générale, au contraire, repose sur le fait que la matière *déforme* l'espace, qui se courbe en sa présence.

L'un des enjeux aujourd'hui est très précisément la construction d'une théorie de la gravitation qui est à la fois quantique et relativiste.

Le temps est présent dans l'équation fondamentale de Schrödinger, figurant d'ailleurs de façon surprenante en compagnie du nombre imaginaire fondamental i ; cette équation décrit l'évolution temporelle de la fonction d'onde (du vecteur d'état) du système, en dehors de toute action extérieure ("mesure") destinée à en savoir plus sur ce système. En quelque sorte, il s'agit de l'évolution *propre* de celui-ci, le physicien se bouchant les yeux et les oreilles, qui est purement déterministe puisque l'état initial étant donné, il est en principe possible de déterminer l'état à tout autre instant. Tout comme dans le cas classique, cette équation du mouvement est invariante dans le renversement du temps, de sorte que la question de la flèche du temps, non seulement se pose toujours, mais encore doit être examinée en incorporant toutes les spécificités quantiques.

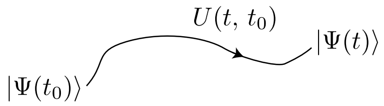

Figure 3: Le propagateur $U(t,\, t_0)$ construit $|\Psi(t)\rangle$ à partir de $|\Psi(t_0)\rangle$. La "trajectoire" existe au sens où à tout instant, l'opérateur U *et* sa dérivée $\partial_t U$ sont définis.

Bien sûr, la question de l'évolution d'un système dans le temps se pose de façon entièrement nouvelle : ici, il ne s'agit pas de prévoir la trajectoire au sens classique du terme (qui n'existe pas) mais de décrire comment varie dans le temps l'objet qui, selon la Théorie quantique, contient toute l'information sur le système considéré, à savoir[27] sa fonction d'onde $\Psi(x,\, t)$ (ou de façon équivalente, son vecteur d'état $|\Psi(t)\rangle$). L'équation de Schrödinger étant du *premier* ordre en temps (au contraire de l'équation de Newton), cette question est en principe réglée pourvu que l'on connaisse un état initial $\Psi(x,\, t_0)$, quel qu'il soit d'ailleurs : l'état à l'instant t s'obtient par action sur cet état initial quelconque d'un certain opérateur caractérisant l'évolution, souvent appelé *propagateur* ; compte tenu du sens physique attribué à la fonction d'onde, le propagateur doit posséder des propriétés spécifiques, à savoir être linéaire et être unitaire. S'il n'y a plus de trajectoire au sens de Newton, il reste que le vecteur d'état décrit une ligne continue et différentiable dans l'espace de Hilbert des états.

Cela étant, si le paramètre temps est pourvu *a priori* de toutes les propriétés que lui attribue la Physique classique, on doit se poser la question de ce qu'il lui advient à l'intérieur d'une théorie dont le cœur est la notion révolutionnaire de *quantification*, la contrepartie technique étant la représentation des grandeurs physiques par des *opérateurs* linéaires (eux aussi nantis des bonnes propriétés). Ainsi la position est représentée par un opérateur $\mathbf{q}$, le moment conjugué par l'opérateur $\mathbf{p}$, ces deux objets à la multiplication non-commutative satisfaisant $[\mathbf{q},\, \mathbf{p}] \stackrel{\text{déf}}{=} \mathbf{qp} - \mathbf{pq} = \mathrm{i}\hbar\mathbf{1}$ – égalité fondatrice de la Théorie quantique reliant entre elles deux variables conjuguées au sens de la Mécanique analytique. Un autre couple de telles grandeurs est constitué de l'énergie E et du temps t, l'uniformité du temps étant la pierre angulaire du théorème de conservation de l'énergie. On est ainsi tenté de soupçonner que, l'énergie étant représentée par l'opérateur $\mathbf{H}$, il doit (devrait ?) exister un opérateur $\mathbf{T}$ associé au temps, ces deux opérateurs satisfaisant une relation du genre $[\mathbf{H},\, \mathbf{T}] = \mathrm{i}\hbar\mathbf{1}$.

On doit à Pauli d'avoir montré que ce n'est pas le cas : si en effet l'opérateur $\mathbf{H}$ existe (on le sait depuis Heisenberg et Schrödinger, c'est le *Hamiltonien*), il ne saurait y avoir un opérateur tel que $\mathbf{T}$, car cela impliquerait immédiatement que tout système... est

[27] À température nulle.

instable au sens où sa plus basse énergie possible[28] serait égale à $-\infty$! Il est possible de comprendre l'argument de Pauli en traçant le parallèle avec le couple (position, impulsion). Dans ce dernier cas, on sait que les opérateurs de translation spatiale s'expriment à l'aide de $\mathbf{p}$ et que l'homogénéité de l'espace se traduit par le fait que pour une particule libre, le Hamiltonien commute avec $\mathbf{p}$, étant entendu que l'espace étant illimité, on ne saurait exclure une translation infinie. Si $\mathbf{T}$ existait, il serait de façon analogue associé aux translations, d'énergie cette fois ; comme le temps est réputé être une variable *continue* variant entre $\pm\infty$, des translations d'énergie infinie devraient être possibles, ce qui n'a pas de sens physique puisque l'énergie d'un système doit être bornée inférieurement pour que celui-ci existe.

L'impossibilité de définir un opérateur temps écarte donc le couple (énergie, temps) d'une relation d'indétermination à laquelle sont soumis coordonnée et impulsion, laquelle s'exprime comme $\Delta p \Delta q \geq \frac{\hbar}{2}$, les Δ désignant sans ambiguïté les variances au sens statistique du terme. S'il est cependant légitime, ne serait-ce que pour des raisons purement dimensionnelles, d'écrire une relation du même type, $\tau \Delta E \sim \hbar$, et si ΔE désigne toujours une dispersion statistique, le temps τ n'a aucune signification de ce genre – et pour cause : en tant que variable échappant à la quantification, une hypothétique dispersion du temps, Δt, ne pourrait être que *nulle*. τ représente en fait une échelle de temps caractéristique de la dynamique du système[29] et il serait d'ailleurs toujours préférable d'énoncer cette relation en tant que *définition* de ce fameux temps, une certaine dispersion statistique d'énergie étant donnée, en *posant* $\tau \stackrel{\text{déf}}{=} \frac{\hbar}{\Delta E}$.

Ainsi, dans la première écriture de la Théorie quantique, due à Heisenberg et Schrödinger, le paramètre temps fait bande à part en étant par nature rebelle à toute forme de quantification. Cette singularité peut ne pas surprendre puisque cette version de la théorie est d'essence non-relativiste et, tout comme la Mécanique de Newton et Galilée, considère le temps comme un paramètre universel, une sorte d'auxiliaire obligé permettant d'écrire l'expression de fonctions mathématiques représentant les grandeurs physiques. Dans les notations précédentes, l'équation fondamentale de Schrödinger est :

$$\mathrm{i}\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\Psi(t)\rangle = \mathbf{H} |\Psi(t)\rangle \ \ ; \tag{7}$$

elle est bien du premier ordre en temps alors que, dans les cas les plus usuels, l'opérateur $\mathbf{H}$ implique des dérivées secondes spatiales, le terme cinétique étant du genre $\frac{\vec{\mathbf{p}}^{\,2}}{2m}$.

En réalité, la singularité du temps persiste dans les généralisations relativistes, l'une des toutes premières étant l'équation de Dirac, pourtant écrite sur des arguments faisant jouer exactement le même rôle aux coordonnées d'espace et au temps. La dérivation précise de cette équation n'est pas si simple, mais le point de départ est aisément compréhensible et mérite ici d'être précisé. Proclamant justement la nécessité de traiter espace et temps sur un pied d'égalité, Dirac postule que, dans l'équation fondamentale à construire, les deux types de grandeurs doivent figurer de la même façon ; par ailleurs, tenant absolument à conserver le caractère de premier ordre en temps – pour des raisons que l'on a envie de déclarer *métaphysiques* –, Dirac en vient à retenir un terme cinétique lui aussi du premier ordre vis-à-vis du moment conjugué. La forme concise de l'équation de Dirac est ainsi :

$$\mathrm{i}\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\Psi(t)\rangle = \mathbf{H}_{\mathrm{Dirac}} |\Psi(t)\rangle \ \ , \tag{8}$$

[28] Rappelons que l'un des premiers triomphes de la Mécanique quantique a été de montrer que l'atome est stable, possédant un état fondamental d'énergie *finie*.

[29] Tout comme, en analyse de Fourier classique, on interprète la relation $\tau \delta\omega \sim 1$ pour un signal de durée τ dont la transformée de Fourier a une largeur spectrale d'ordre $\delta\omega$.

où cette fois le Hamiltonien $\mathbf{H}_{\text{Dirac}}$ implique un terme cinétique de la forme $\vec{\boldsymbol{\alpha}}.\vec{\boldsymbol{p}}$, forme *linéaire* du moment conjugué conduisant par l'association $\vec{\boldsymbol{p}} \rightarrow -\mathrm{i}\hbar\vec{\nabla}$ à une équation différentielle du *premier* ordre par rapport aux variables d'espace. Cela étant, il apparaît immédiatement que la symétrie espace - temps requise par l'exigence relativiste est *brisée* au plan de la représentation puisque les variables "dynamiques" (position, vitesse) sont, comme chez Schrödinger et Heisenberg, associées à des opérateurs qui ne commutent pas alors que le temps reste une variable "classique", un simple paramètre scalaire. Cependant et fort heureusement, on peut montrer que malgré cette différence importante des rôles techniques joués par les variables d'espace et par le temps, l'équation de Dirac est conforme à l'invariance de Lorentz.

On sait que la théorie de Dirac ne fut qu'une étape vers l'élaboration de la Théorie quantique des champs qui aujourd'hui a atteint un stade de maturité remarquable permettant de décrire admirablement les phénomènes les plus fins et ce sur un très grand intervalle d'énergie embrassant la Chimie, la Physique de la matière condensée et celle des hautes énergies. Qu'il s'agisse des effets radiatifs visibles dans les spectres atomiques dont rend parfaitement compte l'Électrodynamique quantique, ou de la Physique des hautes énergies où la Chromodynamique est à l'œuvre, le formalisme procède dans la vision globale dont les principes ont été posés dans un tout autre contexte par Lagrange et Hamilton. Dans tous les cas, il s'agit de construire une action c'est-à-dire de définir un Lagrangien ramassant de façon compacte les symétries des particules en jeu et de leurs interactions. Il est ainsi remarquable de constater que la méthodologie fondée sur un principe variationnel impliquant l'action, inventée au XIX$^{\text{ème}}$ siècle, est encore celle qui prévaut de nos jours – qu'il s'agisse de décrire l'effet Lamb ou de comprendre l'existence du boson de Higgs. Non moins surprenant est de constater que, tout comme au temps des pionniers de la Physique moderne, le paramètre temps est l'objet de traitements différenciés : participation inédite aux changements de repère et non-universalité pour Einstein, et au contraire variable scalaire "à part" – épargnée par la quantification – pour Heisenberg et Schrödinger... et Dirac.

L'évolution quantique décrite par l'équation (7) (ou (8)) n'est pas la seule "évolution" possible, en raison du phénomène assez étrange, communément appelé *réduction du paquet d'ondes* ou *collapse de la fonction d'onde* – "phénomène" étant d'ailleurs un terme quelque peu inapproprié – dont l'affirmation est pourtant une nécessité absolue pour que la théorie garde sa cohérence interne. On sait qu'il s'agit de la modification instantanée[30] de l'état du système lors de la mesure d'une grandeur physique : juste *avant* la mesure, *toutes* les valeurs sont potentiellement observables mais juste *après*, une seule est évidemment réalisée. Reprenant l'image de Schrödinger qui compare la fonction d'onde à un *catalogue*, on peut dire que la mesure n'est rien d'autre que le fait d'ouvrir *au hasard* le catalogue... Géométriquement parlant, le *collapse* de la fonction d'onde équivaut à une projection de celle-ci sur une[31] direction donnée de l'espace de Hilbert.

Pour Schrödinger, ce phénomène relevait de la *magie* et, au fond, il ne l'acceptait pas pour cette raison. Son caractère énigmatique a justifié et justifie encore de vifs débats et, *in fine*, pose le problème des variables cachées[32] dont la négation expérimentale avérée peut se

[30] Ce qualificatif est à prendre au sens du physicien et signifie qu'il se produit sur un intervalle de temps dont la petitesse est en-deçà de toute échelle expérimentalement détectable. Si l'on préfère, on peut dire qu'il survient en un temps infiniment court, l'infini étant à accepter comme d'habitude en Physique. La Théorie de la décohérence vise à prouver justement que pour un objet macroscopique, les interférences quantiques ont une durée de vie "infiniment" courte – mais n'apporte toujours aucune réponse à la question de la sélection d'*une* valeur de l'observable mesurée, celle qui précisément est lue sur l'ampèremètre...

[31] En l'absence de dégénérescence.

[32] Les expériences d'Aspect ont très précisément prouvé qu'il ne peut exister des variables cachées *locales*. Quant aux non-locales...

résumer par une formule[33] apparemment triviale mais qui ne l'est pas, et de très loin : *une mesure non faite n'a pas de résultat.*

Quoi qu'il en soit, ce postulat admis, en résulte un autre phénomène appartenant au bestiaire des étrangetés quantiques : l'effet Zénon. En 1977, Misra et Sudarshan[34] ont prévu que la répétition ultra-rapide de mesures successives ralentissait l'évolution d'un système au point, à la limite, de la bloquer complètement. En effet, réduire le paquet d'ondes, c'est projeter le vecteur d'état sur un certain axe ; si on recommence tout de suite après, la projection devient un coup d'épée dans l'eau ! En quelque sorte, une séquence haute fréquence de mesures fige le mouvement naturel du système, d'où la référence au philosophe grec qui entendait démontrer l'impossibilité pour Achille de rattraper la tortue ou, en termes plus prosaïques et pour reprendre l'aphorisme de Peres[35], *"It is common knowledge that a watched kettle never boils"*. Aussi étrange qu'il soit, cet effet a été confirmé expérimentalement[36]...

Que devient le temps dans tout cela ? Il y a le temps *propre* du système dans la mesure (?) où on ne regarde pas celui-ci, et il y a le temps qui passe pour l'expérimentateur accélérant ses mesures répétées, mais qui semble pourtant s'arrêter pour le système si celui-ci est observé à une cadence ultra-rapide ! On a envie d'ailleurs, *mutatis mutandis*, de mettre ceci en parallèle avec le paradoxe des jumeaux – qui n'a rien de paradoxal[37] – et se révèle encore plus spectaculaire : une particule instable devient stable si on l'observe, une particule ne vieillit plus si on la regarde avec trop d'insistance ! C'est une "évolution sans évolution", avec cette question forcément sans réponse : mais alors, pour qui le temps continue-t-il à passer, s'il passe ?

Les étranges phénomènes qui viennent d'être brièvement décrits semblent montrer qu'il convient de réaliser que c'est sans doute la notion même d'*évolution* (temporelle) qu'il faut revoir, ou relativiser, quand on se place dans un cadre quantique, – c'est pourquoi il peut être utile de répéter que l'opérateur $U(t, t_0)$ introduit plus haut (figure 3) représente l'évolution *propre*, affranchie de toute contrainte. En effet, pour un système classique, l'évolution désigne la possibilité, au moins en principe, de suivre *continûment* le système, pas à pas pourrait-on dire et, en pratique, cela peut toujours être fait à des intervalles de temps aussi petits que le permet l'expérience. En ce qui la concerne, la Théorie quantique, elle, permet seulement (!) de prévoir parfaitement les probabilités de *transition* d'un état à un autre, ce qui autorise, ayant consigné les résultats d'une séquence de mesures, de retracer sur le papier une sorte de trajectoire représentant la promenade du système dans son espace de Hilbert *compte tenu* de la suite d'observations qui lui ont été imposées *et* de leurs résultats. Il ne s'agit évidemment pas de celle qu'aurait effectuée ce système s'il n'avait été l'objet d'une telle surveillance – nul ne peut le dire et d'ailleurs la répétition de celle-ci une fois encore, à partir du même état initial, permet de retracer une nouvelle trajectoire... qui n'a rien à voir avec la précédente, et ce même si le point d'arrivée, fortuitement ou en raison du protocole expérimental, est le même dans les deux cas ! On retrouve ici l'idée ramassée dans la formule de Peres citée plus haut (voir la note 33) : les grandeurs physiques n'ont pas de valeur en soi, seules existent les valeurs *révélées* par une mesure, et qui diffèrent d'une mesure à la suivante (mais alors, qu'est-ce donc que la *réalité physique* ? Vaste question...).

---

[33] Pour Asher Peres, *"Unperformed experiments have no result"*, Am. J. Phys. **46**, 745 (1978)

[34] Baidyanath Misra et Ennackal Chandy George Sudarshan, *"The Zeno's paradox in quantum theory"*, J. Math. Phys. **18**, 756 (1977)

[35] Asher Peres, *"Zeno paradox in quantum theory"*, Am. J. Phys. **48**, 931 (1980)

[36] Wayne M. Itano, Daniel J. Heinzen, John J. Bollinger et David J. Wineland, *"Quantum Zeno effect"*, Phys. Rev. A **41**, 2295 (1990)

[37] Sur la notion de paradoxe en Physique, voir le livre d'Étienne Klein *Conversations avec le Sphinx* (Albin Michel, 1991)

On n'est pas loin ici des mille et un chemins de Feynman et de son intégrale fonctionnelle : certes, la particule part de x_{i} à l'instant t_{i} et arrive à x_{f} à l'instant t_{f} mais entre ces deux points d'espace - temps, on peut lui faire emprunter (mais elle ne les *emprunte* pas) toutes les lignes imaginaires reliant ces deux extrémités – et c'est bien pourquoi il n'y a plus de trajectoire de position et vitesse déterminées puisque toutes sont possibles. Les chemins de Feynman et l'intégrale qu'ils permettent de définir sont sans doute la meilleure façon de se figurer le Principe d'indétermination de Heisenberg.

Noter enfin que la puissance prédictive de la Théorie quantique en ce qui concerne les probabilités de transition porte sur des prévisions *à un instant donné*, mettant une nouvelle fois en évidence le caractère singulier du paramètre temps qui semble décidément résulter des seules décision et volonté de qui observe.

Venons-en maintenant à l'épineux problème de la flèche du temps, qui n'a *a priori* aucune raison d'être résolu d'emblée par la finitude de la constante de Planck[38]. S'il faut parler de l'irréversibilité en général, la Théorie quantique offre un scénario tout trouvé : la réduction du paquet d'ondes, justement. Laissant de côté cette évolution spécifique, on doit encore se poser la question de savoir dans quelles circonstances un système quantique a une évolution *propre* exhibant ou non la flèche du temps entre deux états donnés. La réponse, pour le coup, est facile à donner : tout se tient dans la répartition des énergies possibles (le *spectre* de son Hamiltonien), et peut s'exprimer dans les termes classiques de l'analyse de Fourier puisque, suivant la formule de Planck $E=h\nu$, énergie et fréquence sont proportionnelles.

L'alternative réversible *vs* irréversible est tranchée par la nature de ce spectre, discret ou continu. S'il est discret, la dynamique est périodique, donc réversible, à la condition expresse que toutes les fréquences soient commensurables, le rapport de deux quelconques d'entre elles étant ainsi un nombre rationnel. Dès qu'il existe au contraire deux fréquences dont le rapport est irrationnel, la dynamique propre devient quasi-périodique : il en va ainsi pour un électron tournant le long d'un cycle benzénique. Dans les cas précédents, toute valeur moyenne d'observable est exprimable sous la forme d'une somme ou d'une *série* de termes oscillants, toutes deux ayant en commun d'être la superposition discrète de termes harmoniques. Plus important est le fait que cette valeur moyenne est une sorte de signal se perpétuant sans jamais s'éteindre, sans présenter le moindre amortissement, donc le plus infime symptôme d'irréversibilité.

Lorsque le spectre du Hamiltonien est continu, tout change radicalement. Techniquement parlant, ceci se voit d'emblée par le fait que les sommes qui étaient discrètes dans la situation précédente deviennent des intégrales, c'est-à-dire des sommes *continues*[39] : si une série du genre $\sum_{n\in\mathbb{Z}} \frac{\mathrm{e}^{\mathrm{i}nx}}{n^2+n_0^2}$ est, par construction, une fonction de x 2π-périodique[40], l'intégrale $\int_{\mathbb{R}} \frac{\mathrm{e}^{\mathrm{i}kx}}{k^2+k_0^2}\,\mathrm{d}k$ est égale à l'exponentielle réelle $\frac{\pi}{k_0}\,\mathrm{e}^{-k_0|x|}$, strictement décroissante pour $x>0$. L'exponentielle décroissante est l'archétype de la relaxation normale, parangon des régimes décrivant l'irréversibilité de la dynamique d'un système, quel qu'il soit. De façon ramassée, on peut donc admettre (et cela se démontre) que si δE est l'ordre de grandeur de l'écart entre deux niveaux d'énergie consécutifs, le temps $\frac{\hbar}{\delta E}$ donne une idée du temps de retour *à la* Poincaré.

[38]Encore que... Voir les remarques de Landau et Lifchitz à propos de la nature *quantique* de l'entropie, *Physique statistique*, p. 44 (Mir, Moscou, 1967).

[39]Le changement qualitatif résultant du passage du discret au continu – ou inversement – n'est pas une nouveauté : que l'on se souvienne de l'impérieuse nécessité ressentie par Planck devant la catastrophe ultraviolette !

[40]C'est la fonction égale à $\frac{\pi}{n_0 \sinh \pi n_0} \cosh[n_0(|x|-\pi)]$ si $|x|\leq\pi$ et 2π-périodisée sur $\mathbb{R}$.

Ainsi, poser la question de l'irréversibilité *en dehors de toute mesure effectuée sur le système* n'est rien d'autre que poser celle de savoir si le spectre du Hamiltonien est discret ou continu ; comme on va l'expliquer ci-dessous dans un cas précis, c'est là que s'opère la similitude avec la notion classique de limite thermodynamique, définie dans le cas élémentaire d'un gaz en disant que l'on fait simultanément tendre vers l'infini le nombre d'atomes (soit le nombre de degrés de liberté) et le volume du récipient de telle sorte que la densité du gaz reste constante. Il s'agit bien d'une limite au sens mathématique du terme, seule opération capable par une sommation *infinie* de faire éventuellement apparaître des singularités dans toute fonction de partition puisque celle-ci est une somme d'exponentielles, fonctions entières par excellence.

Pour la clarté et pour pouvoir être précis, considérons l'émission spontanée d'un atome, exemplaire au sens où elle est très représentative de bien d'autres phénomènes observés sur des échelles d'énergie fort différentes. On sait bien que tout atome porté d'une façon ou d'une autre à l'état excité finit par retomber au bout d'un certain temps[41] dans son état fondamental, et y reste naturellement : on n'a jamais vu un atome *spontanément* remonter dans l'état excité. Il n'y a pas plus irréversible...

Dans la description élémentaire, l'atome possède des états liés et quantifiés, et des états non-liés (dits *de diffusion*). Pour les transitions excité $\leftrightarrow$ fondamental, seuls comptent essentiellement les deux états liés correspondants, qui ont chacun une énergie parfaitement déterminée (c'est la quantification !). En conséquence, le spectre d'énergie pertinent est constitué de ces deux valeurs discrètes avec pour conséquence immédiate que la dynamique de l'atome est réversible : si l'atome est préparé dans une superposition de ces deux états, le vecteur d'état oscille indéfiniment ; s'il est préparé dans l'état excité, il y reste indéfiniment et l'émission spontanée... n'existe pas !

Alors comment rendre compte de ce phénomène ? La clé de l'énigme est de réaliser que le retour au fondamental s'effectue par émission d'un photon et que le photon est le grand absent des traitements élémentaires où seule la matière (l'atome) est l'objet de la quantification. Autrement dit, espérer comprendre et décrire l'émission spontanée passe par la quantification de la matière *et* du champ électromagnétique, entreprise qui est assez complexe. Pour la question posée (l'irréversibilité), il suffit de préciser ce qui suit, sans craindre les raccourcis schématiques ou imagés et alors la similitude avec la limite thermodynamique classique doit devenir patente.

La quantification du champ s'effectue par une *"Relecture quantique des équations de Maxwell"*[42] où l'on commence par dénombrer les modes du champ – en nettement plus ardu, c'est néanmoins la même procédure que pour une corde vibrante – en appliquant des conditions aux limites, lesquelles, comme toujours, engendrent spontanément une quantification des vecteurs d'onde $\vec{k}$ possibles, deux valeurs consécutives étant séparées d'ordre $\frac{2\pi}{L}$ où L est la taille du récipient où est enfermé le champ. Par la relation de dispersion du photon, $E = \hbar \|\vec{k}\| c$, les énergies du champ (à un photon) sont donc également quantifiées, et forment un spectre *discret.* Maintenant, dire que le photon peut être émis par l'atome, c'est dire qu'il peut le quitter et partir à l'infini sans espoir de retour[43] ; mais pour cela, il faut que la boîte

[41]Ce temps est essentiellement *aléatoire*, sa moyenne statistique étant par définition la durée de vie de l'état excité.

[42]Claude Cohen-Tannoudji, *Cours au Collège de France*, 1973-1974.

[43]Si un système est infiniment étendu (un cristal par exemple), le photon ne peut jamais s'en évader ; matière et rayonnement couplés possèdent des états propres appelés *polaritons.* Si la matière est de basse dimension (plan ou fil), chaque état matériel excité est couplé à un *continuum* de photons et a donc, comme l'atome dans un état excité, une durée de vie *finie.*

soit de taille infinie. Alors le spectre d'énergie devient continu, les séries se métamorphosent en intégrales et l'irréversibilité devient la règle, se manifestant ici par l'émission spontanée. Ainsi, tout comme pour la limite thermodynamique, c'est en agrandissant le système à l'infini d'une façon ou d'une autre que le temps de retour peut diverger pour traduire une véritable irréversibilité physique.

Ce scénario expliquant l'irréversibilité en Théorie quantique est universel : dès qu'un niveau discret est couplé à un *continuum* d'énergie, sa durée de vie est finie et d'ailleurs se concrétise dans les cas simples par l'illustre *Règle d'or de Fermi*. Cela étant acquis, la question peut être reformulée, exactement comme au XIX$^{\text{ème}}$: comment une telle irréversibilité peut-elle survenir alors que le formalisme est toujours fondé sur des équations (ici celle de Schrödinger ou ses avatars plus élaborés) qui sont, elles, invariantes par renversement du temps ? L'explication technique de la métamorphose d'une série en intégrale grâce à la densification des niveaux est incontestable mais on aimerait creuser ce qui à nouveau prend l'allure d'un paradoxe.

Pour mieux comprendre, il est nécessaire de préciser comment se présente le phénomène d'émission spontanée – pour s'en tenir à ce cas à l'exemplarité indiscutable. La question est en fait la suivante : sachant que l'atome a été porté à l'état excité à un certain instant (mettons $t = 0$), quelle est la probabilité $P(t)$, qu'il soit trouvé au fondamental à l'instant t ultérieur ? Dans cette interrogation, rien n'est dit sur l'évacuation d'énergie vers l'extérieur lors du retour au fondamental, en d'autres termes on ignore délibérément le photon émis suivant une direction qui est d'ailleurs aléatoire, fermant les yeux *de facto* sur certains éléments du système analysé en focalisant l'attention sur une partie de celui-ci. Ce faisant, on se retrouve finalement dans une situation analogue à celle considérée par Born (voir la note 17) où l'effacement délibéré de certains aspects "microscopiques" équivaut à une perte d'information accompagnant à nouveau l'irruption de l'irréversibilité. En tout état de cause, le calcul et l'expérience montrent que $P(t)$ décroît continûment, d'abord comme une exponentielle puis, aux grands temps, selon une loi-puissance, et représente la relaxation de l'atome vers l'état le plus stable, processus éminemment irréversible.

En tout domaine, l'irréversibilité évoque irrésistiblement quelque chose qui s'évanouit au fil du temps, une image qui s'altère, à l'instar de la mémoire quelle qu'en soit la nature. Dans cette optique, la Théorie quantique donne l'exemple de l'éternité immobile chère à Platon par le phénomène d'intrication qui engendre une interdépendance assez sidérante entre deux systèmes (deux particules par exemple) qui ont, même de façon éphémère et peu intense, partagé une existence commune grâce à leur interaction – lors d'une collision par exemple. Une fois les deux objets à nouveau séparés, ils forment encore une entité unique et chacun garde *ad vitam æternam* le souvenir du passage de l'autre dans sa vie[44]. Le temps passe mais cette mémoire, sans être figée au sens strict, se perpétue tant qu'aucun des deux systèmes n'est l'objet d'une mesure, et si celle-ci détruit la corrélation quantique des particules (c'est à nouveau la réduction du paquet d'ondes), elle révèle justement l'inaliénation intemporelle de la mémoire qu'elles avaient conservée en donnant à savoir, observant l'une, ce qu'il en est pour l'autre, où que se trouve cette dernière. On aura reconnu l'expérience de pensée formulée par Einstein, Podolski et Rosen en 1935, les autorisant à affirmer que la Théorie quantique n'est pas *complète*..., affirmation démentie par les expériences d'Aspect en 1982 et confirmant que deux *partiqules* intriquées ne connaissent pas l'amnésie.

[44]Voir la jolie comparaison d'Étienne Klein dans *Conversations avec le Sphinx*, à la fin du chapitre V (Albin Michel, Paris, 1991)

5 Le temps dans la Physique d'aujourd'hui : multiforme et versatile

Dans cette contribution, j'ai essayé de faire un tour d'horizon de la perception et du rôle du temps en Physique contemporaine, sans viser à l'exhaustivité mais au contraire en écartant délibérément des aspects appartenant à des domaines que je connais fort mal et où, pour cette raison, toute excursion de ma part aurait été aventureuse et prétentieuse. C'est ainsi que j'ai laissé de côté la Relativité générale et ce qui va avec, la Cosmologie, où les équations admettent des solutions à temps circulaire, représentant des univers où le temps s'écoule en boucle. S'il est légitime de se livrer à de telles explorations des constructions mathématiques établies et éprouvées, il me semble cependant que, pour rester dans le domaine de la Physique telle qu'on peut l'entendre et la concevoir à un instant donné (c'est-à-dire au *présent*), mieux vaut ne pas s'approcher trop près de l'horizon de Planck puisqu'il constitue une frontière au-delà de laquelle, aujourd'hui, la Physique est inachevée et où par conséquent le physicien devient aveugle, au sens strict. Une telle prudence me paraît d'autant plus requise quand il s'agit d'interroger la nature profonde des concepts, en l'occurrence d'analyser le rôle de l'acteur *temps*.

S'en tenant donc à l'analyse disjointe des mondes quantique et relativiste, on peut déjà observer à la fois la versatilité et les contradictions que les deux théories contemporaines exhibent au grand jour. Au temps de Newton, finalement, tout était très simple : on admettait qu'il existe une horloge maîtresse qui gouverne l'univers, rythmant partout et de la même façon la marche des phénomènes naturels et déclarant que la notion d'antériorité avait elle aussi un caractère absolu, indépendant de l'observateur, permettant d'invoquer le Principe de causalité pour déclarer notamment, en tout lieu et en toute heure, qu'un événement pouvait être la cause d'un certain effet.

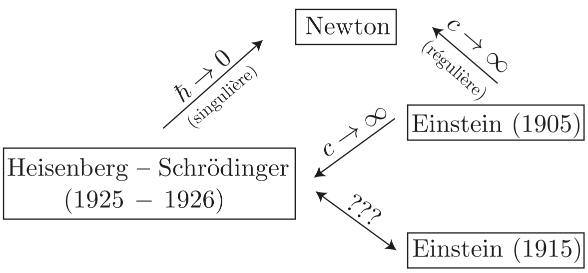

Figure 4: Le trio irréconciliable ?

La Relativité (restreinte) est venue bousculer la notion de temps absolu en montrant que la simultanéité est *relative* et qu'une horloge en mouvement semble ralentir aux yeux d'un observateur qui la voit passer. Si alors l'ordre chronologique de deux points *quelconques* de l'espace-temps peut même être inversé, il n'en reste pas moins que le cône de lumière définit deux régions bien distinctes, l'intérieur étant le monde observable (réel ?) fort heureusement soumis au Principe de causalité. Pour le reste, la conception du temps reste voisine de celle de Newton au sens où la notion de trajectoire existe encore et constitue la figuration géométrique de la vie d'une particule, indépendamment de son observation.

Pour un système quantique au sens de Heisenberg et Schrödinger, l'horloge du temps est plutôt une horloge *propre* à ce système, interne en quelque sorte, inscrite dans les équations dynamiques de la théorie, lesquelles ne tiennent précisément qu'en dehors de toute observation effective. Lors d'une mesure, l'évolution change radicalement de nature, comme si l'instant présent, déjà insaisissable, voulait se singulariser d'une tout autre façon : c'est là que se produit la réduction du paquet d'ondes venant, en quelque sorte, remettre le temps à zéro pour permettre au système de repartir vers une nouvelle vie, dont nul ne sait d'ailleurs à l'avance quel sera le point de départ (*spin up* ou *spin down* ? – on a presque envie de dire : *garçon* ou *fille* ???). De surcroît, dans les corrélations instantanées *à la* EPR permises par l'intrication[45], on retrouve l'idée de l'horloge maîtresse du monde chère à Newton, en contradiction avec Einstein – mais sans toutefois que la téléportation quantique viole la Relativité puisqu'elle n'est pas un transfert de quoi que ce soit.

Une autre distinction entre la Théorie quantique et les autres est l'impossibilité de se passer du temps – alors que l'équation d'Einstein de la Relativité générale... ne contient même pas le paramètre temps. Le caractère *émergent* du temps a été évoqué à plusieurs reprises et certains physiciens en viennent même à considérer que cette propriété est essentielle, la persistence à considérer le temps comme fondamental étant l'un des écueils sur lesquels bute l'intégration de la Relativité générale et la Théorie quantique dans une théorie globale. Pourtant, dans le cadre de cette dernière, le temps est un paramètre *fondamental* incontournable lors des mesures successives d'observables incompatibles : si $\mathbf{A}$ et $\mathbf{B}$ sont les opérateurs représentant les deux grandeurs physiques A et B, et si $[\mathbf{A}, \mathbf{B}] \neq \mathbf{0}$, les résultats de deux mesures successives dépendent de l'ordre, A avant B ou B avant A, étant entendu que l'on ne peut les mesurer simultanément puisque, justement, ces grandeurs sont incompatibles.

L'impossibilité de prévoir le résultat d'une mesure autorise aussi à se demander quel rapport existe entre l'instant juste avant cette mesure où tout est en devenir et non *réalisé*[46] et l'instant juste après où l'aiguille de l'ampèremètre s'est arrêtée devant une certain position bien définie. Peut-on assurément dire que ces deux instants *découlent* l'un de l'autre ? Cette question est d'autant plus sensée qu'il n'y a vraiment aucune relation entre ces deux instants (sauf sur le chronomètre de l'expérimentateur) : dans l'expérience de Stern et Gerlach, si l'on a trouvé l'atome d'argent en haut à midi, il ne faut surtout pas en déduire qu'une microseconde avant il était au voisinage de l'endroit où on l'a trouvé tout de suite après : le résultat acquis par une expérience n'autorise aucune rétroactivité invoquant implicitement une relation de cause à effet, ce qui évoque à nouveau une rupture entre le temps d'*avant* et celui d'*après*. Il semble bien y avoir ainsi deux types de temps : celui du système, son horloge maîtresse à lui, et celui de l'observateur dont l'action déclenche la réduction du paquet d'ondes, phénomène intrinsèquement et pour le moins irréversible : plus que la prétendue dualité onde - corpuscule, la théorie quantique est le domaine où s'exprime la dualité du temps.

La considération de ces deux sortes distinctes de temps permet de comprendre pourquoi la Théorie quantique des champs peut exister en tant que formalisme cohérent et pourquoi elle possède un pouvoir explicatif rarement égalé : nulle part dans le formalisme n'intervient explicitement le mécanisme de réduction du paquet d'ondes, le temps qui est à l'œuvre étant justement celui qui figure dans les équations dynamiques, essentiellement déterministes et satisfaisant les principes de la relativité einsteinienne.

[45] *"Cette action fantôme à distance"* selon Einstein.

[46] Il ne faut pas être tenté de rapprocher cette situation de la pièce jetée en l'air. Dans ce dernier cas, une caméra ultra-rapide permettrait de suivre continûment dans le temps l'*une* des deux faces lorsque la pièce virevolte en l'air avant de retomber ; de ce fait il y a alors indiscutablement un temps qui s'écoule sans à-coups. Dans le cas quantique, et tant que la "pièce" est en l'air, elle n'a ni pile, ni face – tout comme le chat de Schrödinger n'est ni vivant ni mort.

La notion de *champ* a été introduite par Maxwell vers 1850 afin d'unifier l'Électricité et le Magnétisme et, d'une façon générale, désigne un certain objet physique entièrement décrit par une(des) fonction(s) de l'espace et du temps et possédant tous les attributs usuels, notamment une énergie et une impulsion. Pendant longtemps, un champ a très souvent[47] représenté une interaction entre des systèmes (particules, objets astrophysiques,...) et, de ce fait, se doit d'inclure des effets de retard afin de respecter les prescriptions de la Relativité exigeant que rien ne se déplace plus vite que la lumière – c'est bien pourquoi la gravitation de Newton ne pouvait satisfaire Einstein, tout comme d'ailleurs sa propre théorie de 1905. Dans cette acception (qui se révèlera restrictive) un champ associé à une interaction ne peut être représenté que par des fonctions à valeurs *réelles* puisque qu'il définit *directement* la force s'exerçant sur une particule dotée de l'attribut adéquat (une masse, une charge électrique, un moment magnétique, etc.).

Une fois encore, la Théorie quantique a donné un coup de pied dans la fourmilière et a contraint à généraliser la notion de champ pour l'autoriser à décrire également des concepts physiques qui ne sont nullement les sources des interactions et sont de ce fait dégagés de l'obligation de retard. Une fois passée la stupeur de devoir considérer des fonctions d'onde à valeurs *complexes* – une grande première ! –, force a été de donner un sens physique à celles-ci. On sait que, finalement, il a été admis que le module carré du champ défini par la fonction d'onde est une certaine densité de probabilité, le champ lui-même étant la mesure d'un concept inédit et spécifique appelé *amplitude de probabilité*. Pire : une fois la théorie construite et mieux assimilée, à défaut d'être vraiment comprise[48], il est d'ailleurs sans doute préférable d'imaginer que ce champ est la seule et unique représentation des particules, comme l'affirme le titre d'un article récent de Hobson[49] tendant à montrer que la soi-disant dualité *onde - corpuscule* est un concept trompeur et dépassé, hérité d'une époque où la remise en cause radicale des dogmes rendait inévitable la tentation de se raccrocher à des images d'inspiration classique. En tout état de cause, le champ - fonction d'onde donne la probabilité pour tout l'espace à un instant donné, mettant en évidence une nouvelle dissymétrie temps - espace peu conforme à l'esprit de la Relativité d'Einstein.

Les contradictions et les incompatibilités de la notion de temps entre la Relativité (générale) et la Théorie quantique ne sont qu'un aspect des difficultés à laquelle se heurte la Physique d'aujourd'hui dans sa quête du Graal. Un jour viendra où l'espace ne sera peut-être ni plat ni courbe, où l'espace et le temps seront peut-être à leur tour discrétisés – comme semblait le penser Schrödinger à la fin de sa vie – et où, enfin, les deux plus glorieuses théories élaborées au début du 20$^{\text{ème}}$ siècle se fonderont dans un moule commun, constituant la *Théorie du tout*, la *Theory of Everything (TOE)* dont a si longtemps rêvé Einstein.

[47] On parle aussi du champ des déformations d'un système continu, en Élasticité, du champ des vitesses en Hydrodynamique *etc.* Noter qu'un champ possède une infinité non-dénombrable de degrés de liberté, toutes les valeurs des fonctions le représentant à un instant donné.

[48] Franck Laloë, *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?* (EDP Sciences, Paris, 2011).

[49] Art Hobson, *"There are no particles, there are only fields"*, Am. J. Phys., **81**, 211 (2013).